



NATIONAL UNIVERSITY OF MONGOLIA

SCHOOL OF ART AND SCIENCES

DEPARTMENT OF GEOGRAPHY

Geographical Issues

Газарзүйн асуудлууд

Volume 25 (01)

ISSN: 2312-8534

2025

Ulaanbaatar

Impact of extreme climate events on spring vegetation phenology of Mongolia

Muqier^{1,2}, Sainbuyan Bayarsaikhan^{1,2*}, Ma ZhenJiang¹, Battengel Vandansambuu^{1,2}, Byambakhuu Gantumur^{1,2}, Munkh-Erdene Jimseekhuu¹, Quansheng Hai^{1,3}, Batsaikhan Bayarsaikhan⁴

¹*Department of Geography, School of Art and Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 210646, Mongolia*

²*Research Laboratory of Geo-Informatics (GEO-iLAB), Graduate school, National University of Mongolia, 210646, Mongolia*

³*Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Teachers College, Baotou 014030, China*

⁴*College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China*

*Corresponding author: sainbuyan.b@num.edu.mn

Received: 2024.12.05

Revised: 2025.02.15

Accepted: 2025.02.22

Abstract

The increasing frequency of extreme climate events may significantly alter the species composition, structure, and functionality of ecosystems, thereby diminishing their stability and resilience. This study draws on temperature and precipitation data from 53 meteorological stations across Mongolia, covering the period from 1983 to 2016, along with MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) data from 2001 to 2016. The climate anomaly method and the curvature method of cumulative NDVI logistic curves were employed to identify years of extreme climate events and to extract the start of the growing season (SOS) in Mongolia. Furthermore, the study assessed the impact of extreme climate events on the SOS across different vegetation types and evaluated the sensitivity of the SOS to extreme climate indices. The study results show that, compared to the multi-year average green-up period from 2001 to 2016, extreme climate events significantly impact the SOS. Extreme dryness advanced the SOS by 6.9 days, extreme wetness by 2.5 days, and extreme warmth by 13.2 days, while extreme cold delayed the SOS by 1.2 days. During extreme drought event, the sensitivity of SOS to TN90p (warm nights) was the highest; in extremely wet years, the sensitivity of SOS to TX10p (cool days) was the strongest; in extreme warm event, SOS was most sensitive to TX90p (warm days); and during extreme cold events, SOS was most sensitive to TNx (maximum night temperature). Overall, the SOS was most sensitive to extreme temperature indices during extreme climate events, with a predominantly negative sensitivity. The response and sensitivity of SOS to extreme climate events varied across different vegetation types. This is crucial for understanding the dynamic changes of ecosystems and assessing potential ecological risks.

Keywords: Spring phenology; climate anomaly; extreme climate events; extreme climate indices; diverse vegetation types; sensitivity

Монгол орны ургамлын хаврын фенологид уур амьсгалын онцгой үзэгдлийн үзүүлэх нөлөө

©Мөчир¹, Баярсайхан Сайнбуян^{1,2,*}, Ма Жэн Жян¹, Вандансамбуу Батцэнгэл^{1,2}, Гантөмөр Бямбахуу^{1,2}, Жимсээхүү Мөнх-Эрдэнэ¹, Quansheng Hai^{1,3}, Баярсайхан Батсайхан⁴

¹Газарзүйн тэнхим, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, 210646, Монгол Улс

²Зайнаас тандан судлал, газарзүйн мэдээллийн системийн судалгааны лаборатори, Ахисан түвшний сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, 210646, Монгол Улс

³Өвөр Монголын Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Бугатын Багшийн дээд сургууль, Бугат, 014030, БНХАУ

⁴Газарзүйн Дээд сургууль, Өвөр Монголын Багшийн Их Сургууль, , Хөх хот 010022, БНХАУ

*Харилцагч зохиогч: sainbuyan.b@num.edu.mn

Хүлээн авсан: 2024.12.05

Засварласан: 2025.02.15

Зөвшөөрөгдсөн: 2025.02.22

Хураангуй

Уур амьсгалын онцгой үзэгдлийн давтамж нэмэгдэж байгаа нь экосистемийн бүтэц, функцийг өөрчилж, улмаар тогтвортой байдал, түүний нөхөн сэргэх чадамжийг бууруулдаг. Энэхүү судалгаагаар Монгол орны хэмжээнд 1983-2016 он хүртэлх цаг уурын 53 станцын температур, хур тунадасны мэдээлэл, 2001-2016 оны MODIS хиймэл дагуулын мэдээний ургамлын нормчлогдсон ялгаврын индекс (NDVI)-ийн мэдээлэлд тулгуурласан болно. Уур амьсгалын аномалийн арга (climate anomaly), хуримтлагдсан NDVI-ийн логистик муруй шугаман хазайлтын аргыг ашиглан уур амьсгалын онцгой үзэгдэл илэрсэн он жилүүдийг тодорхойлж, Монгол орны ургамал эхэлж ургах хугацаа (growing season-SOS)-г гаргаж авсан. Улмаар уур амьсгалын онцгой үзэгдлүүд байгалийн бүс, бүслүүрийн хувьд SOS-д үзүүлэх нөлөөллийг үнэлж, SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий (sensitivity) байдлыг үнэлэв. Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд 2001-2016 он хүртэлх олон жилийн дундаж SOS-тэй харьцуулахад цаг уурын онцгой үзэгдлүүд SOS-д ихээхэн нөлөөлдөг байна. Хэт хуурайшилт 6.9 хоногоор, хэт чийглэг 2.5 хоногоор, хэт халуун 13.2 хоногоор урагшилж, хэт хүйтний эрч 1.2 хоногоор хойшилсон байна. Хэт хуурайшилтын үед SOS-ийн TN90p (дулаан шөнө)-д мэдрэмтгий байдал хамгийн өндөр байсан; хэт чийглэг жилүүдэд SOS-ийн TX10p (сэрүүн өдрүүд)-д мэдрэмтгий байдал хамгийн хүчтэй байсан; хэт дулаан үед SOS нь TX90p (дулаан өдрүүд)-д хамгийн мэдрэмтгий байсан; мөн хэт хүйтэн үйл явдлын үед SOS нь TNx (шөнийн хамгийн их температур)-д хамгийн мэдрэмтгий байсан. Ерөнхийдөө SOS нь онцгой температурын индексүүдэд хамгийн мэдрэмтгий байсан ч гол төлөв мэдрэмтгий байдал сөрөг байв. Уур амьсгалын онцгой үзэгдэлд байгалийн бүс, бүслүүрийн хувьд SOS-ийн хариу үйлдэл, мэдрэмтгий байдал нь харилцан адилгүй байв. Энэ нь экосистемийн динамик өөрчлөлтийг ойлгох, экологийн болзошгүй эрсдлийг үнэлэхэд чухал юм.

Түлхүүр үгс: Хаврын фенологи; Уур амьсгалын аномаль; Уур амьсгалын онцгой үзэгдэл; онцгой уур амьсгалын индексүүд; мэдрэмтгий байдал

©Зохиогчийн оруулсан хувь нэмэр: Мөчир, Ма Жэн Жян: Онолын үндэслэл, аргазүй боловсруулалт, өгөгдөл боловсруулалт, В. Батцэнгэл, Г. Бямбахуу, Ж.Мөнх-Эрдэнэ: Онолын үндэслэл, үндсэн бичвэрийн үр дүнгийн хяналт, Б. Сайнбуян, Quansheng Hai, Б.Батсайхан: үндсэн бичвэр, өгөгдөл цуглуулалт, боловсруулалт Б. Сайнбуян:: Үр дүнгийн хяналт.

2312-8534/© 2025 Зохиогчийн бүх эрх хуулиар хамгаалагдсан.

Оршил

Дэлхийн дулаарлын нөхцөлд уур амьсгалын аномаль, уур амьсгалын онцгой үзэгдлүүд гарах магадлал нэмэгдэж байна (Masson-Delmotte et al., 2021). Уур амьсгалын онцгой үзэгдэл, чиг хандлага нь уур амьсгалын дундаж өөрчлөлттэй харьцуулахад уур амьсгалын өөрчлөлтөд илүү мэдрэмтгий байдгаараа илүү анхаарал татаж байна (Coumou & Rahmstorf, 2012; Easterling et al., 2000; Fernández-Giménez et al., 2012; Xie et al., 2015). Уур амьсгалын аномаль гэдэг нь тодорхой хугацааны уур амьсгалын дундаж утгын мэдэгдэхүйц хазайлтыг хэлдэг бөгөөд уур амьсгалын онцгой үзэгдлүүд нь уур амьсгалын хувьсагч нь тодорхой босго хэмжээнээс давж (эсвэл түүнээс доош), хувьсагчийн ажиглалтын хязгаарын дээд (эсвэл доод) хязгаарт ойртож буй нөхцөл байдлыг хэлнэ (Camuffo et al., 2020). Эдгээр нь магадлал багатай үйл явц боловч уур амьсгалын онцгой өөрчлөлтөд экосистемийн үйл ажиллагаа, бүтээмжид уур амьсгалын дундаж өөрчлөлтөөс илүү их нөлөө үзүүлдэг (Ciais et al., 2005; Easterling et al., 2000; Xu et al., 2019). Уур амьсгалын өөрчлөлтийн хяналт, цаг уурын онцгой үзэгдлийн үзүүлэлтүүдээр шинжээчийн багаас (ETCCDI) зөвлөмж болгож буй онцгой уур амьсгалын 27 үзүүлэлтийг уур амьсгалын эрс тэс өөрчлөлтийн судалгаанд өргөн ашиглаж байна (Dashkhuu et al., 2015; Mo et al., 2023). Уур амьсгалын эрс тэс өөрчлөлтийн талаар олон эрдэмтэд өргөн хүрээтэй судалгаа хийсэн байдаг (Chen et al., 2022; Y. Li et al., 2022; Liu et al., 2019; Ren et al., 2022; Ying et al., 2020). Liu нар. (2019) Монголын өндөрлөгт 1969-2017 онуудад хэт хүйтэн, ган гачиг болсныг судалж үзээд сүүлийн 49 жилд уур амьсгал дулаарсан ч Монголын бүс нутагт сэрүүн өдөр (TX10p), сэрүүн шөнийн (TN10p) давтамж нэмэгдсэн болохыг тогтоожээ (Liu et al., 2019). Kalita нар. (2023) Энэтхэгийн Черрапунжи бүс нутгийн 1979-2020 он хүртэлх хугацааны эрс тэс уур амьсгалын 21 индексийн мэдэгдэхүйц өөрчлөлтөд дүн шинжилгээ хийжээ. Тэдний судалгаагаар өдрийн хамгийн их температуртай уялдсан индексүүд мэдэгдэхүйц өссөн бол өдрийн хамгийн бага температуртай уялдсан индексүүд үндсэндээ өөрчлөгдөөгүй байгааг харуулж байна (Kalita et al., 2023). Тиймээс уур амьсгалын эрс тэс өөрчлөлтийн онцлог, чиг хандлагыг ойлгох нь уур амьсгалын өөрчлөлтөөс үүдэлтэй сорилт, нөлөөллийг илүү сайн шийдвэрлэхэд тусална (Miao et al., 2017; Pei et al., 2021; Ying et al., 2020).

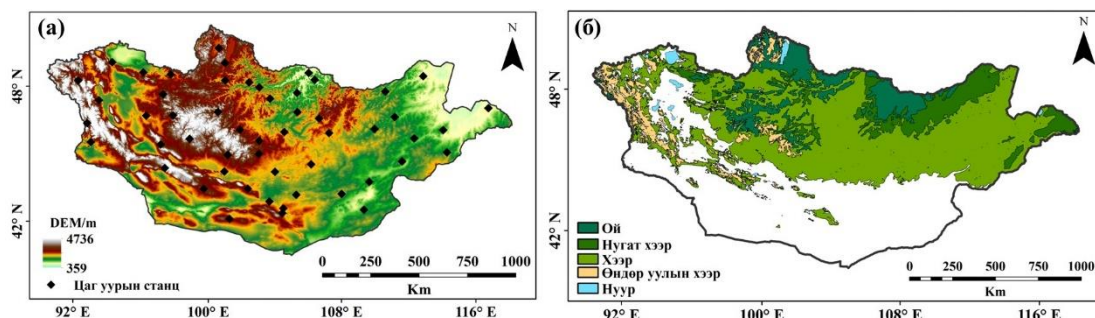
Ургамал ургаж эхлэх хугацаа буюу SOS (Start of Growing Season) нь ургамлын өсөлтийн үйл явц дахь фенологийн чухал үйл явц бөгөөд түүний өөрчлөлтөөр ургамлын идэвхжилтэд өөрчлөлт оруулж, улмаар экосистемийн нүүрстөрөгчийн эргэлтэд нөлөөлж байдаг (Fu et al., 2020). SOS нь уур амьсгалын өөрчлөлттэй нягт холбоотой байсан (Miao et al., 2017; Ren et al., 2017), харин уур амьсгалын онцгой үзэгдэл (ган гачиг, өндөр температур гэх мэт)-д SOS-ийн хариу арга хэмжээний хүрээ, чиглэл үндсэндээ тодорхойгүй хэвээр байна. Өмнөх судалгаанууд нь уур амьсгалын дундаж өөрчлөлтийн SOS-д үзүүлэх нөлөөллийг голчлон анхаарч ирсэн (Fu et al., 2015; Xinxin Li et al., 2021; Miao et al., 2017; Yuan et al., 2024). Уур амьсгалын эрс тэс өөрчлөлтийг уур амьсгалын дундаж өөрчлөлттэй харьцуулахад SOS-д илүү их нөлөө үзүүлдэг (He et al., 2018; Ma et al., 2015). Жишээлбэл, температурын эрс өөрчлөлт дэлхийн бөмбөрцгийн хойд хагас дахь SOS-д дундаж температурын өөрчлөлтөөс илүү өндөр нөлөө үзүүлдэг болохыг харуулсан (Piao et al., 2015). Гантай жилд SOS 9.7 хоногоор хойшилсон бол хур тунадас ихтэй жилд Австралийн зүүн өмнөд хэсэгт SOS 25.8 хоногоор урагшилж, дундаж уур амьсгалын нөлөөнөөс хол давсан гэж тодорхойлжээ (Ma et al., 2015). Уур амьсгалын онцгой үзэгдэлд SOS-ийн хариу нөлөөлөл нь маш нарийн төвөгтэй ч тухайн үйл явцын төрөл, ургамлын хэв шинжээс хамаарч өөр өөр байдаг (Javed et al., 2021; Ji et al., 2021; Mo et al., 2023; Yuan et al., 2020). Ji нар (2021) 1982-2015 оны GIMMS болон NDVI өгөгдлийг ашиглан Хойд Хятадын олон төрөл ургамлын улирлын өмнөх ганд SOS-ийн хариу үйлдэлд дүн шинжилгээ хийжээ. Судалгаагаар улирлын өмнөх ган гачиг нь SOS-ийг

хойшлуулахад хүргэдэг болохыг тогтоосон ч хамгийн их нөлөө нь бэлчээрийн SOS-д ажиглагдсан (Ji et al., 2021). Бага температурын онцгой үзэгдэл нь Хятадад сэрүүн бүсийн хаврын фенологийг голчлон хөдөлгөгч хүчин зүйл болж, холимог ойн SOS-д өдрийн дундаж хамгийн бага температур хамгийн их нөлөө үзүүлдэг бол хүйтэн жавартай өдрийн тоо нь бэлчээр, сийрэг ургамалтай нутагт илүү их нөлөө үзүүлдэг байна (Mo et al., 2023). Иймээс уур амьсгалын онцгой үзэгдэл, тэр дундаа уур амьсгалын өөрчлөлтөд илүү өртөмтгий бүс нутгуудад SOS-ийн хариу нөлөөг судлах нь нэн чухал юм.

Монгол орон нь Монголын өндөрлөгийн гол бүс нутгийн хувьд хуурай, хагас хуурай бүс нутагт оршдог бөгөөд дэлхийн уур амьсгалын өөрчлөлтөд хамгийн мэдрэмтгий бүс нутгийн нэг юм. Сүүлийн жилүүдэд дэлхийн дулаарлын нөлөөгөөр Монгол орны хэмжээнд цаг уурын онцгой үзэгдлийн давтамж, нөлөө тасралтгүй нэмэгдэж байна (Dashkhuu et al., 2015; John et al., 2013; Li et al., 2018). Өмнөх судалгаанаас үзэхэд 2000-2010 оны хооронд Монголын тэгш өндөрлөгт хүчтэй ган гачиг, хэт хүйтний өдрийн давтамж тогтмол нэмэгдэж байсан. 2001, 2009 онд хүчтэй ган гачиг болсон бол 2010 онд эрс хүйтний үзэгдэл болсон (John et al., 2013). Монголын өндөрлөгт SOS болон түүнийг хөдөлгөгч хүчин зүйлсийг олон эрдэмтэд судалсан байдаг (Bao et al., 2021; Luo et al., 2021; Mei et al., 2021; Rihan et al., 2022; Wang et al., 2023). 2001-2018 оны MODIS-ийн мэдээнд үндэслэн Монгол орны баруун хойд уулархаг нутаг дахь хаврын фенологийн өндрийн хамаарал, ургамлын ургалтад үзүүлэх нөлөөлөлд дүн шинжилгээ хийхэд SOS нь нам дор газарт, орон зайн цаг хугацааны хувьд эрт гарсан болохыг тооцжээ. SOS-ийн өөрчлөлтөд хаврын температур, өвлийн хур тунадас голлон нөлөөлсөн (Mei et al., 2021). 1982-2015 оны GIMMS NDVI өгөгдөл дээр үндэслэн Монголын өндөрлөгийн бэлчээрийн SOS-ийн улирлын өмнөх ганд мэдрэг байдал мэдэгдэхүйц буурсан болохыг тогтоожээ (Rihan et al., 2022). Гэсэн хэдий ч Монгол оронд хийсэн өмнөх судалгаанууд нь онцгой уур амьсгалын индекс дэх орон зай цаг, хугацааны өөрчлөлт, тэдгээрийн ургамлын бүрхэвчид үзүүлэх нөлөө голчлон анхаарч, онцгой үзэгдэл, SOS хоорондын хамааралд анхаарал дутуу хандуулсан байна (Li et al., 2018; Li et al., 2023; Ren et al., 2022). Мал аж ахуйн тогтвортой хөгжлийг хангах, бэлчээрийн нөөцийн менежментийг оновчтой болгохын тулд олон төрлийн ургамлын уур амьсгалын онцгой өөрчлөлтөд үзүүлэх хариу нөлөөллийг зөв тодорхойлж, онцгой уур амьсгалын индексэд мэдрэмтгий байдлыг цаашид илрүүлэх нь чухал юм. Дундаж температур эсвэл хур тунадасны нөлөөллийг судалдаг уламжлалт судалгаатай харьцуулахад энэхүү судалгаа нь байгалийн бүс бүслүүрийн хувьд SOS-ийн онцгой үзэгдэлд мэдрэмтгий байдлын нарийвчилсан дүн шинжилгээ хийх зорилгоор онцгой уур амьсгалын индексүүдийг ашигласан. Иймээс энэхүү судалгаанд эхлээд 2000-2016 оны хоорондох хэт хуурай, хэт дулаан, хэт хүйтэн, хэт чийглэг үзэгдлүүдийг тодорхойлохын тулд өдрийн хамгийн их, дундаж, хамгийн бага температур, мөн 1983-2016 оны хур тунадасны өдрийн мэдээг ашигласан. Дараа нь Монгол орны байгалийн бүс, бүслүүрийн хувьд SOS-ийн уур амьсгалын онцгой үзэгдэл хэрхэн нөлөөлж байгааг судалж, эцэст нь онцгой уур амьсгалын индексүүдэд байгалийн бүс, бүслүүрийн хувьд SOS-ийн мэдрэмтгий байдлыг тодорхойлсон.

Судалгааны талбай

Монгол орон Төв Азид оршдог, өмнөд талаараа Хятад, хойд талаараа ОХУ-тай (хойд өргөргийн 41°35' - 52° 09', зүүн уртрагийн 87° 44' - 119° 56') хиллэдэг, нийт газар нутгийн хэмжээ 1.564116 сая квадрат км (Bao et al., 2015), далайн түвшнөөс дунджаар 1580 м өргөгдсөн (Зураг 1). Эх газрын хуурай, хагас хуурай уур амьсгалтай (Bayarsaikhan et al., 2020). Жилийн дундаж температур -8 - 6 °C хооронд хэлбэлздэг бөгөөд жилийн дундаж хур тунадас харьцангуй бага ба ойролцоогоор 200-400 мм, хур тунадас 6-р сараас 8-р сар хүртэл зуны саруудад төвлөрдөг.



Зураг 1. Монгол орны цаг уурын станцуудын орон зайн тархалт (а), МО-ны байгалийн бүс, бүслүүр (б)

Судалгааны материал

Онцгой уур амьсгалын индекс: Судалгаанд ШУА-ийн Газарзүй, Геоэкологийн хүрээлэнгээс 1983-2016 он хүртэлх Монгол орны цаг уурын 53 станцын өдрийн хамгийн их, дундаж, хамгийн бага температур болон өдрийн хур тунадсны цаг уурын ажиглалтын мэдээг ашигласан. Мөн RClimDex загвараар анхдагч мэдээлэлд чанарын хяналтын шинжилгээ хийж, онцгой уур амьсгалын 10 индексийг тооцоолоход ашигласан. Эдгээр индексүүд нь онцгой температурын 8 индекс, хур тунадасны 2 индексийг багтаадаг. Нарийвчилсан мэдээллийг Хүснэгт 1-д үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Уур амьсгалын онцгой үзэгдлүүдийн индексийн тодорхойлолт

Индекс	Үзүүлэлтийн нэр	Тодорхойлолт	Нэгж
TN _n	Min Tmin	Сарын хамгийн бага TN утгууд	°C
TN _x	Max Tmin	Сарын хамгийн их TN утгууд	°C
TX _n	Min Tmax	Сарын хамгийн бага TX утгууд	°C
TX _x	Max Tmax	Сарын хамгийн их TX утгууд	°C
TX10p	Cool days	TX<10% өдрийн тоо /Сэрүүн өдөр/	d
TX90p	Warm days	TX<90% өдрийн тоо /Дулаан өдөр/	d
TN10p	Cool nights	TN<10% өдрийн тоо /Сэрүүн шөнө/	d
TN90p	Warm nights	TN<90% өдрийн тоо /Дулаан шөнө/	d
RX1day	Maximum one-day precipitation	1 хоногийн хамгийн их хур тунадас	mm
RX5day	Maximum five-day precipitation	5 хоногийн хамгийн их хур тунадас	mm

TN ба Tmin нь хамгийн бага температурыг илэрхийлдэг; TX ба Tmax нь хамгийн их температурыг илэрхийлнэ.

Монгол орны цаг уурын станцуудаас цуглуулсан мэдээнүүдийг жил, сар, өдрөөр болон хур тунадас, хамгийн их температур, хамгийн бага температураар нэгтгэн засварлаж, мөн зэргэлдээх станцуудын бүртгэлийг харьцуулж, зөвхөн үндэслэлтэй гэж үзсэн өгөгдлийг хадгалсан. Логикгүй эсвэл үндэслэлгүй гэж тодорхойлсон аливаа өгөгдлийг дутуу утга гэж тэмдэглэж, -99.9 гэсэн нэг төрлийн утгаар тэмдэглэв. Чанарын хяналтын үйл явц дууссаны дараа өгөгдлийг тооцоололд бэлтгэсэн тул үр дүнд нь Excel форматаар хадгалагдсан хэд хэдэн гаралтын файлууд бий болсон. Улирлын өмнөх температур, хур тунадасны SOS-д үзүүлэх нөлөөллийг харгалзан жилийн онцгой уур амьсгалын индексийг өмнөх оны 10-р сараас энэ оны 5-р сар хүртэлх мэдээг ашиглан тодорхойлсон. Дараа нь бүх станцын онцгой уур амьсгалын индексүүдийг Kriging-ний аргаар интерполяци хийж, NDVI өгөгдөлтэй ижил проекц, пикселийн хэмжээтэй растер зургийг боловсруулав.

NDVI өгөгдөл: Судалгааны талбайн 2001-2016 он хүртэлх хугацааны, 16 өдрийн давтамжтай, 1 км орон зайн нарийвчлалтай MOD13A2 NDVI (<https://search.earthdata.nasa.gov>) бүтээгдэхүүнийг

ашигласан. Анхны өгөгдөлд үүл, нарны өндрийн өнцөг, агаар мандлын нөхцөл зэрэг хүчин зүйлсийн нөлөөллийг багасгахын тулд гармоник цагийн цувралын шинжилгээний аргыг ашиглан жилд 23 NDVI өгөгдлийг жигд сэргээн засварлав (smooth and reconstruct). Түүнчлэн ургамлан бүрхэвч нэн бага талбайн судалгааны үр дүнд үзүүлэх нөлөөллийг бууруулах зорилгоор олон жилийн дундаж NDVI 0.08-аас бага талбайг ургамалгүй, сийрэг ургамалтай гэж тодорхойлон, судалгаанд хамруулаагүй.

Байгалийн бүс, бүслүүр: Монгол орны байгалийн бүс, бүслүүрийн зургийг Монгол улсын үндэсний атлас (2022)-аас авч ашигласан. Байгалийн бүс, бүслүүрийн зургийг сканердаж, геометрийн залруулга хийх, тоон хэлбэрт оруулах зэрэг үйл явцуудыг хийсэн. Үүний үр дүнд ой, нуга хээр, тал хээр, өндөр уулны хээр гэсэн дөрвөн ургамлын хэв шинжийг тодорхойлсон (Зураг 1б). Эдгээр ангиллыг ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS болон онцгой уур амьсгалын индексэд мэдрэмтгий байдалд дүн шинжилгээ хийхэд ашигласан.

Судалгааны аргазүй

Онцгой уур амьсгалын үзэгдлийн тодорхойлолт: Уур амьсгалын онцгой үзэгдэл гэж цаг уурын хувьсах хүчин зүйлс (температур, хур тунадас, салхины хурд гэх мэт) тодорхой бүс нутаг, цаг хугацааны хэвийн хэмжээнээс ихээхэн хазайлтаар тодорхойлогддог цаг агаарын үзэгдлийг хэлнэ (Menzel et al., 2011; Wang et al., 2018). Эдгээр үйл явцууд ихэвчлэн маш өндөр эрчимтэй байдаг ч байгаль орчин, нийгэм, эдийн засагт ихээхэн сөрөг нөлөө үзүүлдэг. Энэхүү судалгаагаар Монгол орны 2000-2016 онд тохиолдсон уур амьсгалын онцгой үзэгдлүүдийг судалж, хэт дулаан, их хур тунадастай, хэт хуурай, хэт хүйтэн үйл явцуудад судалгаагаа хандуулсан болно. Температур, хур тунадасны аномаль тооцоолол гаргахын өмнө улирлын өмнөх температур, улирлын өмнөх хур тунадасны SOS-д үзүүлэх нөлөөллийг харгалзан жилийн дундажийг гаргахын тулд өмнөх оны 9-р сарын 1-ээс тухайн оны 8-р сарын 31 хүртэлх температур, хур тунадасны мэдээллийг ашиглан, жилийн дундаж температурын нийт хур тунадсыг тооцоолж, эцэст нь олон жилийн дундаж температур, хур тунадасны хэмжээг гаргав. Томьёо (1)-ийг ашиглан судалгааны талбай дэх бүх цаг уурын суурин 53 станцын жилийн уур амьсгалын аномалийг тооцсон. Аномаль өөрчлөлт нь 75% ба 25%-аас хэтэрсэн тохиолдолд уур амьсгалын онцгой үзэгдэл гэж тодорхойлдог (He et al., 2018).

$$A_j = \frac{\sum x_{ij} - \bar{X}_i}{n} \quad (1)$$

Энд A_j нь j жилийн уур амьсгалын аномаль; X_{ij} нь j жилийн i станцын температур/хур тунадасыг илэрхийлнэ; $\bar{X}_i$ нь 1983-2016 он хүртэлх i станцын дундаж температур/хур тунадсыг тус тус илэрхийлнэ; n нь нийт станцын тоо юм. Температур, хур тунадасны жилийн аномаль өөрчлөлтийг үндэслэн (Хүснэгт 2)-д үзүүлсэн шалгуурыг ашиглан онцгой байдлыг тодорхойлно. (1) Хэт хуурай: температур нь дундажтай аль болох ойр, харин хур тунадас нь 25% аномалийн шугамаас доогуур байна. (2) Хэт чийглэг: температур дундажийн ойролцоо, харин хур тунадас 75%-аас давсан байна. (3) Хэт дулаахан: температур нь 75% аномаль жишиг шугамаас давж, хур тунадас дахин дундаж утгад ойртоно. (4) Хэт хүйтэн: температур 25% аномаль шугамаас доогуур, харин хур тунадас аль болох дундажтай ойролцоо байна.

Хүснэгт 2. Жилийн аномаль хугацааны цувааны 25 ба 75%-аас хэтэрсэн хэмжилтийн үзэгдэл

Онцгой уур амьсгалын үзэгдэл	Tmax	Tmean	Tmin	P
Хэт хуурай үзэгдэл	$A_j \rightarrow 0$	$A_j \rightarrow 0$	$A_j \rightarrow 0$	$A_j < 25\%$
Хэт дулаан үзэгдэл	$A_j > 75\%$	$A_j > 75\%$	$A_j > 75\%$	$A_j \rightarrow 0$
Хэт хүйтэн үзэгдэл	$A_j < 25\%$	$A_j < 25\%$	$A_j < 25\%$	$A_j \rightarrow 0$
Хэт чиглэг үзэгдэл	$A_j \rightarrow 0$	$A_j \rightarrow 0$	$A_j \rightarrow 0$	$A_j > 75\%$
Энгийн жил	$A_j \rightarrow 0$	$A_j \rightarrow 0$	$A_j \rightarrow 0$	$A_j \rightarrow 0$

T_{max} нь хамгийн их температур; T_{mean} нь дундаж температур; T_{min} нь хамгийн бага температур илэрхийлдэг; P нь хур тунадас; A_j нь j жилийн уур амьсгалын аномаль утгыг тус тус илэрхийлнэ.

SOS тооцоолох арга: NDVI өгөгдлийг хуримтлагдсан NDVI-д суурилсан логистик муруй шугаман хазайлтын аргыг ашиглан пикселийн хэмжээсээр SOS-ийг тодорхойлоход ашигласан (Hou et al., 2014). Хуримтлагдсан NDVI-д суурилсан логистик муруй шугаман хазайлтын арга нь жилийн хуримтлагдсан NDVI дээр суурилдаг. Энэ нь хуримтлагдсан NDVI-г логистик функцээр (2) тохируулах, Томьёо (3) ба (4)-нуудад нэгтгэн суурилсан логистик муруй шугаман хазайлтыг тооцоолох, хамгийн их хазайлттай харгалзах хугацааг SOS гэж тодорхойлно.

$$y(t) = \frac{c}{1 + e^{a+bt}} + d \quad (2)$$

Энд $y(t)$ нь julian day t -тай тохирох логистик функцэд суурилуулсан хуримтлагдсан NDVI утгыг илэрхийлнэ; d нь дэвсгэр NDVI; $c+d$ нь хамгийн их хуримтлагдсан NDVI утга; a ба b нь тохирох параметрууд юм. Логистик муруй шугамын хазайлтыг Томьёо (3) ба (4) ашиглан тооцоолно.

$$k = \frac{d\alpha}{ds} = \frac{b^2 cz(1-z)(1+z)^3}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^{1.5}} \quad (3)$$

$$z = e^{a+bt} \quad (4)$$

Энд k нь хуримтлагдсан NDVI логистик муруй шугаман хазайлтыг илэрхийлнэ; α нь нэгж тангенс векторын өнцгийг илэрхийлнэ; s муруйн дагуух нэгж урт; z нь параметр юм.

Статистик шинжилгээ

Суурь шугаман функц (Radial basis function, RBF): RBF мэдрэлийн сүлжээний загварын хувьсах ач *холбогдлыг* ашиглан ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS-д онцгой уур амьсгалын 10 индексийн нөлөөллийг эрэмбэлсэн. Энэхүү судалгаа нь RBF мэдрэлийн сүлжээг шинжилгээний хэрэглүүр болгон ашигладаг ч SOS-д нөлөөлдөг эрс тэс уур амьсгалын 10 индекс: TXn, TXx, TNn, TNx, TX10P, TX90P, TN10P, TN90P, RX1day болон RX5day-ийг RBF мэдрэлийн сүлжээний оролтын давхаргад оруулсан болно. SOS-ийг гаралтын давхарга болгон ашиглаж, ургамлын SOS-д нөлөөлж буй онцгой уур амьсгалын индексийн симуляци шинжилгээг хийж, SOS-д нөлөөлж буй онцгой уур амьсгалын индексүүдийн зэрэглэлийг гаргаж, ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий байдалд дүн шинжилгээ хийдэг.

SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий шинжилгээ: SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий байдлыг олон хүчин зүйлийн шугаман регрессийн аргаар шинжилсэн. SOS-ийг хамааралтай хувьсагчаар, онцгой уур амьсгалын индексийг бие даасан

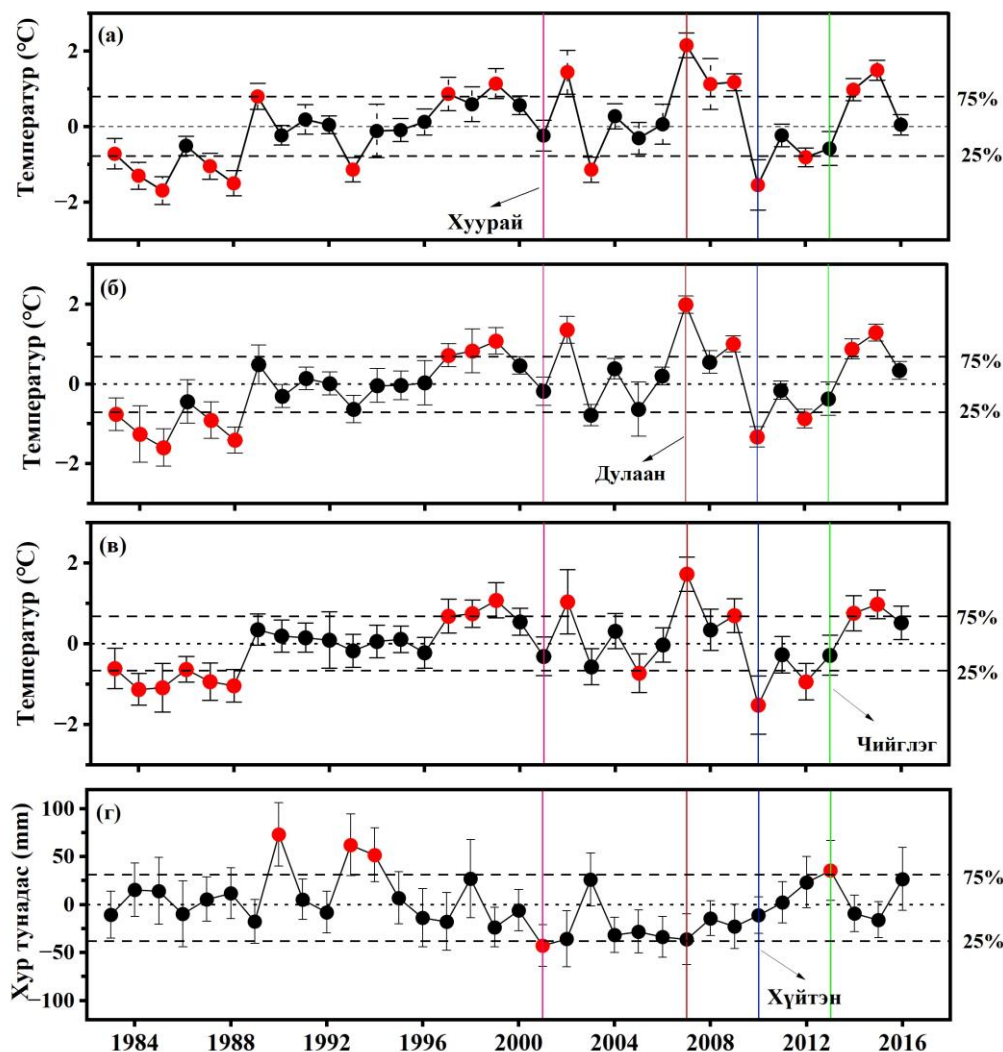
хувьсагчаар тохируулсан. Ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексэд мэдрэмтгий байдлыг олон хүчин зүйлийн шугаман регрессийн аргыг ашиглан пиксел бүр дээр тооцоолсон. Энэхүү шинжилгээнд регрессийн коэффициент (налуу) нь мэдрэмтгий байдлын түвшинг илэрхийлдэг.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \mu \quad (5)$$

Энд β_0 нь тогтмол тоо, μ нь санамсаргүй алдаа, Y нь 2001, 2007, 2010, 2013 онуудын SOS өгөгдөл; $X_1, X_2, \dots, X_k$ нь 2001, 2007, 2010, 2013 онуудад илүү чухал ач холбогдолтой онцгой уур амьсгалын индексүүд; ба $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ нь олон хүчин зүйлийн шугаман регрессийн коэффициентыг илэрхийлэх нь SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий байдлын шинж чанарыг тус тус илэрхийлдэг.

Судалгааны үр дүн

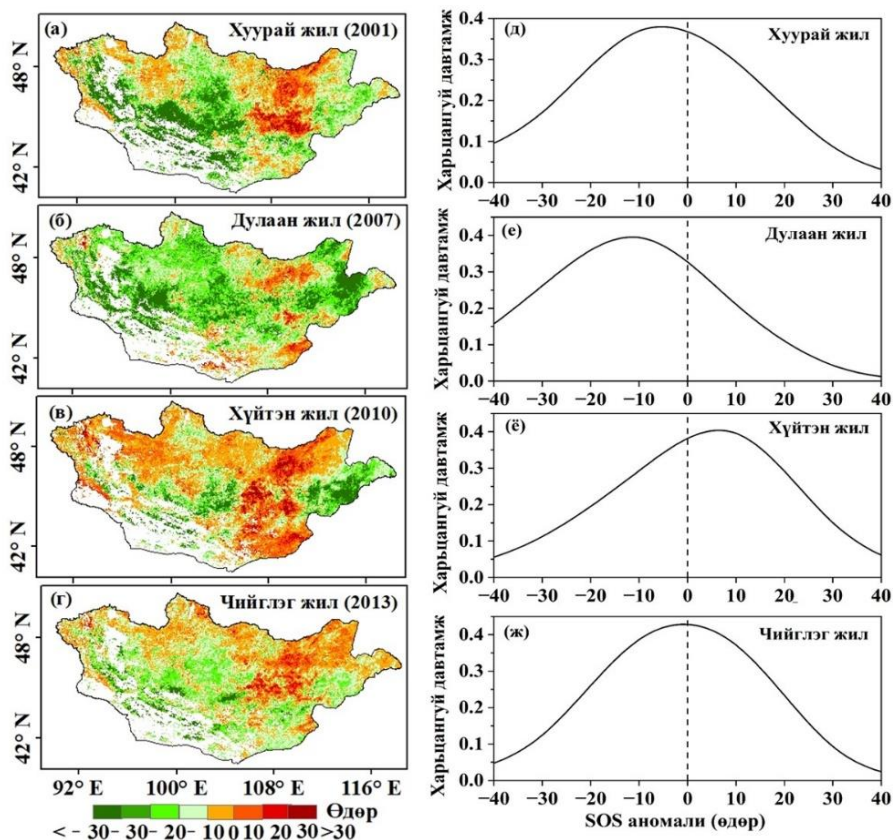
Монгол орны уур амьсгалын онцгой үзэгдэл: 1983-2016 оны цаг уурын мэдээллээс харахад температур, хур тунадасны аномаль өөрчлөлтийг Зураг 2-т үзүүлэв. Судалгааны бүс дэх хамгийн их, дундаж, хамгийн бага температур арван жил тутамд 0.39°C , 0.37°C ба 0.27°C -аар нэмэгдсэн (Зураг 2а, б, в) ба Монгол орны хэмжээнд мэдэгдэхүйц дулаарлын хандлагыг харуулж байна ($P < 0.05$). Тэдгээрийн дотроос хамгийн их температурын өсөлтийн хурд хамгийн бага температураас 1.4 дахин их байв. Жилийн хур тунадасны аномаль муруй (Зураг 2г) нь Монгол орны жилийн хур тунадас 1983-2016 онуудад 10 жилд 5.95 мм-ээр буурсан боловч энэ буурах хандлага мэдэгдэхүйц биш байсан ($P = 0.12$), харин 2004-2010 оны хооронд жилийн хур тунадас олон жилийн дунджаас бага байсан. Сүүлийн хэдэн арван жилийн хугацаанд температур эрс нэмэгдэж, өндөр температурын үзэгдлийн давтамж нэмэгдэж, хүйтний давтамж буурч байна. Ялангуяа 2000 оноос хойш мэдэгдэхүйц дулааралт давамгайлж байна. 1983-1999 оны хооронд хүйтний үзэгдэл 1983, 1984, 1985, 1987, 1988 онуудад голчлон тохиолдож байсан бол өндөр температурын үзэгдэл 1997, 1998 онд хоёрхон удаа тохиолдсон боловч 2000 оноос хойш өндөр температурын үзэгдлийн давтамж эрс нэмэгдсэн, 2002, 2007, 2009, 2014, 2015 онуудад таван удаа тохиолдсон. Монгол орны уур амьсгалын өөрчлөлтийн эдгээр шинж чанарт үндэслэн 2001 онд хэт хуурай, 2007 онд хэт дулаан, 2010 онд хэт хүйтэн, 2013 онд хэт чийглэг байв.



Зураг 2. Монгол орны 1983-2016 оны цаг уурын дундаж аномалиудыг (а) хамгийн их температур, (б) дундаж температур, (в) хамгийн бага температур, (г) хур тунадасны графикаар харуулав. Ягаан, улаан, хөх, ногоон шугамууд нь хэт хуурай, дулаан, хүйтэн, чийглэг жилүүдийг харуулав.

Уур амьсгалын онцгой үзэгдэлд хаврын фенологийн хариу нөлөө: SOS аномаль нь SOS-ийн урт хугацааны дунджаас хазайсан хазайлт юм. Өөрөөр хэлбэл, аномаль утга нь тухайн жилийн SOS болон олон жилийн дундаж SOS-ийн зөрүүг илэрхийлдэг. Эерэг аномаль нь SOS удааширч байгааг илтгэнэ (өөрөөр хэлбэл, ургамлын өсөлт дунджаас хожуу эхэлдэг), харин сөрөг аномаль нь дэвшилтэт SOS (Жишээ нь: ургамлын өсөлт олон жилийн дунджаас эрт эхэлдэг) байгааг илтгэнэ. Зураг 3а-г нь 2001-2016 оны хамгийн эрс тэс дөрвөн жилийн (2001, 2007, 2010, 2013) урт хугацааны дундажтай харьцуулахад SOS аномалиудын орон зайн тархалтын хэв маягийг харуулж байна. 2001 хэт хуурай онд Монгол орны хэмжээнд нийт пикселийн 62.8% -ийн SOS голчлон Хангай нурууны хэсэгт эрт эхэлсэн, Хэнтийн нурууны зүүн хэсгээр SOS орой үүссэн байна (Зураг 3а-д). Зураг 3б,с-ээс харахад 2007 хэт халуун онд Хангайн нурууны баруун хэсэг болон Дорнод аймгийн зүүн хэсгээр буюу судалгааны талбайн 79.0%-д SOS эрт эхэлсэн байна. Эсрэгээрээ, хэт

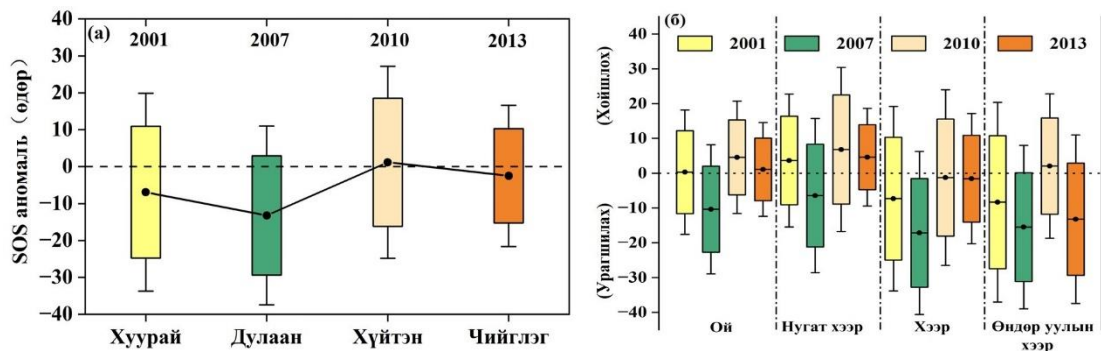
хүйтэн 2010 онд судалгааны талбайн 57.9% -д SOS орой үүссэн байж, гол нь Хэнтийн нурууны зүүн тал болон Дорноговь аймагт тархсан байна (Зураг 3в ба ё). Өндөр хур тунадастай 2013 онд SOS-ийн эрт эхэлсэн хэсгүүд нь орой үүссэн хэсгүүдтэй бараг тэнцүү ойролцоо байсан бөгөөд нийт пикселийн 53.1% ба 43.1% -ийг тус тус эзэлж байна. Судалгааны талбайн баруун өмнөд хэсэг, Хангай нурууны өмнөд хэсгээр эрт эхэлсэн байхад орой үүссэн хэсгүүдэд нь Хэнтийн нурууны зүүн талыг хамааруулан тархсан байна (Зураг 3г ба ж).



Зураг 3. Онцгой уур амьсгалын үзэгдлүүдийн SOS аномалийн орон зайн тархалт (а-г). Онцгой уур амьсгалын үзэгдлүүдийн SOS аномалийн харьцангуй давтамжийг (д-ж)-д харуулав.

Монгол орны судалгааны нийт нутаг дэвсгэр болон байгалийн бүс, бүслүүрийн дундаж SOS аномаль өөрчлөлтүүдийг онцгой уур амьсгалын үзэгдлүүдтэй харуулжээ. Зураг 4а-д үзүүлснээр хэт хуурай жилд Монгол орны судалгааны нийт нутаг дэвсгэрт 2001-2016 оны 17 жилийн дундажтай харьцуулахад SOS дунджаар 6.9 хоногоор урагшилсан байна ($\Delta\text{SOS} = -6.9$ хоног). Харин өндөр хур тунадастай жилд SOS дунджаар 1.2 хоногоор урагшилсан байна ($\Delta\text{SOS} = -1.2$ хоног). Хэт дулаан жилд SOS нь дунджаар 13.2 хоногоор урагшилсан бол ($\Delta\text{SOS} = -13.2$ хоног), хүйтэн жилд дунджаар 1.2 хоногоор хойшилсон байна ($\Delta\text{SOS} = 1.2$ хоног). Байгалийн бүс, бүслүүрийн хувьд SOS нь онцгой уур амьсгалын үзэгдлүүдэд өөр өөрийн хариу үйлдэл үзүүлдэг (Зураг 4б). Ойн бүсийн SOS-ийн хувьд хэт их хуурай болон чийглэг хамгийн бага хариу үзүүлсэн ч өөрчлөлт нь зөвхөн 0.3 болон 1.1 хоногууд байсан ($\Delta\text{SOS} = 0.3$ хоног, $\Delta\text{SOS} = 1.1$ хоног).

Өндөр уулын хээрийн бүсийн SOS нь хэт хуурай, дулаан нөхцөлд хамгийн их өөрчлөгдөж, 8.3, 15.5 хоногоор тус тус урагшилсан байна (Δ SOS = -8.3 хоног, Δ SOS = -15.5 хоног). Хэт дулаан нөхцөлд тал хээрийн бүсийн SOS-д хамгийн их өөрчлөлт үзүүлж, 17.2 хоногоор урагшилсан байна (Δ SOS = -17.2 хоног). Гэвч хэт хүйтэн нөхцөлд нугат хээрийн SOS хамгийн их өртөж, SOS-ийн хувьд 6.8 хоногоор хойшлогдсон байна (Δ SOS = 6.8 хоног). Ерөнхийдөө, SOS-ийн хэт дулаан нөхцөлд үзүүлэх хариу үйлдэл нь бусад онцгой үзэгдлүүдтэй харьцуулахад илүү илэрхий байв.



Зураг 4. (а) Монгол орны судалгааны нийт нутаг дэвсгэрийн дундаж SOS аномаль өөрчлөлт (хар цэгээр тэмдэглэсэн). (б) Эрс тэс уур амьсгалын үзэгдлүүдийн үеийн дөрвөн ургамлын хэв шинжээр бүсийн SOS аномаль харьцуулалт

Байгалийн бүс бүслүүрийн ургамлын фенологид онцгой уур амьсгалын индексийн ач холбогдол:

RBF загварыг ашиглан Монгол орны эрс тэс уур амьсгалын үзэгдлүүд дэх үеийн 10 төрлийн онцгой уур амьсгалын индексүүдийн (Хүснэгт 1) байгалийн бүс, бүслүүрийн SOS-д үзүүлэх нөлөөллийг үнэлэв. Өндөр утгууд нь тухайн хувьсагчийн ач холбогдол илүү гэдгийг илтгэнэ. Зураг 5-д ой, нуга хээр, тал хээр, өндөр уулын хээр болон нийт нутаг дэвсгэрийн SOS-д эдгээр индексүүдийн үзүүлэх нөлөөллийг харуулсан байна.

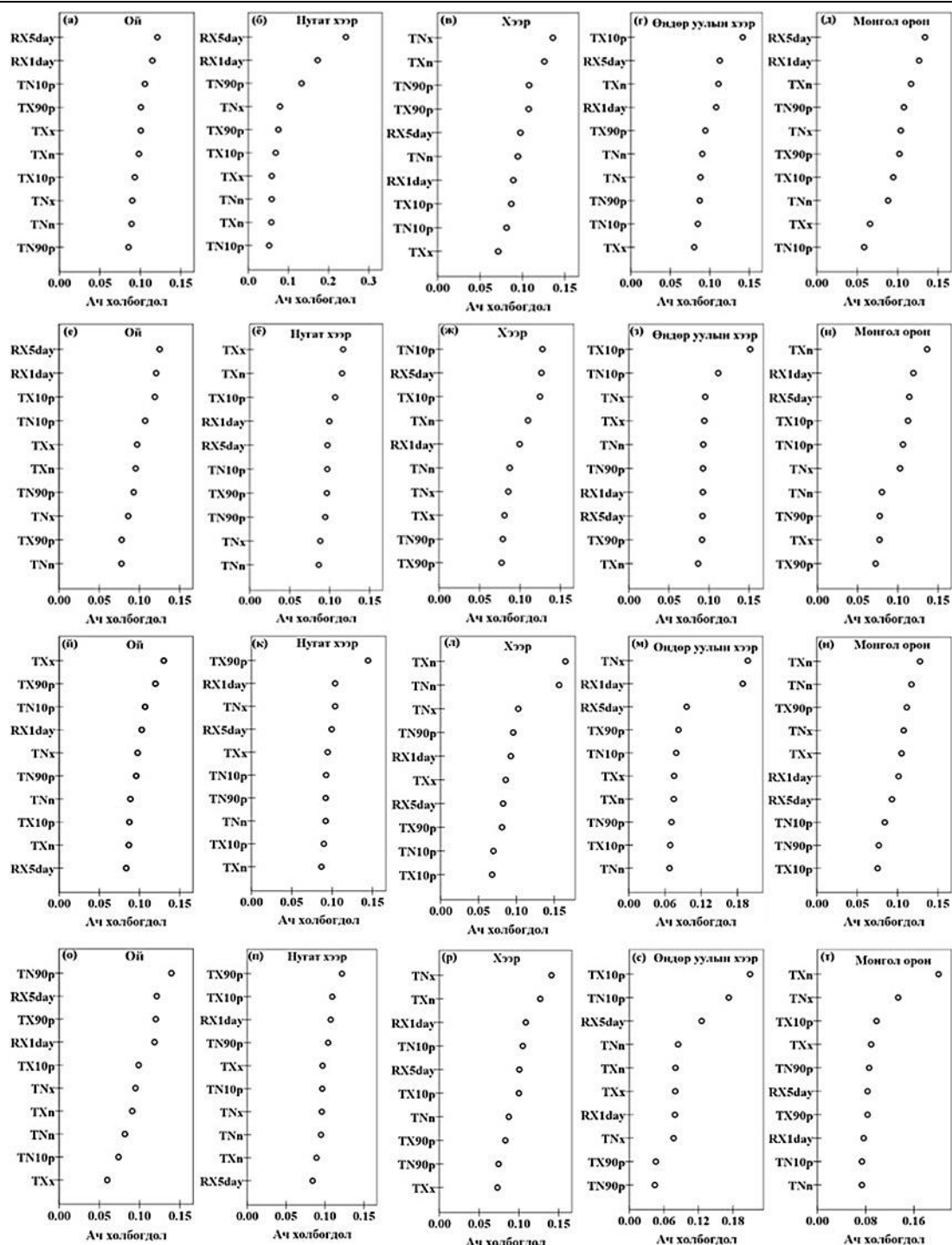
Байгалийн бүс, бүслүүрийн SOS-д үзүүлэх онцгой уур амьсгалын индексүүдийн ач холбогдлыг Зураг-5-т үзүүлэв. Хэт хуурай жилүүдэд ойт хээрийн SOS нь RX5day, RX1day, TN10p, TX90p индексүүдээс голчлон хамаардаг. Нугат хээрийн SOS-ийн хувь RX5day, RX1day, TN90p, TNx индексүүдэд нөлөөлдөг. тал хээрийн SOS-д температурын индексүүд, ялангуяа TNx, TXn, TN90p, TX90p индексүүд хамгийн их нөлөө үзүүлдэг. Өндөр уулын хээрийн SOS-ийн хувьд голчлон TX10p, RX5day, TXn, RX1day индексүүдээс хамаардаг бол нийт бүс нутгийн SOS нь RX5day, RX1day, TXn, TN90p индексүүдээс ихээхэн хамааралтай байна.

Хэт дулаан жилүүдэд (Зураг 5f-j-д үзүүлсэн) ойн SOS-д RX5day, RX1day, TX10p, TN10p индексүүдээс хамаардаг. Нуга хээрийн SOS нь TXx, TXn, TX10p, RX1day индексүүдээс ихээхэн хамааралтай байдаг бол тал хээрийн SOS нь TN10p, RX5day, TX10p, TXn индексүүдээр голлон нөлөөлдөг. Өндөр уулын хээрийн SOS нь TX10p, TN10p, TNx, TXx индексүүдийн нөлөөнд байдаг. Нийт бүс нутгийн SOS нь TXn, RX1day, RX5day, TX10p индексүүдээс хамгийн их хамааралтай.

Зураг 5(й-н)-д үзүүлсэн хэт хүйтэн жилийн хувьд ойн SOS-д TXx, TX90p, TN10p, RX1day индексүүд голчлон нөлөөлдөг. Нугат хээрийн SOS-д TX90p, RX1day, TNx, TN90p индексүүд нөлөөлдөг. Тал хээрийн SOS-д TXn, TNn, TNx, TN90p индексүүд голлон нөлөөлдөг бол өндөр уулын хээрийн SOS-д TNx, RX1day, RX5day, TX90p индексүүд нөлөөлдөг. Нийт бүс нутгийн SOS-д TXn, TNn, TX90p, TNx индексүүд голчлон нөлөөлдөг бөгөөд хэт өндөр температурын индексүүд бүх бүс нутагт чухал нөлөө үзүүлдэг.

Зураг 5 (п-т)-д үзүүлсэн хэт чийглэг жилийн хувьд ойн SOS-д TN90p, RX5day, TX90p, RX1day индексүүд голчлон нөлөөлдөг. Нугат хээрийн SOS-д TX90p, TX10p, RX1day, TN90p индексүүд голчлон нөлөөлдөг. Тал хээрийн ердийн SOS-д TNx, TXn, RX1day, TN10p индексүүд хамгийн их нөлөөлдөг. Уулын хээрийн SOS нь TX10p, TN10p, RX5day, TNn индексүүдээр тодорхойлогддог. Ерөнхийдөө нийт бүс нутгийн SOS-д TXn, TNx, TX10p, TXx индексүүд голчлон нөлөөлдөг бөгөөд хэт өндөр температурын индексүүд бүс нутагт мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлдэг.

Бүх судалгааны талбай болон байгалийн бүс, бүслүүрийн SOS-д 10 онцгой уур амьсгалын индексийн үзүүлж буй нөлөөллөөс, 4 гол индексийг сонгон авч, SOS-ийн хувьд тухайн онцгой уур амьсгалын индексүүд хэр мэдрэмтгий болохыг судалсан.

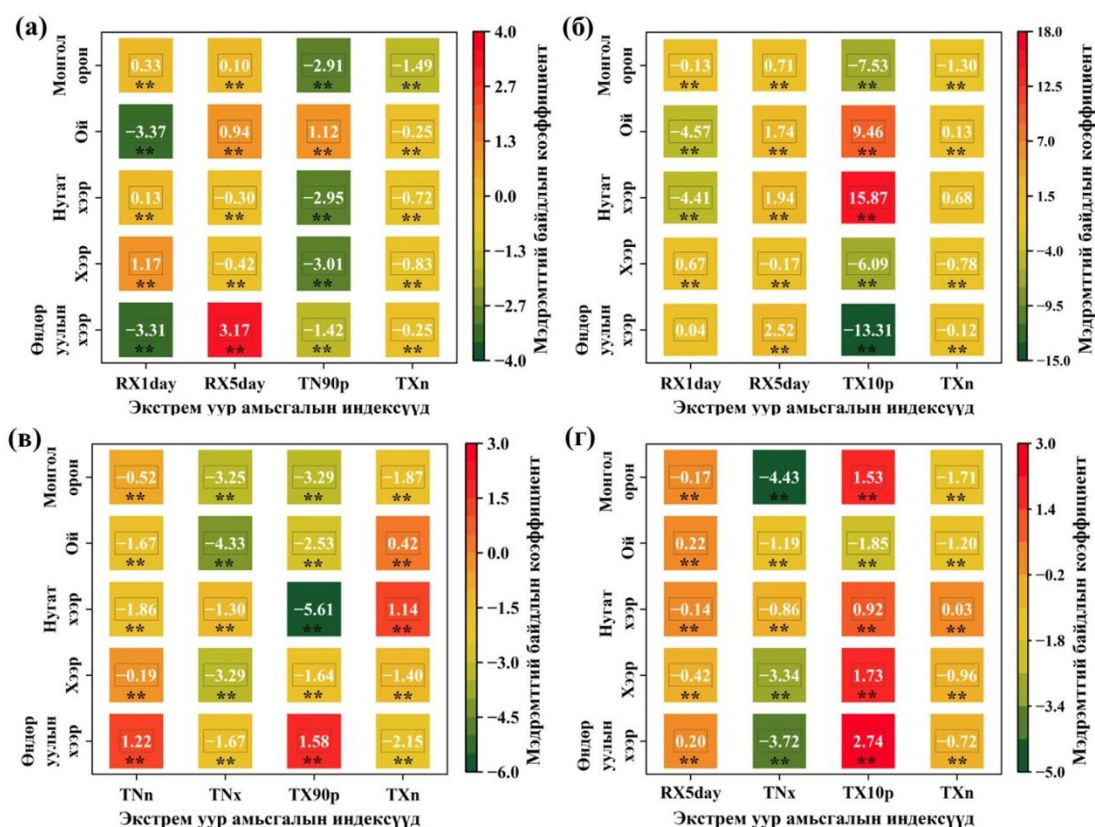


Зураг 5. Онцгой уур амьсгалтай жилүүдийн өөр өөр ургамлын хэв шинжийн бүсийн хаврын фенологид онцгой уур амьсгалын 10 индексийн ач холбогдол: (a-e) Хэт хуурай; (f-j) Хэт дулаан; (k-o) Хэт хүйтэн; (p-t) Хэт чийглэг жил

Байгалийн бүс бүслүүрийн ургамлын фенологийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий байдал: Дөрвөн эрс тэс уур амьсгалын үзэгдлийн хүрээнд бүх судалгааны талбай болон Байгалийн бүс, бүслүүрийн SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий байдлын харьцуулсан шинжилгээ хийх нь индексүүдэд SOS хэрхэн хариу үйлдэл үзүүлэх тухай ойлголтыг гүнзгийрүүлэхэд тусална. SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индексүүдэд мэдрэмтгий байдал нь улирлын өмнөх хур тунадас, улирлын өмнөх температурт үзүүлэх хариу үйлдлийг илүү харуулж байна. Энэхүү шинжилгээгээр экосистемийн тогтвортой байдалд чухал нөлөө үзүүлнэ.

Зураг ба-д үзүүлснээр хэт хуурайшилтын нөхцөлд бүх Монгол орны нугат хээр, тал хээрийн SOS нь TN90p индекс тухайн хүчтэй мэдрэгддэг бөгөөд мэдрэг байдлын коэффициентүүд нь -2.91, -2.95, -3.01 тус тус байна. Эдгээр мэдэгдэхүйц сөрөг мэдрэмтгий байдал нь эдгээр бүс нутгийн SOS нь хур тунадаснаас илүү температурт мэдрэмтгий болохыг харуулж байна. Дулаан шөнийн тоо нэмэгдэж байгаа нь эдгээр газруудад SOS эрт эхлэхэд хүргэдэг. Харин эсрэгээрээ, ой, өндөр уулын хээрийн SOS нь RX1day индекс тухайн их мэдрэмтгий байдлыг харуулж байгаа бөгөөд мэдрэмтгий байдлын коэффициент нь -3.37 болон -3.31 байна. Энэхүү мэдэгдэхүйц сөрөг мэдрэмтгий байдал нь ой, өндөр уулын хээрийн SOS нь температураас илүү хур тунадсанд мэдрэмтгий болохыг харуулж байна. Нэг өдрийн хур тунадасны өсөлтөөр эдгээр экосистемд SOS-ийг урагшлуулсан. Зураг 6b -д үзүүлснээр хэт дулааны жилд бүх судалгааны талбайн SOS нь TX10p-д хамгийн хүчтэй сөрөг мэдрэмтгий байх ч мэдрэмтгий байдлын коэффициент -7.54 байгаа нь сэрүүн өдрүүдийн өсөлтөөр SOS эрт эхлэхэд хүргэдэг болохыг харуулж байна. Тэдгээрийн дотроос нугат хээрийн SOS нь TX10p-д хамгийн мэдрэмтгий буюу 15.87 мэдрэмтгий байдлын коэффициенттэй, харин тал хээрийн SOS нь хамгийн сул мэдрэгчтэй буюу -6.09 коэффициенттэй байна. Ой, нугат хээрийн SOS нь TX10p-тай эерэг хамааралтай бол тал хээр, өндөр уулын хээрийн хувьд сөрөг хамааралтай байна.

Хэт хүйтэн жилийн туршид судалгааны талбай, байгалийн бүс, бүслүүрийн SOS-д хэт өндөр температурын индексүүд хамгийн ихээр нөлөөлдөг (Зураг 6c). Ой, тал хээрийн SOS нь TNx-д өндөр хариу үйлдэл үзүүлдэг бөгөөд мэдрэмтгий байдлын коэффициентүүд нь -4.33 ба -3.29 бөгөөд энэ нь мэдэгдэхүйц мэдрэмтгий байдал сөрөг байдаг. Энэ нь TNx-ийн өсөлт нь ой, тал хээрийн хувьд эрт SOS-д хүргэдэг гэсэн үг юм. Судалгааны бүх талбай болон нугат хээрийн SOS нь TX90p-д хамгийн мэдрэмтгий ба мэдрэмтгий байдлын коэффициентүүд нь -3.29 ба -5.61, харин өндөр уулын хээр TXn-д хамгийн мэдрэмтгий ба мэдрэмтгий байдлын коэффициент -2.15 байна. Энэ нь TX90p-ийн өсөлт нь нугат хээрийн хувьд эрт SOS, TXn-ийн өсөлт нь өндөр уулын хээрийн хувьд эрт SOS-д хүргэдэг болохыг харуулж байна. Зураг 6d-д үзүүлснээр хэт чийглэг нөхцөлд ой, нугат хээрийн SOS TX10p-д хамгийн их өртөж, мэдрэмтгий байдлын коэффициентүүд -1.85 ба 0.92 байгаа нь эдгээр ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS-д сэрүүн өдрүүдийн нөлөөллийг онцолж болно. Ойн SOS нь TX10p-д сөрөг мэдрэмтгий байдаг бол нугат хээрийн SOS нь TX10p-д эерэг мэдрэмтгий байдаг. Монгол орны нийт нутаг дэвсгэр, тал хээр, өндөр уулын хээрийн SOS нь TNx-д хамгийн мэдрэмтгий байдаг тул сөрөг мэдрэмтгий байдал төрүүлж, мэдрэмтгий байдлын коэффициентүүд нь -4.33, -3.34, -3.72 тус тус байна. Энэ нь TNx-ийн өсөлт нь эрт SOS-д хүргэдэг болохыг харуулж байна.



Зураг 6. Эрс тэс уур амьсгалтай жилүүдийн өөр өөр ургамлын хэв шинжийн бүсүүдийн хаврын фенологид онцгой уур амьсгалын 4 индексэд хэрхэн мэдрэмтгий байгааг харуулсан: (а) хэт хуурай; (б) хэт дулаан; (в) хэт хүйтэн; (г) хэт чийглэг жил

Хэлэлцүүлэг

Ургамал ургах улирлын эхлэл (SOS) нь уур амьсгалын дулаарлын чухал үзүүлэлт ч температурын өөрчлөлтөд онцгой мэдрэмтгий байдаг (He & Li, 2020). Хаврын ногоорлын өмнө ургамалжил температурын нөлөөгөөр ичмэл байдлын (dormancy) хоёр үе шатыг дамждаг. Үүнд: ичмэл байдалд байх үе (enddormancy) ба ичмэл байдлаасаа гарах үет шат (ecodormancy). Ичмэл байдалд байх үе ургамал унтаа байдлыг эвдэхийн тулд бага температурт хөргөх шаардлагатай байдаг нь ургамлын өсөлтөд бага температурын гол үүргийг онцолж өгдөг.

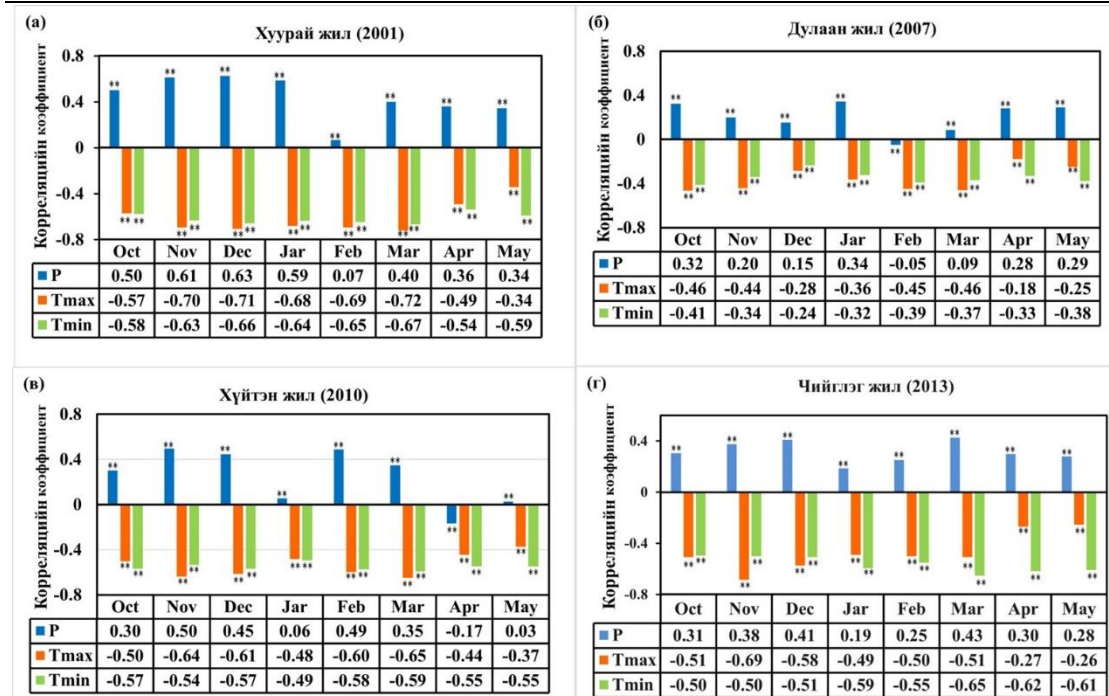
Хөргөх шаардлагыг хангасны дараа ургамал нь ичмэл байдлаасаа гарч, дулааныг хуримтлуулж эхэлдэг. Дулааны эгзэгтэй босго хүрэхэд ургамал эцэстээ ногоорч эхэлдэг (Fu et al., 2014). Уур амьсгалын онцгой үзэгдлийн эрч хүч, давтамж нэмэгдэж байгаа нь уур амьсгалын өөрчлөлтийн экосистемд үзүүлэх нөлөөг урьдчилан таамаглахад тодорхой бус байдлыг нэмэгдүүлж байна (Ma et al., 2015; Mo et al., 2023; Xu et al., 2019). Иймд эх газрын экосистем (Terrestrial ecosystems) уур амьсгалын онцгой үзэгдэлд хэрхэн хариу үйлдэл үзүүлж байгааг судлах нь нэн чухал юм.

Судалгаанаас харахад Монгол орны өдрийн хамгийн их температур өдрийн хамгийн бага температураас их нэмэгдсэн байна. Өдрийн хамгийн их температур нь өдрийн хамгийн бага температураас хурдан өсч, өдөр шөнийн температурын зөрүү нэмэгдсэн байдаг. Энэ нь дэлхийн

бусад ихэнх бүс нутагт ажиглагдаж буй хандлагаас ялгаатай ч өдрийн хамгийн бага температурын өсөлт нь өдрийн хамгийн их температурын өсөлтөөс давж байна (Davy et al., 2017; Peng et al., 2013).

Монгол орны хувьд хэт хуурайшилтаас болж 2001-2016 оны олон жилийн дундажтай харьцуулахад SOS эрт үүссэн нь өмнөх олон судалгааны үр дүнтэй зөрж байна. Энэхүү судалгааны үр дүнтэй нийцэж байгаа бөгөөд бөмбөрцгийн хойд хагаст улирлын өмнөх гантай жилүүдийн SOS нь ердийн жилүүдээс дунджаар 1.9 хоногийн өмнө, чийглэг жилүүдээс 3.7 хоногийн өмнө болсон байна (Zeng et al., 2021). Монголын тэгш өндөрлөгийн хээрийн SOS нь ердийн жилүүдэд урагшлах хандлагатай байдаг бол гантай үед SOS хойшилдаг (Rihan et al., 2022) нь энэ судалгаанд нугат хээрт ажиглагдсан SOS хоцорсонтой нийцэж байна. Ge нарын судалгаагаар 2010 оны хэт ган гачиг нь Хятадын баруун өмнөд хэсэгт орших ЮнГүй өндөрлөгийн SOS-ийг 10.8 хоногоор хойшлуулсныг тогтоожээ (Ge et al., 2021). Энэ судалгаанд ажиглагдсан үр дүнгийн хоёр шалтгаан байж болно. Нэгдүгээрт, гангийн улмаас чийгийн хязгаарлалт нь SOS-д температурын нөлөөллийг нөхөж чадахгүй. Манай судалгааны үр дүнгээс харахад хэт гантай нөхцөлд нийт судалгааны талбайн нугат хээр болон тал хээрийн SOS нь онцгой температурын индексэд илүү мэдрэмтгий байдаг (Зураг 6а). Түүнчлэн өмнөх оны 10-р сараас тухайн оны 5-р сар хүртэлх SOS болон сарын хур тунадас, температурын хамаарлын шинжилгээ (Зураг 7а) нь SOS-д улирлын өмнөх температурын гол үүргийг илүү тодотгож байна. Үүний хамт Монгол орон хуурай болон хагас хуурай бүс нутагт оршдог бөгөөд ургамал нь ихэвчлэн ганд тэсвэртэй (Maherali et al., 2004), гангийн стрессийг даван туулах өндөр чадвартай (Craine et al., 2012), усны хомсдолтой орчинд дасан зохицож чаддаг. Хоёрдугаарт, хэт гантай нөхцөл буюу хаврын улиралд агаарын температур аажмаар нэмэгдэхийн хэрээр цас хайлах ба хөлдсөн хөрс нь хөрсний чийгийг нөхөж, улмаар гангийн стрессийг бууруулдаг (Sun et al., 2014). Зураг 7а-д үзүүлснээр өмнөх оны 10-р сараас 1-р сар хүртэлх хур тунадас болон SOS хоорондын хамаарал бусад саруудаас өндөр байна. Бусад төрлийн ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS-тай харьцуулахад ойн SOS харьцангуй тогтвортой байгаа нь ойн үндэсний систем, ус ашиглалтын үр ашиг өндөртэй холбоотой байж болох юм. Эдгээр шинж чанарууд ойг хэт хуурай нөхцөлд хөрсний усны нөөцийг илүү сайн ашиглах боломжийг олгодог (Wolf et al., 2013; Wu et al., 2018). Нугат хээрийн SOS-ийн хоцролт нь шөнийн температур өндөр байснаас болж хөргөлтийн (chiling) хэрэгцээг хангахад саад болж, ичмэл хугацааг (dormancy) уртасгасантай холбоотой байж магадгүй (Dantec et al., 2014). Хур тунадас нь өндөр уулын хээрийн ургамлын өөрчлөлтийн гол хөдөлгөгч хүчин зүйл гэдгийг харгалзан үзвэл (Menzel et al., 2011), хэт гантай жилд өндөр уулын хээрийн SOS-ийн RX1day-д мэдрэмтгий байдгийг тайлбарлаж болох юм.

2013 оны хэт чийгтэй жилд Монгол орны SOS-ийг ерөнхийд нь урагшлуулсан бөгөөд энэ нь Li нар (2021)-ын үр дүнтэй нийцэж байна. Энэ үр дүнгийн гол шалтгаан нь хангалттай хур тунадасны нөхцөлд ургамлын хаврын улирлын фенологи голчлон температур нөлөөлдөгтэй холбоотой (Zheng et al., 2016). SOS нь хэт өндөр температурын үзүүлэлтүүдэд хэт хур тунадасны үзүүлэлтүүдээс илүү мэдэгдэхүйц байгааг харуулсан ч энэ нь хэт чийгтэй нөхцөлд температурын нөлөө хаврын фенологид хур тунадаснаас илүү ач холбогдолтой болохыг илэрхийлж байна (Зураг 7d). Тал хээр, өндөр уулын хээрийн SOS-ийн урагшилалт нь шөнийн температурын үзүүлэх нөлөөнөөс голчлон шалтгаалдаг. Шөнийн температурын нэмэгдэл нь ургамлын хяруу тэсвэрлэх чадварыг сайжруулж (Xiaoting Li et al., 2021), хяруунаас үүдэлтэй эрсдэлийг бууруулахад хүргэдэг (Shen et al., 2016).



Зураг 7. Онцгой уур амьсгалын үзэгдэлд судалгааны бүс нутгийн хэмжээнд SOS, хур тунадас, температурын хамаарал (а-г).

Монгол оронд 2007 хэт дулаан жилд SOS-ийг ерөнхийд нь урагшлуулсан бөгөөд энэ нь бусад судалгааны үр дүнтэй нийцэж байна (Crabbe et al., 2016; He et al., 2018). Бүх байгалийн бүс, бүслүүрийн SOS урагшилсан ч урагшилсан хэмжээ харилцан адилгүй байв. Энэ нь температур нэмэгдсэнээр ургамал ногоороход шаардлагатай дулаан хуримтлал хангагдсантай холбоотой байж болно (Yin et al., 2024). Түүнчлэн температурын өсөлтөөс болж цас хайлж, хөрсний чийг нэмэгдэж (Chen et al., 2015), ургамлыг ногооруулах таатай орчныг бүрдүүлдэг. Бүх ургамлын хэв шинжийн SOS нь TX10p индексэд хамгийн өндөр мэдрэмтгий байдаг нь өдрийн температур ургамлын SOS-д илүү их нөлөө үзүүлдэг болохыг харуулж байна. Тэдгээрийн дотроос тал хээрийн SOS нь бусад ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS-тай харьцуулахад илүү урагшилсан байдаг нь энэ нь тал хээрийн бүсэд хур тунадас багатай, хуурай уур амьсгалтай байдагтай холбоотой ба (He et al., 2018) ургамал нь халуунд тэсвэртэй байдаг. Үүний хамт эдгээр газруудын зонхилох өвс ургамал нь үндэс гүехэн, сайн хөгжсөн үндэсний системтэй бөгөөд боломжтой усыг хурдан шингээж чаддаг (Schenk & Jackson, 2002). Хэт дулаан жилд цас хайлж хөрсний чийгийн нэмэгдэл нь тал хээрийн ургамлын өсөлтийг улам бүр дэмжинэ. Үүний эсрэгээр, 2010 оны хэт хүйтний улмаас Монгол орны SOS ерөнхий хойшилсон нь бусад судалгаатай нийцэж байна (Mo et al., 2023). SOS нь хэт өндөр температурын индексүүдэд хамгийн мэдрэмтгий байдаг. Нуга болон өндөр уулын хээрт SOS нь өдрийн температурт хамгийн хүчтэй хариу үйлдэл үзүүлдэг бөгөөд энэ нь өдрийн температур бага байх нь ургамлын соёлолт, навчис үүсэхэд шаардагдах дулааны хуримтлалыг удаашруулдагтай холбоотой юм (Yin et al., 2024). Үүний эсрэгээр ойн SOS нь шөнийн температурт хамгийн хүчтэй хариу үйлдэл үзүүлдэг бөгөөд шөнийн температур буурах нь хүйтэнд гэмтэх эрсдэлийг нэмэгдүүлж болзошгүйг харуулж байна. Хүйтний гэмтлийг багасгахын тулд ургамалжил ногоорох нөхцөлөө хойшлуулдаг (Vitasse et al., 2014). Өндөр уулын

хээрийн SOS-ийн хамгийн бага өөрчлөлт нь температур харьцангуй бага байгаа өндөр уулын байршилтай холбоотой байж болох юм. Хэт хүйтэн нөхцөлд өндөр уулын хээр нь бага температурт хүчтэй дасан зохицдог (Scherrer & Körner, 2011) нь тэдний SOS-ийн тогтвортой байдалд хувь нэмэр оруулдаг.

Онцгой уур амьсгалын нийлмэл үзэгдэлтүүд нь хэт хуурай болон өндөр температур, хүчтэй шуурга болон аадар бороо орох зэрэг цаг уурын олон хүчин зүйлийг нэгэн зэрэг эсвэл дараалан үүсч болно. Эдгээр цаг уурын нарийн төвөгтэй нөхцөл байдал нь ургамалжилтад илүү их дарамт учруулж, өсөлт, физиологийн үйл явцад нөлөөлнө. Жишээлбэл, тариалалтын хэвийн нөхцөлд сэвэг зарамны цэцэглэлтийн дундаж хугацаа 69 хоног байсан бол өндөр температур, гангийн нийлмэл стрессийн үед цэцэглэлтийн дундаж хугацаа 44 хоног болж богиноссон байна (Choukri et al., 2020). Ургамлын фенологи дахь онцгой уур амьсгалын нийлмэл үзэгдлүүд ихээхэн анхаарал татсан сэдэв юм. Ургамлын фенологид цаг уурын онцгой үзэгдлүүдийн нөлөөллийг өнгөрсөн үеийн судалгаагаар хүлээн зөвшөөрсөн ч онцгой уур амьсгалын нийлмэл үзэгдлийн нөлөөллийн талаарх судалгаа харьцангуй цөөн байна. Эдгээр үйл явдлууд нь илүү төвөгтэй бөгөөд өргөн тархсан нөлөөтэй байдаг тул (He et al., 2018; J. Li et al., 2022), ургамлын фенологи тэдэнд хэрхэн хариу үйлдэл үзүүлэхийг цаашид судлах нь чухал юм.

Дүгнэлт

Уур амьсгалын онцгой үзэгдлүүд нь Монгол орны байгалийн бүс, бүслүүрийн SOS-д ихээхэн нөлөө үзүүлдэг байна. Эдгээр үзэгдлүүдийн Монгол орны ургамлын өсөлтийн мөчлөгт үзүүлэх нөлөөллийг судлах нь дараах шалтгааны улмаас нэн чухал юм: энэ нь ирээдүйн фенологийн динамикийг үнэлэх, урьдчилан таамаглах, байгаль орчны үр дүнтэй менежмент, уур амьсгалд дасан зохицох стратеги боловсруулах, хуурай газрын экосистемийн ойлголт дахь нүүрстөрөгч, усны эргэлтийн талаарх бидний ойлголтыг гүнзгийрүүлэхэд тусалдаг. Энэхүү судалгаанд 2001-2016 оны MODIS NDVI мэдээлэл, 1983-2016 он хүртэлх Монголын цаг уурын 53 станцын өдрийн хамгийн их, дундаж, хамгийн бага температур, өдрийн хур тунадасны мэдээллийг ашигласан болно. Энэхүү судалгаа нь уур амьсгалын онцгой үзэгдлийн тодорхойлолтыг судалснаар янз бүрийн ургамлын хэв шинжийн бүсийн SOS өөрчлөлт, улирлын өмнөх онцгой уур амьсгалын индексэд мэдрэмтгий байдалд дүн шинжилгээ хийж, дараах дүгнэлтэд хүрсэн:

(1) 1983-2016 онуудад Монгол улсад мэдэгдэхүйц дулаарлын хандлага ажиглагдаж, улирлын өмнөх хамгийн их температур бага температураас 1.4 дахин хурдан өссөн байна. Хур тунадас илт багасах хандлагатай байна. Тодорхой он жилүүдийг онцгой уур амьсгалтай жилүүдээр тодорхойлсон: 2001 оныг хэт хуурай жил, 2007 оныг хэт дулаан жил, 2010 оныг хэт хүйтэн жил, 2013 оныг хэт чийглэг жил гэж тодорхойлсон.

(2) Монгол дахь SOS нь онцгой уур амьсгалын үзэгдэлд өөр өөрөөр хариу үйлдэл үзүүлдэг. Хэт хуурай, дулаан, чийглэг жилүүдэд 2001-2016 оны олон жилийн дундаж SOS-тэй харьцуулахад илүү SOS урагшилсан хандлагатай байдаг бол хэт хүйтний улмаас SOS хойшилдог. Уур амьсгалын онцгой үзэгдэлд SOS-ийн хариу үйлдэл нь янз бүрийн ургамлын хэв шинжийн бүсүүдэд өөр өөр байдаг.

(3) Уур амьсгалын эрс тэс жилүүдэд Монгол дахь SOS-ийн онцгой уур амьсгалын индекс мэдрэмтгий байдал харилцан адилгүй байна. Хэт хуурай, чийглэг жилүүдэд хамгийн бага температур нь SOS-ийн гол хөдөлгөгч хүч болдог бол хэт дулаан, хүйтэн жилүүдэд хамгийн их температур гол үүрэг гүйцэтгэдэг. Уур амьсгалын эдгээр үзүүлэлтүүдэд SOS-ийн мэдрэмтгий байдал нь янз бүрийн ургамлын хэв шинжийн бүсүүдэд өөр өөр байдаг.

Ном зүй

1. Bao, G., Bao, Y., Sanjjava, A., Qin, Z., Zhou, Y., & Xu, G. (2015). NDVI-indicated long-term vegetation dynamics in Mongolia and their response to climate change at biome scale. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4293-4306. <https://doi.org/10.1002/joc.4286>
2. Bao, G., Jin, H., Tong, S., Chen, J., Huang, X., Bao, Y., Shao, C., Mandakh, U., Chopping, M., & Du, L. (2021). Autumn Phenology and Its Covariation with Climate, Spring Phenology and Annual Peak Growth on the Mongolian Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298-299. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108312>
3. Bayarsaikhan, S., Mandakh, U., Dorjsuren, A., Batsaikhan, B., Bao, Y., Adiya, Z., & Myagmartseren, P. (2020). Variations of Vegetation Net Primary Productivity and Its Responses to Climate Change from 1982 to 2015 in Mongolia. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-3-2020, 347-353. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-347-2020>
4. Camuffo, D., della Valle, A., & Becherini, F. (2020). A critical analysis of the definitions of climate and hydrological extreme events. *Quaternary International*, 538, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.008>
5. Chen, K., Ge, G., Bao, G., Bai, L., Tong, S., Bao, Y., & Chao, L. (2022). Impact of Extreme Climate on the NDVI of Different Steppe Areas in Inner Mongolia, China. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071530>
6. Chen, X., An, S., Inouye, D. W., & Schwartz, M. D. (2015). Temperature and snowfall trigger alpine vegetation green-up on the world's roof. *Glob Chang Biol*, 21(10), 3635-3646. <https://doi.org/10.1111/gcb.12954>
7. Choukri, H., Hejjoui, K., El-Baouchi, A., El Haddad, N., Smouni, A., Maalouf, F., Thavarajah, D., & Kumar, S. (2020). Heat and Drought Stress Impact on Phenology, Grain Yield, and Nutritional Quality of Lentil (*Lens culinaris Medikus*). *Front Nutr*, 7, 596307. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.596307>
8. Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J. F., Sanz, M. J., Schulze, E. D., Vesala, T., & Valentini, R. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529-533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>
9. Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2(7), 491-496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
10. Crabbe, R. A., Dash, J., Rodriguez-Galiano, V. F., Janous, D., Pavelka, M., & Marek, M. V. (2016). Extreme warm temperatures alter forest phenology and productivity in Europe. *Sci Total Environ*, 563-564, 486-495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.124>
11. Craine, J. M., Ocheltree, T. W., Nippert, J. B., Towne, E. G., Skibbe, A. M., Kembel, S. W., &

- Fargione, J. E. (2012). Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience. *Nature Climate Change*, 3(1), 63-67. <https://doi.org/10.1038/nclimate1634>
12. Dantec, C. F., Vitasse, Y., Bonhomme, M., Louvet, J. M., Kremer, A., & Delzon, S. (2014). Chilling and heat requirements for leaf unfolding in European beech and sessile oak populations at the southern limit of their distribution range. *Int J Biometeorol*, 58(9), 1853-1864. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0787-7>
 13. Dashkhuu, D., Kim, J. P., Chun, J. A., & Lee, W.-S. (2015). Long-term trends in daily temperature extremes over Mongolia. *Weather and Climate Extremes*, 8, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.11.003>
 14. Davy, R., Esau, I., Chernokulsky, A., Outten, S., & Zilitinkevich, S. (2017). Diurnal asymmetry to the observed global warming. *International Journal of Climatology*, 37(1), 79-93. <https://doi.org/10.1002/joc.4688>
 15. Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 289(5487), 2068-2074. <https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>
 16. Fernández-Giménez, M. E., Batkhishig, B., & Batbuyan, B. (2012). Cross-boundary and cross-level dynamics increase vulnerability to severe winter disasters (dzud) in Mongolia. *Global Environmental Change*, 22(4), 836-851. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.001>
 17. Fu, Y. H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., Ciais, P., Huang, M., Menzel, A., Penuelas, J., Song, Y., Vitasse, Y., Zeng, Z., & Janssens, I. A. (2015). Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526(7571), 104-107. <https://doi.org/10.1038/nature15402>
 18. Fu, Y. H., Zhou, X., Li, X., Zhang, Y., Geng, X., Hao, F., Zhang, X., Hanninen, H., Guo, Y., De Boeck, H. J., & Morellato, P. (2020). Decreasing control of precipitation on grassland spring phenology in temperate China. *Global Ecology and Biogeography*, 30(2), 490-499. <https://doi.org/10.1111/geb.13234>
 19. Fu, Y. S., Campioli, M., Vitasse, Y., De Boeck, H. J., Van den Berge, J., AbdElgawad, H., Asard, H., Piao, S., Deckmyn, G., & Janssens, I. A. (2014). Variation in leaf flushing date influences autumnal senescence and next year's flushing date in two temperate tree species. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 111(20), 7355-7360. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321727111>
 20. Ge, W., Han, J., Zhang, D., & Wang, F. (2021). Divergent impacts of droughts on vegetation phenology and productivity in the Yungui Plateau, southwest China. *Ecological Indicators*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107743>
 21. He, G., & Li, Z. (2020). Asymmetry of Daytime and Nighttime Warming in Typical Climatic Zones along the Eastern Coast of China and Its Influence on Vegetation Activities. *Remote Sensing*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/rs12213604>
 22. He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., Lin, P., Zhao, M., & Fang, S. (2018). Impacts of recent climate extremes on spring phenology in arid-mountain ecosystems in China. *Agricultural and Forest*

- Meteorology*, 260-261, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.022>
23. Hou, X., Gao, S., Niu, Z., & Xu, Z. (2014). Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 35(9), 3316-3330. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.903437>
 24. Javed, T., Li, Y., Feng, K., Ayantobo, O. O., Ahmad, S., Chen, X., Rashid, S., & Suon, S. (2021). Monitoring responses of vegetation phenology and productivity to extreme climatic conditions using remote sensing across different sub-regions of China. *Environ Sci Pollut Res Int*, 28(3), 3644-3659. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10769-1>
 25. Ji, S., Ren, S., Li, Y., Dong, J., Wang, L., Quan, Q., & Liu, J. (2021). Diverse responses of spring phenology to pre-season drought and warming under different biomes in the North China Plain. *Sci Total Environ*, 766, 144437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144437>
 26. John, R., Chen, J., Ou-Yang, Z.-T., Xiao, J., Becker, R., Samanta, A., Ganguly, S., Yuan, W., & Batkhishig, O. (2013). Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010. *Environmental Research Letters*, 8(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035033>
 27. Kalita, R., Kalita, D., & Saxena, A. (2023). Trends in extreme climate indices in Cherrapunji for the period 1979 to 2020. *Journal of Earth System Science*, 132(2). <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02087-0>
 28. Li, C., Filho, W. L., Wang, J., Yin, J., Fedoruk, M., Bao, G., Bao, Y., Yin, S., Yu, S., & Hu, R. (2018). An assessment of the impacts of climate extremes on the vegetation in Mongolian Plateau: Using a scenarios-based analysis to support regional adaptation and mitigation options. *Ecological Indicators*, 95, 805-814. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.031>
 29. Li, G., Yu, L., Liu, T., Bao, Y., Yu, J., Xin, B., Bao, L., Li, X., Chang, X., & Zhang, S. (2023). Spatial and temporal variations of grassland vegetation on the Mongolian Plateau and its response to climate change. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1067209>
 30. Li, J., Bevacqua, E., Chen, C., Wang, Z., Chen, X., Myneni, R. B., Wu, X., Xu, C.-Y., Zhang, Z., & Zscheischler, J. (2022). Regional asymmetry in the response of global vegetation growth to springtime compound climate events. *Communications Earth & Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00455-0>
 31. Li, X., Fu, Y. H., Chen, S., Xiao, J., Yin, G., Li, X., Zhang, X., Geng, X., Wu, Z., Zhou, X., Tang, J., & Hao, F. (2021). Increasing importance of precipitation in spring phenology with decreasing latitudes in subtropical forest area in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 304-305. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108427>
 32. Li, X., Guo, W., Li, S., Zhang, J., & Ni, X. (2021). The different impacts of the daytime and nighttime land surface temperatures on the alpine grassland phenology. *Ecosphere*, 12(6). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3578>
 33. Li, Y., Zhao, J., Miao, R., Huang, Y., Fan, X., Liu, X., Wang, X., Wang, Y., & Shen, Y. (2022). Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of Extreme Climate Indices in Central China. *Sustainability*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/su14042329>

34. Liu, Z., Yao, Z., Huang, H., Batjav, B., & Wang, R. (2019). Evaluation of Extreme Cold and Drought over the Mongolian Plateau. *Water*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010074>
35. Luo, M., Meng, F., Sa, C., Duan, Y., Bao, Y., Liu, T., & De Maeyer, P. (2021). Response of vegetation phenology to soil moisture dynamics in the Mongolian Plateau. *Catena*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105505>
36. Ma, X., Huete, A., Moran, S., Ponce-Campos, G., & Eamus, D. (2015). Abrupt shifts in phenology and vegetation productivity under climate extremes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(10), 2036-2052. <https://doi.org/10.1002/2015jg003144>
37. Maherali, H., Pockman, W. T., & Jackson, R. B. (2004). Adaptive Variation in the Vulnerability of Woody Plants to Xylem Cavitation. *Ecology*, 85(8), 2184-2199. <http://www.jstor.org/stable/3450284>
38. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, S., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M., & Scheel Monteiro, P. M. (2021). Ipcc, 2021: Summary for policymakers. in: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
39. Mei, L., Bao, G., Tong, S., Yin, S., Bao, Y., Jiang, K., Hong, Y., Tuya, A., & Huang, X. (2021). Elevation-dependent response of spring phenology to climate and its legacy effect on vegetation growth in the mountains of northwest Mongolia. *Ecological Indicators*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107640>
40. Menzel, A., Seifert, H., & Estrella, N. (2011). Effects of recent warm and cold spells on European plant phenology. *International Journal of Biometeorology*, 55, 921-932.
41. Miao, L., Muller, D., Cui, X., & Ma, M. (2017). Changes in vegetation phenology on the Mongolian Plateau and their climatic determinants. *PLoS One*, 12(12), e0190313. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190313>
42. Mo, Y., Zhang, X., Liu, Z., Zhang, J., Hao, F., & Fu, Y. (2023). Effects of Climate Extremes on Spring Phenology of Temperate Vegetation in China. *Remote Sensing*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/rs15030686>
43. Pei, T., Ji, Z., Chen, Y., Wu, H., Hou, Q., Qin, G., & Xie, B. (2021). The Sensitivity of Vegetation Phenology to Extreme Climate Indices in the Loess Plateau, China. *Sustainability*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13147623>
44. Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Myneni, R. B., Chen, A., Chevallier, F., Dolman, A. J., Janssens, I. A., Penuelas, J., Zhang, G., Vicca, S., Wan, S., Wang, S., & Zeng, H. (2013). Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 501(7465), 88-92. <https://doi.org/10.1038/nature12434>
45. Piao, S., Tan, J., Chen, A., Fu, Y. H., Ciais, P., Liu, Q., Janssens, I. A., Vicca, S., Zeng, Z., Jeong, S. J., Li, Y., Myneni, R. B., Peng, S., Shen, M., & Penuelas, J. (2015). Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nat Commun*, 6, 6911. <https://doi.org/10.1038/ncomms7911>
46. Ren, J., Tong, S., Ying, H., Mei, L., & Bao, Y. (2022). Historical and Future Changes in Extreme

- Climate Events and Their Effects on Vegetation on the Mongolian Plateau. *Remote Sensing*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/rs14184642>
47. Ren, S., Yi, S., Peichl, M., & Wang, X. (2017). Diverse Responses of Vegetation Phenology to Climate Change in Different Grasslands in Inner Mongolia during 2000–2016. *Remote Sensing*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/rs10010017>
 48. Rihan, W., Zhao, J., Zhang, H., & Guo, X. (2022). Preseason drought controls on patterns of spring phenology in grasslands of the Mongolian Plateau. *Sci Total Environ*, 838(Pt 2), 156018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156018>
 49. Schenk, H. J., & Jackson, R. B. (2002). Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90.
 50. Scherrer, D., & Körner, C. (2011). Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *Journal of Biogeography*, 38, 406–416. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02407.x>
 51. Shen, M., Piao, S., Chen, X., An, S., Fu, Y. H., Wang, S., Cong, N., & Janssens, I. A. (2016). Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau. *Glob Chang Biol*, 22(9), 3057–3066. <https://doi.org/10.1111/gcb.13301>
 52. Sun, Z., Wang, Q., Xiao, Q., Batkhishig, O., & Watanabe, M. (2014). Diverse Responses of Remotely Sensed Grassland Phenology to Interannual Climate Variability over Frozen Ground Regions in Mongolia. *Remote Sensing*, 7(1), 360–377. <https://doi.org/10.3390/rs70100360>
 53. Vitasse, Y., Lenz, A., & Korner, C. (2014). The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Front Plant Sci*, 5, 541. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00541>
 54. Wang, M., Wang, S., Wang, J., Yan, H., Mickler, R. A., Shi, H., He, H., Huang, M., & Zhou, L. (2018). Detection of positive gross primary production extremes in terrestrial ecosystems of China during 1982–2015 and analysis of climate contribution. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(9), 2807–2823.
 55. Wang, M., Zhang, H., Wang, B., Wang, Q., Chen, H., Gong, J., Sun, M., & Zhao, J. (2023). The Sensitivity of Green-Up Dates to Different Temperature Parameters in the Mongolian Plateau Grasslands. *Remote Sensing*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/rs15153830>
 56. Wolf, S., Eugster, W., Ammann, C., Häni, M., Zielis, S., Hiller, R., Stieger, J., Imer, D., Merbold, L., & Buchmann, N. (2013). Contrasting response of grassland versus forest carbon and water fluxes to spring drought in Switzerland. *Environmental Research Letters*, 8(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035007>
 57. Wu, X., Liu, H., Li, X., Ciais, P., Babst, F., Guo, W., Zhang, C., Magliulo, V., Pavelka, M., Liu, S., Huang, Y., Wang, P., Shi, C., & Ma, Y. (2018). Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate Northern Hemisphere. *Glob Chang Biol*, 24(1), 504–516. <https://doi.org/10.1111/gcb.13920>
 58. Xie, Y., Wang, X., & Silander, J. A., Jr. (2015). Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112(44),

- 13585-13590. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509991112>
59. Xu, C., McDowell, N. G., Fisher, R. A., Wei, L., Sevanto, S., Christoffersen, B. O., Weng, E., & Middleton, R. S. (2019). Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. *Nature Climate Change*, 9(12), 948-953. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0630-6>
 60. Yin, P., Li, X., & Pellikka, P. (2024). Asymmetrical Impact of Daytime and Nighttime Warming on the Interannual Variation of Urban Spring Vegetation Phenology. *Earth's Future*, 12(5). <https://doi.org/10.1029/2023ef004127>
 61. Ying, H., Zhang, H., Zhao, J., Shan, Y., Zhang, Z., Guo, X., Rihan, W., & Deng, G. (2020). Effects of spring and summer extreme climate events on the autumn phenology of different vegetation types of Inner Mongolia, China, from 1982 to 2015. *Ecological Indicators*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105974>
 62. Yuan, M., Zhao, L., Lin, A., Wang, L., Li, Q., She, D., & Qu, S. (2020). Impacts of preseason drought on vegetation spring phenology across the Northeast China Transect. *Sci Total Environ*, 738, 140297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140297>
 63. Yuan, Z., Bao, G., Dorjsuren, A., Oyont, A., Chen, J., Li, F., Dong, G., Guo, E., Shao, C., & Du, L. (2024). Climatic Constraints of Spring Phenology and Its Variability on the Mongolian Plateau From 1982 to 2021. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129(2). <https://doi.org/10.1029/2023jg007689>
 64. Zeng, Z., Wu, W., Ge, Q., Li, Z., Wang, X., Zhou, Y., Zhang, Z., Li, Y., Huang, H., Liu, G., & Peñuelas, J. (2021). Legacy effects of spring phenology on vegetation growth under preseason meteorological drought in the Northern Hemisphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108630>
 65. Zheng, Z., Zhu, W., Chen, G., Jiang, N., Fan, D., & Zhang, D. (2016). Continuous but diverse advancement of spring-summer phenology in response to climate warming across the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.012>