

目次

我国地下水硝酸盐污染及源解析研究进展 涂春霖, 陈庆松, 尹林虎, 李强, 和成忠, 刘振南 (3129)

北京市地下水中高危害污染物筛选 杨蕾, 徐莹, 余诗航, 李潇斐, 李剑 (3142)

融合多源时空数据的地下水硫酸盐预测模型 李如跃, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 闫志云 (3153)

北京市城市河流中抗生素的污染特征及多层次生态风险评估 赵晓帅, 郑其冰, 马瑞, 张恒, 陈苗, 郭昌胜 (3165)

典型城市不同河流沉积物中抗生素抗性基因的时空分布特征:以石家庄为例
..... 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 白寅虎, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 张璐璐, 崔建升 (3176)

长江流域地表水中镉生态风险的区域差异分析
..... 丁仁, 廖梓童, 陆韻, 巫寅虎, 陈卓, 高梓楠, 徐红卫, 陆松柳, 惠二清, 魏东斌, 洪洪普 (3186)

安徽涡河流域水化学与同位素特征及水体转化关系 许金昭, 刘桂建, 司雯, 刘锐佳, 王冠宇 (3196)

基于注意力机制优化的BiLSTM珠江口水质预测模型 陈湛峰, 李晚芳 (3205)

基于流域单元的环巢湖综合景观对河流水质的影响 王杰, 刘安安, 张俊武, 陈青松, 杨慧文 (3214)

休耕对抚仙湖周边农田土壤剖面和浅层地下水中氮累积的影响 叶远行, 陈安强, 李林, 闵金恒, 王炽, 闫辉, 张丹 (3225)

改性生物质材料对地表水中残余草甘膦异丙胺盐的吸附 周玥, 李艳, 王晓东, 王慧, 薛冰纯 (3234)

污水处理过程中典型PPCPs的污染特征及降解转化研究进展 贺德春, 郑密密, 黄伟, 柳玉荣, 胡嘉梧, 刘姜艳, 潘杰 (3247)

关中原城市群土地利用变化对碳储量的影响 边蕊, 赵安周, 刘宪锋, 徐瑞皓, 李子洋 (3260)

基于InVEST-PLUS模型的淮北市碳储量时空演变及预测 于芝琳, 赵明松, 高迎凤, 王涛, 赵治东, 王世航 (3270)

基于PLUS-InVEST模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测
1990~2020年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素 韩方红, 高凡, 何兵, 曹燕, 姚小晨 (3297)

未来气候情景下甘南草地土壤有机碳密度的时空预测与分析 李钊, 张美玲, 张锐祺, 田景, 王晨 (3308)

长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素 何刘洁, 郑博福, 万炜, 谢泽阳, 宋旭, 朱锦奇, 刘忠 (3318)

近20年兰西城市群生态系统服务价值对土地利用转型的时空响应
..... 梁朕月, 曹春, 李锦超, 唐千惠, 吴育焱, 肖潇, 饶玉良, 王继伟, 杨丽琴 (3329)

中国生态环境质量与人类活动耦合机制及其影响因子 赵体侠, 王丽园, 孙梓欣, 张哲, 董庆栋, 朱文博 (3341)

重要生态功能区干旱时空演变特征及对关键资源的影响:以黄河流域为例 卢荡, 魏伟, 王继平, 闫彭, 刘婷, 周俊菊, 顾斌斌 (3352)

黄河中游不同地貌分区景观格局脆弱性及其驱动力 何梦真, 张乐涛, 魏仪媛, 郑泽豪, 王清源 (3363)

基于可解释机器学习的青藏高原草地气候变化多因素影响分析 刘慧文, 刘欢, 胡鹏, 彭辉, 王硕 (3375)

“双碳”目标下城市形态对碳排放的影响:以长江经济带为例 冯新惠, 李艳, 王诗逸, 余迺, 杨佳钰, 吴能君 (3389)

成渝城市群紧凑度与碳排放强度时空演变及协调发展 李志英, 朱晓珊, 李志英, 王颖云 (3402)

西安高新区多情景碳达峰预测及减排路径分析 姜旭朋, 张强, 赵文婷, 原晓红, 樊亭亭, 郑烈龙, 刘跃廷 (3412)

基于机器学习的交通碳排放预测模型构建与分析 刘慧甜, 胡大为 (3421)

中国交通运输碳排放强度时空交互特征及跃迁机制 李健, 刘舒琪, 王晚祺 (3433)

碳中和植物降污固碳及其机制研究进展 陈芸, 周启星, 陶宗鑫, 郑彤, 吴康迎, 张嘉乐, 欧阳少虎 (3446)

废旧三元锂离子电池回收利用碳足迹 宋晓聪, 杜帅, 谢明辉, 邓陈宁, 郭静, 沈鹏, 赵慈, 陈忱 (3459)

农业环境中抗生素风险评估的研究进展 杨珍珍, 李红娜, 李娜 (3468)

基于最优尺度地理探测的长三角有机污染物时空分布驱动因素分析 何金珂, 周亚男, 陈跃红, 庄超, 李润光 (3480)

城-郊区域土壤铅(Pb)累积过程时空模拟:以中部某大城市为例 宋啸凡, 侯鹰, 董一帆, 杨勇, 高镇, 陈卫平 (3493)

基于APCS-MLR模型的开封市公交站周边灰尘重金属源解析及健康风险评估
..... 段海静, 申浩欣, 彭超月, 任册, 王艳锋, 刘德新, 王玉龙, 郭瑞超, 马建华 (3502)

宁夏供港蔬菜田土壤重金属分布特征及生态风险评价 姬丽, 马琨, 谢铁娜, 陈林, 李虹, 贾彪 (3512)

4种改良剂对紫色土Cd生物有效性及土壤酶活性的影响 丁馨茹, 徐曼, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (3523)

生物炭负载氨基对土壤碳排放、酶活性及微生物群落的影响 杨如意, 董艳红, 肖鑫, 徐艳丽, 况帅, 宋文静, 董建新, 郑学博 (3533)

刺梨果渣生物炭对白菜产量及品质和土壤性质的影响 樊洪, 谢珊, 龙天雨, 杨丽, 段淳, 刘元生, 宋理洪, 洪祖拥 (3543)

生物炭对西瓜连作土壤真菌群落结构和功能类群的影响 常芳娟, 张贵云, 张丽萍, 吕贝贝, 刘珍, 范巧兰, 姚众 (3553)

不同改良物料对盐碱土壤真菌群落结构的影响 白小龙, 张恩, 武晋民, 马东海, 张邦彦, 张朝辉, 田丰, 赵卉, 王彬 (3562)

生物炭和秸秆还田对咸水滴灌棉田土壤微生物群落特征及功能差异的影响 郭晓雯, 向贵琴, 张发朝, 江山, 闵伟 (3571)

不同比例硫酸铵替代尿素对玉米根际土壤环境及微生物群落的影响 张延慧, 刘宇, 韩莹, 董馨宇, 郭探文, 闫秋艳, 闫双堆 (3584)

不同形态氮添加对多年生高寒栽培草地土壤理化性质和微生物群落结构的影响
..... 童永尚, 张春平, 董全民, 杨增增, 张小芳, 霍丽安, 曹铨, 张正社, 俞翊, 杨晓霞 (3595)

宁夏黄土陵区农田土壤细菌海拔分布特征 吴霞, 蔡进军, 王长军, 李维倩, 陈刚, 白阳阳 (3605)

大通河流域土壤细菌及氮循环功能菌群沿海拔的空间分布 王竹, 刘扬, 王芳 (3614)

不同水文情景下白洋淀水体好氧反硝化菌群对水质因子的动态响应
..... 孟佳靖, 张甜娜, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (3627)

粉煤灰添加对城市多源有机废弃物联合堆肥效能及堆体细菌群落的影响
..... 邹嘉成, 杜国彬, 苏凯文, 于彩虹, 刘迎超, 王晨晨, 徐德卓 (3638)

镉胁迫下外源壳聚糖对小麦幼苗生理特性、抗氧化能力及镉吸收的影响
..... 张静静, 焦秋娟, 徐正阳, 范丽娜, 姜瑛, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 林迪, 柳海涛 (3649)

水体微塑料丰度与氮代谢功能微生物及基因响应关系 王志超, 马钰, 李雅馨月, 李晨曦, 高静涵, 李卫平 (3661)

聚苯乙烯微塑料对污水中胞外耐药基因的影响及其机制 周帅, 黄啊潮, 黄泽枫, 李伦福, 杨锋娟, 陈安琪, 修斐晨, 高媛媛 (3671)

聚乙烯微塑料对土壤养分和酶活性的影响 梁榕, 何娇, 孙飞虎, 张瑞芳, 王鑫鑫 (3679)

低密度聚乙烯微塑料对土壤中含氧多环芳烃自然衰减的影响 汤佳豪, 鲍文秀, 张阔, 李瑜婷, 古鹏, 吴济舟, 卢媛 (3688)

不同环境介质轮胎微塑料老化及小粒径微粒释放特征 张泰硕, 商静静, 刘海勇, 王顺燕, 刘鹏 (3700)

光老化对不同粒径聚苯乙烯微塑料吸附Cu(II)的影响 刘文娟, 郭玉峰, 邓文博 (3708)

秸秆添加对长期施肥旱地土壤N₂O和CO₂排放的影响 涂昊泽, 林彬, 王军, 胡荣桂, 肖恒斌, 邹磊 (3716)

有机肥部分替代化肥对桃园N₂O和NO排放的影响 徐品上, 郭姝敏, 郑皓晨, 王金阳, 邹建文 (3725)

基于SEM模型的热环境时空特征及影响因素分析:以西安都市圈为例 张颖, 王旭红, 冯子豪, 苑嘉欣, 余孟千禧 (3734)

西安市大气污染物时空演化特征及对人体健康评价 徐传奇, 白杨, 唐远薇, 张欣宇, 王志瑞, 呼婧婧, 杨锦涛 (3746)

川南城市群冬季大气细颗粒物中金属元素特征及其来源解析 张天力, 黄小娟, 张军科, 韩琳, 陈璐璐, 张小玲 (3756)

基于可解释机器学习的青藏高原草地物候变化多因素影响分析

刘慧文¹, 刘欢², 胡鹏², 彭辉^{1,3,4*}, 王硕¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 4. 中国海洋大学海洋环境地质工程山东省重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 气候变化背景下, 青藏高原植被物候发生显著改变. 然而, 影响物候的水热因素众多, 目前较少有研究关注多因素对青藏高原物候的影响效应, 导致对青藏高原物候变化机制认识不足. 为此, 研究通过遥感数据解译, 在对2002~2021年青藏高原草地物候时空变化特征分析的基础上, 聚焦降水、气温、海拔和土壤等多方面, 利用可解释机器学习方法(SHAP)揭示物候变化的主导因素, 并量化分析多因素对物候的交互影响. 结果表明: ①青藏高原分别有56.32%、67.65%和65.50%的草地表现出生长季开始时间(SOS)提前、生长季结束时间(EOS)延迟和生长季长度(LOS)延长趋势; ②青藏高原草地SOS和LOS主要受水分条件影响, 3月0~10 cm土壤水分对SOS提前和LOS延长起促进作用的范围分别在10~25 kg·m⁻²和15~25 kg·m⁻²之间, 峰值分别在20 kg·m⁻²和18 kg·m⁻²左右; EOS则主要受温度影响, 9月和10月温度越高对EOS延迟促进作用越强, 并分别在高于8°C和-0.5°C时达到峰值; ③水热等因素对物候的影响存在非线性交互效应, 3月0~10 cm土壤水分达到20 kg·m⁻²后, 更有利于降低水和低海拔地区SOS提前; 10月温度高于0°C后较好的水分条件更有利于EOS延迟; 3月0~10 cm土壤水分在12~22 kg·m⁻²之间时, 高降水地区LOS更长. 研究表明, 可解释机器学习方法可为物候变化的多因素影响定量分析提供一种新的方法.

关键词: 青藏高原; 草地物候; 时空变化; 极限梯度提升(XGBoost); SHAP; 交互影响

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)06-3375-14 DOI: 10.13227/j.hjkk.202306185

Multi-factor Impact Analysis of Grassland Phenology Changes on the Qinghai-Xizang Plateau Based on Interpretable Machine Learning

LIU Hui-wen¹, LIU Huan², HU Peng², PENG Hui^{1,3,4*}, WANG Shuo¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The vegetation phenology of the Qinghai-Xizang Plateau is changing significantly in the context of climate change. However, there are many hydrothermal factors affecting the phenology, and few studies have focused on the effects of multiple factors on the phenology of the Qinghai-Xizang Plateau, resulting in a lack of understanding of the mechanisms underlying phenological changes on the Qinghai-Xizang Plateau. In this study, we used remote sensing data interpretation to analyze the spatial and temporal variability of grassland phenology on the Qinghai-Xizang Plateau from 2002 to 2021, focusing on precipitation, temperature, altitude, soil, and other aspects to reveal the dominant factors of phenological variability using an interpretable machine learning method (SHAP) and to quantify the interactive effects of multiple factors on phenology. The results showed that: ① The growing season start (SOS) of grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau mostly ranged from 110 to 150 d, with 56.32% of grasslands showing an early SOS trend; the growing season end (EOS) mostly ranged from 290-320 d, with 67.65% of grasslands showing a delayed EOS trend; and the growing season length (LOS) mostly ranged from 120 to 210 d, with 65.50% of the grasslands showing a trend towards longer growing season lengths. ② SOS in grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau was mainly influenced by moisture conditions, in which soil moisture between 10 and 25 kg·m⁻² in the 0-10 cm soil layer in March promoted the advancement of SOS and peaked at approximately 20 kg·m⁻². EOS was mainly influenced by temperature, with higher temperatures in September and October having a stronger effect on EOS latency promotion and peaking at over 8°C and -0.5°C, respectively. The main influencing factors of LOS were more consistent with SOS, in which soil moisture between 15 and 25 kg·m⁻² in the 0-10 cm soil layer in March promoted the prolongation of LOS and peaked at approximately 18 kg·m⁻². ③ There was an obvious interactive effect of water and heat and other factors on phenology; after soil moisture reached 20 kg·m⁻² in the 0-10 cm soil layer in March, SOS was more advanced in low-precipitation and low-altitude areas. Better moisture conditions were more conducive to EOS delay at temperatures above 0°C in October, and soil moisture in high precipitation areas promoted LOS prolongation more when soil moisture was between 12 and 22 kg·m⁻² in 0-10 cm in March. The results also demonstrated that interpretable machine learning methods could provide a new approach to the analysis of the multifactorial effects of phenological change.

Key words: Qinghai-Xizang Plateau; grassland phenology; spatial and temporal variation; extreme gradient boosting (XGBoost); shapley additive explanations (SHAP); interactive effects

收稿日期: 2023-06-23; 修订日期: 2023-08-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3205000); 国家自然科学基金项目(52122902, U2240202); 水利部水生态安全保障人才创新团队项目(WR0145B022021); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题项目(SKL2022ZD01)

作者简介: 刘慧文(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为机器学习在流域生态水文中的应用, E-mail: Sacajawea0125@163.com

* 通信作者, E-mail: pengh@ouc.edu.cn

青藏高原对气候变化高度敏感,近几十年其变暖速度几乎是全球平均水平的两倍^[1].青藏高原生态系统以高寒草甸和草原为主,作为气候变化最敏感最直接的响应指标之一,青藏高原高寒草地物候变化被广泛关注^[2,3].基于原位观测和卫星遥感的数据表明,快速变暖使青藏高原草地物候发生了显著变化^[4],例如春季物候的提前^[5,6]以及秋季物候的延迟^[7,8]等.植被物候的变化会对生态系统功能和碳循环过程产生强烈影响^[9],且可能通过改变陆地与大气之间的水和能量交换对区域气候形成反馈作用^[10,11].揭示植被物候变化控制机制不仅有助于改进生态水文建模过程,而且有助于提高未来气候变化情景下对区域碳收支和生态系统变化的预测能力^[4].

过去研究多关注物候对气候变化的响应,通常认为气温和降水是青藏高原草地物候变化的主要影响因素^[7,8,12],青藏高原的变暖和降水增加推动了春季物候提前以及秋季物候延迟^[13].水分可用性是限制植被生长的关键因素,Xu等^[14]研究发现青藏高原草地生态系统正由热约束转向水约束,生长季开始时间受降水影响更大,且干旱地区相较于湿润地区对降水变化更为敏感^[15,16].生长季结束时间受降水和温度协同影响,充足的降水和变暖共同促进了青藏高原生长季的延长^[17].气候变化主导了青藏高原植被的改善^[18],Wu等^[19]研究认为温度是影响青藏高原植被变化最重要的因素,水分可用性对草地产生了积极影响.现有研究在揭示青藏高原草地物候变化机制中尚存在一定不足.一方面,研究多聚焦单一因素变化对物候的影响^[7,8,20-22],忽视了该过程中

单因素与其他因素之间的交互影响.另一方面,研究多关注气温和降水而较少研究土壤水分变化和海拔高差等对青藏高原草地物候的影响.土壤水分是植被最直接的水源,而海拔会通过改变气候格局间接影响植被物候^[23,24].除此之外,物候变化是多因素共同作用的结果,其与影响因素之间通常存在非线性关系,而目前研究使用的相关性分析、线性回归等传统的统计学方法难以描述非线性变化,无法得到各因素对物候变化的相对贡献并且定量解释物候对影响因素变化的响应机制^[11].

本文基于2002~2021年的MODIS NDVI数据提取青藏高原草地物候分析其时空变化特征,进一步,以海拔以及月尺度的气温、降水和土壤水分作为影响要素,采用可解释机器学习方法量化了各要素变化对物候的影响及其交互效应.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原(26°~39°N, 73°~104°E)素有“世界屋脊”之称,平均海拔4 000 m以上,总面积约 $2.6 \times 10^6 \text{ km}^2$.空间上,青藏高原海拔高差较大,低处不足2 000 m,最高则达到8 844 m,如图1所示.受地形和季风影响,青藏高原水热条件存在较强的空间异质性.气温呈现出中部较低,东南部和西北部较高的分布形态^[24],且季节差异明显,昼夜温差大^[25].降水空间分配不均,年平均降水量从东南部高于1 000 mm减少至西南部的低于50 mm^[26],年内有明显的干湿两季^[27].植被类型以高寒草地为主(图1),面积约为 $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,占青藏高原总面积的57.7%^[28].

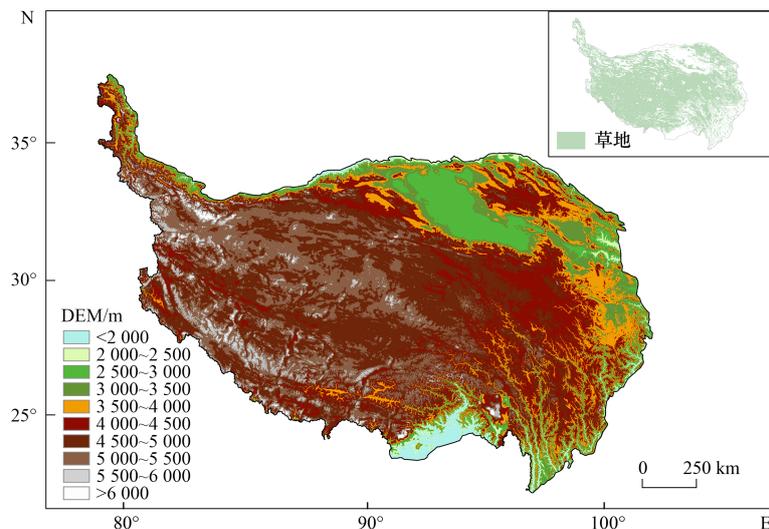


图1 研究区示意

Fig. 1 Schematic of the study area

1.2 数据来源与预处理

本文使用归一化植被指数(NDVI)数据、植被类

型数据、高程数据、气象数据以及土壤水分数据,数据来源见表1.除数字高程模型(DEM)和植被图

表 1 数据名称及来源
Table 1 Data names and sources

数据名称	数据来源	时空分辨率
NDVI(MOD13A1)	美国航空航天局戈达德航天中心(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)	16 d, 1 km
中国植被图	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)	1:1 000 000
DEM	ASTER GDEMv3(http://www.gscloud.cn/)	30 m
中国 1 km 分辨率逐月降水量/平均气温数据集(1901 ~ 2021 年)	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)	月, 1 km
土壤水分(GLDAS_NOAH)	美国戈达德地球科学数据和信息服务中心(https://disc.gsfc.nasa.gov/)	月, 0.25°

外, 其余数据均采用 2002 ~ 2021 年的。

采用 ArcGIS 软件将 NDVI 数据进行格式和投影转换、拼接和裁剪, 并使用 TIMESAT 软件提取物候数据。根据 1:100 万植被图提取青藏高原草地区域, 并将所有数据统一分辨率为 10 km × 10 km, 作为机器学习模型输入。

1.3 研究方法

1.3.1 物候提取方法

为减少云和积雪等对遥感影像的干扰, 首先通过 Savitzky-Golay (SG) 滤波^[29]对 NDVI 时间序列数据进行平滑处理。然后, 采用动态阈值法^[30]提取植被物候指标, 包括生长季开始时间(SOS)、生长季结束时间(EOS)以及生长季长度(LOS)。该方法已在全球得到了广泛地使用和验证^[31-36], 经反复试验将 SOS 和 EOS 的阈值设置为 0.2, 采用儒略历(1 月 1 日为 1 a 中的第 1 d)来表示上述 3 个物候指标^[33]。动态阈值法的计算公式为:

$$NDVI_{ratio} = \frac{NDVI_t - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1)$$

式中, $NDVI_{ratio}$ 为输出比值, 其第一次超过阈值的时间定义为 SOS, 第一次低于阈值的时间定义为 EOS^[22]。NDVI 为日期 t 的 NDVI 值, $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$ 分别为年度 NDVI 时间序列的最小值和最大值。为消除非植被区域的影响, 本研究提取了年均 NDVI 大于 0.1 的像元^[32,34]。物候的提取主要在 TIMESAT3.3 中完成。

1.3.2 趋势分析方法

采用 Sen's 斜率估计法计算 2002 ~ 2021 年青藏高原草地物候的变化趋势, 并通过 Mann-Kendall 检验方法判断其变化是否显著。Sen's 斜率估计法优点在于可以限制异常值对斜率的影响^[37], 计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (2)$$

式中, median 为取中值函数, β 为物候指标变化趋势斜率。当 $\beta > 0$ 时, 序列值呈增大趋势; 当 $\beta = 0$ 时, 序列值变化趋势不明显; 当 $\beta < 0$ 时, 序列值呈减小趋势。 i 和 j 为年份, $2002 \leq i < j \leq 2021$, x_i 和 x_j 分

别为 i 和 j 时刻的物候指标值。

Mann-Kendall 是一种检验数据是否具有单调趋势的非参数方法, 与 Sen's 斜率估计法结合可以很大程度上避免离群值的干扰^[38]。本研究采用 90% 置信度, 即 $|Z| \geq 1.64$ 时表示通过了显著性检验。趋势分析利用 R v4.2.1 中的“trend”包实现。

1.3.3 物候变化多因素影响分析方法

以往研究表明, 水热条件包括气温、降水以及土壤水分等会直接影响植被物候^[13,25]。考虑到青藏高原海拔高差较大, 导致水热条件的空间异质性强, 会间接影响植被物候^[39]。本研究选择聚焦气温、降水和土壤水分以及海拔等方面, 探究其对青藏高原草地物候的影响。同时, 为进一步明确年内水热条件变化对植被物候的影响, 气温、降水以及土壤水分采用月尺度数据, 具体见表 2。SOS 和 EOS 的影响因素为季前水热条件和海拔, 其中 SOS 的季前为 1 ~ 5 月, EOS 的季前为 6 ~ 11 月, 二者的影响因素都作为 LOS 的影响因素。对于 SOS, 由于青藏高原从前一年 9 月开始不稳定冻结, 到当年 3 月开始不稳定融化^[40], 期间降水多以积雪状态贮存且土壤水分基本保持稳定, 故将该阶段累计降水作为一个预测变量, 土壤水分从 3 月开始作为预测变量。

采用可解释机器学习方法, 通过构建极限梯度提升树(extreme gradient boosting, XGBoost)模型并结合 SHAP(Shapley additive explanations)重要性算法, 量化各影响因素对青藏高原草地物候变化的贡献大小, 并解释不同因素对物候变化的交互影响。XGBoost 是一种兼具线性模型和树模型特点的优化模型, 相较于简单线性统计分析方法, XGBoost 模型可以建立多因素与目标变量之间的非线性关系, 具有训练速度快, 不易过拟合等优点, 被广泛应用于解决各类回归和分类问题^[41]。但是, 它尚存在可解释性较差的缺点, 虽然可以显示预测变量对目标变量的整体影响程度, 但却不能解释预测变量的变化如何影响目标变量^[42]。此时, SHAP 值^[43]可以通过分离每个预测变量对目标变量的边际贡献弥补 XGBoost 模型的缺点^[44]。二者相结合, 不仅可以量化

各个预测变量对目标变量的贡献,还可以分析不同预测变量对目标变量的交互作用.假设第*i*个目标变量的第*j*个预测变量为 x_{ij} ,第*i*个目标变量的模型预测值为 y_i ,所有目标变量预测值的平均值为 y_{base} ,则SHAP值服从如下公式^[41]:

$$y_i = y_{base} + f(x_{i1}) + f(x_{i2}) + f(x_{i3}) + \dots + f(x_{ij}) \quad (3)$$

式中, $f(x_{ij})$ 为第*i*个目标变量的第*j*个预测变量的SHAP值,表示该预测变量对目标变量预测值的边际贡献.SHAP的绝对值反映了预测变量对模型预测

的影响程度,可用于影响因素的重要性排名,绝对值越大,说明该影响因素对植被物候的影响越大.当 $f(x_{ij}) > 0$ 时,说明预测变量对模型预测起正向作用,即影响因素值增大会促进物候指标值增大;反之,当 $f(x_{ij}) < 0$ 时,说明该预测变量对模型预测有负面影响,即影响因素值增大会导致物候指标值减小.

将3个物候指标作为目标变量,相应的影响因素作为预测变量分别训练XGBoost模型,然后使用

表2 青藏高原草地物候影响因子¹⁾

Table 2 Factors influencing grassland phenology on the Qinghai-Xizang Plateau

变量类型	变量名称	变量含义	SOS	EOS	LOS	
高程/m	elev	高程	√	√	√	
降水/mm	P_last09 ~ now03	季前(上一年9月至当年3月)累计降水	√	—	√	
	P_now_04	4月降水	√	—	√	
	P_now_05	5月降水	√	—	√	
	P_now_06	6月降水	—	√	√	
	P_now_07	7月降水	—	√	√	
	P_now_08	8月降水	—	√	√	
	P_now_09	9月降水	—	√	√	
	P_now_10	10月降水	—	√	√	
	P_now_11	11月降水	—	√	√	
	土壤水分/kg·m ⁻²	SM0 ~ 10_now_03	3月0 ~ 10 cm 土壤水分	√	—	√
		SM0 ~ 10_now_04	4月0 ~ 10 cm 土壤水分	√	—	√
SM0 ~ 10_now_05		5月0 ~ 10 cm 土壤水分	√	—	√	
SM0 ~ 10_now_06		6月0 ~ 10 cm 土壤水分	—	√	√	
SM0 ~ 10_now_07		7月0 ~ 10 cm 土壤水分	—	√	√	
SM0 ~ 10_now_08		8月0 ~ 10 cm 土壤水分	—	√	√	
SM0 ~ 10_now_09		9月0 ~ 10 cm 土壤水分	—	√	√	
SM0 ~ 10_now_10		10月0 ~ 10 cm 土壤水分	—	√	√	
SM0 ~ 10_now_11		11月0 ~ 10 cm 土壤水分	—	√	√	
SM10 ~ 40_now_03		3月10 ~ 40 cm 土壤水分	√	—	√	
SM10 ~ 40_now_04		4月10 ~ 40 cm 土壤水分	√	—	√	
SM10 ~ 40_now_05		5月10 ~ 40 cm 土壤水分	√	—	√	
SM10 ~ 40_now_06		6月10 ~ 40 cm 土壤水分	—	√	√	
SM10 ~ 40_now_07		7月10 ~ 40 cm 土壤水分	—	√	√	
SM10 ~ 40_now_08		8月10 ~ 40 cm 土壤水分	—	√	√	
SM10 ~ 40_now_09		9月10 ~ 40 cm 土壤水分	—	√	√	
SM10 ~ 40_now_10		10月10 ~ 40 cm 土壤水分	—	√	√	
SM10 ~ 40_now_11		11月10 ~ 40 cm 土壤水分	—	√	√	
气温/°C		T_now_01	1月温度	√	—	√
	T_now_02	2月温度	√	—	√	
	T_now_03	3月温度	√	—	√	
	T_now_04	4月温度	√	—	√	
	T_now_05	5月温度	√	—	√	
	T_now_06	6月温度	—	√	√	
	T_now_07	7月温度	—	√	√	
	T_now_08	8月温度	—	√	√	
	T_now_09	9月温度	—	√	√	
	T_now_10	10月温度	—	√	√	
	T_now_11	11月温度	—	√	√	

1)“√”表示选择该因素作为相应物候指标的影响因素,“—”表示该因素不作为相应物候指标的影响因素,SOS、EOS和LOS影响因素数量分别为15、25和39

SHAP 值量化每个因素对物候的边际贡献. 通过 SHAP 重要性算法(每个预测变量的 SHAP 值的绝对平均值)对影响因素的重要性进行排序, 确定主要影响因素后利用 SHAP 值分析其对物候的影响及其交互效应. XGBoost 模型利用 python3.7 中 Scikit-learn 机器学习库的“xgboost”函数来构建. SHAP 分析通过 python3.7 中“shap”包计算.

2 结果与分析

2.1 青藏高原草地物候时空变化特征

2.1.1 草地生长期开始时间时空变化

2002 ~ 2021 年青藏高原草地 SOS 的时空变化结果如图 2 所示. 结果显示, 草地 SOS 多年均值在第 127 d, 其中 71.18% 草地 SOS 分布在第 110 ~ 150 d 之间, 说明其多在 4 月下旬至 5 月末开始进入生长季. 空间上, SOS 差异显著, 自东向西大体呈逐渐推迟的态势, 多年均值在东部地区多在第 120 d 之前, 而在西部则推迟到第 140 d 之后, 见图 2(a). 近 20 年间, 超半数(56.32%)的草地 SOS 呈提前趋势[图 2(b)], 提前速率均值为 $0.47 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$, 主要发生在青藏高原的东部. 其中, 有 11.14% 的草地 SOS 出现显著提前[图 2(c), $P < 0.1$]. 43.68% 的草地 SOS 出现推迟, 平均每年延迟 0.48 d, 主要位于青藏高原西南地区, 其中 8.71% 表现出显著性($P < 0.1$).

2.1.2 草地生长期结束时间时空变化

2002 ~ 2021 年青藏高原草地 EOS 的时空变化计

算结果见图 3. 青藏高原草地 EOS 多年均值在第 303 d, 其中 81.58% 草地 EOS 分布在第 290 ~ 320 d 之间, 说明青藏高原大部分草地到 10 月下旬至 11 月中旬生长季结束. 空间上, 表现出从中部向四周逐渐推迟的趋势, 中部地区的 EOS 多年均值在第 280 d 左右, 西部和东部地区推迟到第 310 d 之后, 见图 3(a). 20 年间有 67.65% 的草地表现出 EOS 延迟的趋势[图 3(b)], 平均延迟速率约为 $0.58 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中 18.96% 的区域显著延迟[图 3(c), $P < 0.1$]. EOS 提前前的草地中仅有 7.33% 表现出显著性, 平均每年提前 0.43 d.

2.1.3 草地生长季长度时空变化

2002 ~ 2021 年青藏高原草地 LOS 时空变化计算结果见图 4. 青藏高原草地 LOS 多年均值为 176 d, 其中 92.73% 的草地多年均值在 120 ~ 210 d 之间. 空间上, LOS 呈现出自东向西逐渐缩短的趋势, 在东部地区多在第 190 d 之上, 而在西部则缩短到不足 150 d, 见图 4(a). 青藏高原有 65.50% 的草地 LOS 表现出延长趋势[图 4(b)], 平均延长速率为 $0.94 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中 18.15% 的区域表现出显著延长[图 4(c), $P < 0.1$].

2.2 青藏高原草地物候影响因素分析

本研究利用 SHAP 值对 XGBoost 模型的结果进行了解释, 图 5 显示了影响物候最重要的 15 个因素. 进一步, 研究选择对物候影响重要性排名前 25% 的因素作为主导因素进行重点分析. 3 月的表层土壤水分对青藏高原草地 SOS 影响最大[图 5(a)], 其次是

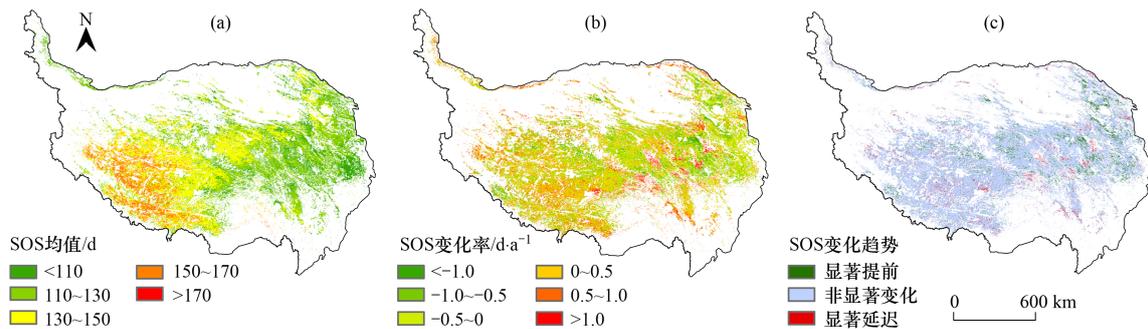


图 2 2002 ~ 2021 年青藏高原草地 SOS 时空变化趋势

Fig. 2 Spatial and temporal trends in grassland SOS on the Qinghai-Xizang Plateau from 2002 to 2021

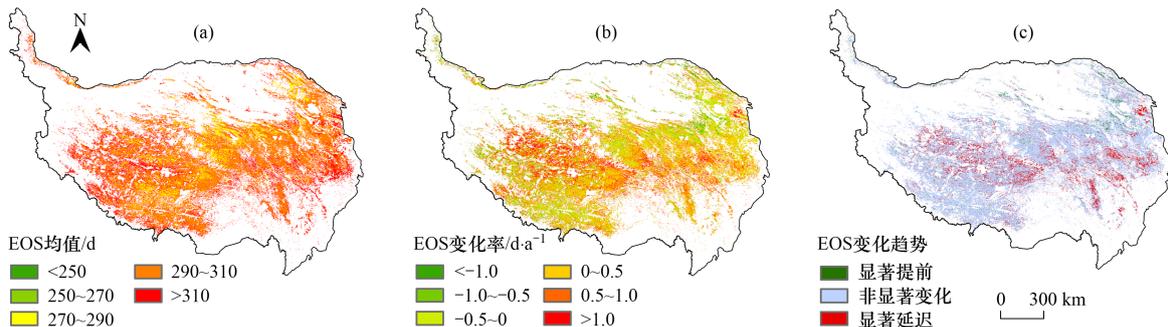


图 3 2002 ~ 2021 年青藏高原草地 EOS 时空变化趋势

Fig. 3 Spatial and temporal trends in grassland EOS on the Qinghai-Xizang Plateau from 2002 to 2021

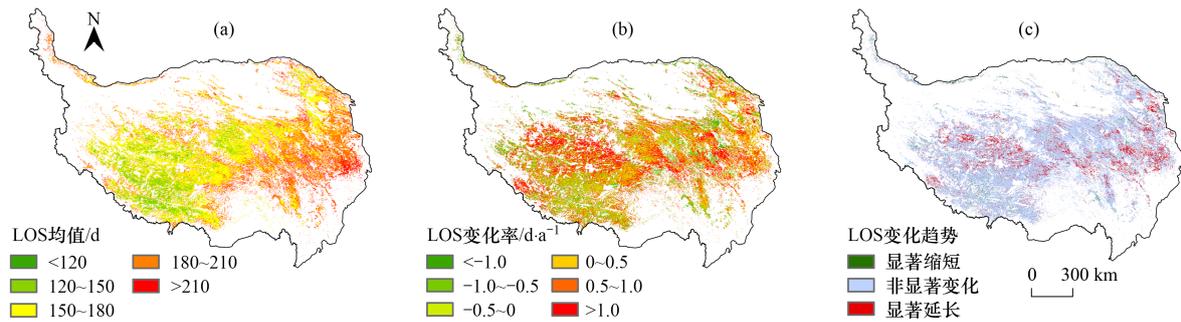


图4 2002~2021年青藏高原草地LOS时空变化趋势

Fig. 4 Spatial and temporal trends in grassland LOS on the Qinghai-Xizang Plateau from 2002 to 2021

5月的降水量、海拔以及冻结期的降水量,如图6(a)所示,3月表层土壤水分高、5月降水量大、海拔低以及冻结期降水量大都会促进青藏高原草地SOS的提前(SHAP值为负);EOS主要是由温度决定的[图5(b)],对其影响最大的因素是9月和10月的温度,其次是海拔、7月表层(0~10 cm)土壤水分、9月10~40 cm土壤水分以及6月降水量,如图6(b)所示,SHAP值为正代表影响因素会促进EOS延迟,温度(9月和10月)高、海拔低、生长季前期水分(7月表层土壤水分、6月降水)低、以及9月10~40 cm水分高都会促进EOS延迟.LOS的前3位影响因素与SOS较为一致[图5(c)],影响较大的依次是3月表层(0~10 cm)土壤水分、海拔、冻结期降水、11月温度、11月降水、8月降水、10月温度、2月温度、5月降水以及3月温度,如图6(c)所示,SHAP值为正表示会促进LOS延长,海拔高和生长季前温度(2月和3月)低会导致LOS缩短,其他影响因素值高会促进LOS延长.

笔者观察到影响因素对SOS的影响存在明显的阈值效应,如图7(a)所示,当3月的表层土壤水分大于 $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,对SOS的提前由抑制转为促进作用(SHAP值由正转负),并在土壤水分为 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右时促进作用达到最大,而随着土壤水分进一步增加,其促进作用开始减弱;相似地,5月降水量在 $0\sim 12 \text{ mm}$ 时,降水越多对SOS的推迟作用越强,而当降水超过 12 mm ,则该推迟作用开始减弱并在降水达到 35 mm 时开始促进SOS提前,降水量达到 65 mm 时促进作用达到了最大[图7(b)].海拔高于 4500 m 时会使得SOS推迟,在 5000 m 时这种影响到达峰值[图7(c)].冻结期累计降水高于 110 mm 时,开始促进SOS的提前,但这种促进作用在累计降水超过 250 mm 时变得不确定[图7(d)].

主导因素变化对EOS的影响结果见图8,整体来看,生长季晚期(9月和10月)温度高,会促进EOS的延迟[图8(a)和8(b)].温度在9月高于 5°C 以

及在10月高于 -3°C 都会促进EOS延迟,但这种促进作用是有限的,当9月温度达到 8°C 或10月温度达到 -0.5°C 时,其对EOS延迟的促进作用达到最大且继续升温会保持不变.海拔对EOS的影响不确定性较大,存在明显的垂直分散[图8(c)].7月表层土壤水分低($< 22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)以及9月10~40 cm深度土壤水分高($> 85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)会促进EOS延迟[图8(d)和8(e)],9月土壤水分在 $85\sim 100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间时对EOS的影响变化剧烈.生长季前期6月降水高于 130 mm 时会促进EOS延迟[图8(f)].

主导因素对LOS的影响结果见图9,3月表层土壤水分在 $15\sim 25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间时会促进LOS延迟,这种促进作用在 $18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时达到峰值[图9(a)].海拔低于 4000 m 会促进LOS的延长[图9(b)].通常来说,较高的降水会促进LOS的延长[图9(c)~9(f)].季前冻结期(上一年9月至当年3月)累计降水达到 100 mm ,5月降水达到 50 mm ,8月降水达到 80 mm 以及生长季结束时(11月)的降水达到 5 mm 都会促进LOS的延长.生长季结束时(10~11月)温度越高越有利于LOS延长[图9(g)和9(h)],10月温度达到 -2°C 或者11月温度达到 -7°C 由抑制LOS延长转为促进.而生长季开始前(2~3月)温度低反而有利于LOS的延长[图9(i)和9(j)].

2.3 青藏高原草地物候主导因素的交互影响

本研究认为降水、气温、土壤水分和地形等因素对青藏高原草地物候存在交互影响,共同控制物候的改变.为此,以对物候变化贡献较高的主导因素为基础因子,同时在其它主导因素中任选一个作为交互因子,组成因子组,探讨双主导因素对物候的交互影响.本研究过程中发现并非所有影响因素之间都存在交互作用,故以下仅展示分析存在明显交互作用的因素对物候的影响.

多因素影响SOS的交互效应图见图10.可以看出,当3月表层土壤水分达到 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右时,与其它主导因素的交互作用会对SOS变化起到显著

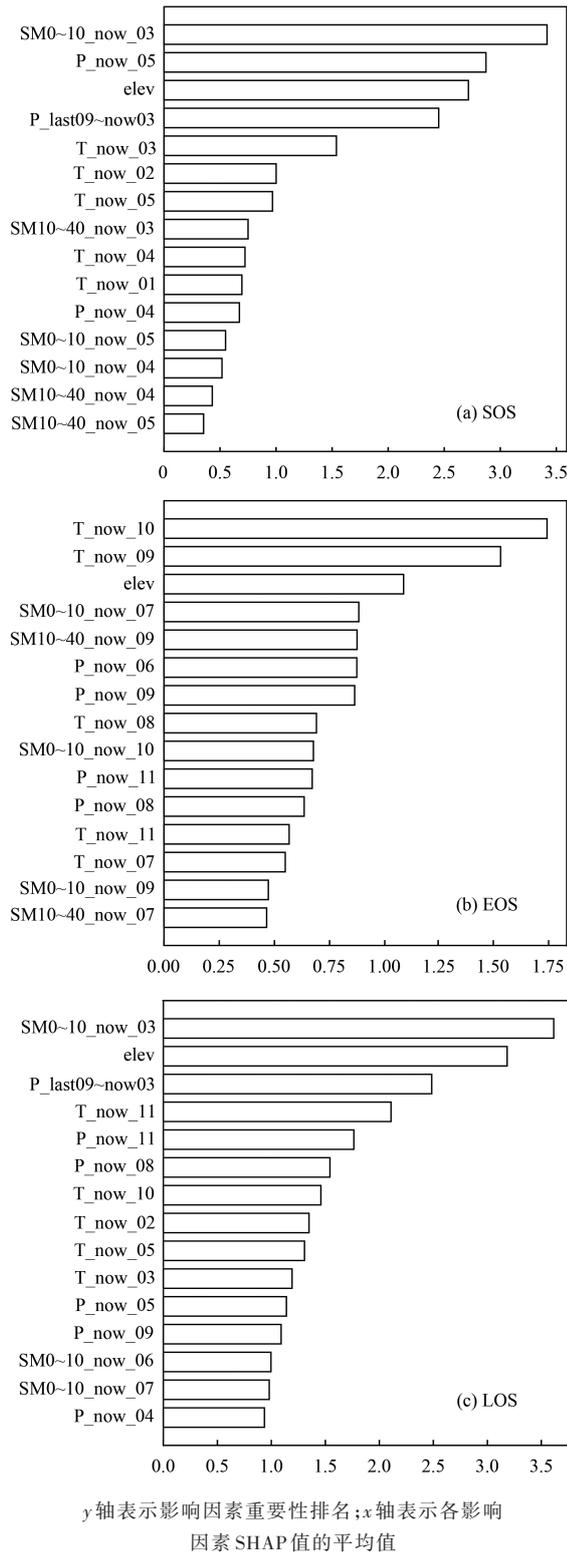


图5 根据均值(|SHAP值|)对前15个因素的重要性排序
 Fig. 5 Importance ranking of the top 15 variables according to the mean (|SHAP value|)

影响. 其中, 5月降水和冻结期降水与3月表层土壤水分对SOS的交互影响相似[图10(a)和10(b)], 即当土壤水分达到 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右时, 低降水量反而会促进SOS提前, 也就是说, 过高和过低的水分条件都不利于SOS提前. 另外当3月土壤水分超过20

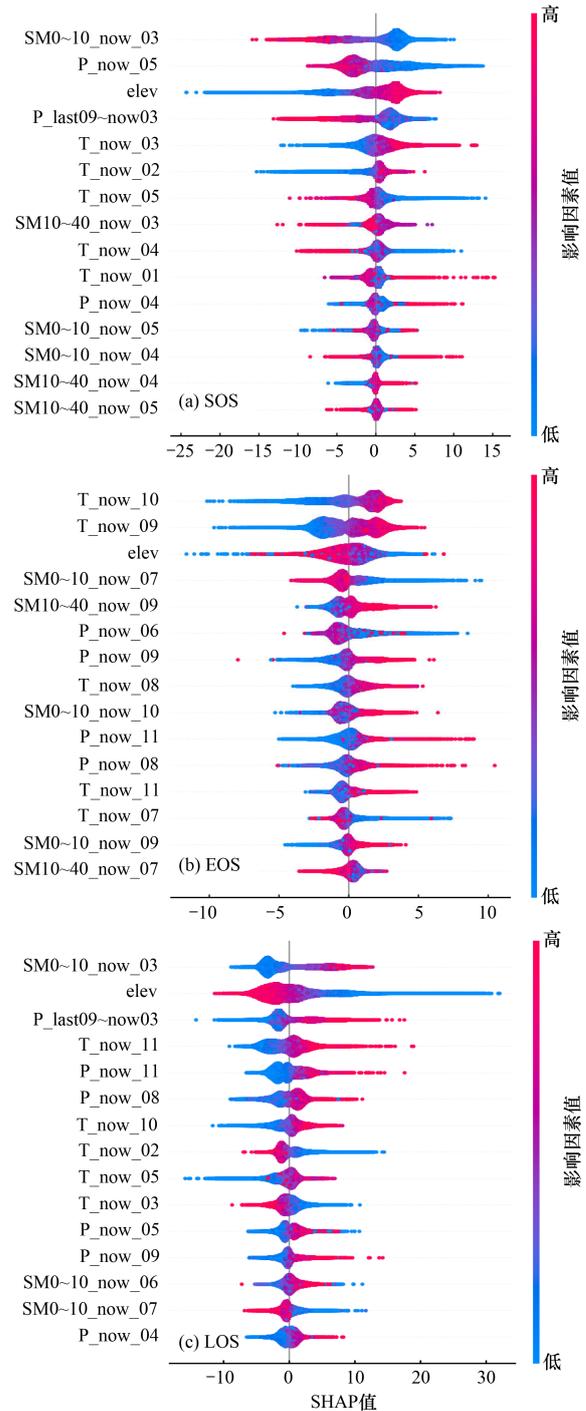
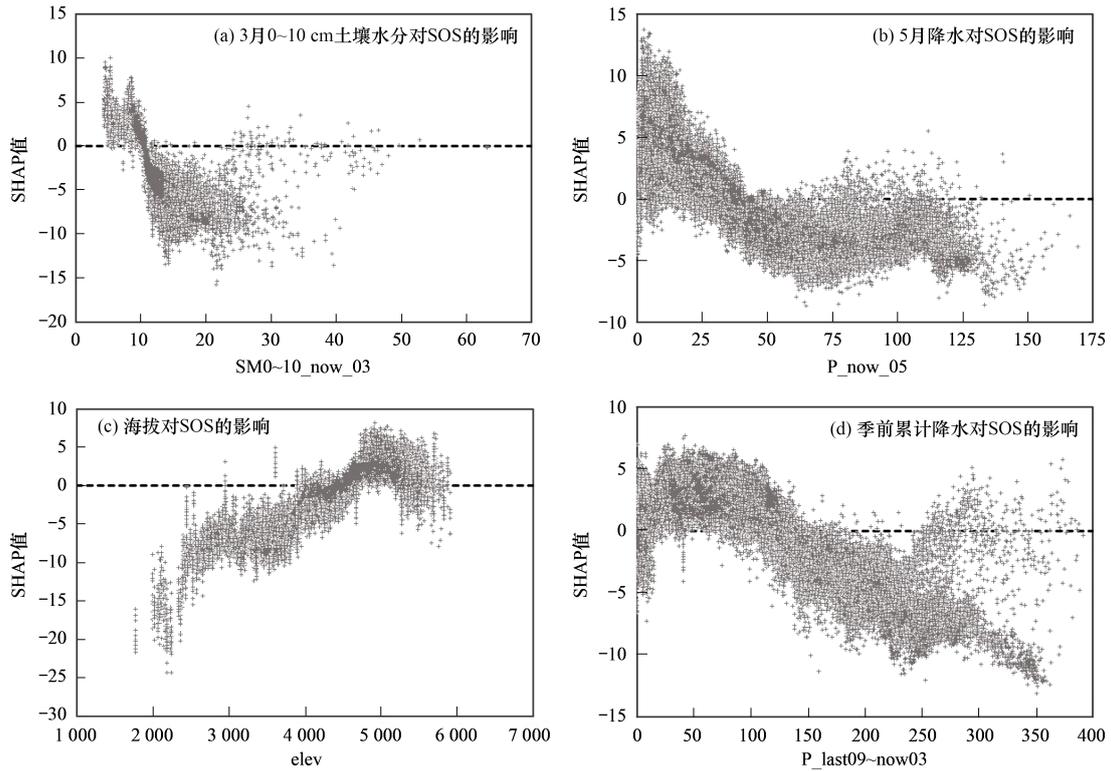


图6 输入变量对物候的影响
 Fig. 6 Influence of input variables on phenology

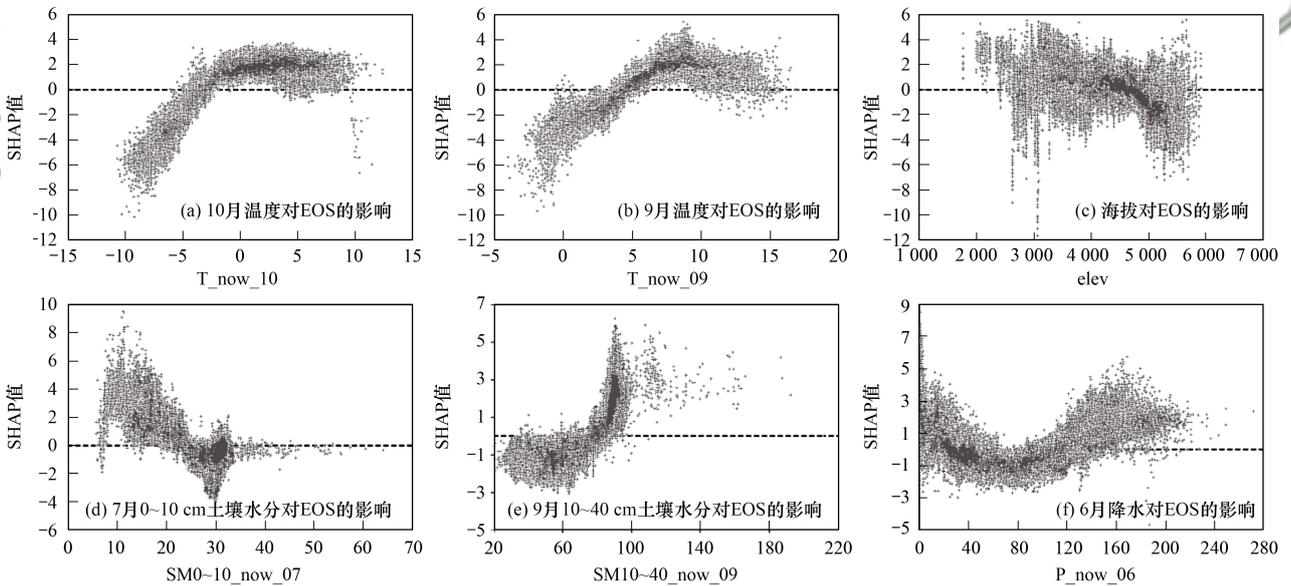
$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 低海拔地区相较于高海拔地区土壤水分对SOS提前的促进作用更强[图10(c)]. 如图10(d)~10(f)所示, 当冻结期降水在50~110 mm时, 3月表层土壤水分高、5月降水量大以及海拔低的地区SOS推迟效应更加显著, 而当冻结期降水高于250 mm后, 较好的降水条件和较低的海拔会增强其对SOS



散点表示横坐标上影响因素对应的SHAP值;虚线为SHAP值为零的线

图7 XGBoost(SOS)的SHAP依赖关系

Fig. 7 SHAP dependency plot for XGBoost (SOS)



散点表示横坐标上影响因素对应的SHAP值;虚线为SHAP值为零的线

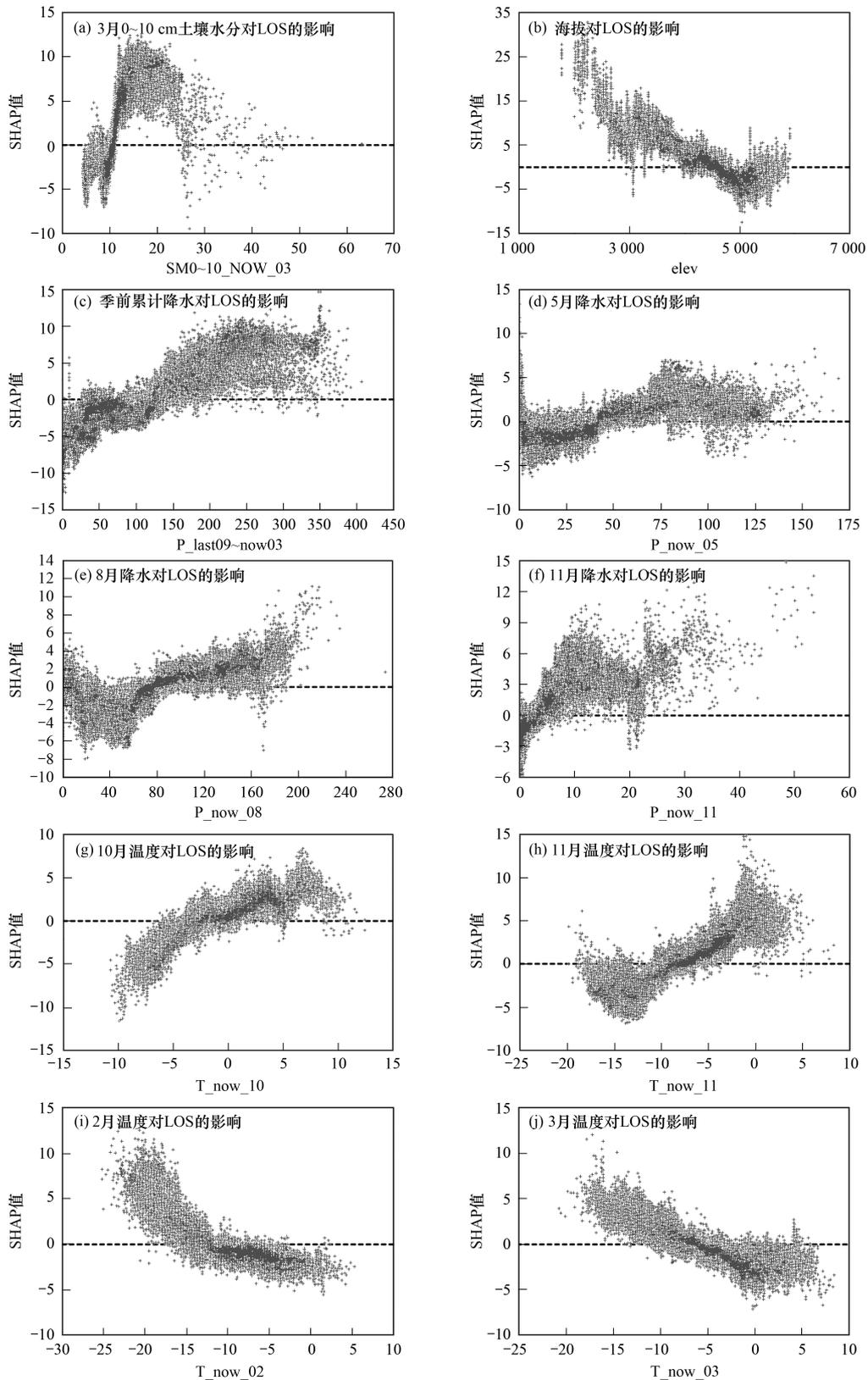
图8 XGBoost(EOS)的SHAP依赖关系

Fig. 8 SHAP dependency plot for XGBoost (EOS)

提前的促进作用.

如图 11(a) ~ 11(c)所示, 温度对 EOS 的影响明显受到水分条件的调控. 10月温度低于 -3°C 时会抑制 EOS 的延迟, 且水分较高时抑制作用更强; 当 10月温度高于 0°C , 6月降水量大、7月表层土壤水分高以及 9月 10 ~ 40 cm 土壤水分高的地区对 EOS 延迟

的促进作用更强. 同样地, 海拔对 EOS 的影响表现出明显的垂直分散[图 11(d) ~ 11(f)], 在 3 000 ~ 4 500 m 之间, 6月降水、7月表层土壤水分高以及 9月 10 ~ 40 cm 土壤水分高会促进 EOS 延迟. 6月降水对 EOS 的影响受到温度调节[图 11(g)和 11(h)], 6月降水量低于 75 mm 时, 9月和 10月温度越高, 对



散点表示横坐标上影响因素对应的SHAP值;虚线为SHAP值为零的线

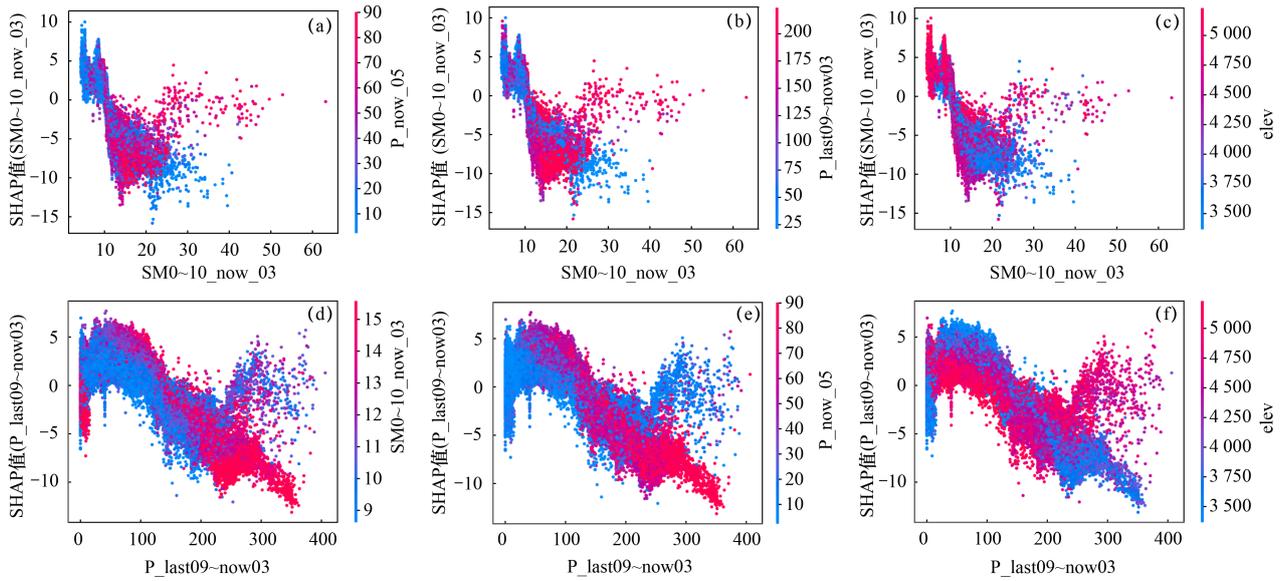
图9 XGBoost(LOS)的SHAP依赖关系

Fig. 9 SHAP dependency plot for XGBoost (LOS)

EOS延迟的促进作用越强;6月降水量超过75 mm后,9、10月温度较低的地区EOS更延迟.除此之外,6月降水量较大时,7月表层土壤水分对EOS几

乎无影响[图11(i)].

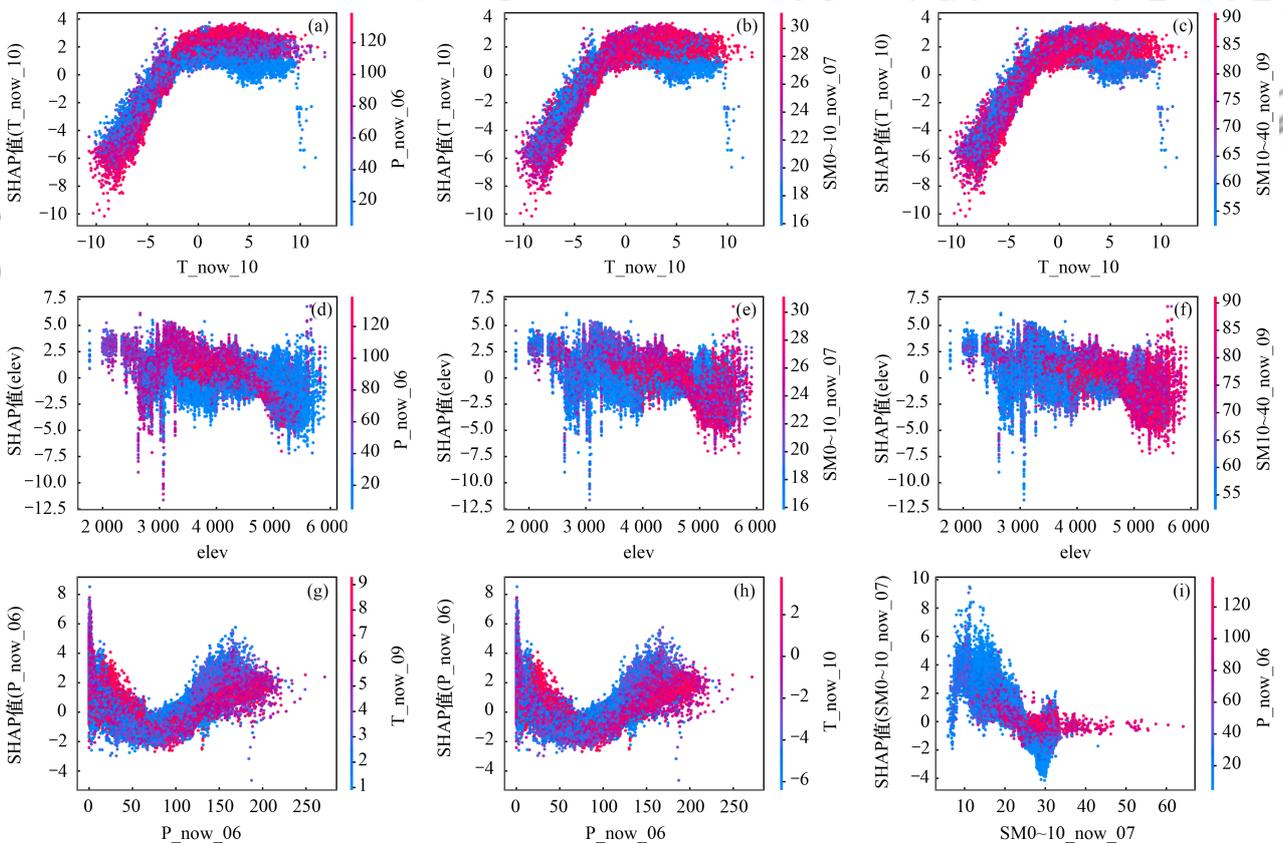
降水、海拔和温度都会影响LOS对土壤水分的响应[图12(a)~12(d)].3月表层土壤水分在12~22



(a)3月0~10 cm 土壤水分与5月降水对SOS的交互影响,(b)3月0~10 cm 土壤水分与季前累计降水对SOS的交互影响,(c)3月0~10 cm 土壤水分与海拔对SOS的交互影响,(d)季前累计降水与3月0~10 cm 土壤水分对SOS的交互影响,(e)季前累计降水与5月降水对SOS的交互影响,(f)季前累计降水与海拔对SOS的交互影响,散点表示横坐标上影响因素在产生交互作用的其他因素影响下对应的SHAP值;色柱表示与横坐标上影响因素产生交互作用的因素取值

图 10 多因素影响 SOS 的交互效应

Fig. 10 Interaction effects of multiple factors affecting SOS



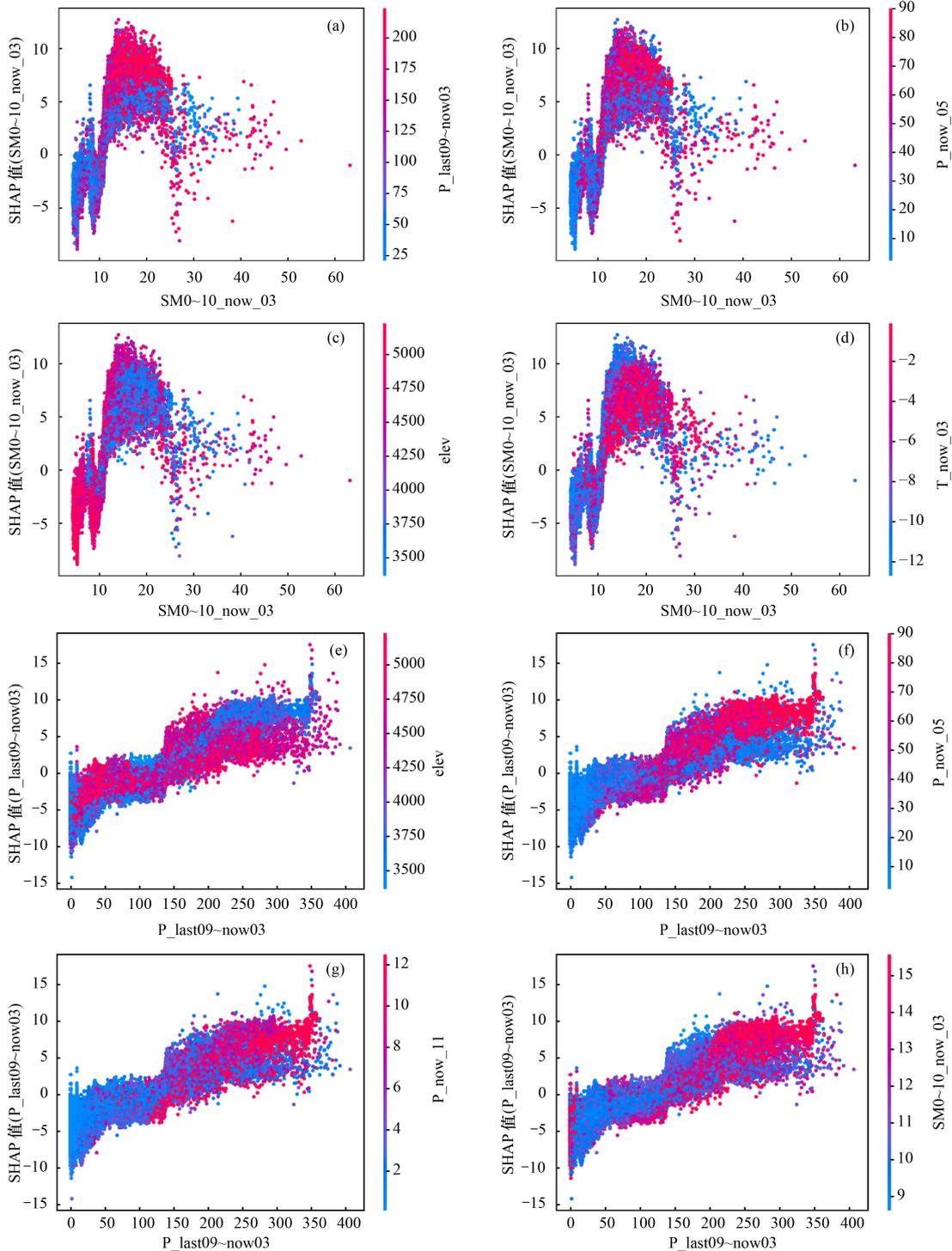
(a)10月温度与6月降水对EOS的交互影响,(b)10月温度与7月0~10 cm 土壤水分对EOS的交互影响,(c)10月温度与9月10~40 cm 土壤水分对EOS的交互影响,(d)海拔与6月降水对EOS的交互影响,(e)海拔与7月0~10 cm 土壤水分对EOS的交互影响,(f)海拔与9月10~40 cm 土壤水分对EOS的交互影响,(g)6月降水与9月温度对EOS的交互影响,(h)6月降水与10月温度对EOS的交互影响,(i)7月0~10 cm 土壤水分与6月降水对EOS的交互影响,散点表示横坐标上影响因素在产生交互作用的其他因素影响下对应的SHAP值;色柱表示与横坐标上影响因素产生交互作用的因素取值

图 11 多因素影响 EOS 的交互效应

Fig. 11 Interaction effects of multiple factors affecting EOS

kg·m⁻²之间时, 季前冻结期和生长季开始时的高降水更有利于 LOS 的延长, 但在土壤水分超过 25 kg·m⁻²之后, 过高的水分条件导致了 LOS 缩短[图 12 (a)和 12(b)]. 海拔和温度的影响较为一致, 土壤水分在 17 ~ 22 kg·m⁻²之间时, 高温和低海拔条件下其对 LOS 延长的促进作用更大[图 12(c)和 12(d)]. 冻

结期降水满足促进 LOS 延长的条件后(高于 100 mm), 海拔和水分条件会对其促进作用大小产生影响[图 12(e)和 12(h)]. 海拔低的地区季前降水对 LOS 延长的促进作用更大[图 12(e)]. 生长季开始时降水(5月)和结束时降水(11月)较高更有利于 LOS 的延长[图 12(f)和 12(g)]. 3月表层土壤水分高也会增强



(a)3月0~10 cm 土壤水分与季前累计降水对 LOS 的交互影响, (b)3月0~10 cm 土壤水分与5月降水对 LOS 的交互影响, (c)3月0~10 cm 土壤水分与海拔对 LOS 的交互影响, (d)3月0~10 cm 土壤水分与3月温度对 LOS 的交互影响, (e)季前累计降水与海拔对 LOS 的交互影响, (f)季前累计降水与5月降水对 LOS 的交互影响, (g)季前累计降水与11月降水对 LOS 的交互影响, (h)季前累计降水与3月0~10 cm 土壤水分对 LOS 的交互影响, 散点表示横坐标上影响因素在产生交互作用的其他因素影响下对应的 SHAP 值; 色柱表示与横坐标上影响因素产生交互作用的因素取值

图 12 多因素影响 LOS 的交互效应

Fig. 12 Interaction effects of multiple factors affecting LOS

季前降水对 LOS 延长的促进作用[图 12(h)].

3 讨论

基于 2002 ~ 2021 年青藏高原草地物候时空变化趋势结果, 整体上表现出 SOS 提前, EOS 延迟以及 LOS 延长的趋势, 这与已有的研究结果基本一致^[5, 13, 34, 45-49]. 本研究以海拔、气候条件和土壤水分条件作为预测变量, 物候作为目标变量构建 XGBoost 模型并使用 SHAP 法对模型结果进行了解释, 以探究影响青藏高原草地物候变化的主导因素以及其交互效应. 模型结果表明, 青藏高原草地 SOS 主要是由水分条件驱动, 3 月表层土壤水分对 SOS 影响最大, 这可能是因为 3 月表层冻土已经开始不稳定融化^[40], 底层冻土尚且处于冻结状态, 表层充足的水分保证了植被根系的生长活动. Wang 等^[45]的研究证明了冻土融化对物候的影响, 同时表明季前降水是影响物候的重要因素, 这与本研究的结果一致. 季前冻结期充足的降水为植被萌发提供了保障, 但过量的水分会对植被生长产生反作用. 青藏高原草地 SOS 主要是在 5 月, 该月充足的降水 (≥ 35 mm) 保证了植被的提前萌发. 水分的驱动作用还受到海拔的限制, 高海拔地区即使水分充足 SOS 也会较为延后, 这可能与高海拔地区温度较低有关^[31, 50]. EOS 的影响因素较多, 整体是由温度条件驱动, 受到水分条件限制, 这与先前的研究结果基本一致^[4, 8, 23, 47]. 季前温度是青藏高原草地 EOS 的主要影响因素, 较高的温度有利于 EOS 的延迟, 但这种作用在温度高于阈值时受到了限制, 可能是因为植被绿化造成生长季晚期的水分胁迫^[51], 水分条件已经无法满足植被生长的需求. Li 等^[47]的研究发现夏季植被生长旺盛往往会诱发更早的植被休眠, 所以在植被生产力较高的区域应加强管理, 适度放牧^[46, 52]. LOS 的主要影响因素与 SOS 较为一致, 整体而言水分条件对生长季的影响更大, 当水分满足条件后, 海拔和温度会对其影响程度产生调控作用.

本研究考虑了海拔、气温、降水以及土壤水分等因素, 定量解释了其对青藏高原草地物候变化的影响, 为进一步探究草地变化对气候的反馈作用以及对水碳循环的影响奠定了基础, 并为青藏高原生态恢复和放牧管理措施制定提供了理论支撑. 青藏高原范围广, 水文气候地貌条件具有空间异质性, 因此不同地区物候变化特征和主导因素可能有所差别, 且当前考虑的因素可能依然未能完整解释青藏高原草地物候的变化^[48, 50, 53]. 未来应考虑纳入更多的影响因素, 根据物候变化的空间差异将青藏高原划分为多个特征相似的区域开展分区研究, 提高成果

的针对性和精细度.

4 结论

(1) 青藏高原草地 SOS 多在第 110 ~ 150 d 之间, 有 56.32% 的草地表现出 SOS 提前趋势, 提前速率约为 $0.47 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; EOS 多在第 290 ~ 320 d 之间, 有 67.65% 的草地表现出 EOS 延迟趋势, 平均延迟速率约为 $0.58 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; LOS 多在第 120 ~ 210 d 之间, 有 65.50% 的草地表现出 LOS 延长趋势, 平均延长速率为 $0.94 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$;

(2) 水热等因素对物候指标的影响存在明显阈值和峰值效应. 青藏高原草地 SOS 主要受水分条件影响, 3 月表层土壤水分在 $10 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间时会促进 SOS 提前并在 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右时促进作用达到峰值; EOS 主要受温度影响, 生长季晚期 9 月和 10 月温度分别达到 5°C 和 -3°C 后其对 EOS 延迟的抑制作用转为促进作用, 分别高于 8°C 和 -0.5°C 时, 其促进作用达到峰值; LOS 的主要影响因素与 SOS 较为一致, 3 月表层土壤水分在 $15 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间会促进 LOS 延长, 在 $18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右达到峰值, 通常降水量越大越促进 LOS 延长.

(3) 影响青藏高原草地物候的因素之间存在明显的交互效应. 3 月表层土壤水分达到 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 后低降水和低海拔地区其对 SOS 提前的促进作用更强; 10 月温度高于 0°C 后较好的水分条件更有利于 EOS 延迟; 3 月表层土壤水分在 $12 \sim 22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间时, 高降水相对于低降水更有利于 LOS 延长, 季前降水量达到 100 mm 后, 在海拔低、水分条件充足的区域其对 LOS 延长的促进作用更大.

参考文献:

- [1] Yao T D, Xue Y K, Chen D L, *et al.* Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, **100**(3): 423-444.
- [2] Li P, Liu Z L, Zhou X L, *et al.* Combined control of multiple extreme climate stressors on autumn vegetation phenology on the Tibetan Plateau under past and future climate change [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, **308-309**, doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108571.
- [3] Shen M G, Piao S L, Dorji T, *et al.* Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau: research status and challenges [J]. *National Science Review*, 2015, **2**(4): 454-467.
- [4] An S, Chen X Q, Zhang X Y, *et al.* Precipitation and minimum temperature are primary climatic controls of alpine grassland autumn phenology on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3): 431.
- [5] Zheng Z T, Zhu W Q, Chen G S, *et al.* Continuous but diverse advancement of spring-summer phenology in response to climate warming across the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and*

- Forest Meteorology, 2016, **223**: 194-202.
- [6] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, *et al.* Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, **110**(11): 4309-4314.
- [7] Zhu W Q, Jiang N, Chen G S, *et al.* Divergent shifts and responses of plant autumn phenology to climate change on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, **239**: 166-175.
- [8] Sun Q L, Chen G C, Li B L, *et al.* Multiple factors induce temporal shifts in herbaceous plant leaf senescence dates on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, **334**, doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109441.
- [9] Piao S L, Liu Z, Wang T, *et al.* Weakening temperature control on the interannual variations of spring carbon uptake across northern lands [J]. Nature Climate Change, 2017, **7**(5): 359-363.
- [10] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, *et al.* Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, **169**: 156-173.
- [11] Piao S L, Liu Q, Chen A P, *et al.* Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges [J]. Global Change Biology, 2019, **25**(6): 1922-1940.
- [12] Cheng M, Wang Y, Zhu J X, *et al.* Precipitation dominates the relative contributions of climate factors to grasslands spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2022, **14**(3), doi: 10.3390/rs14030517.
- [13] Shen M G, Wang S P, Jiang N, *et al.* Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, **3**(10): 633-651.
- [14] Xu C Y, Liu D, Wang X Y, *et al.* Shifting from a thermal-constrained to water-constrained ecosystem over the Tibetan Plateau [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, **14**, doi: 10.3389/fpls.2023.1125288.
- [15] Shen M G, Piao S L, Cong N, *et al.* Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2015, **21**(10): 3647-3656.
- [16] Ma P F, Zhao J X, Zhang H Z, *et al.* Increased precipitation leads to earlier green-up and later senescence in Tibetan alpine grassland regardless of warming [J]. Science of the Total Environment, 2023, **871**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162000.
- [17] Chen Z G, Shen M G, Jiang N, *et al.* Daytime warming strengthened delaying effect of precipitation on end of the vegetation growing season on the Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2023, **892**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164382.
- [18] 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 等. 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究 [J]. 环境科学, 2023, **44**(1): 323-335.
- Xu Y, Dai Q Y, Huang W T, *et al.* Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in Southwest China from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023, **44**(1): 323-335.
- [19] Wu K, Chen J H, Yang H, *et al.* Spatiotemporal variations in the sensitivity of vegetation growth to typical climate factors on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Remote Sensing, 2023, **15**(9), doi: 10.3390/rs15092355.
- [20] Wang C Y, Wang J N, Wang X F, *et al.* Phenological changes in alpine grasslands and their influencing factors in seasonally frozen ground regions across the Three Parallel Rivers Region, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, **9**, doi: 10.3389/feart.2021.797928.
- [21] Che M, Chen B, Innes J L, *et al.* Spatial and temporal variations in the end date of the vegetation growing season throughout the Qinghai-Tibetan Plateau from 1982 to 2011 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, **189-190**: 81-90.
- [22] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 等. 1982-2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响 [J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 39-52.
- Kong D D, Zhang Q, Huang W L, *et al.* Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 39-52.
- [23] Wang X Y, Wu C Y, Liu Y, *et al.* Earlier leaf senescence dates are constrained by soil moisture [J]. Global Change Biology, 2023, **29**(6): 1557-1573.
- [24] 徐丽娇, 胡泽勇, 赵亚楠, 等. 1961—2010 年青藏高原气候变化特征分析 [J]. 高原气象, 2019, **38**(5): 911-919.
- Xu L J, Hu Z Y, Zhao Y N, *et al.* Climate change characteristics in Qinghai-Tibetan Plateau during 1961-2010 [J]. Plateau Meteorology, 2019, **38**(5): 911-919.
- [25] 管琪卉, 丁明军, 张华敏. 青藏地区高寒草地春季物候时空变化及其对气候变化的响应 [J]. 山地学报, 2019, **37**(5): 639-648.
- Guan Q H, Ding M J, Zhang H M. Spatiotemporal variation of spring phenology in alpine grassland and response to climate changes on the Qinghai-Tibet, China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(5): 639-648.
- [26] Chen X Q, An S, Inouye D W, *et al.* Temperature and snowfall trigger alpine vegetation green-up on the world's roof [J]. Global Change Biology, 2015, **21**(10): 3635-3646.
- [27] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系 [J]. 植物生态学报, 2006, **30**(1): 1-8.
- Yang Y H, Piao S L. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, **30**(1): 1-8.
- [28] 王立景, 肖焱, 孔令桥, 等. 青藏高原草地承载力空间演变特征及其预警 [J]. 生态学报, 2022, **42**(16): 6684-6694.
- Wang L J, Xiao Y, Kong L Q, *et al.* Spatiotemporal patterns and early-warming of grassland carrying capacity in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(16): 6684-6694.
- [29] Chen J, Jönsson P, Tamura M, *et al.* A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, **91**(3-4): 332-344.
- [30] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT - a program for analyzing time-series of satellite sensor data [J]. Computers & Geosciences, 2004, **30**(8): 833-845.
- [31] 王泰华, 杨大文. 2001—2020 年三江源冻土区植被物候变化特征分析 [J]. 冰川冻土, 2023, **45**(2): 711-723.
- Wang T H, Yang D W. Variation characteristics of vegetation phenology during 2001-2020 on frozen ground zone of the Three Rivers Source Region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, **45**(2): 711-723.
- [32] 赵心睿, 刘冀, 杨少康, 等. 北方地区典型林草地物候时空变化特征及其对气象因子的响应 [J]. 生态学报, 2023, **43**(9): 3744-3755.
- Zhao X R, Liu J, Yang S K, *et al.* Spatio-temporal variations of typical woodland and grassland phenology and its response to meteorological factors in Northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(9): 3744-3755.
- [33] 何宝忠, 丁建丽, 李焕, 等. 新疆植被物候时空变化特征 [J].

- 生态学报, 2018, **38**(6): 2139-2155.
- He B Z, Ding J L, Li H, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang from 2001 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(6): 2139-2155.
- [34] Liu X G, Chen Y N, Li Z, *et al.* Driving forces of the changes in vegetation phenology in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(23), doi: 10.3390/rs13234952.
- [35] Wang J, Liu D S. Vegetation green-up date is more sensitive to permafrost degradation than climate change in spring across the northern permafrost region [J]. *Global Change Biology*, 2022, **28**(4): 1569-1582.
- [36] 常清, 王思远, 孙云晓, 等. 青藏高原典型植被生长季遥感模型提取分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2014, **16**(5): 815-823.
- Chang Q, Wang S Y, Sun Y X, *et al.* The remote sensing monitoring model of the typical vegetation phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, **16**(5): 815-823.
- [37] 唐志光, 邓刚, 胡国杰, 等. 亚洲高山区积雪物候时空动态及其对气候变化的响应 [J]. *冰川冻土*, 2021, **43**(5): 1400-1411.
- Tang Z G, Deng G, Hu G J, *et al.* Spatiotemporal dynamics of snow phenology in the High Mountain Asia and its response to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, **43**(5): 1400-1411.
- [38] 雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 等. 1985-2015年中国不同生态系统NDVI时空变化及其对气候因子的响应 [J]. *生态学报*, 2023, **43**(15): 6378-6391.
- Lei Q, Hu Z W, Wang J Z, *et al.* Spatiotemporal dynamics of NDVI in China from 1985 to 2015: ecosystem variation, regional differences, and response to climatic factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(15): 6378-6391.
- [39] Shen M G, Zhang G X, Cong N, *et al.* Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **189-190**: 71-80.
- [40] 彭小清, 田伟伟, 李璇佳, 等. 青藏高原和环北极冻土变化研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2023, **45**(2): 521-534.
- Peng X Q, Tian W W, Li X J, *et al.* Research progress on changes in frozen ground on the Qinghai-Tibet Plateau and in the circum-Arctic region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, **45**(2): 521-534.
- [41] Wang S, Peng H, Hu Q, *et al.* Analysis of runoff generation driving factors based on hydrological model and interpretable machine learning method [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, **42**, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101139
- [42] Wang S, Peng H, Liang S K. Prediction of estuarine water quality using interpretable machine learning approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **605**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127320.
- [43] Lundberg S M, Lee S L. A unified approach to interpreting model predictions [A]. In: *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems* [C]. Long Beach: Curran Associates Inc., 2017. 4768-4777.
- [44] Zhang W Q, Luo G P, Hamdi R, *et al.* Can gross primary productivity products be effectively evaluated in regions with few observation data? [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2023, **60**(1), doi: 10.1080/15481603.2023.2213489.
- [45] Wang T H, Yang D W, Zheng G H, *et al.* Possible negative effects of earlier thaw onset and longer thaw duration on vegetation greenness over the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, **326**, doi: 10.1016/j.agrformet.2022.109192.
- [46] Liu H, Liu S L, Wang F F, *et al.* Management practices should be strengthened in high potential vegetation productivity areas based on vegetation phenology assessment on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **140**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108991.
- [47] Li P, Peng C H, Wang M, *et al.* Dynamics of vegetation autumn phenology and its response to multiple environmental factors from 1982 to 2012 on Qinghai-Tibetan Plateau in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **637-638**: 855-864.
- [48] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等. 青藏高原草地物候动态及其对驱动因子的响应 [J]. *草业科学*, 2023, **40**(1): 4-14.
- Ji Z X, Pei T T, Chen Y, *et al.* Grassland phenological dynamics and its response to driving factors on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Pratacultural Science*, 2023, **40**(1): 4-14.
- [49] 李佳, 唐志光, 邓刚, 等. 2001-2020年青藏高原草地物候变化遥感监测 [J]. *水土保持研究*, 2023, **30**(4): 265-274.
- Li J, Tang Z G, Deng G, *et al.* Remote sensing monitoring of grassland phenological changes in the Qinghai-Tibetan Plateau during 2001-2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(4): 265-274.
- [50] Teng H F, Luo Z K, Chang J F, *et al.* Climate change-induced greening on the Tibetan Plateau modulated by mountainous characteristics [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(6), doi: 10.1088/1748-9326/abfeeb.
- [51] Lian X, Piao S L, Li L Z X, *et al.* Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation [J]. *Science Advances*, 2020, **6**(1), doi: 10.1126/sciadv.aax0255.
- [52] Dong S K, Shang Z H, Gao J X, *et al.* Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **287**, doi: 10.1016/j.agee.2019.106684.
- [53] Lian X, Piao S L, Chen A P, *et al.* Seasonal biological carryover dominates northern vegetation growth [J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1), doi: 10.1038/s41467-021-21223-2.

CONTENTS

Research Advances of Groundwater Nitrate Pollution and Source Apportionment in China	TU Chun-lin, CHEN Qing-song, YIN Lin-hu, <i>et al.</i> (3129)
Screening of Highly Hazardous Pollutants in Groundwater of Beijing	YANG Lei, XU Ying, YU Shi-hang, <i>et al.</i> (3142)
Prediction Model of Groundwater Sulphate Based on Combined Multi-source Spatio-temporal Data	LI Ru-yue, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3153)
Pollution Characteristics and Multilevel Risk Assessments of Antibiotics in the Urban Rivers of Beijing, China	ZHAO Xiao-shuai, ZHENG Qi-bing, MA Rui, <i>et al.</i> (3165)
Spatial and Temporal Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Different River Sediments in Typical Cities: A Case Study of Shijiazhuang	ZHAO Bo, SONG Yuan-meng, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (3176)
Analysis of Regional Differences in Cadmium Ecological Risk in Surface Waters of the Yangtze River Basin	DING Ren, LIAO Zi-tong, LU Yun, <i>et al.</i> (3186)
Hydrochemical and Stable Isotopic Characteristics and Transformation Relationship of Water Bodies in the Guohe River Basin, Anhui Province	XU Jin-zhao, LIU Gui-jian, SI Wen, <i>et al.</i> (3196)
Water Quality Prediction Model for the Pearl River Estuary Based on BiLSTM Improved with Attention Mechanism	CHEN Zhan-feng, LI Xiao-fang (3205)
Effect of Integrated Landscape Characteristics Around Chaohu Lake on River Water Quality Based on Watershed Units	WANG Jie, LIU An-an, ZHANG Jun-wu, <i>et al.</i> (3214)
Effect of Fallow on Nitrogen Accumulation in Soil Profile and Shallow Groundwater in Cropland Around Fuxian Lake	YE Yuan-hang, CHEN An-qiang, LI Lin, <i>et al.</i> (3225)
Adsorption of Residual Pesticide Glyphosate Isopropylamine in Surface Water by Modified Biomass Materials	ZHOU Yue, LI Yan, WANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (3234)
Research Progress on Pollution Characteristics, Degradation, and Transformation of Typical PPCPs in the Process of Wastewater Treatment	HE De-chun, ZHENG Mi-mi, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3247)
Impact of Land Use Change on Carbon Storage in Urban Agglomerations in the Guanzhong Plain	BIAN Rui, ZHAO An-zhou, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (3260)
Spatio-temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in HuaiBei City Based on InVEST-PLUS Model	YU Zhi-lin, ZHAO Ming-song, GAO Ying-feng, <i>et al.</i> (3270)
Temporal and Spatial Evolution and Prediction of Ecosystem Carbon Storage in Jiangxi Province Based on PLUS-InVEST Model	HU Ji-xi, LE Xian-wen, WANG Wei-lin, <i>et al.</i> (3284)
Exploring the Spatial and Temporal Trajectories of Land Use Carbon Emissions and Influencing Factors in the Aksu River Basin from 1990 to 2020	HAN Fang-hong, GAO Fan, HE Bing, <i>et al.</i> (3297)
Spatiotemporal Simulation and Prediction of Soil Organic Carbon Density in Gannan Grassland Under Future Climate Scenarios	LI Zhao, ZHANG Mei-ling, ZHANG Rui-qi, <i>et al.</i> (3308)
Trade-off and Synergy of Ecosystem Services in the Yangtze River Economic Belt and Its Driving Factors	HE Liu-jie, ZHENG Bo-fu, WAN Wei, <i>et al.</i> (3318)
Spatiotemporal Response of Ecosystem Service Value to Land Use Change in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration over the Past 20 Years	LIANG Bin-yue, CAO Chun, LI Jin-chao, <i>et al.</i> (3329)
Coupling Mechanisms of Eco-environmental Quality and Human Activities in China and Their Influencing Factors	ZHAO Ti-xia, ZHU Lian-qi, WANG Li-yuan, <i>et al.</i> (3341)
Spatio-temporal Evolution of Drought and Its Impact on Key Resources in the Important Ecological Functional Area: A Case Study in the Yellow River Basin	LU Dang, WEI Wei, WANG Ji-ping, <i>et al.</i> (3352)
Landscape Pattern Vulnerability and Its Driving Forces in Different Geomorphological Divisions in the Middle Yellow River	HE Meng-zhen, ZHANG Le-tao, WEI Yi-yuan, <i>et al.</i> (3363)
Multi-factor Impact Analysis of Grassland Phenology Changes on the Qinghai-Xizang Plateau Based on Interpretable Machine Learning	LIU Hui-wen, LIU Huan, HU Peng, <i>et al.</i> (3375)
Impacts of Urban Form on Carbon Emissions Under the Goal of Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality: A Case Study of the Yangtze River Economic Belt	FENG Xin-hui, LI Yan, WANG Shi-yi, <i>et al.</i> (3389)
Spatio-temporal Evolution and Coordinated Development of Compactness with Carbon Emission Intensity in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration	LI Zhi-ying, ZHU Xiao-shan, YANG Li, <i>et al.</i> (3402)
Multi Scenario Carbon Peak Prediction and Emission Reduction Path Analysis of Xi'an Hi-tech Zone	JIANG Xu-peng, ZHANG Qiang, ZHAO Wen-ting, <i>et al.</i> (3412)
Construction and Analysis of Machine Learning Based Transportation Carbon Emission Prediction Model	LIU Hui-tian, HU Da-wei (3421)
Spatiotemporal Interaction Characteristics and Transition Mechanism of Carbon Intensity in China's Transportation Industry	LI Jian, LIU Shu-qi, WANG Xiao-qi (3433)
Research Progress in Reducing Pollution and Sequestration of Carbon by Carbon Neutral Plants	CHEN Yun, ZHOU Qi-xing, TAO Zong-xin, <i>et al.</i> (3446)
Carbon Footprint of Spent Ternary Lithium-Ion Battery Waste Recycling	SONG Xiao-fang, DU Shuai, XIE Ming-hui, <i>et al.</i> (3459)
Risk Assessment of Antibiotics in Agricultural Environment	YANG Zhen-zhen, LI Hong-na, LI Na (3468)
Driving Factors Analysis for Spatial-Temporal Distribution of Organic Pollutants in the Yangtze River Delta Based on the Optimal-scale Geographical Detector	HE Jin-ke, ZHOU Ya-nan, CHEN Yue-hong, <i>et al.</i> (3480)
Spatiotemporal Simulation of Soil Pb Accumulation Process in Urban-Rural Areas: A Case Study of a Large City in Central China	SONG Xiao-fan, HOU Ying, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (3493)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Dust Around Bus Stops in Kaifeng City Based on APCS-MLR Model	DUAN Hai-jing, SHEN Hao-xin, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (3502)
Evaluation of Heavy Metal Distribution Characteristics and Ecological Risk of Soil of Vegetable Land for Hong Kong in Ningxia	JI Li, MA Kun, XIE Tie-na, <i>et al.</i> (3512)
Effects of Four Amendments on Cadmium Bioavailability and Enzyme Activity in Purple Soil	DING Xin-ru, XU Man, YAN Ning-zhen, <i>et al.</i> (3523)
Effects of Biochar-loaded Ammonia Nitrogen on Soil Carbon Emissions, Enzyme Activity, and Microbial Communities	YANG Ru-yi, DONG Yan-hong, XIAO Xin, <i>et al.</i> (3533)
Effects of <i>Rosa roxburghii</i> Pomace Biochar on Yield and Quality of Chinese Cabbage and Soil Properties	FAN Hong, XIE Shan, LONG Tian-yu, <i>et al.</i> (3543)
Effects of Biochar Application on the Structure and Function of Fungal Community in Continuous Cropping Watermelon Soil	CHANG Fang-juan, ZHANG Gui-yun, ZHANG Li-ping, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Different Modified Materials on Soil Fungal Community Structure in Saline-Alkali Soil	BAI Xiao-long, ZHANG En, WU Jin-min, <i>et al.</i> (3562)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Microbial Community Characteristics and Functional Differences in Saline Water Drip Irrigation Cotton Fields	GUO Xiao-wen, XIANG Gui-qin, ZHANG Fa-chao, <i>et al.</i> (3571)
Effects of Different Proportions of Ammonium Sulfate Replacing Urea on Soil Nutrients and Rhizosphere Microbial Communities	ZHANG Yan-hui, LIU Yu, HAN Ying, <i>et al.</i> (3584)
Effects of Different Forms of Nitrogen Addition on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Community Structure of Perennial Alpine Cultivated Grassland	TONG Yong-shang, ZHANG Chun-ping, DONG Quan-min, <i>et al.</i> (3595)
Altitude Distribution Characteristics of Farmland Soil Bacteria in Loess Hilly Region of Ningxia	WU Xia, CAI Jin-jun, WANG Zhang-jun, <i>et al.</i> (3605)
Spatial Patterns of Soil Bacterial Communities and N-cycling Functional Groups Along an Altitude Gradient in Datong River Basin	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang (3614)
Dynamic Response of Aerobic Denitrification Bacteria to Water Quality in Baiyangdian Lake Under Different Hydrological Scenarios	MENG Jia-jing, ZHANG Tian-na, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3627)
Effects of Fly Ash on the Efficiency and Bacterial Community Structure of Urban Multi-source Organic Solid Waste	ZOU Jia-cheng, DU Yan-bin, SU Kai-wen, <i>et al.</i> (3638)
Effect of Exogenous Chitosan on Physiological Properties, Antioxidant Activity, and Cadmium Uptake of Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Jing-jing, JIAO Qiu-juan, XU Zheng-yang, <i>et al.</i> (3649)
Response of Relationship Between Microplastic Abundance and Nitrogen Metabolism Function Microorganisms and Genes in Water	WANG Zhi-chao, MA Yu, LI Ya-xin-yue, <i>et al.</i> (3661)
Effects and Mechanisms of Polystyrene Microplastics on Extracellular Antibiotic Resistance Genes in Wastewater	ZHOU Shuai, HUANG A-chao, HUANG Ze-feng, <i>et al.</i> (3671)
Effects of Polyethylene Microplastics on Soil Nutrients and Enzyme Activities	LIANG Rong, HE Jiao, SUN Fei-hu, <i>et al.</i> (3679)
Effect of Low-density Polyethylene Microplastics on Natural Attenuation of Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil	TANG Jia-hao, BAO Wen-xiu, ZHANG Wen, <i>et al.</i> (3688)
Aging and Small-sized Particles Release Characteristics of Tire Microplastics in Various Environmental Media	ZHANG Tai-shuo, SHANG Jing-jing, LIU Hai-yong, <i>et al.</i> (3700)
Effect of Photoaging on Adsorption of Cu(II) by Polystyrene Microplastics with Different Particle Sizes	LIU Wen-juan, GUO Yu-feng, DENG Wen-bo (3708)
Effects of Straw Addition on N ₂ O and CO ₂ Emissions from Red Soil Subjected to Different Long-Term Fertilization	TU Hao-ze, LIN Shan, WANG Jun, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Partial Substitution of Chemical Fertilizers with Organic Fertilizers on N ₂ O and NO Emissions from a Peach Orchard	XU Pin-shang, GUO Shu-min, ZHENG Hao-chen, <i>et al.</i> (3725)
Spatiotemporal Pattern and Influencing Factors of Thermal Environment Based on SEM Model: A Case Study in Xi'an Metropolitan Area	ZHANG Ying, WANG Xu-hong, FENG Zi-hao, <i>et al.</i> (3734)
Air Pollutant Spatiotemporal Evolution Characteristics and Effects on Human Health in Xi'an City	XU Chuan-qi, BAI Yang, TANG Yuan-wei, <i>et al.</i> (3746)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric Fine Particulate Matter and Their Sources in Winter in the Southern Sichuan Urban Agglomeration	ZHANG Tian-li, HUANG Xiao-juan, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (3756)