

DOI: 10.20103/j.stxb.202211123260

胡喆媛, 张学霞, 张雪, 王景萍, 王翔宇. 1990—2020 年地表物候时空变化对高寒湿地景观演变过程的响应. 生态学报, 2023, 43(21): 8998-9009.
Hu Z Y, Zhang X X, Zhang X, Wang J P, Wang X Y. Response of spatio-temporal variation of land surface phenology to alpine wetland landscape evolution from 1990 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8998-9009.

1990—2020 年地表物候时空变化对高寒湿地景观演变过程的响应

胡喆媛^{1,2}, 张学霞^{1,2,*}, 张雪^{1,3}, 王景萍^{1,2}, 王翔宇^{1,2}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

3 石家庄学院资源与环境科学学院, 石家庄 050035

摘要: 地表物候是生态系统环境变化的敏感指示器。为探讨物候时空变化和湿地景观生态格局与过程之间的关系, 论文以若尔盖高寒湿地为例, 基于 1990—2020 年 GIMMS3g NDVI 和 MODIS NDVI 数据集、7 期 Landsat TM/OLI 卫星遥感数据, 采用阈值法提取地表物候参数, 基于面向对象的分类方法解译出土地利用数据, 利用土地覆盖转换指数模型 (PNTI) 刻画高寒湿地动态变化过程, 分析地表物候时空变化与高寒湿地景观格局演变过程的关系。结果表明: (1) 1990—2020 年研究区呈现前期湿地面积减少后期趋于稳定的特征, 根据土地利用类型演变路径和强度分为动态平衡区、退化演变区和恢复演变区, 面积占比分别 56.84%、28.14% 和 15.02%。(2) 植被返青期 (SOS)、生长盛期 (POS) 呈南早北晚, 枯黄期 (EOS) 呈中间早周边晚, 生长期长度 (LOS) 呈中间短周边长、西北短东南长的空间分布特征。SOS 分布在第 96—149 天, EOS 分布在第 249—284 天, LOS 持续 125—173d, POS 分布在第 179—209 天。SOS、POS 先推迟后提前, EOS 先提前后推迟, LOS 呈现先缩短后延长的规律, 1990—2005 年变化率为 -10.8d/10a, 而 2000—2020 年为 2.4d/10a。(3) SOS、EOS 对高寒湿地恢复/退化演变路径响应敏感, 对演变路径方向相同但演变强度等级不同的湿地景观格局演变过程响应则不敏感。SOS、EOS 在退化演变区的变化率整体上高于 SOS、EOS 在恢复演变区及动态平衡区的变化率。SOS 提前和 EOS 推迟可作为高寒湿地退化的指示指标, 具有生态预警作用。

关键词: 地表物候; 阈值法; PNTI 指数模型; 时空变化; 若尔盖高寒湿地

Response of spatio-temporal variation of land surface phenology to alpine wetland landscape evolution from 1990 to 2020

HU Zheyuan^{1,2}, ZHANG Xuexia^{1,2,*}, ZHANG Xue^{1,3}, WANG Jingping^{1,2}, WANG Xiangyu^{1,2}

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of State Forestry Administration of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

3 College of Resources and Environmental Sciences, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China

Abstract: Land surface phenology (LSP) is a sensitive indicator of environmental change in ecosystems. The LSP in alpine wetlands can reflect the changing patterns of naturally seasonal phenomena in alpine wetland ecosystems and their response and adaptation to environmental changes, which has become one of the research hotspots in the field of global change. To explore the relationship between spatio-temporal changes of phenology and ecological patterns and processes of wetland landscapes in Zoige alpine wetlands, based on the GIMMS3g NDVI and MODIS NDVI datasets and 7-phase Landsat TM/OLI satellite remote sensing data from 1990 to 2020, the surface phenological parameters were extracted by using the

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0606102); 国家重点研发计划 (2017YFC0504802)

收稿日期: 2022-11-12; **网络出版日期:** 2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxuexia@bjfu.edu.cn

threshold method and the land use data were interpreted by using object-oriented classification method. The Positive and Negative Transformation Index (PNTI) model was used to portray the dynamic change process of alpine wetlands. The results showed that (1) the wetland area in the study area from 1990 to 2020 presented the characteristics of first decreasing and then stabilizing. According to the evolution path and intensity of land use types, it was divided into dynamic equilibrium area, degradation evolution area, and restoration evolution area, accounting for 56.84%, 28.14%, and 15.02%, respectively. (2) From the spatial distribution characteristics, the start of the growing season (SOS) and the peak of the growing season (POS) were gradually delayed from south to north, while the end of the growing season (EOS) was gradually delayed from the middle to the periphery. The length of the growing season (LOS) was short in the middle and long in the periphery, short in the northwest and long in the southeast. The SOS ranged mainly from 96 to 149 Julian days, EOS ranged mainly from 249 to 284 Julian days, POS ranged mainly from 179 to 209 Julian days, and LOS was concentrated within 125 to 173 days. In terms of interannual variation, the SOS and POS delayed first and then advanced, while EOS advanced first and then delayed. The LOS shortened first and then extended, with a shortening rate of 10.8 d/10a from 1990 to 2005 and an extension rate of 2.4 d/10a from 2000 to 2020. (3) The SOS and EOS were sensitive to the response of evolutionary processes of landscape patterns in alpine wetlands with different directions of evolutionary paths (i.e., restoration and degradation), while they were not sensitive to the response of evolutionary paths with the same direction but different intensity levels. The change rates of the SOS and EOS in the degradation evolution area were overall higher than those of SOS and EOS in the restoration evolution area and dynamic equilibrium area. The advance of SOS and delay of EOS can be used as indicators of alpine wetland degradation and has an ecological early warning function. Alpine wetland landscape evolution had no significant effect on LOS and POS at $P=0.05$ level.

Key Words: land surface phenology; threshold method; PNTI index model; spatio-temporal variation; Zoige Alpine wetland

湿地与森林、海洋并列全球三大生态系统,在全球碳循环中占据重要地位,发挥调节气候、维持生态系统稳定和生物多样性等生态功能^[1]。高纬度和高海拔的湿地具有特殊的碳汇功能^[2],但由于地处全球气候变化敏感和生态脆弱地区,面临的萎缩、退化问题尤其突出^[3],加之受气候变化和人类活动影响加剧,水源涵养、环境自净、碳氮沉降等功能减弱^[4],一旦遭受破坏很难在短期内修复,高寒湿地生态系统对全球环境变化的敏感性引起了广泛关注。

地表物候(Land Surface Phenology, LSP)能反映过去一段时间内环境变化下生态系统的动态特征,是环境变化最直接、最敏感的感应器和指示器^[5],高寒湿地 LSP 则能够反映高寒湿地生态系统的自然季节现象的变化规律及其对环境变化的响应和适应,在调控生态系统结构和功能变化中发挥显著作用^[6]。

目前植物物候研究多聚焦于物候变化与气温、降水、光照等气候因子之间的关系^[7-8],普遍认为存在春季物候提前和秋季物候延迟的趋势,温度变化是驱动物候变化的重要影响因素,但降水变化对物候的影响不显著^[9-11],研究对象也多聚焦于森林^[12]、草原^[13-14]等的物候变化。然而也有研究表明物候变化在很大程度上是由小于 1km²范围内多种因子驱动的^[15],与全球气候变化相比,高寒湿地物候对微环境差异表现出高度敏感性^[16]。湿地格局及其景观变化对区域内微环境具有重要影响,而目前仍缺乏物候变化与高寒湿地格局演变过程之间关系的研究。

鉴于此,本研究以高寒湿地为研究对象,构建 PNTI 模型对高寒湿地景观演变过程定量刻画,提取高寒湿地 LSP 关键参数厘清其时空动态变化特征,探讨 1990—2020 年间物候变化对于高寒湿地景观演变过程的响应,全面认识气候变化背景下高寒湿地生态系统物候变化机制,以期为实现生态保护和区域可持续发展提供有效的自然解决方案。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

若尔盖高寒湿地处青藏高原东北部边缘,隶属四川省阿坝藏族羌族自治州若尔盖县,总面积约 10436km²,属高原寒温带湿润季风气候,1990—2020 年间年平均气温为 1.94℃,年均降水量 600—750mm^[17]。若尔盖县森林资源和湿地资源丰富,境内河流湖泊众多,黑河、白河、班佑河蜿蜒迂回汇入黄河,白龙江和求吉河汇入长江。县域被长江、黄河两大水系自东南向西北分为丘状高原区和高山峡谷区两大地貌类型(图 1)。植被类型可划分为高寒草甸、沼泽化草甸、沼泽植被和水生植被,种类成分贫乏,以莎草科、禾本科、毛茛科、水麦冬科、菊科、灯心草科为主,毛果苔草、木里苔草、乌拉苔草、藏嵩草、华扁穗草常见。

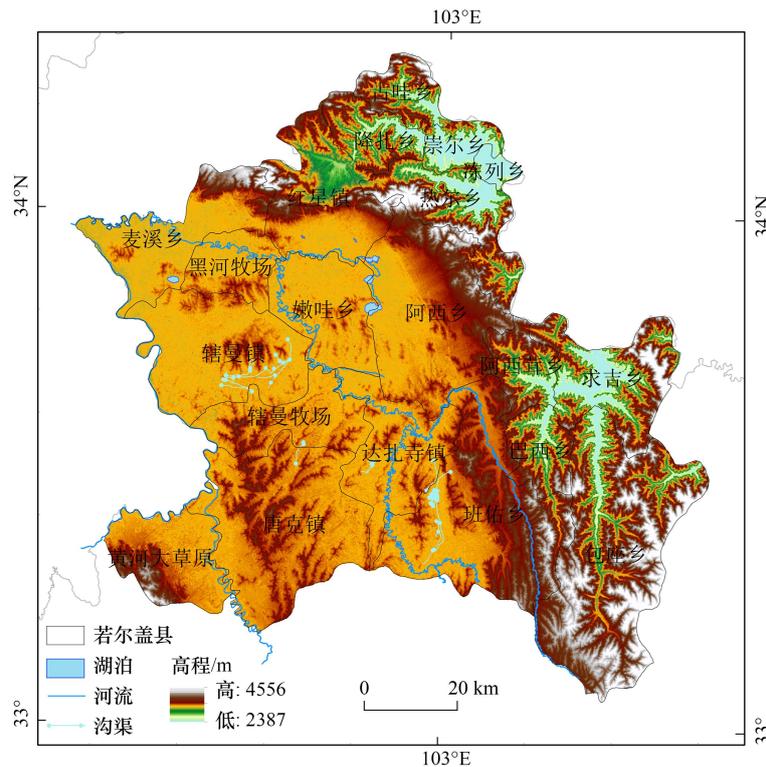


图 1 研究区概况图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 NDVI 时间序列数据集

论文使用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)分析地表物候变化特征,数据源为 GIMMS3g NDVI 和 MODIS NDVI 数据集。GIMMS3g NDVI 数据来源于美国国家航天局(NASA)推出的第三代全球植被指数变化数据(<http://www.glass.umd.edu/>),时间尺度为 1990—2005 年,时间分辨率和空间分辨率为 15d 和 8km,共 320 景影像。MODIS NDVI 数据来自 NASA 提供的 MOD13Q1 产品(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>),时间尺度为 2000—2020 年,时间分辨率和空间分辨率为 16d 和 250m,共 414 景影像。

借助 MRT(MODIS Reprojection Tool)提取所需 NDVI 波段及数据质量控制波段,基于最大值合成法(Maximum value composites, MVC)去除云、雨等的影响,最后利用 Python 编程批处理完成投影转换、边界裁剪等预处理。

1.2.2 Landsat 影像数据

论文选取 Landsat5 TM、Landsat8 OLI 遥感影像数据分析湿地动态变化过程,数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率 30m,轨道号选取 130037、131036、131037。选择处于植被生长季且云量不高于 10%的影像,云量未达到要求的影像用相邻或相近时间影像代替,最终合成 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年共 7 期覆盖研究区的影像。

1.2.3 物候观测数据

采用中国生态系统研究网络植物物候观测数据作为物候提取的参考和验证数据,来源于国家生态科学数据中心 (<http://rs.cern.ac.cn/data/initDRsearch>)。该植被物候观测数据集中草本子集共记录了青藏高原高寒植被区域的 31 个物种,论文选取能够涵盖全部物种的海北站、茂县站和贡嘎山站 3 个生态站观测数据。

1.3 研究方法

1.3.1 物候提取方法

基于消除云、大气等干扰后的 GIMMS3g NDVI 和 MODIS NDVI 数据集,选取返青期 (Start of growing season, SOS)、枯黄期 (End of growing season, EOS)、生长期长度 (Length of growing season, LOS) 和生长盛期 (Peak of growing season, POS) 4 个物候参数研究 LSP 变化特征。

(1) S-G 滤波算法

基于 TIMESAT 软件的 Savitzky-Golay (S-G) 滤波算法重建 NDVI 时间序列数据。该算法是时域内基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法,具有滤除噪声、保持信号的形状与宽度不变的特征,具体公式如下^[18-19]:

$$y_m^* = \frac{\sum_{m=-n}^n c_m y_{i+m}}{N} \quad (1)$$

其中, y_m^* 为合成序列数据; c_m 为滤波系数; y_{i+m} 为原始序列数据; N 为滤波器长度,数值等于 $2n+1$ 。经过反复实验本研究将滤波窗口值设为 4。

(2) NDVI 阈值法

LSP 遥感提取方法有阈值法、最大斜率法、曲率曲线法、Gu 法等,其中阈值法历经固定阈值法、动态阈值法、多参量阈值法的发展阶段,在易与其他方法结合、广泛应用等方面优势明显^[20],故论文使用该方法提取物候参数,公式如下:

$$\text{NDVI}_{\text{ratio}} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{min}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{min}}} \quad (2)$$

其中, NDVI_{max} 为一年中 NDVI 最大值; NDVI_{min} 为 NDVI 上升/下降阶段的最小值; $\text{NDVI}_{\text{ratio}}$ 首次稳定超过阈值的日期为 SOS, $\text{NDVI}_{\text{ratio}}$ 首次稳定低于阈值的日期为 EOS。LOS 为 SOS 和 EOS 的时间间隔; NDVI_{max} 出现的日期为 POS^[21]。参考已有学者动态阈值的设定^[13],本研究将 NDVI 值上升至幅值 20% 对应的日期设为 SOS,下降至幅值 60% 对应的日期设为 EOS,将基于此设定提取的结果与物候站点观测的 2006—2015 年高寒植被区域的 31 种植物物候期进行对比 (图 2),得出。二者具有较好的一致性,因此基于遥感数据提取物候参数可以较为准确地反映研究区植被返青期与枯黄期的时空变化特征。

(3) 一致性检验

GIMMS3g NDVI 和 MODIS NDVI 两套数据集来源于不同传感器,二者在量值上存在系统差别。论文选取 2000—2005 年重叠的 6a 数据,对数据进行一致性检验^[22-23] (表 1),判断基于两者建立 NDVI 时间序列的可行性与提取物候参数结果的连续性和一致性。

结果表明,重叠时段两套时间序列数据集相关系数高于 0.7,均通过 $P=0.05$ 水平的检验。基于 NDVI 数据集提取的 SOS 与 EOS 结果与生态站植物物候观测数据具有较好的一致性,说明二者可同时用于研究区植

物物候的研究中。

1.3.2 高寒湿地景观格局变化

(1) 面向对象的遥感分类

论文参考《湿地公约》、《全国湿地资源调查与监测技术规程(试行)(林湿发[2008]265号)》及相关文献资料^[24-25],结合影像特征,确定湿地的解译标志和分类方案;将研究区湿地类型划分为湖泊、河流、沼泽、沼泽化草甸和水田,将非湿地类型划分为林地、高寒草甸、耕地(除水田)、建设用地及裸地,共10类。

多尺度分割算法(Multi-resolution segmentation)采用自下而上的迭代合并算法将同质的相邻像元或小的分割对象合并为较大的影像对象,保证各对象之间平均异质性最小、对象内部像元之间同质性最大^[26]。论文基于该方法获得影像对象,综合考虑遥感影像特征及地物特征,多次试验后最终设定分割尺度15,形状因子0.2,紧致度因子0.1。基于影像波段合成特征、影像对象的光谱特征等选取合适的分类样本。基于Google Earth高分辨率影像选择精度验证样本,用于地物分类的精度评价。最终得到的1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2020年若尔盖县土地利用分类总精度均大于80%,表明基于面向对象的土地利用/覆盖分类精度较高,可以用于关键土地利用/覆盖类型的提取。

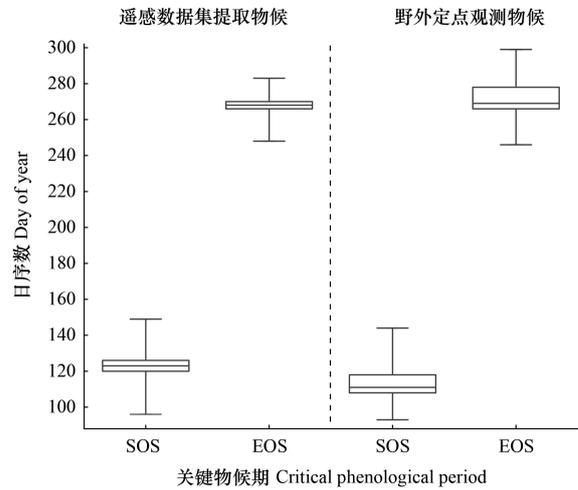


图2 遥感数据集提取与野外定点观测关键物候期对比
Fig.2 Comparison of phenological periods between remote sensing data set extraction and field fixed point observation

表1 2000—2005年GIMMS NDVI和MODIS NDVI数据的一致性检验

Table 1 GIMMS NDVI and MODIS NDVI data consistency check from 2000 to 2005

| 年份 Year | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 相关系数 Correlation coefficient | 0.879 ** | 0.971 ** | 0.845 ** | 0.965 ** | 0.735 ** | 0.907 ** |

** 表示相关系数通过 P=0.05 水平的检验

(2) 时空演变定量评价—PNTI 指数模型

土地覆盖转换指数模型(Positive and Negative Transformation Index, PNTI)通过划分土地利用/覆盖类型的不同转换趋势,评价土地利用/覆盖变化类型对其生态系统服务功能变化的影响和作用^[27],本研究利用该方法定量刻画高寒湿地景观动态变化过程,公式如下^[28]:

$$PNTI_k = \frac{\Delta N_k}{\Delta N} \times 100\% \quad (3)$$

$$PNTI = PNTI_+ - PNTI_- \quad (4)$$

式中:PNTI为湿地类型净转化率;k为转化方向,包括“+”和“-”,分别表示趋水方向和退水方向,趋水方向即湿地生态系统向有益于湿地恢复的方向发展,演变序列为高寒草甸-沼泽化草甸-沼泽-河流/湖泊,退水方向即湿地生态系统向湿地退化方向发展,演变序列为河流/湖泊-沼泽-沼泽化草甸-高寒草甸^[28];ΔN表示湿地类型转化总次数,5年为一个统计单元,即1990—1995年、1995—2000年...2015—2020年共计6次;ΔN_k表示湿地类型在k方向上的转化次数。

基于像元计算,将PNTI按数值大小划分成5级,代表湿地演变路径与强度等级。第1、2级像元PNTI<0,代表湿地演变为退水方向、呈退化趋势,为退化演变区;第3级像元PNTI=0,代表湿地处于稳定或动态平衡状态,为动态平衡区;第4、5级像元PNTI>0,代表湿地演变为趋水方向,湿地向趋于恢复的方向好转,为恢复演变区。

1.3.3 数据分析

单因素方差分析(one-way ANOVA)用来研究不同水平下单一因子对指标影响的显著性,若方差分析差异有统计学意义($\alpha=0.05$),进一步使用多重比较方法对各水平下多个指标进行两两比较分析,检验哪些指标间的差异显著、哪些不显著^[6]。论文利用 Excel 2010 对数据进行初步整理,使用 SPSS 22.0 软件单因素方差分析和 Duncan 多重比较检验分析不同演变路径和强度下各物候参数差异的显著性,绘图使用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 湿地景观类型时空变化特征

利用 PNTI 指数模型对土地利用/覆盖分类结果进行计算,从不同时期土地利用/覆盖类型变化情况(图 3)和高寒湿地各级演变区域面积对比及空间分布分析发现(图 4):若尔盖高寒湿地总体呈现研究前期湿地面积减少后期趋于稳定的特征。研究时段内各湿地类型平均面积依次为沼泽化草甸>沼泽>河流>湖泊>水田,非湿地类型平均面积依次为高寒草甸>林地>裸地>建设用地>耕地。

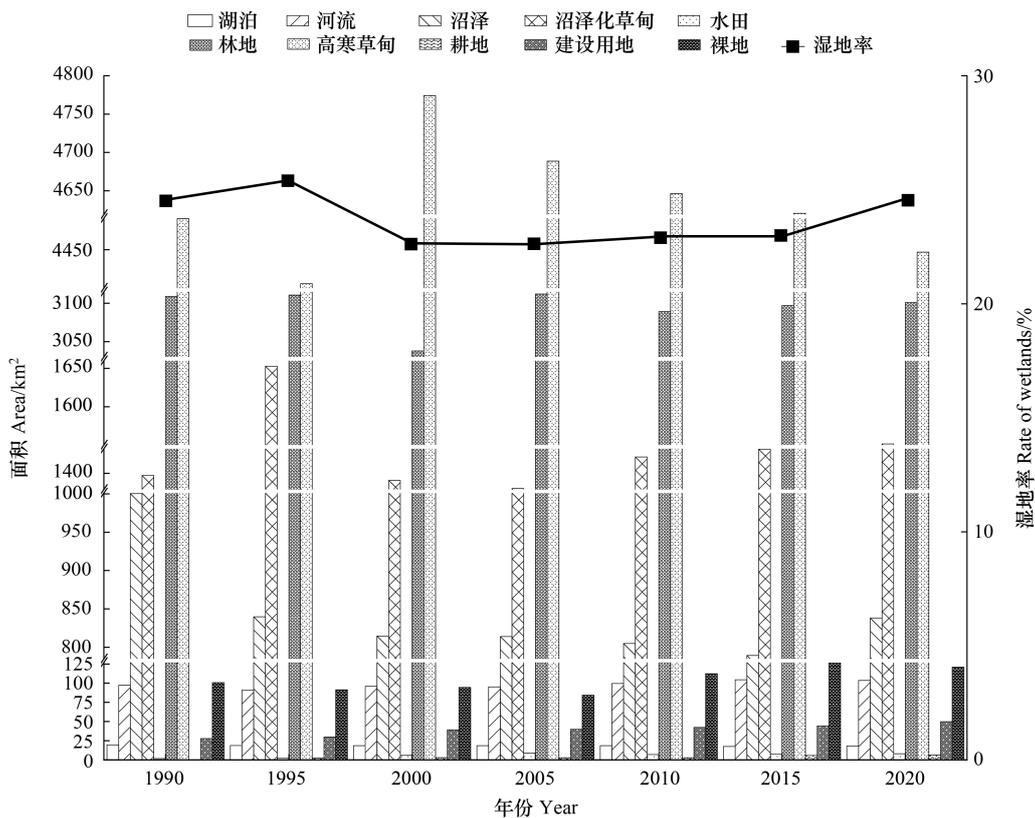


图 3 不同土地利用/覆盖类型面积变化

Fig.3 Area changes of different land use/cover types

退化演变区总面积为 1077.1319km^2 , 占总演变面积的 28.14%, 主要分布在若尔盖县中部及南部的切割剥蚀构造区, 其中第 2 级像元面积占比最大。恢复演变区总面积为 574.8588km^2 , 占比 15.02%, 主要集中在平坦的黄河大草原及黑河牧场周围, 其中第 4 级像元面积占比最大。动态平衡区总面积为 2175.583km^2 , 占比 56.84%, 主要分布在湖泊、河流等开放水体且泥炭沼泽发育的地势平缓区域。

2.2 地表物候动态变化特征

物候期采用儒略日(Julian days)换算方法。图 5 为 1990—2020 年若尔盖县 4 个物候参数平均值的空间分布, SOS 分布在第 96—149 天, 即 4 月上旬至 5 月末植被开始生长, 高寒草甸及湿地植被呈现南边早北边晚

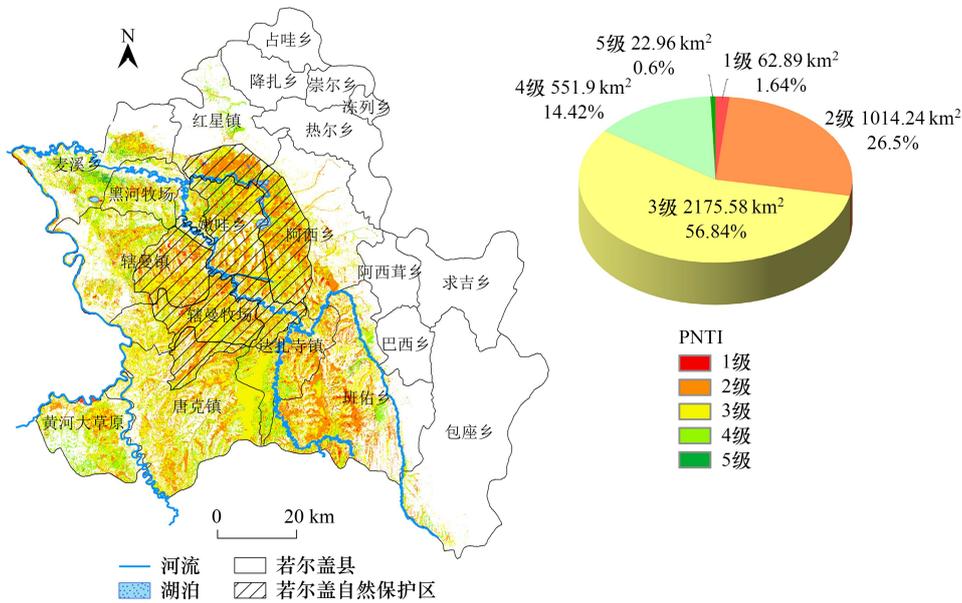


图4 1990—2020年若尔盖高寒湿地演变空间分布及面积

Fig.4 Spatial distribution of the evolution of Zoige alpine wetlands from 1990 to 2020

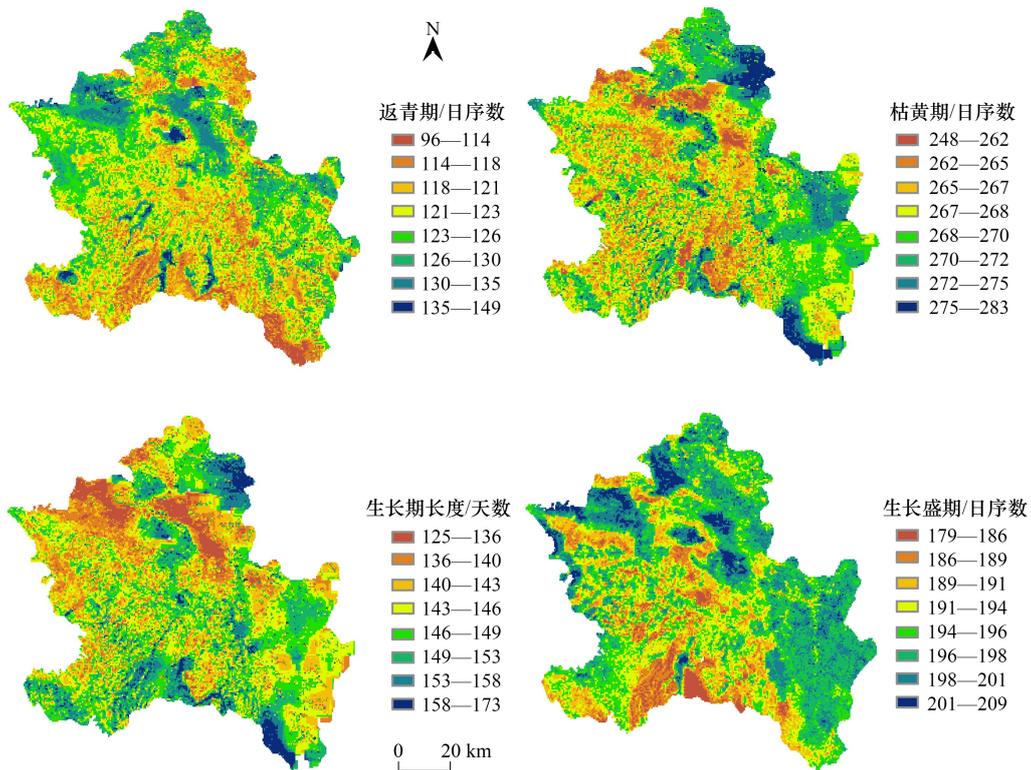


图5 1990—2020年若尔盖县地表物候空间格局

Fig.5 Spatial pattern of land surface phenology in Zoige County from 1990 to 2020

的空间分布格局,即由东南向西北方向 SOS 逐渐推迟。EOS 分布在第 249—284 天,即 9 月上旬至 10 月中下旬,呈现中间早周边晚的空间分布特征。LOS 约 125—173d,植物持续生长 4—6 个月,空间分布上呈现中间

短周边长、西北短东南长的空间分布特征。POS 分布在第 179—209 天,即 6 月末至 7 月末植物生长至最为茂盛阶段,空间分布格局与 SOS 相似,呈现南边早北边晚的特征。

对研究区 1990—2020 年物候参数进行变化趋势分析发现(图 6):SOS 呈先推迟后提前的变化趋势,1990—2005 年推迟速率为 9.4d/10a,2000—2020 年提前速率为 3.7d/10a。EOS 呈现先提前后推迟的变化趋势,1990—2005 年以 1.3d/10a 的速率缓慢提前,2000—2020 年以 1.1d/10a 的速率波动推迟。LOS 呈现先缩短后延长的变化趋势,1990—2005 年以 10.8d/10a 的速率缩短,2000—2020 年以 2.4d/10a 的速率延长。POS 呈现先推迟后提前的变化趋势,1990—2005 年以 0.37d/10a 的速率缓慢推迟,2000—2020 年以 1.4d/10a 的速率缓慢提前,2002 年 POS 出现最早,为第 207 天,2001 年出现最晚,为第 227 天。

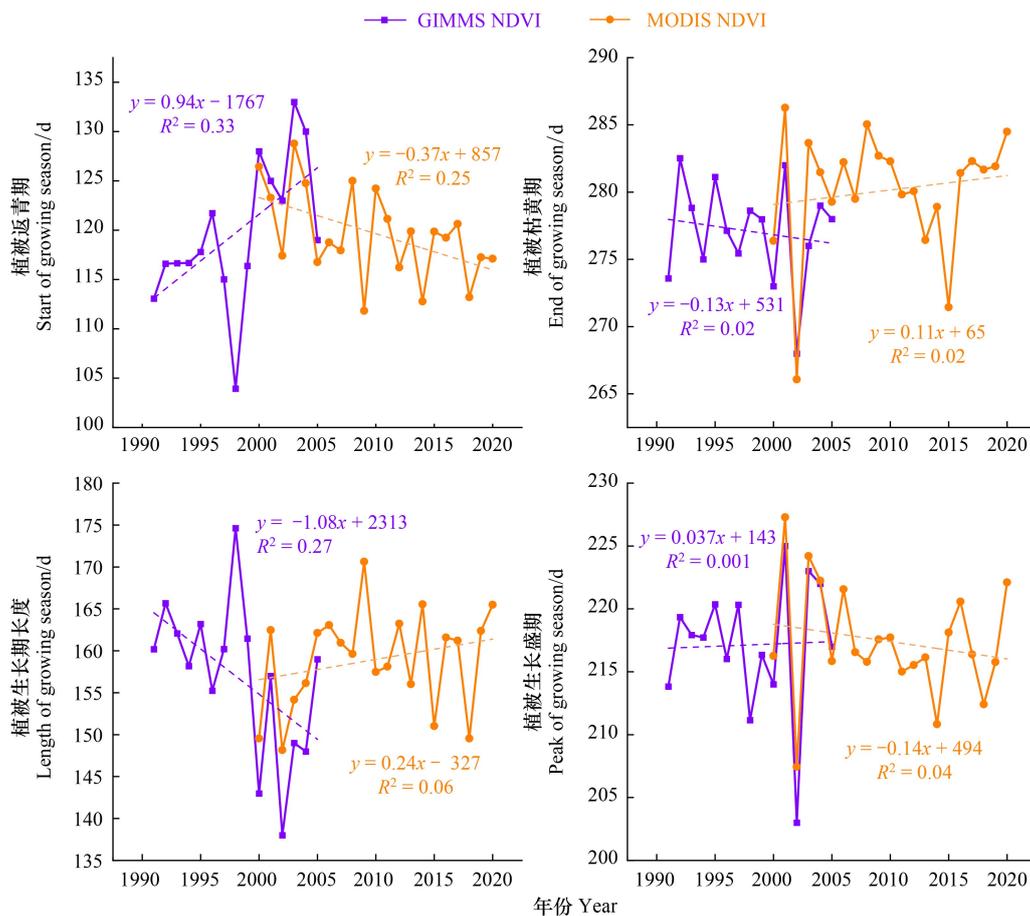


图 6 1990—2020 年若尔盖县地表物候年际变化

Fig.6 Interannual changes of land surface phenology in Zoige County from 1990 to 2020

2.3 地表物候对高寒湿地景观类型演变的响应

高寒湿地景观格局演变过程中环境因子也随之改变,为探明湿地演变与物候变化间的关系,本研究将湿地演变等级与 LSP 年际变化建立联系,探讨环境因子对 LSP 的影响。基于多重比较检验分析不同演变路径和强度下 SOS、EOS、LOS 和 POS 四个物候参数差异的显著性,结果表明(图 7)高寒湿地景观演变过程对于 SOS、EOS 影响显著,对 LOS、POS 在 $P=0.05$ 水平上无显著影响。演变方向不同的组别之间,如 1 级和 5 级、1 级和 4 级、2 级和 5 级等,SOS、EOS 差异显著;演变路径方向相同但演变强度等级不同的组别之间,如 1 级和 2 级、4 级和 5 级,SOS、EOS 响应不敏感。SOS 和 EOS 可作为表征湿地演变方向变化的指标,通过观测湿地植被 SOS 和 EOS 变化情况一定程度上可以判断湿地演变方向的改变。SOS 和 EOS 在退化演变区的变化率整体上高于 SOS、EOS 在恢复演变区的变化率,动态平衡区 SOS 和 EOS 变化率均处于中等水平,由此可知湿地退

化, SOS、EOS 变化剧烈; 湿地修复, 则 SOS 与 EOS 变幅较小, 表明生境变化影响植物生长节育过程。

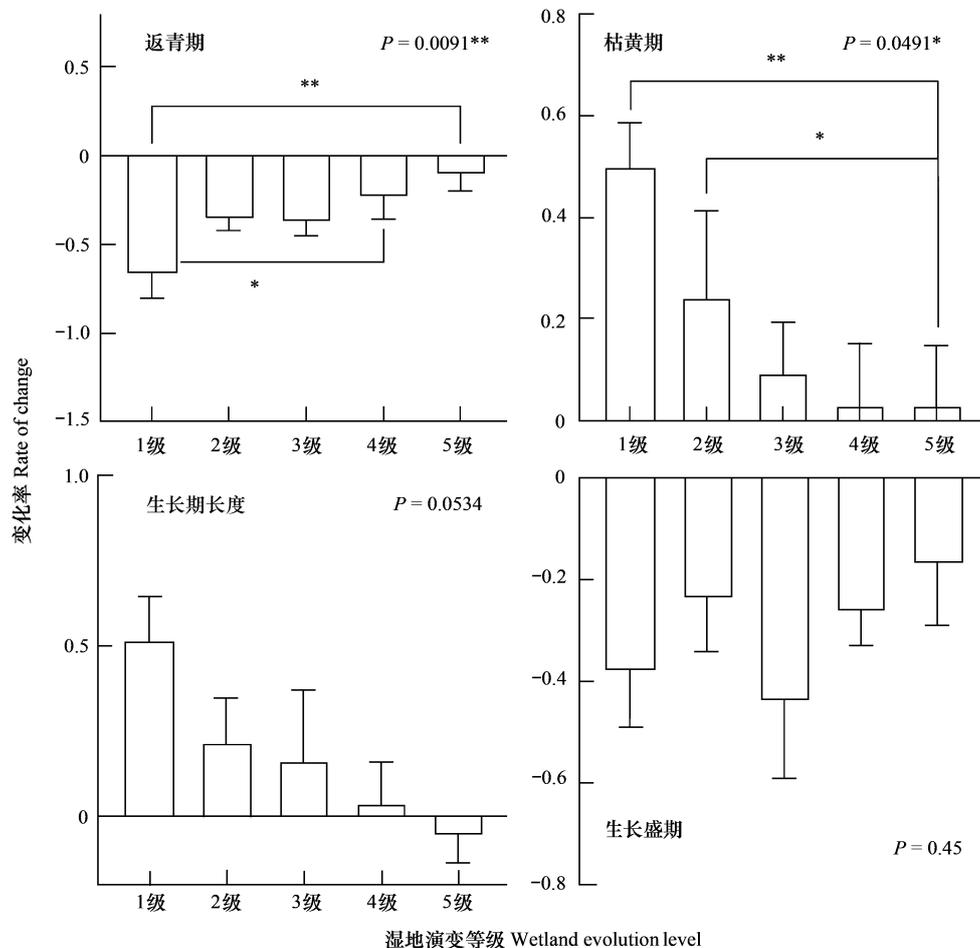


图 7 地表物候变化率与湿地演变等级的关系

Fig.7 Relationship between land surface phenological change rate and wetland evolution grades

* 代表显著 ($P < 0.05$), ** 代表极显著 ($P < 0.01$)

3 讨论

(1) 若尔盖高寒湿地景观格局变化受自然、人为双重因素干扰叠加的观点已被充分证实^[29]。研究区受复杂下垫面、剧烈气候变化、频发自然灾害、过度放牧等因素影响, 局部出现湿地萎缩、沙化退化^[30], 敏感脆弱的湿地生态系统抗干扰能力较差, 进而放大了外界因素的影响。1994 年若尔盖县建立省级自然保护区, 1998 年晋升为国家级自然保护区, 2008 年被列入《国际重要湿地名录》, 成立了四川若尔盖湿地自然保护区管理局管理机构^[31]; 多个大坝保护站建设工程、多条沼泽排水沟堵沟工程竣工, 修复沼泽面积大于 10000hm²^[32], 湿地生态环境得到改善和提升。

(2) 若尔盖县 LSP 整体呈现 SOS 南边早北边晚, EOS 中间早周边晚, LOS 中间短周边长、西北短东南长, POS 南边早北边晚的空间分布格局, 该分布特征产生的原因可以概括为两个方面: 一是与若尔盖县土地覆被类型和植被类型有关, 中、西部主要覆被类型为沼泽、沼泽化草甸和高寒草甸, 沼泽主要分布于河流下游地势平坦的积水区域, 沼泽化草甸环绕于沼泽外围, 而东部主要覆被类型为林地。已有研究表明, SOS 出现时间一般为林地最早, 草甸次之, 耕地最晚; EOS 出现最早为耕地, 林地最晚, 草甸处于二者之间^[33-34], LOS 和 POS 随之呈现相应特征, 这与本研究区物候空间分布格局的结果一致。二是与河流地貌格局导致的区域内水

热组合异质性有关。若尔盖县地势由东南向西北倾斜,黑河由南向北流入黄河,上游排水条件良好,水热条件搭配利于植被的返青和生长^[32];下游泥炭沼泽发育,保水蓄水能力极强,植被根系处于透水透气性差、低氧的环境,植物休眠、生长阶段均受到影响^[35];研究区边缘为白河流域及白龙江支流,排水状况好,土壤热容量小表土升温迅速,一定程度上有利于植物生长,这也造成了 LSP 分布呈现区域差异性。

若尔盖县自然环境恶劣,海拔较高,气候寒冷,研究前期人类活动进一步加速了自然因素对 LSP 的影响^[36],导致 SOS 推迟、EOS 提前、LOS 缩短。而近年来随着湿地好转,水分、积温等环境条件变化,能够在更长时间内满足植被生长需求,LOS 延长。全球气候变暖趋势下融雪初期融雪水下渗增加了土壤表层含水量,同时积雪作为地表覆盖一定程度上隔离了大气和土壤的热量传递^[37],客观上起到保温作用,表土温度升高,水热条件好转促进植被生长发育,使 SOS 提前、LOS 延长。由于积极的湿地修复保护工程,湿地生态环境得到改善和提升^[29],这也促进了 SOS 提前、EOS 推迟、LOS 延长、POS 提前。

(3) 高寒湿地景观演变过程中的物候变化特征表明:对于演变方向不同的组别,SOS、EOS 变化差异显著,一定程度上可作为表征高寒湿地演变方向变化的指标,具有生态预警作用。退化演变区多位于高山、谷底等地貌起伏较大的区域,切割、剥蚀严重,恶劣的地质地貌环境条件不利于植物萌发、生长、繁殖。湿地退化意味植被生长环境被改变或破坏,植物抵抗气候变化和人类活动影响的能力削弱,SOS、EOS 年际变化幅度加大,影响更为显著。恢复演变区多沟道、河流纵横,随着湿地好转水位不断提升,土壤微生物因土壤含水量增加而代谢强度降低,呼吸作用产热减少^[38],因此返青当月土壤温度降低减缓了 SOS 提前趋势,植被生长期间土壤平均温度下降也使 EOS 推迟更为缓慢^[39]。同时,生长季节充足的土壤养分可以增强植物对寒冷的抵抗力和适应能力^[40],从而延缓秋叶衰老,源于植被生长节育过程的内稳性机制。动态平衡区地形平缓,水热条件、局部小气候和地质地貌条件等因素均处于退化演变区和恢复演变区之间,对湿地景观演变的响应相应处于三种演变区中的中等水平。LOS 和 POS 是 SOS 和 EOS 综合作用的结果,造成其变化的直接原因即 SOS 和 EOS 的变化,湿地演变为间接影响因素,同时其他影响因素众多^[22],因而湿地演变对 LOS 和 POS 影响不显著。

(4) SOS 提前和 EOS 推迟意味 LOS 延长,但在高纬度和高海拔地区,可能出现土壤碳库损失量大于植被固碳量的情况^[11,41]。SOS 提前和 EOS 延迟导致土壤分解造成的 CO₂ 损失量大于植被 CO₂ 吸收的增量,从表层土壤和泥炭地中释放出大量 CO₂,生态系统的碳存储能力将下降^[42]。LOS 延长是植物应对环境变化的响应机制,而高寒生态系统可能不会从 LOS 延长中受益,因此应对环境变化的能力会进一步削弱,潜在风险增加。

4 结论

(1) 若尔盖高寒湿地总体呈现研究前期湿地面积减少后期趋于稳定的特征。本研究利用 PNTI 指数模型定量刻画高寒湿地景观动态变化过程,各演变区由大到小依次为动态平衡区>退化演变区>恢复演变区,面积分别为 2175.583km²、1077.1319km²和 574.8588 km²,占比分别为 56.84%、28.14%和 15.02%。

(2) 不同物候期在空间分布上存在一定差异。SOS 分布在第 96—149 天,呈南边早北边晚的空间分布格局;EOS 分布在第 249—284 天,呈中间早周边晚的空间分布特征;LOS 约 125—173d,空间分布上呈中间短周边长、西北短东南长的空间分布特征;POS 分布在第 179—209 天,空间分布格局与 SOS 相似。研究时段内 SOS 呈先推迟(9.4d/10a)后提前(3.7d/10a)的变化趋势,EOS 呈现先提前(1.3d/10a)后推迟(1.1d/10a)的变化趋势,LOS 呈现先缩短(10.8d/10a)后延长(2.4d/10a)的变化趋势,POS 呈现先推迟(0.37d/10a)后提前(1.4d/10a)的变化趋势。

(3) 高寒湿地演变过程对于 SOS 和 EOS 在 $P=0.05$ 水平上影响显著。对高寒湿地景观演变方向不同的组别,即分属退化演变区和恢复演变区的组别,SOS、EOS 响应敏感,能够表征演变方向变化;对于演变路径方向相同但演变强度等级不同的组别,SOS、EOS 响应不敏感。湿地向退水方向演变,SOS、EOS 变化剧烈;湿地朝着趋水方向演变,SOS 与 EOS 变化缓慢。SOS 提前/EOS 推迟可作为高寒湿地退化的指示指标,具有生态

预警作用。

参考文献(References):

- [1] Xia H M, Zhao W, Li A N, Bian J H, Zhang Z J. Subpixel inundation mapping using Landsat-8 OLI and UAV data for a wetland region on the Zoige Plateau, China. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 31.
- [2] 王云英, 裴薇薇, 郭小伟, 杜岩功. 青藏高原高寒湿地生态系统碳水通量与水分利用效率研究. *草地学报*, 2022, 30(5): 1037-1042.
- [3] Hu S J, Niu Z G, Chen Y F, Li L F, Zhang H Y. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 319-327.
- [4] Shen G, Yang X C, Jin Y X, Xu B, Zhou Q B. Remote sensing and evaluation of the wetland ecological degradation process of the Zoige Plateau Wetland in China. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 48-58.
- [5] Wu C Y, Peng D L, Soudani K, Siebicke L, Gough C M, Altaf Arain M, Bohrer G, Lafleur P M, Pechl M, Gonsamo A, Xu S G, Fang B, Ge Q S. Land surface phenology derived from normalized difference vegetation index (NDVI) at global FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 171-182.
- [6] 顾文杰, 周广胜, 吕晓敏, 周梦子, 周莉, 汲玉河, 周怀林. 克氏针茅物候对气候变暖和水分变化的响应及其光合生理生态机制. *生态学报*, 2022, 42(20): 8322-8330.
- [7] 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. *山地学报*, 2019, 37(5): 639-648.
- [8] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 余卫东. 植物物候与气候研究进展. *生态学报*, 2010, 30(2): 447-454.
- [9] Piao S L, Cui M D, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Liu J, Tang Y H. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1599-1608.
- [10] Yang B, He M H, Shishov V, Tychkov I, Vaganov E, Rossi S, Ljungqvist F C, Bräuning A, Griebinger J. New perspective on spring vegetation phenology and global climate change based on Tibetan Plateau tree-ring data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(27): 6966-6971.
- [11] Wu C Y, Peng J, Ciais P, Peñuelas J, Wang H J, Beguería S, Andrew Black T, Jassal R S, Zhang X Y, Yuan W P, Liang E Y, Wang X Y, Hua H, Liu R G, Ju W M, Fu Y H, Ge Q S. Increased drought effects on the phenology of autumn leaf senescence. *Nature Climate Change*, 2022, 12(10): 943-949.
- [12] 郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 28-32.
- [13] 黄文洁, 曾桐瑶, 黄晓东. 青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征. *草业科学*, 2019, 36(4): 1032-1043, 919.
- [14] Tao Z X, Dai J H, Wang H J, Huang W J, Ge Q S. Spatiotemporal changes in the bud-burst date of herbaceous plants in Inner Mongolia grassland. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(12): 2122-2138.
- [15] Ward S E, Schulze M, Roy B. A long-term perspective on microclimate and spring plant phenology in the Western Cascades. *Ecosphere*, 2018, 9(10): e02451.
- [16] Schwartz M D, Hanes J M, Liang L. Separating temperature from other factors in phenological measurements. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(7): 1699-1704.
- [17] 宋小艳, 王长庭, 胡雷, 刘丹, 陈科宇, 唐国. 若尔盖退化高寒草甸土壤团聚体结合有机碳的变化. *生态学报*, 2022, 42(4): 1538-1548.
- [18] 潘力, 夏浩铭, 王瑞萌, 牛文辉, 田海峰, 秦耀辰. 基于 Google Earth Engine 的淮河流域越冬作物种植面积制图. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 211-218.
- [19] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(8): 833-845.
- [20] 周玉科, 刘建文. 基于 MODIS NDVI 和多方法的青藏高原植被物候时空特征分析. *遥感技术与应用*, 2018, 33(3): 486-498.
- [21] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.
- [22] 贾文雄, 赵珍, 俎佳星, 陈京华, 王洁, 丁丹. 祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应. *生态学报*, 2016, 36(23): 7826-7840.
- [23] 刘家福, 马帅, 李帅, 任春颖, 毛德华, 张柏. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2018, 38(21): 7647-7657.
- [24] 张雪, 张学霞, 余新晓, 方宇, 崔焱. 基于图谱的 4 个时期若尔盖县湿地演变分区. *湿地科学*, 2019, 17(6): 623-630.
- [25] Zhang X X, Fu S J, Hu Z Y, Zhou J X, Zhang X. Changes detection and object-oriented classification of major wetland cover types in response to driving forces in Zoige County, eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 9297-9305.
- [26] Thomas N, Hendrix C, Congalton R G. A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(9): 963-972.

- [27] 范泽孟, 张轩, 李婧, 岳天祥, 刘纪远, 孙晓芳, 香宝, 匡文慧. 国家级自然保护区土地覆盖类型转换趋势. 地理学报, 2012, 67(12): 1623-1633.
- [28] 张雪. 若尔盖高寒湿地演变过程与植被物候响应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [29] Wei D, Zhao H, Huang L, Qi Y H, Wang X D. Feedbacks of alpine wetlands on the Tibetan Plateau to the atmosphere. *Wetlands*, 2020, 40(4): 787-797.
- [30] 孙飞达, 李飞, 陈文业, 朱灿, 周俗, 苟文龙, 刘琳, 周冀琼. 若尔盖退化高寒湿地土壤理化性质、酶活性及微生物群落的季节动态. 生态学报, 2020, 40(7): 2396-2406.
- [31] 国家林业局组织. 中国湿地资源—四川卷, Sichuan volume: 四川卷 Sichuan volume. 北京: 中国林业出版社, 2015: 209-213.
- [32] 陈克林. 若尔盖湿地恢复指南. 北京: 中国水利水电出版社, 2010:1-11.
- [33] 游松财, 宋春桥, 柯灵红, 刘高焕, 钟新科. 基于 MODIS 植被指数的藏北高原植被物候空间分布特征. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1513-1520.
- [34] 常守志, 王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 张柏, 张春华. 基于 NDVI 数据的三江平原农田物候监测. 遥感技术与应用, 2011, 26(1): 82-88.
- [35] 刘伟龙, 赵慧, 王小丹, 程根伟. 气候变化下西藏高寒湿地生态系统研究的意义和特点. 山地学报, 2014, 32(4): 481-487.
- [36] 侯蒙京, 高金龙, 葛静, 李元春, 刘洁, 殷建鹏, 冯琦胜, 梁天刚. 青藏高原东部高寒沼泽湿地动态变化及其驱动因素研究. 草业学报, 2020, 29(1): 13-27.
- [37] Zheng J S, Jia G S, Xu X Y. Earlier snowmelt predominates advanced spring vegetation greenup in Alaska. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 315: 108828.
- [38] 王丹, 吕瑜良, 徐丽, 张洪轩, 王若梦, 何念鹏. 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响. 生态学报, 2013, 33(20): 6436-6443.
- [39] 周婷, 张寅生, 高海峰, 张腾, 马颖钊. 青藏高原高寒草地植被指数变化与地表温度的相互关系. 冰川冻土, 2015, 37(1): 58-69.
- [40] Zhang A L, Li X Y, Wu S X, Li L, Jiang Y, Wang R Z, Ahmed Z, Zeng F J, Lin L S, Li L. Spatial pattern of C: N: P stoichiometry characteristics of alpine grassland in the Altunshan Nature Reserve at North Qinghai-Tibet Plateau. *CATENA*, 2021, 207(4): 105691.
- [41] Sun J, Zhou T C, Liu M, Chen Y C, Liu G H, Xu M, Shi P L, Peng F, Tsunekawa A, Liu Y, Wang X D, Dong S K, Zhang Y J, Li Y N. Water and heat availability are drivers of the aboveground plant carbon accumulation rate in alpine grasslands on the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(1): 50-64.
- [42] 刘允芬, 欧阳华, 曹广民, 罗辑, 张宪洲, 赵新全, 杨清伟. 青藏高原东部生态系统土壤碳排放. 自然资源学报, 2001, 16(2): 152-160.