

DOI: 10.20103/j.stxb.202409122208

杨景云, 金鑫, 金彦香, 陈克龙, 谢慧春, 李子昂, 傅笛. 高寒内陆河流域湿地面积变化及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(8): 3684-3699.

Yang J Y, Jin X, Jin Y X, Chen K L, Xie H C, Li Z A, Fu D. Wetland area changes and influencing factors in Alpine Inland River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3684-3699.

高寒内陆河流域湿地面积变化及其影响因素

杨景云^{1,2}, 金鑫^{1,2,3,4,*}, 金彦香^{1,2,4}, 陈克龙^{1,2,4}, 谢慧春^{2,3,4}, 李子昂^{1,2}, 傅笛^{1,2}

1 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016

2 青海师范大学青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810016

3 青海师范大学青海祁连山南坡森林生态系统国家定位观测研究站, 互助 810500

4 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

摘要: 高寒内陆河流域孕育的高寒湿地对气候变化敏感, 极易受外部因素干扰并发生退化。及时准确的阐述高寒湿地面积变化特征及归因分析有助于提高兼具敏感性和脆弱性的高寒湿地资源保护和管理的科学性。青海湖流域位于青藏高原东北部, 是全球变化的敏感区和青藏高原脆弱生态系统典型区, 也是国际重要湿地分布区之一。基于 GEE 云平台和 2000—2023 年长时间序列 Landsat 遥感影像, 采用随机森林分类方法对青海湖流域高寒湿地进行分类, 分析其面积变化特征, 最后结合相关分析和随机森林特征变量重要性排序方法探讨青海湖流域高寒湿地面积变化的影响因素。结果表明: (1) 2000—2023 年湿地分类的平均总体精度为 88.45% (85.01%—92.63%), 平均 kappa 系数为 0.83 (0.82—0.91), 有效区分了湖泊、沼泽湿地和沼泽化草甸等高寒湿地类型。(2) 研究期内青海湖流域湿地总面积增加了 604.19 km², 其中沼泽湿地面积减少了 228.21 km², 湖泊与沼泽化草甸面积分别增加了 203.93 km² 和 628.47 km²。(3) 受气候暖湿化影响, 湿地呈现由干旱向湿润的转化趋势, 主要体现为沼泽湿地与湖泊之间的转化、沼泽化草甸与草地之间的转化。24 年内共有 1101.44 km² 草地转化为沼泽化草甸, 2.93 km² 湖泊转化为沼泽湿地, 66.65 km² 沼泽湿地转化为湖泊湿地。(4) 青海湖流域不同海拔高度上因其气候、降水模式存在差异, 致使主导不同湿地面积变化的气候因子不同。降水和季节性积雪是影响青海湖流域高寒湿地面积变化的主要因素。研究结果可为流域尺度高寒湿地的科学保护提供相关依据。

关键词: 高寒湿地; 面积变化; 驱动因素分析; 青海湖流域

Wetland area changes and influencing factors in Alpine Inland River Basin

YANG Jingyun^{1,2}, JIN Xin^{1,2,3,4,*}, JIN Yanxiang^{1,2,4}, CHEN Kelong^{1,2,4}, XIE Huichun^{2,3,4}, LI Ziang^{1,2}, FU Di^{1,2}

1 School of the Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

2 Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

3 Qinghai South of Qilian Mountain Forest Ecosystem Observation and Research Station, Qinghai Normal University, Huzhu 810500, China

4 Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016, China

Abstract: wetlands within alpine inland river basins are highly sensitive to climate fluctuations, readily affected by external disruptions, and inclined to degrade. Timely and precise delineations of changes in alpine wetland areas are vital for enhancing scientific conservation and management efforts. This helps address the sensitivity and vulnerability of alpine wetland resources. The Qinghai Lake Basin, sensitive to global changes, represents a quintessential area of delicate ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau and serves as a distribution zone for internationally significant wetlands. This study leveraged the Google Earth Engine (GEE) platform, employing a long-term dataset of Landsat remote sensing imagery spanning from 2000 to 2023. The random forest classification approach was applied to categorize alpine wetlands within the

基金项目: 国家自然科学基金 (42161020, U22A20454); 青海省科技厅应用基础研究项目 (2023-ZJ-943J)

收稿日期: 2024-09-12; **网络出版日期:** 2025-01-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinx13@lzu.edu.cn

Qinghai Lake Basin, examining characteristics of their area alterations. Finally, combining correlation analysis and the random forest variable importance ranking method, factors influencing the area changes of alpine wetlands in the Qinghai Lake basin were investigated. The findings disclosed that (1) The mean overall accuracy of wetland classification from 2000 to 2023 was 88.45% (varying between 85.01% and 92.63%), accompanied by an average kappa coefficient of 0.83 (varying between 0.82 and 0.91). In the past, the classification accuracy of swamp meadow was relatively low, with average producer accuracy and average user accuracy at 77.99% and 86.74%, respectively. Lake classification had the highest accuracy, with average producer accuracy at 98.20% and user accuracy at 99.27%. Swamps registered an average producer accuracy of 86.03% and user accuracy of 86.66%, effectively discerning alpine wetland categories including lakes, swamps, and swamp meadows. (2) During the study period, the total wetland area in the Qinghai Lake Basin increased by 604.19 km², with the swamp areas decreasing by 228.21 km², while the lake and swamp meadow areas increased by 203.93 km² and 628.47 km², respectively. Among the three types of wetlands, swamp meadow showed the greatest variability in the past, exhibiting a fluctuating upward trend, increasing from 21.23% to 28.70% of the total wetland area. Swamp decreased from 6.87% to 2.85% of the total wetland area. The lake area initially decreased between 2003 and 2005, followed by a gradual increase, with a change of 4.65% over time. (3) Driven by increased warmth and precipitation, wetlands exhibited a shift from arid to humid states, primarily marked by transitions between swamps and lakes, as well as between swamp meadows and grasslands. Over 24 years, 1101.44 km² of grasslands converted to swamp meadow, 2.93 km² of lake converted to swamp, and 66.65 km² of swamp converted to lake. (4) Attributable to variations in climate and precipitation patterns across varying elevations, distinct climatic elements govern the alterations in wetland areas within the Qinghai Lake Basin. In alpine regions, the swamp meadow showed a significant positive correlation with spring snow albedo; the area of lake affected by seasonal snow cover varied. precipitation and seasonal snow cover are the main factors influencing changes in high-altitude wetland areas. The results of this study can provide relevant basis for the scientific conservation and management of alpine wetlands at the basin scale.

Key Words: alpine wetland; area changes; driving factors analysis; Qinghai Lake Basin

湿地是由水陆相互作用而形成的一种独特生态系统,是自然界最富生物多样性的生态景观之一^[1]。青藏高原独特的自然环境孕育出了大面积高海拔湿地生态系统^[2],主要包括湖泊、河流、沼泽湿地、沼泽化草甸等。因气候条件恶劣,青藏高原生态系统较其它地区结构简单,较为脆弱,对全球气候变化敏感^[3-4]。随着人类活动加剧和全球气候变化,高寒湿地正面临着严重的萎缩和退化风险^[5]。因此,对高寒湿地进行长期监测,了解其面积变化特征及原因具有重要意义。

遥感技术的发展为大尺度、长时间序列湿地变化监测提供了支撑^[6-7]。已有研究多在低海拔、地势平坦区域展开且方法相对成熟、湿地分类及提取结果较为理想^[8-11]。而在青藏高原地区,复杂的地形条件和自然景观会导致遥感影像中存在混合像元,致使该区域湿地分类相对困难^[12]。目前,对于青藏高原高寒湿地的分类研究较少且多在区域尺度展开。例如,Zhang 等以青藏高原东部三江源玛曲湿地为研究区,利用 Landsat 长时间序列数据,分析了湿地的变化特征与驱动因素^[13]。Bai 等基于 Landsat 数据分析了若尔盖高原高寒湿地景观格局演变过程及其影响因素,得出该地人类活动对湿地景观格局的变化起重要作用^[14]。侯蒙京等对 Landsat 影像进行解译,分析了青藏高原东部甘南和川西北地区高寒沼泽湿地的动态变化^[15]。这些区域尺度研究为高寒湿地分类、湿地动态监测及其影响因素研究提供了参考。但目前,对于青藏高原高寒湿地分类的数据来源、分类方法及分类系统仍不确切。另外,湿地的形成、发育、演替、消亡与水文过程密不可分^[16],区域尺度研究难以兼顾水文过程的整体性^[17]。而在流域尺度上监测湿地面积变化有助于理解湿地生态系统的响应机制、演变规律以及与环境变化的相互作用等。但目前高寒湿地分类、面积变化及影响因素研究较少从流域尺度展开。此外,湿地的变化过程包括湿地与非湿地之间的转化,以及湿地类型之间的转化,在高寒地区不

同湿地类型之间的转化对气候变化可能更为敏感,因此加强湿地类型间的动态转化监测和变化因素分析十分必要,然而目前相关研究较少。

高寒湿地受区域水热条件季节性变化影响明显,同时对区域气候变化较为敏感,极易受外部因素干扰并发生退化^[18]。高寒湿地面积变化的影响因素是复杂、多方面的。目前在湿地变化驱动力机制研究方面,主要是通过构建湿地面积变化、景观格局变化与驱动力因子之间的相关关系、回归关系来分析湿地变化的主要驱动因素^[19]。但相关研究所使用的因子较为单一,且很少考虑到青藏高原地形剧烈变化所带来的各因素对湿地面积影响程度的差异性。另外,高寒地区积融雪过程是影响区域水文过程的重要因素之一,可使土壤水分^[20]、地下水位发生变化^[21],影响湿地水分供应、植被分布和生态系统的稳定性,但现有研究较少考虑积融雪对湿地的影响。

青海湖流域位于青藏高原东北部,是全球变化的敏感区域和青藏高原脆弱生态系统的典型地区,也是国际重要湿地分布区之一^[25]。本研究基于 Landsat 长时间序列数据和 GEE 云平台对青海湖流域湿地进行分类并分析不同地形条件下降水、温度、蒸散发及可以反映积雪状态变化的积雪反照率^[22]对湿地的影响,具体目标为:(1)评价本研究 2000—2023 年青海湖流域高寒湿地分类精度;(2)明确青海湖流域湿地的时空变化特征及不同湿地类型之间的转化特征;(3)揭示不同地形条件下高寒湿地面积变化的驱动因素,为流域尺度高寒湿地的科学保护和管理提供相关科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域(36°15′—38°20′N,97°50′—101°20′E)位于青藏高原东北部,是青藏高寒区、西北干旱区与东部季风区的交汇处^[23]。流域海拔为 3150—5277 m,地势西北高,东南低,以山地为主要地貌类型。流域属高原大陆性气候区,受西风带、高原季风共同影响,气候环境复杂多变。该区干旱少雨、太阳辐射强、昼夜温差大,年平均气温介于-1.1—4.0℃^[24],降水量季节变化明显,多集中在 5 至 9 月,年平均降水量约 291—579 mm^[25—26]。青海湖流域是中国典型的高寒湿地分布区,主要湿地类型有湖泊、河流、沼泽湿地和沼泽化草甸等^[27—28]。作为国际重要湿地分布区之一,青海湖流域对于丰富青藏高原生物多样性,调节气候、涵养水源具有不可替代的作用^[29]。

1.2 数据源

1.2.1 遥感数据

为获取长时间序列数据,本研究所使用的遥感数据来自 GEE 云平台的 30 m Landsat TM/ETM+/OLI 数据集,所采用的遥感影像数据为 Landsat 地表反射率数据(Surface Reflectance,SR)。由于研究区气候条件复杂,一年中仅使用一景影像无法获得整个区域的无云图像,因此选择植被生长季(5—9 月)的遥感影像,对其进行去云合成处理,以便进行最终分类。

地形数据来源于 GEE 平台提供的 SRTM 数据,该数据由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量,空间分辨率为 30 m。本研究主要用于提取地形特征。在湿地驱动因素分析过程中,基于 SRTM 数据将海拔分为 <3500 m、3500—4000 m、4000—4500 m、4500—5000 m、≥5000 m 共五个分区,分析不同海拔上湿地面积与气候因子的相互关系。

1.2.2 气象数据

气温数据来源于 ERA5-Land(<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>),它是 ERA5 的陆地表面产品数据集,包含 1980 年以来全球 50 多个变量的高空间分辨率(0.1°×0.1°)和时间分辨率(1 h)数据并且免费开放获取。该数据集提供了多种气象数据的下载,包括 2 m 空气温度、2 m 露点温度、湖冰厚度、积雪深度、总降水量、地表径流等,本研究所使用的气温资料为 2 m 空气温度。

降水数据来源于多源加权集合降水(MSWEP)(<https://www.gloh2o.org/mswep/>),是由 Beck 等^[30]融合地

面雨量计数据、卫星观测及再分析数据所制成的,它的时间分辨率为 3 小时,空间分辨率为 0.1°。MSWEP 的高分辨率和全球覆盖的特性使其成为了气候研究、水文建模、灾害风险评估等多个领域的重要数据来源。

蒸散发数据来源于 MOD16 产品数据 (https://developers.google.com/earth—engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD16A2),它是由美国国家航空航天局(NASA)发布。产品主要包括 MOD16A2 及 MOD16A3 两个数据集,二者在时间分辨率上有所不同,MOD16A2 是 8 天合成的数据,年合成的是 MOD16A3,空间分辨率均为 500 m。两种数据集包括蒸散发(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发(PET)和潜热通量(PLE),本研究所使用的数据集为 MOD16A2,该数据下载自 GEE 云平台。

积雪反照率数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>),数据集为中国陆域八天合成积雪反照率数据,时间范围为 2000 年 1 月至 2020 年 3 月,空间分辨率为 0.01°。该数据集基于 MODIS 反射率产品 MOD09GA,积雪产品 MOD10A1/MYD10A1 和全球数字高程模型 SRTM 数据,在 ART 模型基础上发展了积雪反照率反演模型^[31],研制了中国积雪反照率数据产品。

1.2.3 辅助数据

为了辅助湿地分类与验证结果,本研究选用了相同空间分辨率的五种土地覆被数据集进行对比,使用的数据集如表 1 所示。

表 1 其他湿地数据集
Table 1 Other wetland datasets

数据集名称 Dataset name	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution	来源 Source
全球地表覆盖数据 (Globelland30)	30 m	2000—2020 年	http://www.webmap.cn/mapDataAction.do?method=globalLandCover
全球 30 米精细分类湿地数据集 (GWL_FCS30D)	30 m	2000—2022 年	https://zenodo.org/records/8239305
中国 1985—2022 年 30 米地表覆被数据集(CLCD)	30 m	1985、1990—2022 逐年	https://zenodo.org/records/8176941
30 米分辨率中国湿地空间分布数据集 (CAS_Wetlands)	30 m	2015 年	http://www.geodata.cn/thematicView/wetland2020.html
中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC)	30 m	多时期(1970 年代末期以来 11 期)	https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54

Globelland30:全球地表覆盖数据 Global land cover data product;GWL_FCS30D:全球 30 m 精细分类 Global annual wetland dataset at 30 m; CLCD:中国 1985—2022 年 30 m 地表覆被数据集 The 30 m annual land cover dataset in China from 1985 to 2022;CAS_Wetlands:30 m 分辨率中国湿地空间分布数据集 The wetland data set of the Chinese academy of sciences;CNLUCC:中国多时期土地利用遥感监测数据集 China multi-period land use/cover change dataset

1.3 方法

本研究首先基于 GEE 云平台获取长时间序列 2000—2023 年 Landsat 遥感影像,对其进行去云合成处理。结合研究区自然条件和湿地资源概况,构建高寒湿地分类体系,并利用随机森林分类方法对湿地进行提取与分类,最后基于地统计学方法探讨青海湖流域高寒湿地对气候变化的响应。

1.3.1 湿地分类系统

湿地分类体系的合理构建会影响湿地提取与分类的精度,然而目前湿地没有统一的定义和分类标准,本研究参考国内外湿地的定义和分类体系^[32—34],结合青海湖流域高寒湿地的特征,建立了湿地分类体系(表 2)。湿地类型包括湖泊、沼泽湿地、沼泽化草甸;非湿地类型包括草地、灌丛、裸地、建设用地、旱地等。

本研究于 2023 年进行野外实地考察,利用 GPS 记录仪采集了沼泽湿地、沼泽化草甸、草地、灌丛的实地采样点,共 461 个。此外,在野外考察的基础上,参考 Google Earth 高分辨率卫星图像,收集了其他地物类型湖泊、裸地、建设用地、旱地的样本点,共计 1396 个。针对人工增删调试训练样本,工作量大等问题,本研究选择基于重分类的样本迁移方法^[35],通过重新分类的方式去除自身样本类型与初始分类结果不一致的样本点,再

次使用修改后的样本进行重新分类,不断优化分类结果,以获得更高精度的分类结果。

表 2 基于遥感影像的青海湖流域湿地分类系统

Table 2 Remote sensing-based wetland classification system for the Qinghai Lake Basin

类型 Type	分类 Classification	定义 Definition
湿地 Wetland	湖泊	湖泊本身及岸边或浅湖发生沼泽化过程而形成的湿地。
	沼泽湿地	指地势平坦低洼,排水补偿,长期潮湿,季节性积水或常积水,表层生长沼生、湿生植物的土地,具有特殊的植被和成土过程,部分地区有泥炭堆积。
	沼泽化草甸	为典型草甸向沼泽植被的过渡类型,分布于中低海拔、地势低洼、排水差、土壤过湿、通透性不良等环境条件下发育起来的,包括分布在平原地区的沼泽化草甸以及高山和高原地区具有高寒性质的沼泽化草甸。
非湿地 Non-wetland	草地	以耐寒多年生草本植物为主,主要用于牧业生产的地区或自然界各类草原、草甸。
	灌丛	以灌木占优势的植被类型,群落高度通常小于 5 m。
	裸地	地表土质覆盖,植被覆盖度在 5%以下。
	城镇	城乡居民点、交通用地。
	旱地	一般指无灌溉设施,主要靠天然降水种植旱生农作物的耕地。

1.3.2 湿地分类方法

为构建青海湖流域长时间序列湿地分类数据集,本研究基于高寒湿地分类特征集,建立了随机森林分类器。随机森林是一种基于分类回归树的组合分类算法^[36],是土地覆被分类中最常用的算法之一。RF 分类算法通过 Bootstrap 方法有放回的从训练集中随机抽取 n 个样本建立训练样本集;然后根据训练样本集构建 n 个决策树来形成森林;最后根据投票来决定最终分类结果。本研究通过调用 GEE 平台提供的随机森林算法进行湿地分类。

合理选择和组合不同特征变量能有效提高分类精度,本研究构建了多维分类特征作为随机森林分类器的输入,所选择的分类特征包括光谱特征、植被指数、水体指数、纹理特征和地形特征等,表 3 为湿地分类特征集。

表 3 湿地分类特征集

Table 3 Features set for wetland classification

分类特征 Categorical feature	名称 Name	公式 Formula
植被指数 Vegetation index	NDVI	$(\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}})$
	EVI	$2.5 \times (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + 6 \times \rho_{\text{red}} - 7.5 \times \rho_{\text{blue}} + 1)$
	DVI	$\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}$
	RVI	$\rho_{\text{nir}} / \rho_{\text{red}}$
水体指数 Water index	NDWI	$(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{nir}}) / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{nir}})$
	MNDWI	$(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{swir}}) / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{swir}})$
	LSWI	$(\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{swir}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{swir}})$
	AWEI	$4 \times (\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{swir1}}) - (0.25 \times \rho_{\text{nir}} + 2.75 \times \rho_{\text{swir2}})$
纹理特征 Textural features	constant	$\sum_i \sum_j p(i, j) \times (i - j)^2$
	asm	$\sum_i \sum_j p(i, j)^2$
	correlation	$\sum_i \sum_j (i - \text{mean}) \times (j - \text{mean}) \times p(i, j)^2 / \text{Variance}$
地形特征 Topographic feature	slope	
	elevation	

NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index;EVI:增强型植被指数 Enhanced Vegetation Index;DVI:差值植被指数 Difference Vegetation Index;RVI:比值植被指数 RatioVegetation Index;NDWI:归一化水体指数 Normalized Difference Water Index;MNDWI:改进型归一化水体指数 Modified Normalized Difference Water Index;LSWI:地表水指数 Land Surface Water Index;AWEI:自动水体提取指数 Automated Water Extraction Index;constant:对比度;asm:角二阶矩 Angular Second Moment;correlation:相关性;slope:坡度;elevation:高程; ρ_{nir} :近红外波段; ρ_{red} :红波段; ρ_{blue} :蓝波段; ρ_{green} :绿波段; ρ_{swir1} :短波红外 1; ρ_{swir2} :短波红外 2; $p(i, j)$:影像灰度共生矩阵(GLCM)中的概率值,表示灰度级 i 和 j 的联合概率分布; i, j :影像中像素的灰度级索引;mean:灰度级的均值;Variance:灰度级的方差

本研究选取 80% 的样本点作为训练样本,20% 作为验证样本,使用混淆矩阵对分类结果进行精度验证,具体为计算混淆矩阵中的总体精度、Kappa 系数、制图精度和用户精度等指标来描述 8 种土地利用类型的分类精度。

1.3.3 驱动因素分析方法

湿地变化主要受自然因素和人类活动的影响^[37],由于研究区的人类活动强度低^[38—39],因此本研究主要探讨气候因子对湿地变化的影响。

特征重要性评估用来计算样本特征的重要性,定量地描述特征对分类或者回归的贡献程度。随机森林特征变量重要性排序方法能够度量每个特征的重要性,得出每个指标的贡献度,通常可以用基尼指数(Gini index)或者袋外数据(OOB)错误率作为评价指标来衡量,可以依据这些评价指标选择主导湿地面积变化的影响因素。

皮尔逊相关系数是一种用来衡量两个变量或多个变量之间线性相关程度的统计量,取值范围为 $[-1, 1]$,相关系数越靠近-1 或 1,说明变量之间具有强相关性。

本研究基于 Python 3.7、SPSS 等软件,采用上述方法探讨气候因素对研究区湿地面积变化的影响程度,并利用 ArcGIS、Origin 绘制相关结果图。

2 结果与分析

2.1 湿地分类准确性评估

基于 2000—2023 年 Landsat 影像数据和随机森林分类方法,获得了青海湖流域湿地分类图,并利用混淆矩阵进行精度评价,统计结果如图 1 所示。2000—2023 年分类图的平均总体精度为 88.45% (85.01%—92.63%),平均 kappa 系数为 0.83 (0.82—0.91)。其中,非湿地类型中,草地和裸地的平均生产者精度分别为 95.09%、93.23%;平均用户精度为 88.33%、93.35%。在这 3 种湿地类型中,沼泽化草甸分类精度较低,平均生产者精度和平均用户精度为 77.99%、86.74%;湖泊分类精度最高,平均生产者精度为 98.20%,用户精度 99.27%;沼泽湿地的平均生产者精度为 86.03%,用户精度为 86.66%。

2.2 湿地变化特征

2.2.1 湿地面积变化特征

图 2 为青海湖流域 2000—2023 年湿地分类图。由分类图可知,分布结果呈现空间一致性,沼泽化草甸主要分布在青海湖流域北部高海拔地区;湖泊主要分布在东南部,在西北部高海拔地区有小面积分布;沼泽湿地环湖分布,较为分散。

草地是青海湖流域最主要的土地覆被类型,紧邻湿地分布。因此,本研究分析了青海湖流域湿地与草地面积变化趋势,如图 2 所示。总体来看,2000—2023 年间湿地总面积由 6097.15 km²增加至 6701.34 km²,变化幅度 9.91%,草地面积呈现波动减少的趋势,2000 年草地总面积为 18604.15 km²,2023 年减少至 17684.17 km²。图 3 显示了湖泊、沼泽化草甸以及沼泽湿地 3 种湿地类型的变化情况。其中湖泊、沼泽化草甸面积有所增加,分别增加了 203.93 km²和 628.47 km²,沼泽湿地面积减少了 228.21 km²。在三种湿地类型中变化幅度最大的是沼泽化草甸,呈波动上升趋势,由占湿地总面积的 21.23% 增加为 28.70%;沼泽湿地由占湿地总面积的 6.87% 减少为 2.85%;湖泊面积在 2003—2005 年间,先呈减少趋势,此后面积逐渐增加,变化幅度为 4.65%。

图 4 为 2000—2023 年三种湿地类型在不同海拔下的面积变化情况。沼泽化草甸在海拔 3500—4000 m 和 4000—4500 m 的范围内变化趋势一致,变化较为剧烈,呈现波动上升的趋势,在海拔小于 3500 m 的区域,呈现略微上升的趋势。沼泽湿地多分布在海拔小于 3500 m 的地区,研究时段内面积逐渐减少,在海拔 3500—4000 m 和 4000—4500 m 的范围内,面积呈现略微上升的趋势。青海湖湖面海拔为 3196 m,近年来湖泊面积呈现增加的趋势,而在海拔 4000—4500 m 的地区有小面积湖泊分布,总体面积变化不大。

2.2.2 不同地形下湿地分布特征

为了解地形对湿地空间分布的影响,将 SRTM 数据与 2000、2023 年湿地分类数据进行叠加,分别计算不

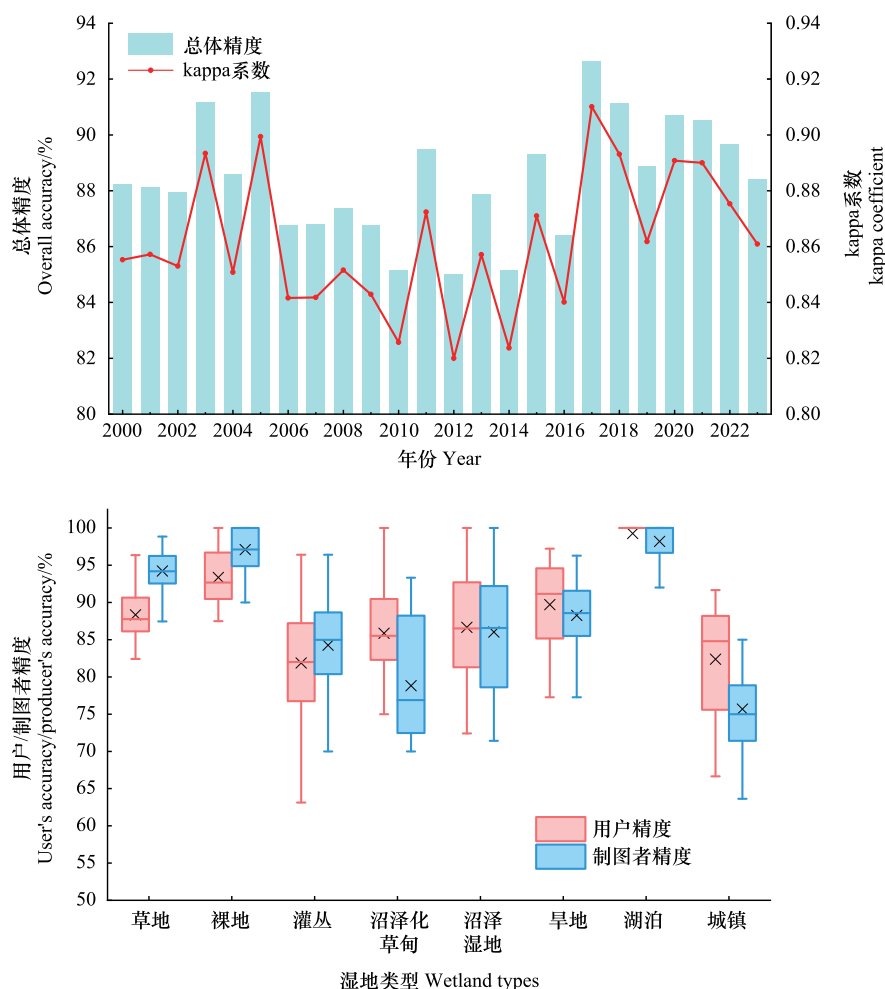


图 1 精度评价图

Fig.1 Accuracy assessment chart

同海拔、坡度、坡向上的湿地面积,如图 5 所示。结果表明,青海湖流域湿地主要集中在海拔 4500 m 以下,不同湿地类型分布在不同海拔分区上。海拔小于 3500 m 的区域,主要湿地类型有湖泊和沼泽湿地,近 20 年二者面积呈现相反的变化趋势,主要原因是部分沼泽湿地因湖泊面积增加被淹没。沼泽化草甸分布在 3500—4500 m 之间,海拔大于 5000 m 的区域无湿地分布。

将坡度按 5°等距划分,得出在青海湖流域,湿地主要分布在 0—5°坡度范围内,其中沼泽湿地和湖泊分布在 0—5°范围内,沼泽化草甸多分布在 0—10°之间。

将坡向分为平坦地面、阴坡 (0—45°/315°—360°)、半阴坡 (45°—135°)、阳坡 (135°—225°)、半阳坡 (225°—315°)。湖泊多分布在平坦地区,其他两类湿地多分布在阴坡。相较海拔和坡度而言,各个坡向上湿地的分布较为均匀。

2.2.3 不同湿地类型间的转化

湿地面积的变化受气候和人类活动影响的程度不同而有所差异,会发生不同类型之间的转化,具体分为湿地与非湿地之间、湿地与湿地之间。通过计算土地利用转移矩阵,绘制桑基图(图 6),对湿地类型间的转化进行统计分析,可以得出在研究期间内,不同地物类型之间的转化存在较大的变化。2000—2023 年,湿地与非湿地的转化规律为草地向沼泽化草甸转化,并且呈现转化量不断增大的趋势;2010—2023 年研究区内沼泽化草甸面积增加迅速,草地面积相应减少,24 年内共有 1101.44 km²草地转化为沼泽化草甸。

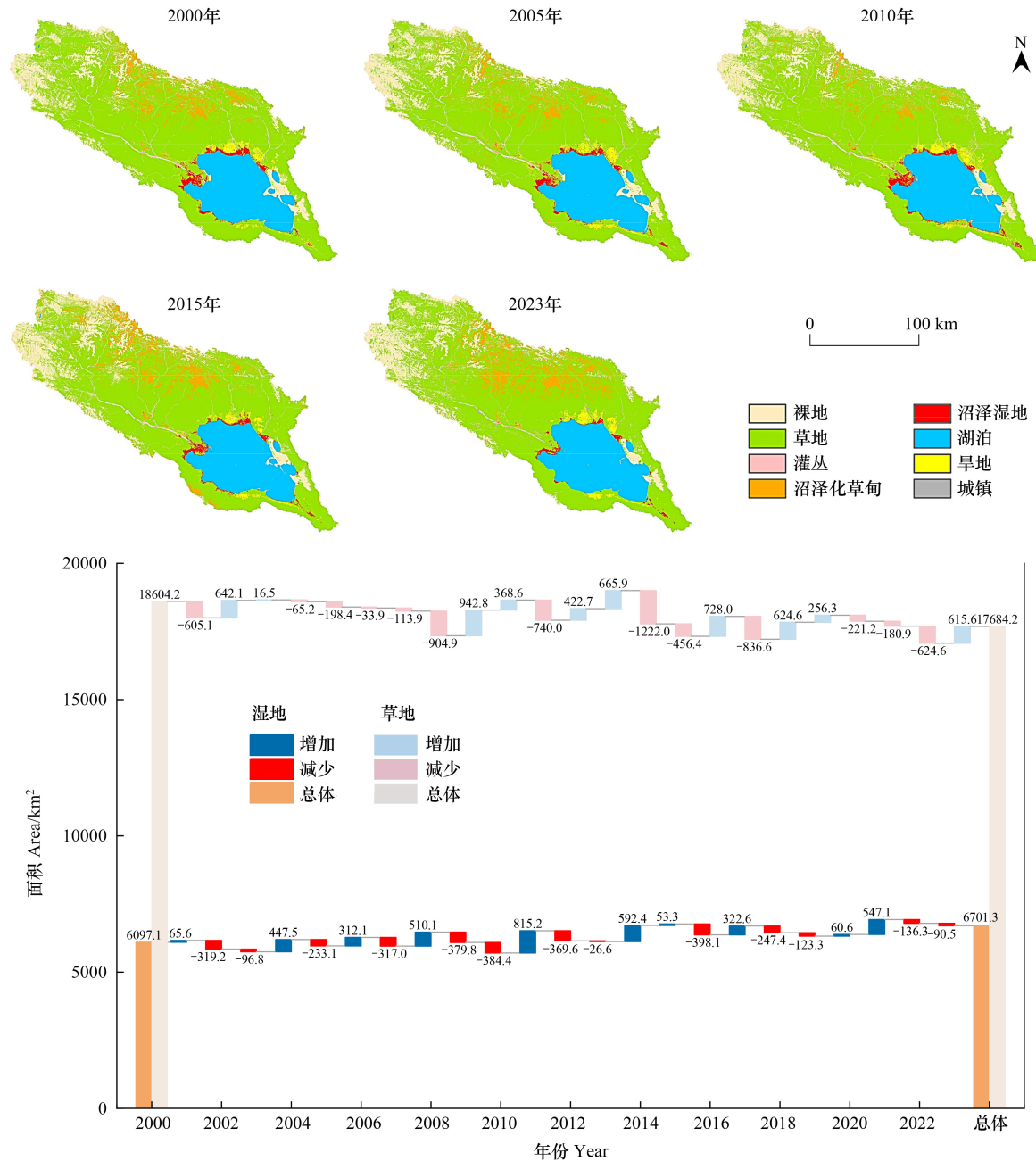


图 2 青海湖流域 2000—2023 年湿地分类与面积增减变化图

Fig.2 Qinghai Lake Basin wetland classification and area change from 2000 to 2023

湿地类之间的转化规律为沼泽湿地较为活跃,主要体现为沼泽湿地向湖泊的转化,沼泽化草甸因其分布在高海拔地区,较少与其他湿地发生转化。2000 至 2023 年间,共有 2.93 km²湖泊转化为沼泽湿地,66.65 km²沼泽湿地转化为湖泊湿地。

2.3 驱动因素分析

从表 4 可以看出,造成青海湖流域三类湿地面积变化的主导因素不同,其中沼泽湿地受蒸散发的影响最大,其特征权重值为 0.462,二者呈负相关关系($r=-0.537$),随着蒸散发量的增加,湿地水分流失,面积逐渐缩小(表 5)。沼泽化草甸对降水的响应较为明显(表 4),湖泊与积雪反照率关系密切(表 4)。

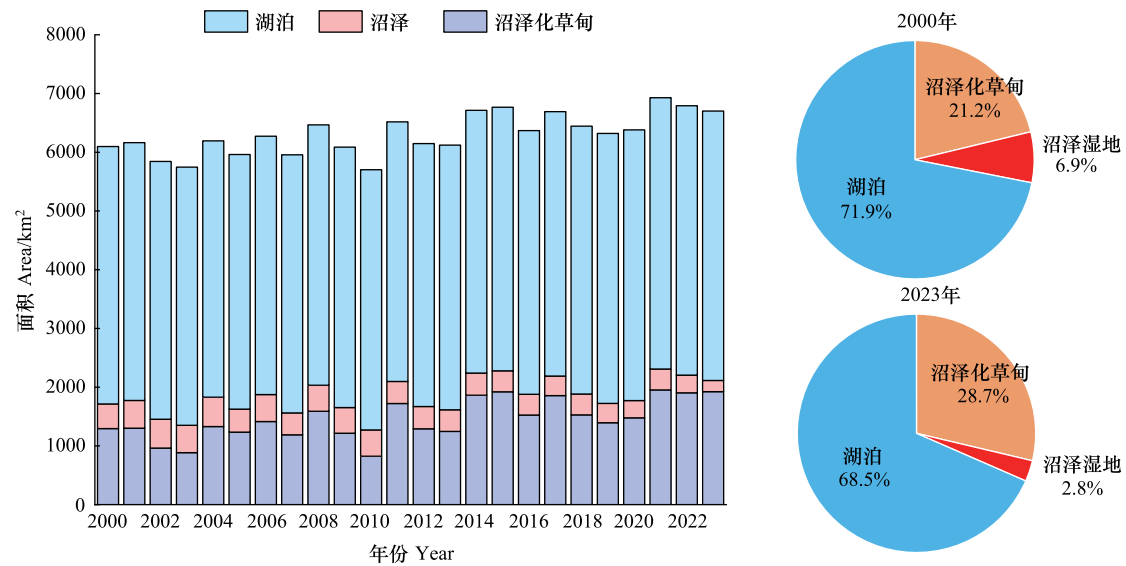


图3 2000—2023年湿地面积变化图
Fig.3 Map of wetland area changes from 2000 to 2023

表4 随机森林特征重要性权重
Table 4 Random forest feature importance weights

气候因子 Climate factors	沼泽湿地 Swamp	沼泽化草甸 Swamp meadow	湖泊 Lake
年降水量 Annual precipitation	0.059	0.345	0.129
年均温 Annual average temperature	0.251	0.230	0.121
蒸散发 Evapotranspiration	0.462	0.265	0.171
积雪反照率 Snow albedo	0.228	0.160	0.579

表5 青海湖流域不同湿地与气候因子相关性
Table 5 Correlation between different wetland types and climate factors in the Qinghai Lake Basin

Wetland types	年降水量 Annual precipitation	年均温 Annual average temperature	蒸散发 Evapotranspiration	积雪反照率 Snow albedo
沼泽化草甸 Swamp meadow	0.378	0.128	0.317	0.006
沼泽湿地 Swamp	-0.488 *	0.227	-0.537 **	-0.244
湖泊 Lake	0.431 *	0.255	0.527 **	0.363

* 表示在 $P<0.05$,相关性显著; ** 表示在 $P<0.01$,相关性显著

研究区不同高程上的湿地面积与不同季节气候因子的相关关系如图 7 所示。由于大于 5000 m 的地区中无湿地分布,因此不做统计。在高程小于 3500 m 的地区,湖泊面积与春季降水量($r=0.455$)、春季积雪反照率($r=0.448$)均呈正相关关系;沼泽湿地与春季积雪反照率呈负相关关系($r=-0.496$);沼泽化草甸与夏季气温呈正相关关系($r=0.470$)。在 3500—4000 m 的高程带上,沼泽湿地与春季降水量呈正相关关系($r=0.490$)。在 4000—4500 m 的高程带上,湖泊与冬季降水量呈正相关关系($r=0.515$),与春季和冬季积雪均呈正相关关系。由图 7 可知,不同的高程带上主导不同湿地变化的气候因子有所不同,在这三种湿地类型中,湖泊对降水和积雪反照率的响应较为明显,气温升高导致冰川积雪融化,湖泊面积增加;沼泽化草甸在海拔为 4000—4500 m 的地区与春季积雪反照率呈显著正相关($r=0.439$)。

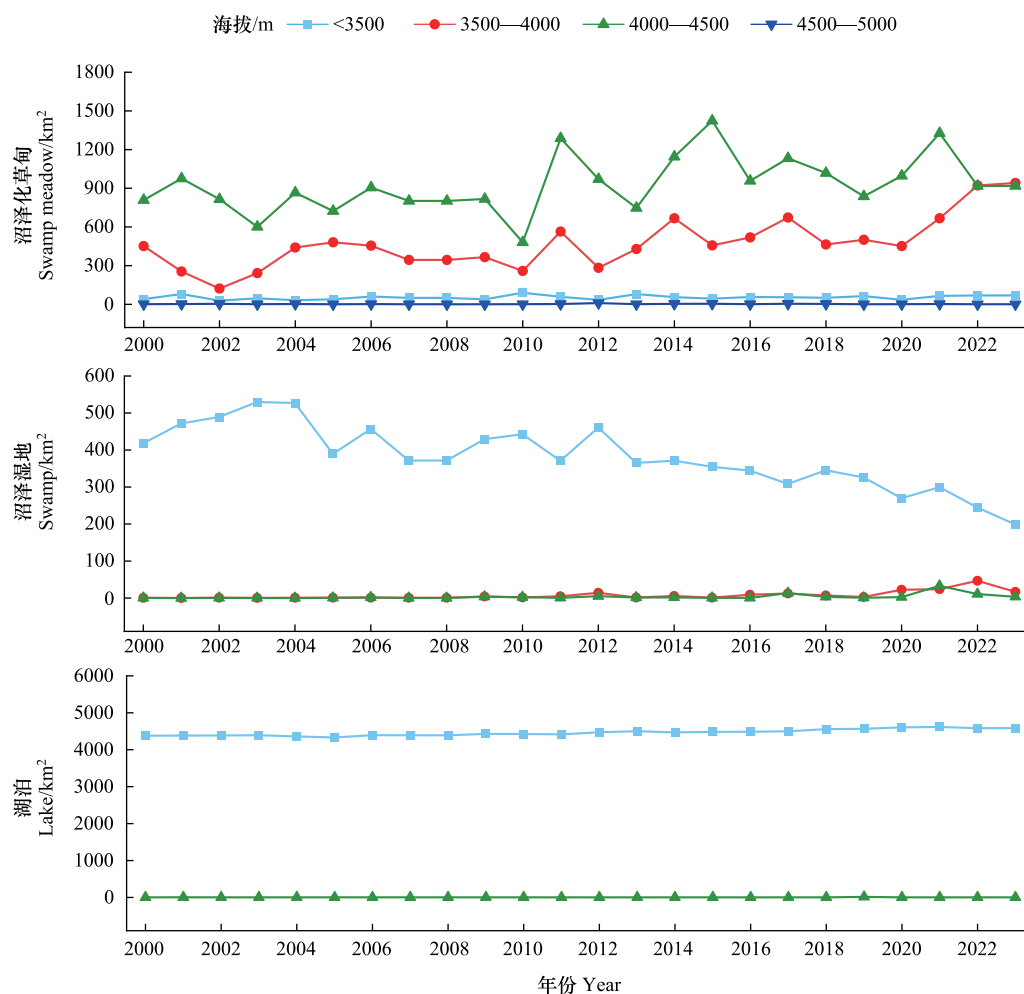


图4 不同海拔下三类湿地面积变化特征

Fig.4 Changes in wetland area characteristics at different altitudes

3 讨论

3.1 分类结果与其他湿地数据产品对比

目前,在世界和各个国家范围内进行的各类湿地清查^[40—41],由于研究目的、湿地定义、分类体系和数据空间分辨率不一致的原因,难以进行比较^[42]。对此,将本研究 2020 年的分类结果与同时期、同空间分辨率的湿地数据集(全球地表覆盖数据(Globeland30)、全球 30 米精细分类湿地数据集(GWL_FCS30D)、中国 1985—2022 年 30 m 地表覆被数据集(CLCD)、30 m 分辨率中国湿地空间分布数据集(CAS_ Wetlands)、中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC))进行对比发现,本研究所提取的湿地总面积为 6381.12 km², Globeland30、GWL_FCS30D、CLCD 的湿地总面积分别为 4669.32 km²、4634.47 km²、4566.35 km²,这 3 种湿地数据集低估了青海湖流域湿地的面积,尤其是在高海拔地区分布的沼泽化草甸提取效果不理想;CAS_ Wetlands 与 CNLUCC 的分类结果好于上述三类数据集,湿地总面积分别为 6895.09 km²、6159.13 km²,CAS_ Wetlands 数据集只有 2015 年一期,本研究中该年份的湿地面积为 6766.70 km²,二者湿地面积较为接近。从空间上看,这两个数据集湿地分布基本呈现空间一致性,但仍有部分湿地没有准确识别,存在误分。

沼泽化草甸是青海湖流域主要湿地类型之一,也是维系该区生态平衡的重要地理单元,准确提取沼泽化草甸可为该区碳排放估算和水资源调控提供科学依据^[43]。传统的目视解译会存在细小湿地被漏分的情况,

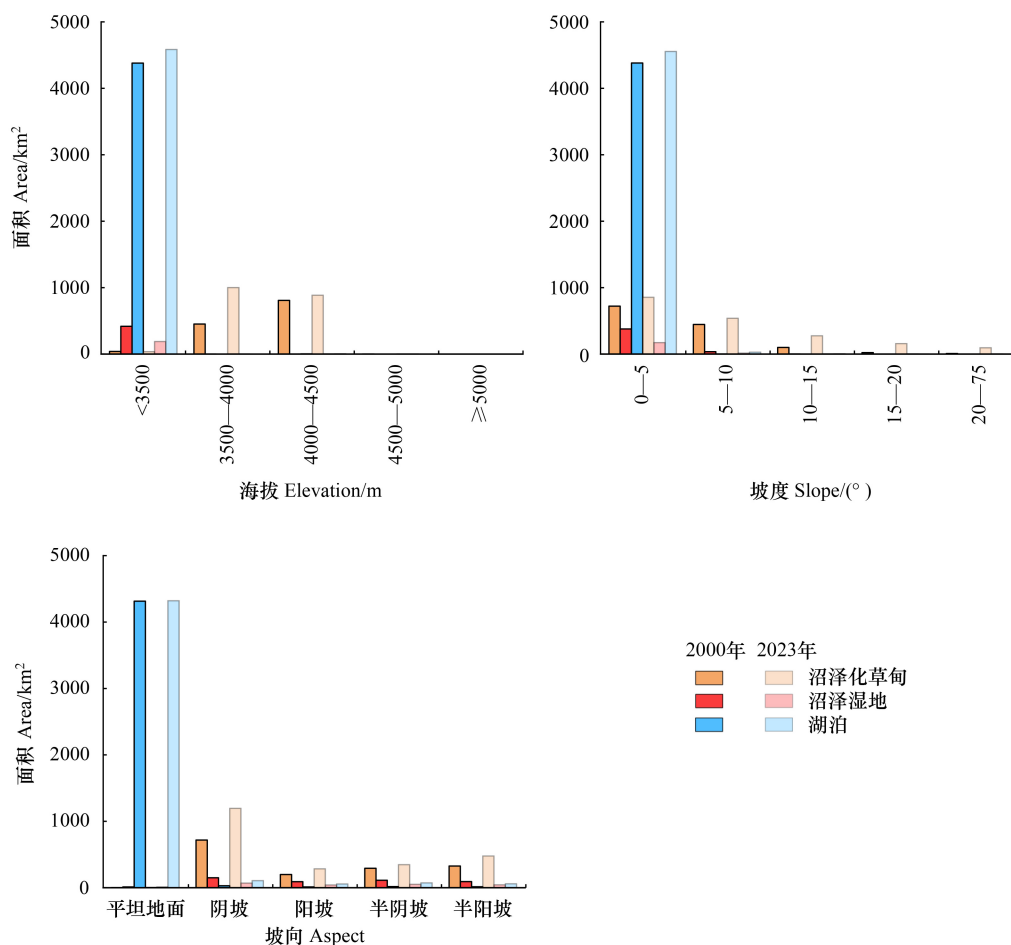


图5 湿地分布的地形特征图

Fig.5 Topographical characteristics of wetland distribution

可能会导致湿地面积被低估^[44]。Globeland30 是采用 POK(像素-对象-知识)方法开发的全球 30 m 土地覆被产品^[45],该数据集中湿地分类精度最低;GWL_FCS30D 数据集虽然采用全局分布的训练样本和局部自适应建模来确保湿地分类的准确性,但由于某些湿地复杂的空间和光谱特征而导致的误分漏分问题仍然无法解决^[46];CAS_Wetlands 数据集是基于中国范围的野外调查,采用集成面向对象方法与多层决策树的湿地分类技术(HOHC)形成的高精度中国湿地分布数据^[47],但只有一期数据,无法为长时间监测湿地变化提供帮助,CNLUCC 数据集同样每五年才有一次数据产品。上述数据集都是在大区域尺度上进行分类,由于分类方法和分类体系的不同,存在较大的不确定性和差异性。对比这五个数据集,本研究基于 GEE 云平台,对近 24 年青海湖流域湿地进行了分类。沼泽化草甸、沼泽湿地与湖泊 3 种湿地类型的平均生产者精度和平均用户精度分别在 77.99%、86.74%以上,在流域尺度上提取的范围更加精准,在时间尺度上形成了连续时间序列的湿地数据集,可为理解生态系统的长期演变和动态变化提供支持。

3.2 高寒湿地面积变化驱动因素分析

受研究区气候暖湿化的影响,青海湖流域湿地类型转化方式,主要体现为沼泽湿地与湖泊之间的转化、沼泽化草甸与草地之间的转化。24 年内共有 1101.44 km²草地转化为沼泽化草甸,2.93 km²湖泊转化为沼泽湿地,66.65 km²沼泽湿地转化为湖泊湿地。沼泽化草甸是草甸与湿地之间的过渡类型,草地向沼泽化草甸的转化通常是由于土壤水分增加、排水不良引起的^[48]。这种演替会导致生物多样性、土壤养分、植物生产力和碳循环发生变化,进而影响沼泽化草甸所能提供的生态系统服务功能^[48-50]。近年来,气候变暖和人为干扰加剧

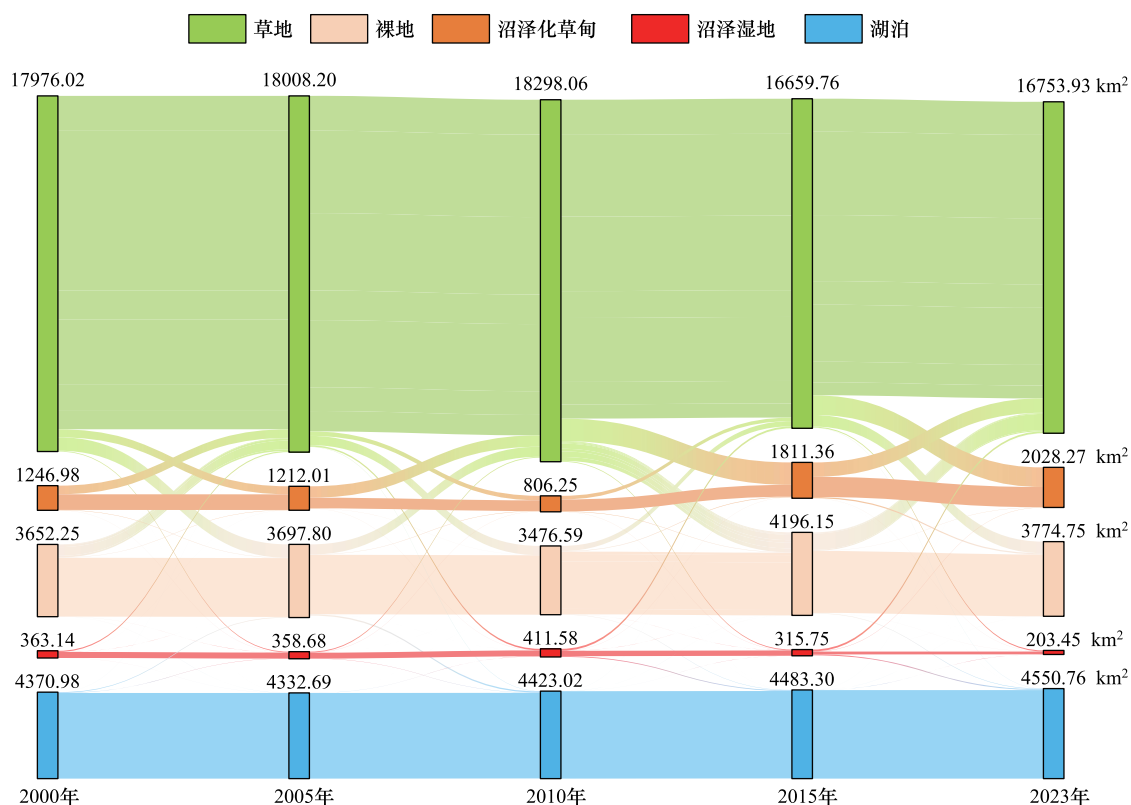


图 6 2000—2023 年青海湖流域湿地类型转化关系

Fig.6 The Transformation of wetland types in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2023

导致了地下水位下降和水文条件改变,青藏高原部分地区沼泽化草甸逐渐向干旱演替^[49],而在青海湖流域,由于降水量显著增加,湿地整体呈现由干向湿的转化趋势。

在青海湖流域,随着海拔的增加,气温降水模式不同,影响湿地面积变化的因素也有所差异。在地形复杂的山区,高程、坡度、坡向等地形因子不仅显著影响植被空间分布格局,而且还控制着其他环境因子,如太阳辐射、风、降水、积雪、土壤类型等,这些环境因子的综合作用决定了地表覆被类型的空间异质性^[51—52]。相比于同纬度的其他地区,青藏高原植被生长状况对气候变化更为敏感,这主要取决于地形^[53]。

本研究定量分析了积雪反照率和其它气候因子对不同地形条件下湿地面积的影响。结果表明,在高海拔地区沼泽化草甸与春季积雪反照率呈显著正相关;湖泊受季节性积雪与降水量影响较大,在海拔小于 3500 m 的地区,湖泊面积与春季降水量、春季积雪反照率均成正相关关系(r 分别为 0.455 及 0.448)。春季融雪是青海湖流域维持沼泽化草甸的湿润环境、促进湿地植被生长的重要水分来源。不同于高纬度地区,青藏高原的积雪覆盖率和积雪日数相对较小,但由于地处低纬度高海拔区域,接收较强的太阳辐射。因此,青藏高原的积雪变化会强烈地改变局地 and 区域的能量平衡和水循环,对气候系统产生重要的影响^[54]。已有研究表明,青藏高原地区增温速率显著高于全球平均速率^[55],导致积雪发生显著变化,影响高寒植被的生长^[56]。高寒湿地的水文特征与冰雪融水密切相关^[57],积雪变化可以调节气温、土壤温度和土壤湿度,影响植被生长所需的热量积累^[58],进而导致湿地发生变化。在其它高寒湿地驱动力分析的研究中,湿地变化主要受降水、气温、蒸散发的影响^[59—60]。有研究表明,降水对高寒湿地的影响是缓慢积累的,温度对湿地变化的影响最大^[13]。气温升高会增加蒸发,造成沼泽湿地水文损失,抑制沼泽植被的生长^[61]。本研究中沼泽湿地面积与蒸散发成负相关($r=-0.537$),流域内蒸散发增加致使沼泽湿地水分减少,引起湿地面积减少或干旱化。而有所不同的是,在青海湖流域降水和季节性积雪是湖泊和沼泽化草甸发生变化的主要原因。

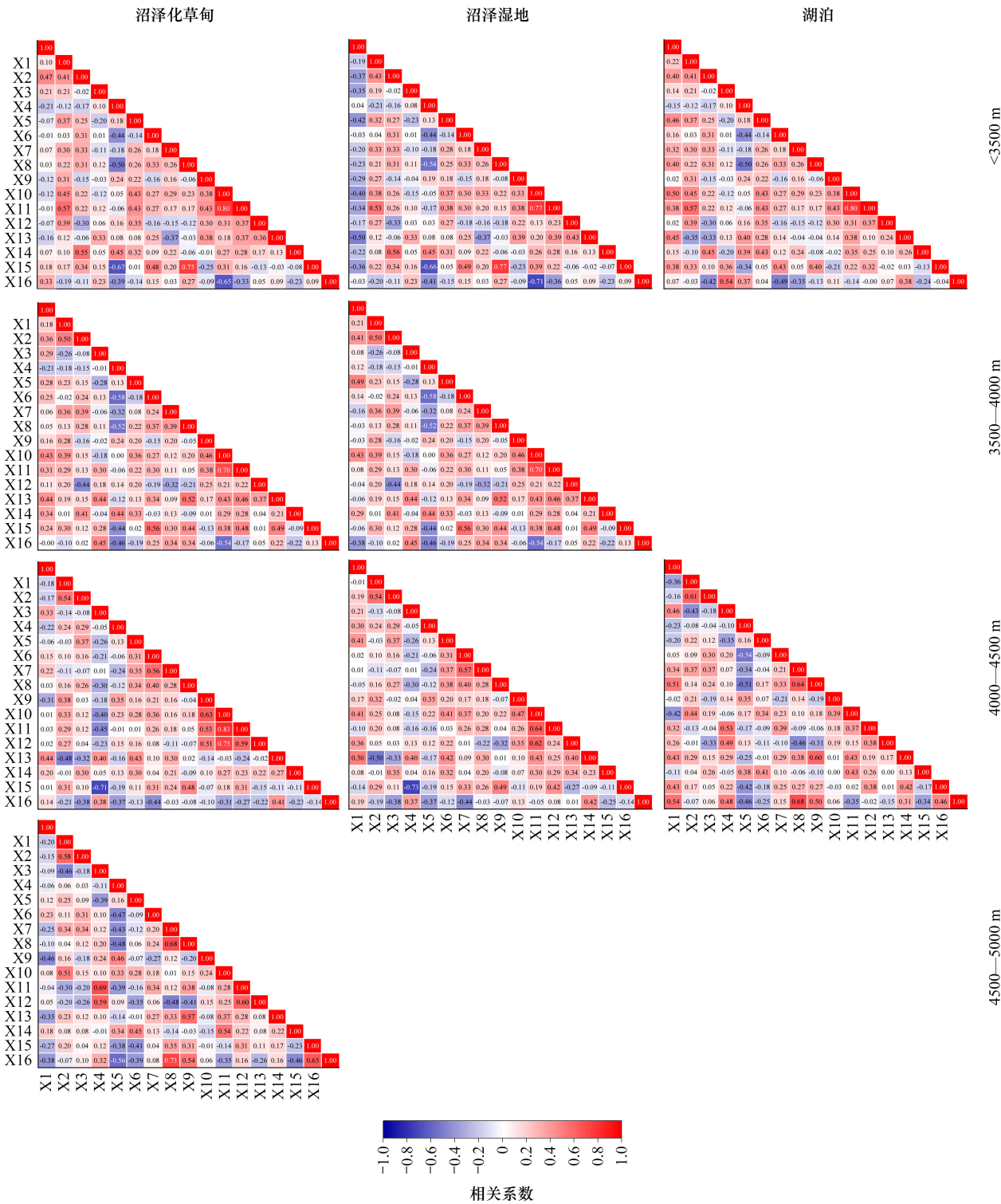


图 7 不同海拔上湿地面积与气候因子的相关性

Fig.7 Correlation between wetland area at different elevations and climate factors

X1: 春季平均气温; X2: 秋季平均气温; X3: 夏季平均气温; X4: 冬季平均气温; X5: 春季降水量; X6: 夏季降水量; X7: 秋季降水量; X8: 冬季降水量; X9: 春季蒸散发; X10: 夏季蒸散发; X11: 秋季蒸散发; X12: 冬季蒸散发; X13: 春季积雪反照率; X14: 夏季积雪反照率; X15: 秋季积雪反照率; X16: 冬季积雪反照率

3.3 局限性与展望

湿地分类的精度主要取决于影像质量、样本点、分类方法,其中影像质量是决定分类精度的主要因素^[62]。此外,湿地具有动态性且无明确的边界,存在较大的时间和空间异质性,对湿地进行遥感分类时需要考虑季节性带来的影响^[62-63]。青藏高原地区海拔高、气候多变,云覆盖率较高,获取遥感影像进行湿地信息提取时会受到云层的影响^[64],因此需要针对云覆盖率较高的情况进行处理或者选择合适的时间段来获取影像数据。在青海湖流域,沼泽化草甸分布的高海拔地区云量较多,本研究选择植被生长季节(5—9月)的遥感影像进行去云合成处理得到了研究区无云影像。最终进行湿地分类的遥感影像是由多期影像进行填补的,可能会造成地物信息的缺失,影响湿地分类的准确性^[65]。本研究所提取的三种湿地类型中,沼泽化草甸分类精度最低。遥感影像像元可能包含多种地物或植被类型,光谱特征相似,导致沼泽化草甸与周围其他植被类型混合在一起^[66],难以精确提取出沼泽化草甸的边界,在后续工作中应进一步考虑提高沼泽化草甸提取的效果。

4 结论

本研究以典型高寒湿地分布区青海湖流域为研究区,利用 GEE 云平台和 Landsat 遥感影像,分析了该区域湿地的时空变化特征。结果表明,2000—2023 年青海湖流域湿地总体面积逐渐增加,其中沼泽湿地面积呈下降趋势,湖泊与沼泽化草甸面积逐渐增加。受青藏高原气候暖湿化影响,湿地呈现由干旱向湿润的转化趋势。湿地类之间转换主要为沼泽湿地向湖泊之间的转化,非湿地与湿地的转化规律为草地向沼泽化草甸转化。此外,还重点探讨了不同地形条件下湿地面积对气候变化的响应。结果表明,青海湖流域不同海拔高度上因其气候、降水模式存在差异,致使湿地面积变化的气候因子不同。在高寒地区,降水和季节性积雪是影响青海湖流域高寒湿地面积变化的主要因素。春季积雪消融,为湿地提供大量水分,进而导致湿地面积增加。

参考文献(References):

- [1] Zhang Y R, Gong Z N, Gong H L, Zhao W J. Investigating the dynamics of wetland landscape pattern in Beijing from 1984 to 2008. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(5): 845-858.
- [2] 陈桂琛, 黄志伟, 卢学峰, 彭敏. 青海高原湿地特征及其保护. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 254-259.
- [3] Liu Y, Liu G H, Xiong Z Q, Liu W Z. Response of greenhouse gas emissions from three types of wetland soils to simulated temperature change on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmospheric Environment*, 2017, 171: 17-24.
- [4] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价. *地理研究*, 2011, 30(12): 2289-2295.
- [5] 王根绪, 李元寿, 王一博, 陈玲. 近 40 年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化. *地理学报*, 2007, 62(5): 481-491.
- [6] Demarquet Q, Rapinel S, Dufour S, Hubert-Moy L. Long-term wetland monitoring using the landsat archive; a review. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): 820.
- [7] Jin H R, Huang C Q, Lang M W, Yeo I Y, Stehman S V. Monitoring of wetland inundation dynamics in the Delmarva Peninsula using Landsat time-series imagery from 1985 to 2011. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 26-41.
- [8] Töyrä J, Pietroniro A, Martz L W, Prowse T D. A multi-sensor approach to wetland flood monitoring. *Hydrological Processes*, 2002, 16(8): 1569-1581.
- [9] Mui A, He Y H, Weng Q H. An object-based approach to delineate wetlands across landscapes of varied disturbance with high spatial resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 109: 30-46.
- [10] Tulbure M G, Broich M, Stehman S V, Kommareddy A. Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 142-157.
- [11] Pereira O J R, Melfi A J, Montes C R. Image fusion of Sentinel-2 and CBERS-4 satellites for mapping soil cover in the Wetlands of Pantanal. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2017, 8(2): 148-172.
- [12] Lu M, Wu W B, Zhang L, Liao A P, Peng S, Tang H J. A comparative analysis of five global cropland datasets in China. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(12): 2307-2317.
- [13] Zhang B, Niu Z G, Zhang D Q, Huo X L. Dynamic changes and driving forces of alpine wetlands on the Qinghai-Tibetan Plateau based on long-term time series satellite data: a case study in the Gansu Maqu wetlands. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4147.
- [14] Bai J H, Lu Q Q, Wang J J, Zhao Q Q, Ouyang H, Deng W, Li A N. Landscape pattern evolution processes of alpine wetlands and their driving factors in the Zoige Plateau of China. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(1): 54-67.
- [15] 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.

- [16] 章光新,武瑶,吴燕锋,刘雪梅. 湿地生态水文学研究综述. 水科学进展,2018,29(5): 737-749.
- [17] 王介民,高峰,刘绍民. 流域尺度 ET 的遥感反演. 遥感技术与应用,2003,18(5): 332-338.
- [18] Zhang Y, Wang G X, Wang Y B. Changes in alpine wetland ecosystems of the Qinghai-Tibetan Plateau from 1967 to 2004. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 180(1/2/3/4): 189-199.
- [19] Zhang X J, Wang G Q, Xue B L, Zhang M X, Tan Z X. Dynamic landscapes and the driving forces in the Yellow River Delta wetland region in the past four decades. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147644.
- [20] Li Y X, Liu D P, Li T X, Fu Q, Liu D, Hou R J, Meng F X, Li M, Li Q L. Responses of spring soil moisture of different land use types to snow cover in Northeast China under climate change background. *Journal of Hydrology*, 2022, 608: 127610.
- [21] Edwards A C, Scalenghe R, Freppaz M. Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: a review. *Quaternary International*, 2007, 162: 172-181.
- [22] Thackeray C, Fletcher C. Snow albedo feedback: Current knowledge, importance, outstanding issues and future directions. *Progress in Physical Geography*, 2016, 40(3): 392-408.
- [23] 曹生奎,陈克龙,曹广超,朱锦福,芦宝良,张涛,王记明. 青海湖流域矮嵩草甸土壤有机碳密度分布特征. 生态学报, 2014, 34(2): 482-490.
- [24] Wang X L, Liang T G, Xie H J, Huang X D, Lin H L. Climate-driven changes in grassland vegetation, snow cover, and lake water of the Qinghai Lake basin. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(3): 036017.
- [25] Han Y L, Yu D Y, Chen K L. Evolution and prediction of landscape patterns in the Qinghai lake basin. *Land*, 2021, 10(9): 921.
- [26] 梅子钰,张雅茹,黄心言,刘志成. 基于生态系统服务的青海湖流域生态风险评估及其空间异质性影响因素分析. 生态学报, 2024, 44(12): 4973-4986.
- [27] Zhang N, Chen K L, Wang S Y, Qi D S, Zhou Z Y, Xie C Y, Liu X J. Dynamic response of the cbbL carbon sequestration microbial community to wetland type in Qinghai Lake. *Biology*, 2023, 12(12): 1503.
- [28] 陈桂琛,彭敏. 青海湖地区植被及其分布规律. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(1): 71-81.
- [29] Wang L, Mao X, Song X H, Tang W J, Wang W Y, Yu H Y, Deng Y H, Zhang Z P, Zhang Z J, Zhou H K. How rising water levels altered ecosystem provisioning services of the area around Qinghai Lake from 2000 to 2020: an InVEST-RF-GTWR combined method. *Land*, 2022, 11(9): 1570.
- [30] Beck H E, Wood E F, Pan M, Fisher C K, Miralles D G, van Dijk A I J M, McVicar T R, Adler R F. MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(3): 473-500.
- [31] Ye L Z, Xiao P F, Zhang X L, Feng X Z, Hu R, Ma W, Li H X, Song Y N, Ma T Y. Evaluating snow bidirectional reflectance of models using multiangle remote sensing data and field measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [32] Semeniuk C A, Semeniuk V. A geomorphic approach to global classification for inland wetlands. *Vegetatio*, 1995, 118(1): 103-124.
- [33] 牛振国,景雨航,张东启,张波. 气候变化背景下青藏高原湿地生态系统响应特征: 回顾与展望. 气候变化研究进展, 2024, 20(5): 509-518.
- [34] Zhang Y L, Wang C L, Bai W Q, Wang Z F, Tu Y L, Yangjaen D G. Alpine wetlands in the Lhasa River Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(3): 375-388.
- [35] Yan X, Niu Z G. Reliability evaluation and migration of wetland samples. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 8089-8099.
- [36] Breiman L. Random forests. *Machine learning*, 2001, 45: 5-32.
- [37] 张倚浩,阎建忠,程先. 气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展. 生态学报, 2023, 43(6): 2180-2193.
- [38] Yang G Q, Zhang M, Xie Z H, Li J Y, Ma M G, Lai P Y, Wang J B. Quantifying the contributions of climate change and human activities to water volume in lake Qinghai, China. *Remote Sensing*, 2021, 14(1): 99.
- [39] Dong H M, Song Y G, Zhang M S. Hydrological trend of Qinghai lake over the last 60 years: driven by climate variations or human activities? *Journal of Water and Climate Change*, 2019, 10(3): 524-534.
- [40] Davidson N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934.
- [41] Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, Yao W B, Zhou D M, Zhao K Y, Zhao H, Li N N, Huang H B, Li C C, Yang J, Liu C X, Liu S, Wang L, Li Z, Yang Z Z, Qiao F, Zheng Y M, Chen Y L, Sheng Y W, Gao X H, Zhu W H, Wang W Q, Wang H, Weng Y L, Zhuang D F, Liu J Y, Luo Z C, Cheng X, Guo Z Q, Gong P. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2813-2823.
- [42] Zheng Y, Liu H M, Zhuo Y, Li Z Y, Liang C Z, Wang L X. Dynamic changes and driving factors of wetlands in Inner Mongolia Plateau, China. *PLoS One*, 2019, 14(8): e0221177.
- [43] Cao S K, Cao G C, Feng Q, Han G Z, Lin Y Y, Yuan J, Wu F T, Cheng S Y. Alpine wetland ecosystem carbon sink and its controls at the Qinghai Lake. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(5): 210.
- [44] Gong P, Niu Z G, Cheng X, Zhao K Y, Zhou D M, Guo J H, Liang L, Wang X F, Li D D, Huang H B, Wang Y, Wang K, Li W N, Wang X W, Ying Q, Yang Z Z, Ye Y F, Li Z, Zhuang D F, Chi Y B, Zhou H Z, Yan J. China's wetland change (1990—2000) determined by remote sensing. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(7): 1036-1042.
- [45] Chen J, Chen L J, Chen F, Ban Y F, Li S N, Han G, Tong X H, Liu C, Stamenova V, Stamenov S. Collaborative validation of GlobeLand30:

- methodology and practices. *Geo-spatial Information Science*, 2021, 24(1): 134-144.
- [46] Zhang X, Liu L Y, Zhao T T, Wang J Q, Liu W D, Chen X D. Global annual wetland dataset at 30 m with a fine classification system from 2000 to 2022. *Scientific Data*, 2024, 11(1): 310.
- [47] Mao D H, Wang Z M, Du B J, Li L, Tian Y L, Jia M M, Zeng Y, Song K S, Jiang M, Wang Y Q. National wetland mapping in China: a new product resulting from object-based and hierarchical classification of landsat 8 OLI images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 164: 11-25.
- [48] Pan T, Hou S, Liu Y J, Tan Q H, Liu Y H, Gao X F. Influence of degradation on soil water availability in an alpine swamp meadow on the eastern edge of the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137677.
- [49] Yang W, Zhao J X, Qu G P, Li R C, Wu G L. The drought-induced succession decreased ecosystem multifunctionality of alpine swamp meadow. *CATENA*, 2023, 231: 107358.
- [50] Wang H, Yu L F, Chen L T, Zhang Z H, Li X F, Liang N S, Peng C H, He J S. Carbon fluxes and soil carbon dynamics along a gradient of biogeomorphic succession in alpine wetlands of Tibetan Plateau. *Fundamental Research*, 2023, 3(2): 151-159.
- [51] Guo D, Zhang H Y, Hou G L, Zhao J J, Liu D Y, Guo X Y. Topographic controls on alpine treeline patterns on Changbai Mountain, China. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(2): 429-441.
- [52] Wang C Y, Wang J N, Naudiyal N, Wu N N, Cui X, Wei Y Q, Chen Q T. Multiple effects of topographic factors on spatio-temporal variations of vegetation patterns in the three parallel rivers region, southeast Qinghai-Tibet plateau. *Remote Sensing*, 2021, 14(1): 151.
- [53] Pan Y H, Wang Y, Zheng S J, Huete A R, Shen M G, Zhang X Y, Huang J F, He G J, Yu L, Xu X Y, Xie Q Y, Peng D L. Characteristics of greening along altitudinal gradients on the Qinghai-Tibet Plateau based on time-series landsat images. *Remote Sensing*, 2022, 14(10): 2408.
- [54] Che T, Hao X H, Dai L Y, Li H Y, Huang X D, Xiao L. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*, 2019, 34(11): 1247-1253.
- [55] You Q L, Cai Z Y, Pepin N, Chen D L, Ahrens B, Jiang Z H, Wu F Y, Kang S C, Zhang R N, Wu T H, Wang P L, Li M C, Zuo Z Y, Gao Y H, Zhai P M, Zhang Y Q. Warming amplification over the Arctic pole and third pole: trends, mechanisms and consequences. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103625.
- [56] Wang X Y, Wu C Y, Peng D L, Gonsamo A, Liu Z J. Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256: 61-74.
- [57] Wissinger S A, Oertli B, Rosset V. Invertebrate communities of alpine ponds//*Invertebrates in Freshwater Wetlands*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 55-103.
- [58] Wang X F, Li Z X, Xiao J F, Zhu G F, Tan J L, Zhang Y, Ge Y C, Che T. Snow cover duration delays spring green-up in the Northern Hemisphere the most for grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 355: 110130.
- [59] Salimi S, Almuktar S A A N, Scholz M. Impact of climate change on wetland ecosystems: a critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112160.
- [60] Li Y, Hou Z, Zhang L Q, Qu Y, Zhou G Q, Lin J T, Li J W, Huang K. Long-term spatio-temporal changes of wetlands in Tibetan Plateau and their response to climate change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 121: 103351.
- [61] Shen X J, Shen M G, Wu C Y, Peñuelas J, Ciais P, Zhang J Q, Freeman C, Palmer P I, Liu B H, Henderson M, Song Z L, Sun S B, Lu X G, Jiang M. Critical role of water conditions in the responses of autumn phenology of marsh wetlands to climate change on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e17097.
- [62] Liu Q H, Zhang Y L, Liu L S, Wang Z F, Nie Y, Rai M K. A novel Landsat-based automated mapping of marsh wetland in the headwaters of the Brahmaputra, Ganges and Indus Rivers, southwestern Tibetan Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 102481.
- [63] Gallant A. The challenges of remote monitoring of wetlands. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10938-10950.
- [64] Deng X Y, Wu L X, He C J, Shao H Y. Study on spatiotemporal variation pattern of vegetation coverage on Qinghai-Tibet Plateau and the analysis of its climate driving factors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(14): 8836.
- [65] Phan T N, Kuch V, Lehnert L W. Land cover classification using google earth engine and random forest classifier—the role of image composition. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2411.
- [66] 明義森, 刘启航, 柏荷, 黄昌. 利用光学和 SAR 遥感数据的若尔盖湿地植被分类与变化监测. *遥感学报*, 2023, 27(6): 1414-1425.