

DOI: 10.20103/j.stxb.202409172247

邱梦琪, 刘焱序, 刘涛, 张叶, 王璟, 杨猛, 秦杰, 向国萍. 1986—2024 年若尔盖湿地景观演变及其驱动因素. 生态学报, 2025, 45(5): 2162-2172.

Qiu M Q, Liu Y X, Liu T, Zhang Y, Wang J, Yang M, Qin J, Xiang G P. Landscape dynamics and its driving factors in Zoige Wetlands from 1986 to 2024. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2162-2172.

1986—2024 年若尔盖湿地景观演变及其驱动因素

邱梦琪¹, 刘焱序^{1,*}, 刘涛², 张叶², 王璟², 杨猛², 秦杰³, 向国萍²

1 北京师范大学地理科学学部 地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875

2 四川省第二地质大队 黄河上游若尔盖生态修复野外科学观测研究站, 成都 610017

3 四川省第九地质大队, 德阳 618000

摘要:若尔盖湿地是我国面积最大的高原泥炭沼泽集中分布区, 在保障黄河水资源安全方面发挥了巨大的作用。然而, 当前缺乏针对若尔盖地区的长时间序列、较高时空分辨率的湿地景观信息, 导致对若尔盖湿地景观演变全貌认识不全。为明晰若尔盖湿地时空演变趋势及驱动因素, 研究以若尔盖湿地草本沼泽和水体为研究对象, 在 Google Earth Engine 云平台中, 利用 Landsat-5/7/8 遥感卫星数据集, 结合随机森林分类与样本迁移方法, 生成了 1986—2024 年湿地空间分布数据集, 空间分辨率为 30 m, 时间间隔为 1 年, 整体分类精度在 95.49% 以上。研究表明: 2024 年草本沼泽及水体总湿地面积相对 1986 年退化了 77.15 km², 湿地退化率为 2.5%。草本沼泽以 1996 年及 2013 年为时间节点, 呈现出“增-减-增”的变化趋势; 水体面积的变化波动较大, 呈现“减-增”的变化趋势, 2024 年的水体规模约是 1986 年的 1.6 倍。草本沼泽会随着生长季温度的升高而发生退化, 降水量与径流量的增加促进了水体面积的扩张, 近些年的湿地修复工程有效促进了湿地恢复。然而, 水体的连通性及草本沼泽的聚集性却呈现下降趋势, 因此, 未来的湿地保护和修复工作应重点提升湿地的连通性和聚集性。研究为若尔盖湿地保护、恢复和可持续管理提供了参考信息。

关键词:若尔盖湿地; 长时间序列; 时空变化; 景观指数; 驱动因素

Landscape dynamics and its driving factors in Zoige Wetlands from 1986 to 2024

QIU Mengqi¹, LIU Yanxu^{1,*}, LIU Tao², ZHANG Ye², WANG Jing², YANG Meng², QIN Jie³, XIANG Guoping²

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Ruergai Ecological Restoration Field Observation and Research Station, Upper Yellow River, the 2nd Geological Brigade of Sichuan, Chengdu 610017, China

3 The 9th Geological Brigade of Sichuan, Deyang 618000, China

Abstract: The Zoige (Ruergai) Wetland, China's largest high-altitude peatland region, is crucial for maintaining the water resource balance of the Yellow River. However, the lack of long-term, high-resolution, and densely sampled wetland datasets has impeded a thorough understanding of the wetland's landscape evolution. To elucidate the spatio-temporal evolution trends and driving factors of the Zoige wetland and enhance its protection and management, we concentrated on the marshes and water bodies within the Zoige Wetland, utilizing the Google Earth Engine cloud platform to process Landsat-5/7/8 remote sensing satellite data. Employing random forest classification and sample transfer techniques, we created a wetland spatial distribution dataset covering 1986 to 2024, with a spatial resolution of 30 m and a temporal resolution of one year, achieving an overall classification accuracy exceeding 95.49%. The findings show that by 2024, the total wetland area

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFF1309200); 国家自然科学基金项目(42171088)

收稿日期:2024-09-17; **采用日期:**2025-01-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanxuli@bnu.edu.cn

of marshes and water bodies had diminished by 77.15 km² from 1986, indicating an overall degradation rate of 2.5%. Marshes followed a “growth-decline-growth” trajectory, with key transition points identified in 1996 and 2013. Water bodies exhibited greater variability, following a “decline-growth” pattern, with their area in 2024 being approximately 1.6 times that of 1986. Marsh degradation was closely linked to rising temperatures during the growing season, while increases in precipitation and runoff facilitated the expansion of water bodies. Recent wetland restoration efforts have played a significant role in reversing these degradation trends. However, the connectivity of water bodies and the aggregation of marshes have shown a declining trend. Consequently, future wetland conservation and restoration initiatives should prioritize enhancing the connectivity and aggregation of wetlands. This study provides critical insights and reference data for the protection, restoration, and sustainable management of the Zoige Wetland.

Key Words: Zoige Wetland; long time series; spatial-temporal change; landscape index; driving factor

湿地面积仅占陆地表面的 2.6%,但生产了地球上 20%以上的有机碳^[1],直接或间接为 75 项可持续发展目标做出了贡献^[2]。然而,湿地是敏感、脆弱、动态的生态系统,在海平面上升、海水入侵、洪水、干旱及农业扩张的威胁下面临流失和生态退化的严重风险^[3-7]。尽管人类在努力恢复自然湿地,但全球 69%—75%的湿地在上个世纪已经消失^[8]。因此,湿地生态系统规模的变化引起了世界越来越多的关注^[9-11]。除面积变化,湿地景观格局可以反映内部结构组成和空间配置^[12],对于理解湿地生态过程具有指示作用,也是景观生态学研究的核心内容^[13-14]。此外,湿地长时间序列变化分析有助于掌握湿地生态系统的突变和趋势,是湿地有效保护、恢复和可持续管理的基础和前提。

若尔盖湿地是世界最大的高原泥炭湿地之一,仅占黄河流域上游面积的 11%,但储存了全国 41.6%的泥炭,涵养了黄河上游 30%的水量^[15]。然而,由于自然及人类活动干扰,有研究显示若尔盖湿地在上个世纪末的 15 年中退化了 38.9%^[16],湿地空间分布格局也受到了很大程度的影响^[17]。尤其是黄河流域上游土地沙化、环境恶化、生物多样性下降等重要生态问题与若尔盖湿地退化密切相关^[18]。若尔盖湿地生态系统的变化影响着黄河流域的生态环境状况,其质量好坏关系到区域生态系统平衡和生物多样性。因此,深入研究并整合高精度的湿地数据集对于全面了解若尔盖湿地的动态变化、驱动因素尤为关键。

当前无论是在全球层面、国家层面还是若尔盖区域层面,均发布了一系列关于湿地的数据集或研究:对于高精度湿地数据,以单一年份、单一类型为主,存在一定的数据滞后问题^[19-22];对于长时间序列数据,存在时间间隔,以 5—10 年为一期居多^[17,23-26];对于连续湿地数据,则局限于单一生态系统类型,如植被覆盖度等^[27-30]。由于湿地数据集时空分辨率不一致,对若尔盖湿地缺乏针对性,导致在若尔盖区域的数据存疑。此外,因缺乏长时间序列连续数据集,难以对湿地变化进行定量的归因分析,气候变化及人类活动对若尔盖湿地的影响尚不明晰,且近年来在若尔盖地区实施的一系列湿地生态保护和修复工程成果有待检验。因此,更精细的时间序列信息有待更新,以便更全面的认识湿地景观变化趋势及驱动因素,促进湿地的保护和管理。研究以若尔盖湿地中的草本沼泽和水体为研究对象,精细化分析 1986—2024 年湿地面积及景观格局变化趋势和驱动因素,以期为若尔盖湿地保护、恢复和可持续管理提供参考信息。

1 研究区概况

若尔盖湿地位于青藏高原东缘(图 1),介于东经 101.88—103.23°、北纬 32.98—34.00°之间,主要分布在四川省的若尔盖县、红原县及甘肃省的玛曲县,面积约 7044 km²,平均海拔为 3491 m。2022 年 4 月,国家公园管理局复函同意创建若尔盖国家公园。本研究区选择若尔盖国家公园的初步设计范围,矢量边界源自第二次青藏高原综合科学考察研究成果。若尔盖国家公园主要的土地覆被类型为草地及草本沼泽,二者分别占总面积的 54.63%及 42.14%,还有少量河流、湖泊等水体湿地,面积约占总面积的 0.51%。近年来,研究区的年降水量在 314—587 mm 之间,其中 5—10 月为雨季,占年降水量的 86%;年均温为 9℃,最冷月 1 月平均气温为

-6 ℃,最热月 7 月平均气温为 22 ℃,年均相对湿度 69%^[31],为典型的大陆性高原寒温带湿润半湿润季风气候。

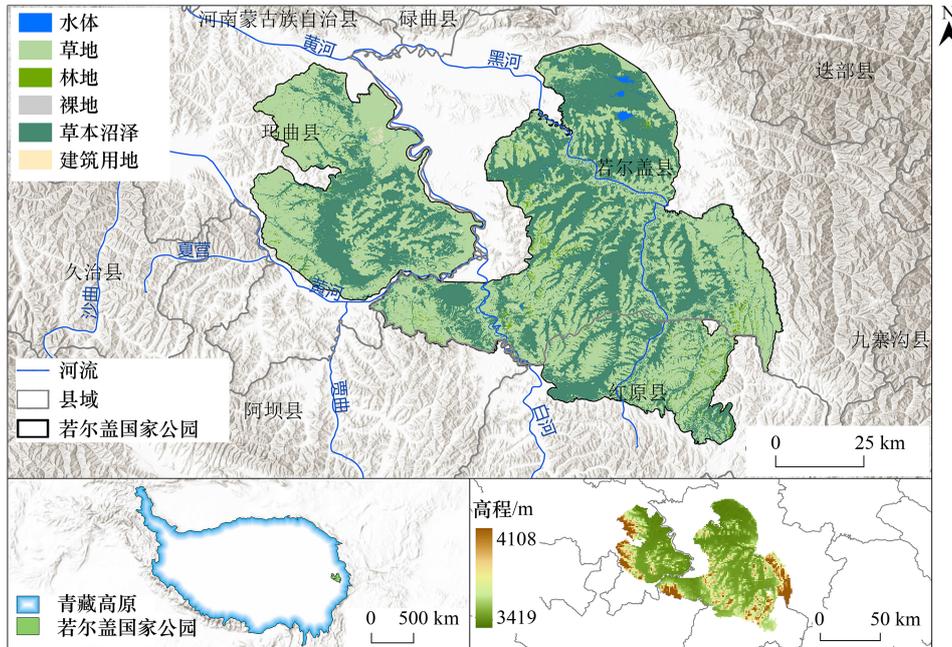


图 1 若尔盖湿地位置、范围及 2022 年土地覆被类型

Fig.1 Location, extent and land cover of the Zoige wetlands

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

遥感影像取自 Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ 及 Landsat-8 OLI 数据集,空间分辨率为 30 m,均可在 Google Earth Engine (GEE) 平台获取。研究采用 Level 2 Collection 2 Tier 1 版本的影像,该数据已经过美国地质调查局的系统辐射和几何校正,在裁剪、去云后用于湿地监督分类。气候数据选择了国家地球系统科学数据中心 (geodata.cn) 的中国逐月平均气温数据集 (1 km) 及逐月降水量数据集 (1 km),经 Python 提取了研究区范围内 1986—2022 年的逐月气温及降水数据。水文数据选取了黄河上游的唐乃亥水文站径流量及输沙量数据集 (1986—2022 年),来自水利部黄河水利委员会 (yrcc.gov.cn)。放牧数据选取了红原县、玛曲县及若尔盖县的县级牲畜存栏量数据集 (2000—2019 年),来自国家青藏高原科学数据中心 (tpdc.ac.cn)。

2.2 研究方法

2.2.1 湿地制图

研究将若尔盖湿地分为水体和草本沼泽两类,在分类时还增加了其他主要土地覆被类型作为非湿地类型,包括林地、草地、裸地和建筑。湿地制图包括参考年份 (2020 年) 及长时间序列制图 (1986—2024 年) 两部分。第一部分首先在 GEE 平台对 Landsat 时间序列数据集进行去云、中值合成处理 (每年前后邻近 2 年的 5 月至 10 月影像合成为一期,2024 年选取 5 月至 9 月合成一期),加载出假彩色遥感影像,结合 Google Map、Sentinel-2 10 m 分辨率影像,用以选取湿地样本点。其中,草地及草本沼泽是难以区分的地类,在经过野外调查、多源湿地数据叠加,结合湿地环境特征基础上,确定了二者的目视采样过程 (图 2)。草本沼泽多位于河流、湖泊等水体附近,相对于草地,沼泽的颜色较深,呈现暗红色。水体在遥感影像中最为明显,湖蓝色为明水面水体,深蓝色为季节性水体。2020 年样本点来源于目视解译及已有多源湿地数据叠加^[32],总计 697 个样本。

其次,结合样本点的光谱波段、光谱指数、纹理特征及高程信息^[32],通过随机森林 (Random Forest) 机器学习

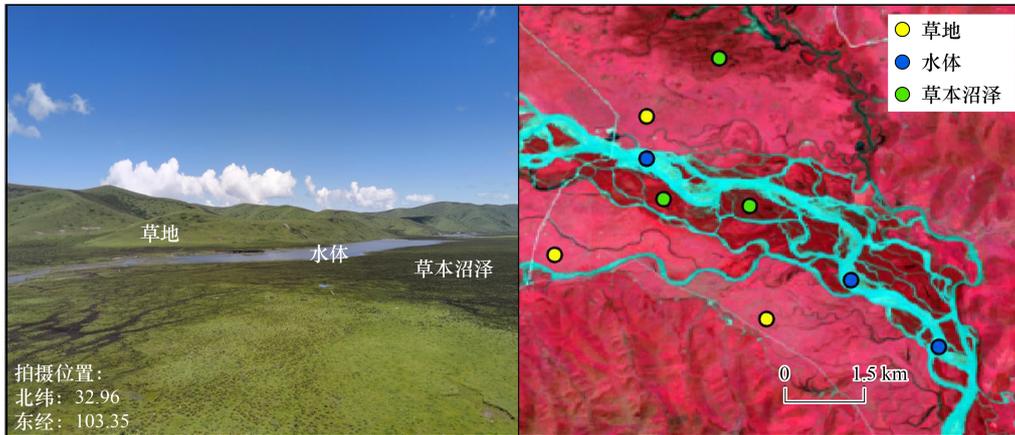


图2 关键地类(草地、草本沼泽、水体)样本采集过程示意

Fig.2 Illustrates the sample collection process of key ground classes (grass, marsh, water)
左图摄于2024年8月4日;右图为2020年5—10月中值合成影像,Landsat 8,RGB:B5:B4:B3

习方法进行监督分类。其中,草本沼泽、草地、林地样本点统计值在 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、LSWI (Land Surface Water Index)、Brightness 特征中有明显的区分(图3)。从 NDVI 看,林地样本点统计值 25%—75%位于 0.7 以上,草地次之,草本沼泽最低。从 LSWI 看,林地样本点统计值要远远高于草地和草本沼泽,而草本沼泽略高于草地。建筑及裸地样本点的统计值在 BSI (Bare Soil Index)、Brightness 表现相近,但是 NDBI (Normalized Difference Build up Index) 可以有效区分二者。最后,使用 70%样本点数据参与分类模型训练,剩余 30%样本点用于检验分类的准确度。通过不断调整样本信息、分类模型参数等,输出最佳的 2020 年湿地地图。第二部分,基于样本迁移方法^[32]将 2020 的样本点迁移到目标年份(1986—2024 年),再次使用随机森林分类方法完成长时序的湿地制图。最终得到 1986—2024 年逐年若尔盖湿地土地覆被空间数据集,空间分辨率为 30 m,整体精度在 95.49%以上。其中,2023、2024 年迁移之后的总样本数量分别为 682、683,整体精度分别为 0.97、0.97,KAPPA 系数分别为 0.96、0.95。

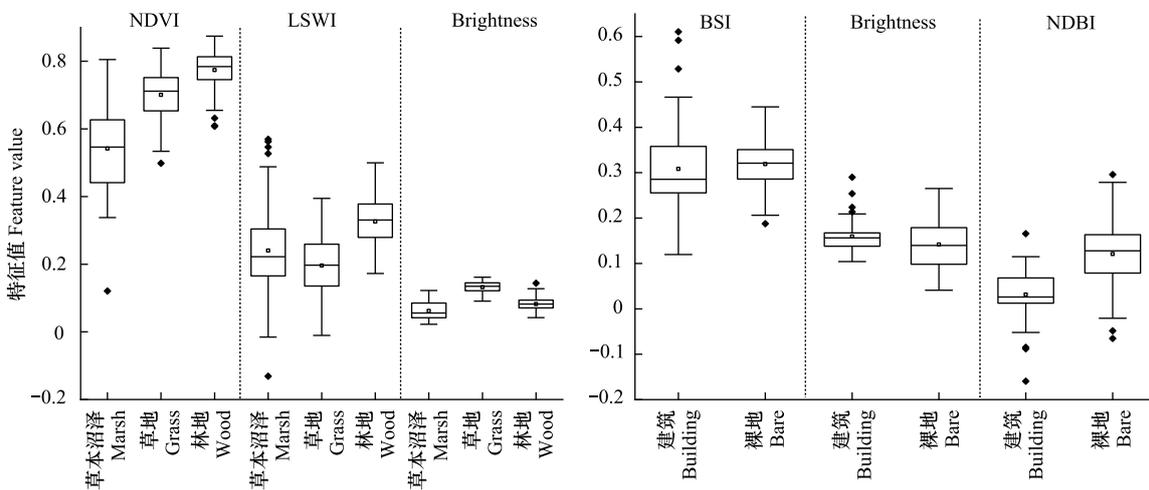


图3 样本点的关键特征值

Fig.3 Key features of sample points

NDVI: 归一化差分植被指数;LSWI: 植被水分含量指数;Brightness: 亮度;BSI: 裸土指数;NDBI: 归一化差分建筑指数

2.2.2 景观指数

景观指数是用来评估和描述景观空间排列和组成的定量指标^[33],本文从景观类型水平,选取聚集性指数(AI)及连通性指数(CONNECT)(表1)定量表征水体及草本沼泽湿地的景观格局特征。其中,聚集性指数用于衡量湿地的集群程度,连通性指数用于反映湿地斑块之间的连接状况。通常高聚集性、连通性的湿地具有更密切的水体流动、生物迁移和能量交换,有助于维持湿地生态系统的稳定性和韧性,发挥更强的生态系统服务,如为生物提供多样化的栖息地、提升生态资源的利用效率等。

表1 景观指数及其意义

Table 1 Landscape indices and its meanings

景观指数 Landscape index	意义 Meaning
聚集度指数 Aggregation index (AI)	反映景观类型斑块间的聚集性
连通性指数 Connectivity index (CONNECT)	反映景观类型的连通性

2.2.3 相关性分析

湿地面积及景观格局易受到自然因素和人类活动的双重影响。若尔盖湿地地处高海拔地区,对气温和降水气候因子高度敏感。同时,湖泊和河流等水体受到地表径流的影响显著。此外,当地居民以放牧为主要生产方式,这种人类活动也会对湿地面积产生影响。因此,研究选取若尔盖区域年总降水量、生长季(5—10月)平均气温、唐乃亥水文站统计的累积径流量及累积输沙量、若尔盖区域内三县牲畜存栏量为驱动因素,采用皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient)对各指标进行相关性分析,定量探究湿地面积与驱动因子、景观指数之间的关系。由于各因子的时间可获取范围存在差异,研究在分析中采用成对排除个案的方法以处理缺失数据并确保分析的准确性。

3 结果与分析

3.1 湿地面积变化

3.1.1 草本沼泽面积变化

结果表明,若尔盖草本沼泽面积经历了迅速扩张、急剧退化和稳定恢复的三个阶段(图4)。第一阶段(1986—1995年)为草本沼泽扩张阶段,相对1986年,草本沼泽面积增加了975.77 km²,增加了31%,平均每年的增速为108.42 km²,增加的区域主要分布在河流(黄河、白河及黑河)两侧(图5)。第二阶段(1996—2012年)为草本沼泽退化阶段,面积共减少了396.86 km²,相对1996年下降了13%,平均每年减少24.80 km²,退化区域主要分布在草本沼泽及河流的边缘区域。第三阶段(2013—2024年)为草本沼泽稳定恢复阶段,2024年草本沼泽面积相对2013年扩张了19.60 km²,草本沼泽增加与减少的比重分别为9.6%及9.1%,说明该阶段湿

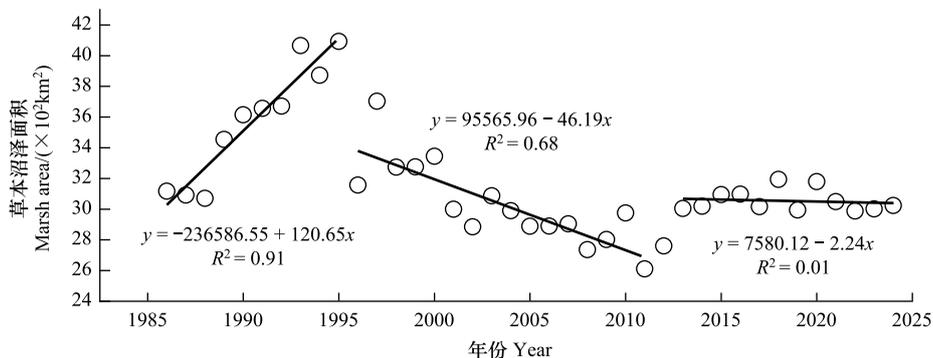


图4 1986—2024年若尔盖草本沼泽面积时间变化

Fig.4 Time changes of marsh area in Zoige during 1986—2024

地的扩张与退化同时进行。从整个时间序列来看,1986 年草本沼泽面积为 3117.49 km²,2024 年面积为 3023.72 km²,增加和退化的比重分别为 11.1%和 13.8%,共计减少了 93.76 km²。在退化的草本沼泽中,其中有 89%转为草地,4%转为裸地。因此,当前草本沼泽面积仍未恢复至 1986 年的规模。从空间格局来看,草本沼泽扩张主要发生在若尔盖地区的西北部,黄河及其支流白河,以及黑河的下流地带,退化发生在若尔盖地区的东南部及黑河的上游区。

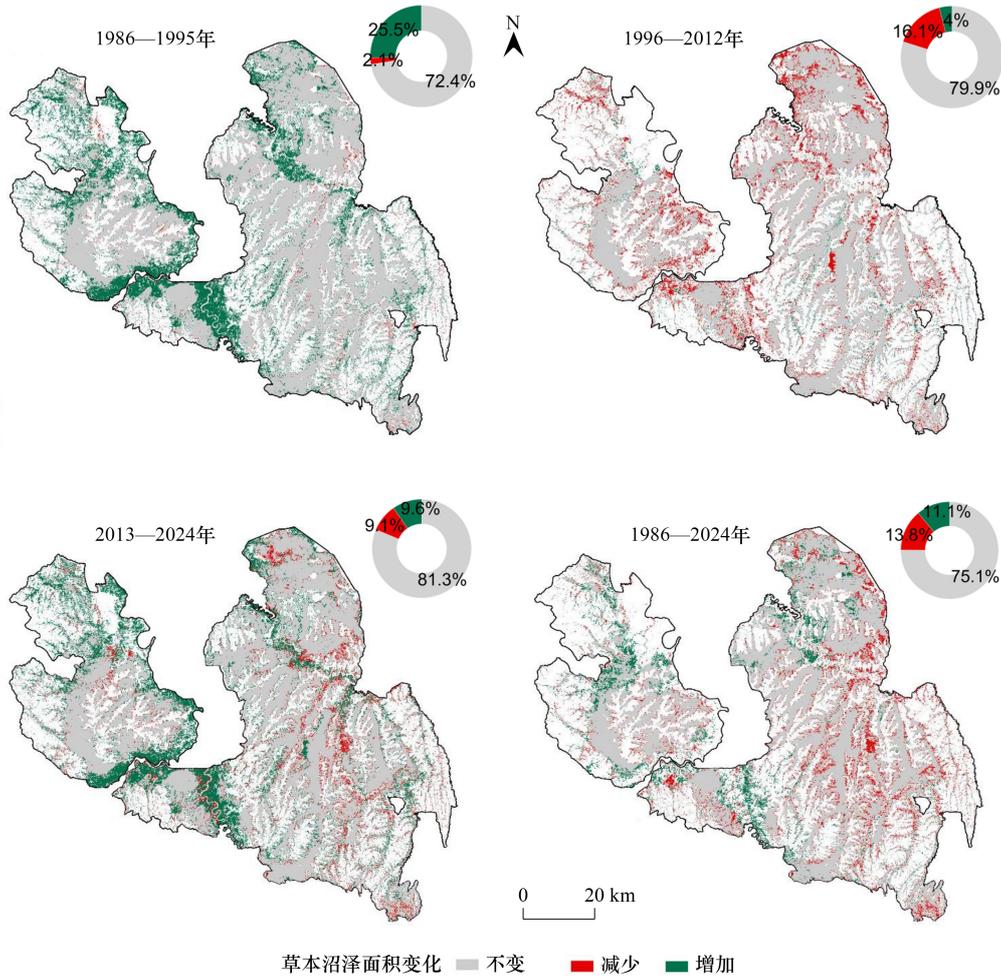


图 5 1986—2024 年若尔盖草本沼泽面积空间变化
Fig.5 Spatial changes of marsh area in Zoige during 1986—2024

3.1.2 水体面积变化

若尔盖水体面积在 1986 年至 2024 年期间经历了复杂的波动。整体来看,水体面积呈现出先缓慢下降,后稳定回升的趋势(图 6)。水体面积在研究期初期(1986—2008 年)偏低,平均每年的水体面积为 31.78 km²;研究期后期(2009—2024 年)水体的年平均面积为 40.04 km²。相对 1986 年,2024 年近 42.6%的水面发生了扩张,8.9%的水面发生了退化,水体面积共计增加了 16.61 km²,说明水体面积整体上呈现增加的趋势。从空间格局来看,图 7 中 a、b、c 分别代表了湖泊、河流及沼泽水面增减特点,水面扩张主要发生在斑块的边缘区,尤其是作为中国三大湿地之一的花湖,湖泊面积发生了显著的扩张。

3.2 湿地景观格局变化

1986—2024 年若尔盖水体及草本沼泽连通性、聚集性指数变化如图 8 所示。从连通性指数来看,水体连通性指数约是草本沼泽的 10 倍。在变化趋势上,水体连通性指数整体呈现轻微下降趋势,草本沼泽的连通性

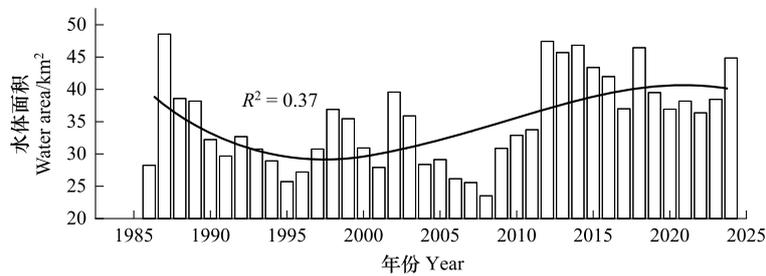


图 6 1986—2024 年若尔盖水体面积时间变化

Fig.6 Time changes of water area in Zoige during 1986—2024

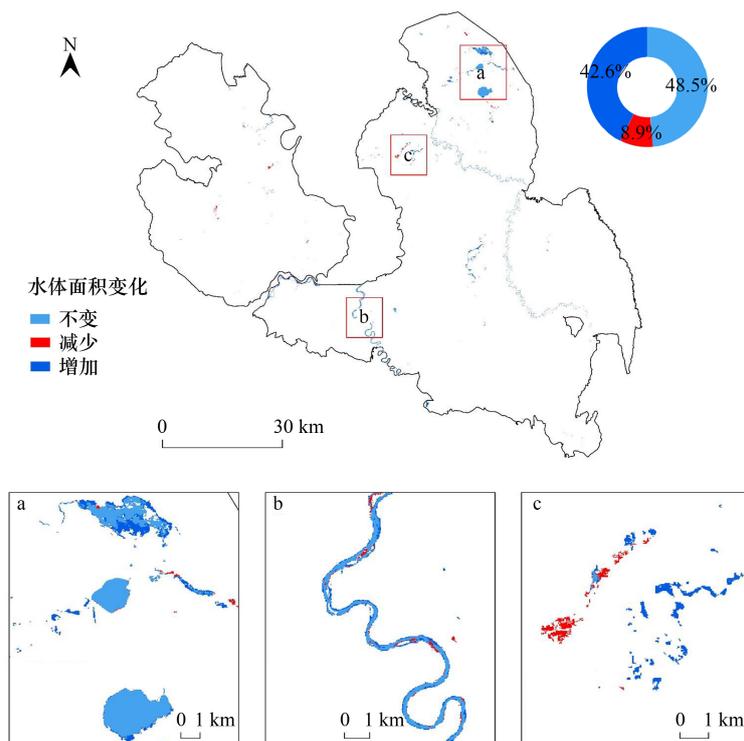


图 7 1986—2024 年若尔盖水体面积空间变化

Fig.7 Spatial changes of water area in Zoige during 1986—2024

a: 湖泊, b: 河流, c: 沼泽水面

指数则呈上升趋势。从聚集性指数来看,草本沼泽的聚集性指数显著高于水体,这表明草本沼泽斑块分布高度集中。在变化趋势上,水体聚集性指数呈缓慢上升的趋势,草本沼泽聚集性虽然总体上较高,但呈现轻微下降趋势。此外,2021 年以来,无论是水体及草本沼泽,其连通性及聚集性指数均有所下降。综上所述,水体连通性指数较高但呈略微下降趋势,聚集性指数相对较低但呈现上升趋势。草本沼泽的连通性指数较低,整体呈上升趋势,聚集性指数虽高但呈下降趋势。

3.3 驱动因素分析

3.3.1 湿地面积变化驱动因素

若尔盖草本沼泽和水体面积的变化与多个气候和水文因素密切相关。相关性热图表明(图 9),草本沼泽面积受气温、累积径流和累积泥沙量的显著负面影响。具体而言,生长季(5—10 月)平均气温与草本沼泽面

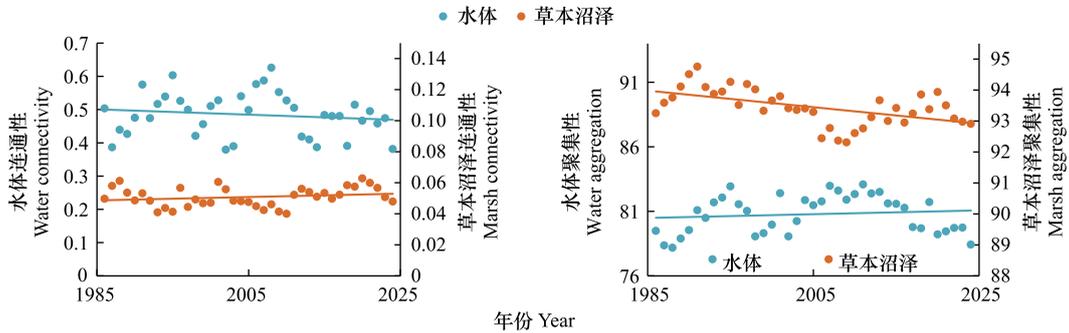


图 8 1986—2024 年若尔盖水体及草本沼泽连通性、聚集性指数变化

Fig.8 Changes of connectivity and aggregation indices of water and marsh in Zoige from 1986 to 2024

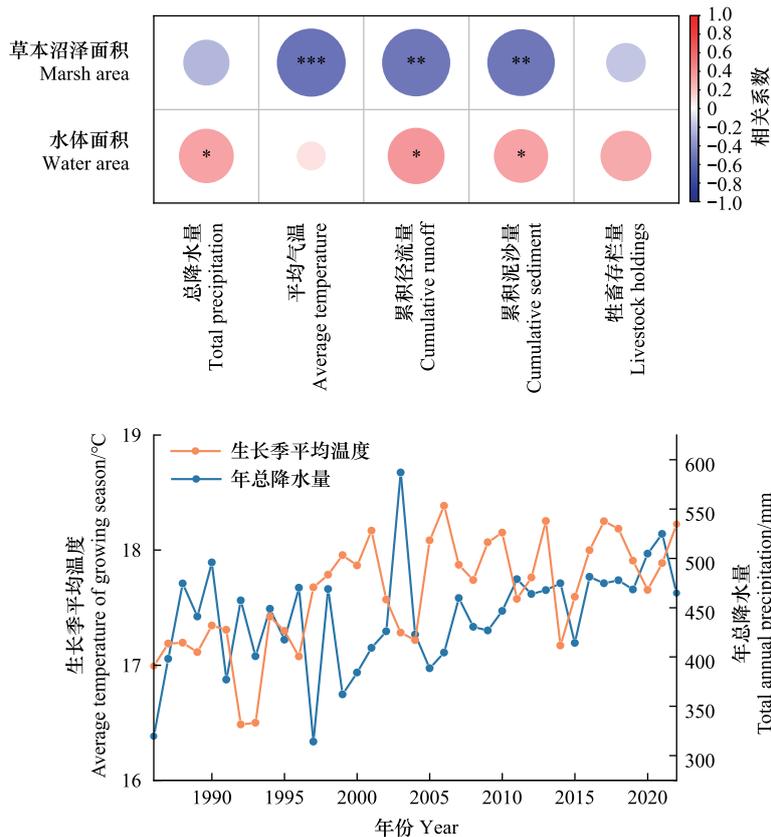


图 9 湿地面积与其驱动因素的相关性热图及 1986—2022 年若尔盖生长季平均温度和年总降水量

Fig.9 The correlation map of wetlands area with its driving factors, and the average temperature and total annual precipitation in Zoige from 1986 to 2022

上图中“平均气温”为若尔盖 5—10 月生长季平均气温; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

积呈显著负相关 (Pearson's $r = -0.53, P < 0.001$), 这表明气温升高可能通过加速蒸发, 减少湿地水分, 从而导致草本沼泽植被覆盖减少。此外, 累积径流量和累积泥沙量也对草本沼泽面积产生负面影响 (Pearson's $r = -0.51, P < 0.01$), 尤其是径流可能引发侵蚀和泥沙淤积, 进一步破坏湿地的水文条件和植被生长。相比之下, 水体面积主要受到降水量和径流的正向影响。总降水量与水体面积呈显著正相关 (Pearson's $r = 0.34, P < 0.05$), 表明降水增加会促进水体面积的扩展。累积径流量也与水体面积呈正相关 (Pearson's $r = 0.36, P < 0.05$), 说明径流量的增加为湿地系统带来了更多水源, 从而扩大了水体范围。表征放牧强度的牲畜存栏量对草本沼泽及水体面积的影响均不显著, 因此本研究数据从统计角度尚不能支持放牧对湿地规模直接影响的证

据。进一步结合若尔盖地区生长季平均温度和年总降水量可知,自 1986 年至 2022 年,研究区生长季平均温度上升了 1.23 °C,年总降水量也在波动中上升了 145 mm,呈现出整体“暖湿化”的趋势,为水体扩张提供了有利条件。

3.3.2 湿地面积与景观指数关系

湿地面积变化与景观指数变化之间的相关性如图 10 所示。草本沼泽的面积与其聚集性指数呈现显著的正相关(Pearson's $r=0.76, P<0.001$),与其连通性指数呈现负相关,但是统计关系并不显著(Pearson's $r=-0.31, P>0.05$)。这意味着草本沼泽的面积扩张通常伴随着沼泽斑块的空间聚集,但连通性在斑块扩张中并未得到加强。相比之下,水体面积与水体连通性、聚集性指数之间呈显著负相关(Pearson's $r=-0.84, P<0.001$; Pearson's $r=-0.41, P<0.05$)。这种现象表明,水体面积的扩张更多表现为局部斑块的增加,而不是通过连通孤立斑块形成连续的水网系统。新增的水体斑块由于地形或水源分布的限制,分散于不同区域,从而降低了水体的聚集性。除此之外,水体面积与草本沼泽的连通性指数呈正相关(Pearson's $r=0.51, P<0.001$),说明水体面积的增加有助于增强草本沼泽的连通性,因为水体斑块的增多使得草本沼泽斑块之间的联系更加紧密,从而提升了草本沼泽的连通性。

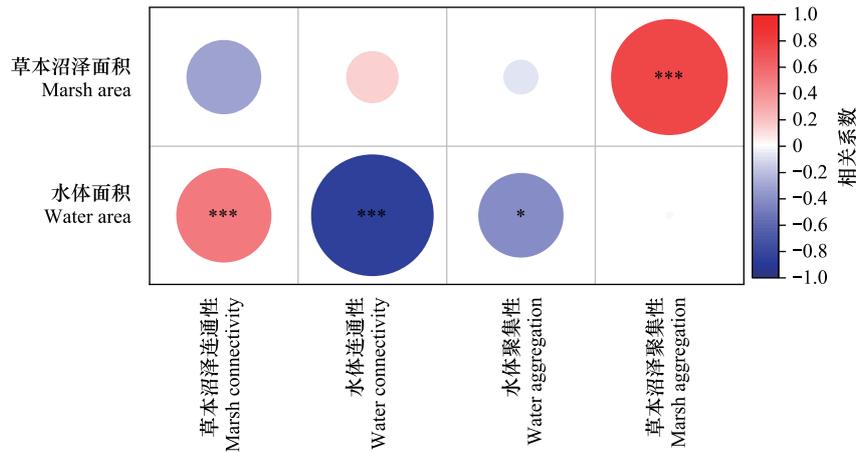


图 10 若尔盖草本沼泽和水体面积与其连通性、聚集性指数相关性热图

Fig.10 Correlation map of marsh and water area with its connectivity and aggregation index in Zoige

4 讨论

研究表明,1986—2024 年若尔盖草本沼泽和水体湿地面积经历了复杂的变动,但整体上呈现向好的趋势。其中,草本沼泽在 1986—1995 年迅速扩张,与前人的研究相一致^[17]。这一扩张得益于 20 世纪 80 年代至 90 年代实施的一系列生态保护措施,为黄河源区提供了良好的水源涵养功能^[33]。然而,在随后的 1996—2012 年间,草本沼泽不断退化^[24,26,34],同期植被覆盖度的下降^[28]进一步佐证了这一现象。若尔盖湿地位于高寒高海拔的生态脆弱区,易受气候波动影响。一些研究认为,气温升高引发的蒸发增加是湿地退化的主要原因^[35—37],但由于缺乏景观尺度分析,这一观点存在争议^[38]。本研究表明,在 $P<0.001$ 显著性水平下,气温上升对草本沼泽面积产生了负向影响。该时期,若尔盖地区生长季平均气温上升了 0.7 °C,证明温度升高确实一定程度上加剧了湿地退化。此外,高原放牧活动也被认为是导致该时期湿地退化的另一因素^[23,39]。草本沼泽的退化带来一系列生态问题,如前人在 2004—2005 年的实地考察中发现,若尔盖湿地沙化现象加剧,沙尘暴的发生频率也随之上升^[40]。

从 2013—2024 年,若尔盖草本沼泽不断恢复^[41]。在该阶段,生长季平均气温相较上一阶段仅升高了 0.1 °C,但年总降水量整体增加了 43 mm,为草本沼泽的有序恢复提供了有利的自然条件。该时期先后在若尔盖

地区实施了一系列湿地保护修复工程,包括若尔盖湿地国家级自然保护区保护设施建设项目、花湖湿地生态恢复工程、唐克镇九曲黄河第一湾湿地生态修复工程项目、若尔盖保护区(国际重要湿地)及周边湿地生态效益补偿试点项目等。通过实施填沟还湿、限牧还湿、治沙还湿、灭鼠还湿等综合治理措施,取得了显著成效^[42]。另一方面,若尔盖水体面积波动性较大,可分为两个阶段,第二阶段(2009—2024年)水体面积相对第一阶段(1986—2008年)扩张了26%。水面面积扩张与降水量、径流量密切相关,而气温对水面面积影响并不显著。与此同时,若尔盖地区陆续实施的水文修复工程也促进了水面面积的增加。湿地规模的扩大提升了生物多样性,若尔盖鸟类种数从2017年观鸟赛的356种提高到379种,实现了补水、扩湖、增绿的目标。

在湿地保护与修复中,不仅要关注湿地的规模,也应重视湿地的连通性和聚集性。良好的水文连通性可以增强湿地生态系统的物质循环效率,提升水质净化、碳汇等功能,同时为水生生物提供更适宜的生存环境,有助于维持和促进生物多样性^[43]。然而,一旦水文连通性受到干扰或中断,湿地内部的生物地球化学循环将受到破坏,物种迁移和栖息地利用的难度增加,导致湿地生态系统服务功能的减弱。尽管近些年若尔盖湿地面积逐渐恢复,但水体的连通性指数及草本沼泽的聚集性指数却呈现下降的趋势,这意味着湿地的修复仍需更加关注湿地生态功能的修复。为了有效修复湿地的连通性和聚集性,可以依照山水林田湖草沙生命共同体理念进行有序的修复。如通过恢复湿地的水文路径,修筑生态护岸、填堵人工沟渠和水道连接隔离的湿地片段,增强湿地水体的流动性和整体连通性。其次,减少人为干扰,尤其是过度放牧和不合理的土地利用,促进湿地自我修复。此外,可通过栽种本地植物和恢复自然植被群落,减少湿地的破碎化。最后,实施基于自然的生态修复工程^[44],如湿地保护区的扩展和生态走廊建设,在区域尺度上增强湿地的聚集性和生态系统的稳定性,从而构建健康稳定的湿地生态系统。

5 结论

(1)从湿地面积来看,若尔盖草本沼泽面积经历了扩张(1986—1995年)、退化(1996—2012年)和稳定恢复(2013—2024年)三个阶段,但当前面积仍未恢复至1986年的规模。水体面积在研究期初期(1986—2008年)整体偏低,研究期后期(2009—2024年)整体提升,2024年水体规模约是1986年的1.6倍。

(2)从空间变化来看,草本沼泽扩张主要发生在若尔盖地区的西北部、黄河及其支流白河以及黑河的下游地带,退化发生在若尔盖地区的东南部及黑河的上游区。水面扩张主要发生在水体斑块的边缘区。

(3)从驱动因素来看,草本沼泽面积随着生长季温度的升高而发生退化,但气候“暖湿化”趋势为水面扩张提供了有利条件。同时,近些年的湿地修复工程在沼泽地及水体恢复方面发挥了显著的成效。

(4)从景观格局来看,草本沼泽聚集性指数呈略微下降趋势,水体的连通性指数呈下降趋势,因此,未来的湿地保护和修复工作应重点提升湿地的空间连通性和聚集性。

参考文献(References):

- [1] Bao T, Jia G S, Xu X Y. Weakening greenhouse gas sink of pristine wetlands under warming. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 462-469.
- [2] Ramsar convention on wetlands. *The Global Wetland Outlook: Special Edition 2021*. Ramsar, 2021.
- [3] Blum M D, Roberts H H. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 488-491.
- [4] Murray N J, Phinn S R, DeWitt M, Ferrari R, Johnston R, Lyons M B, Clinton N, Thau D, Fuller R A. The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 2019, 565(7738): 222-225.
- [5] Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, Hou L Y, Qin Y W, Dong J W, Doughty R B, Chen B Q, Zhang X, Chen Y, Ma J, Zhao B, Li B. Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 163: 312-326.
- [6] Sandi S G, Rodriguez J F, Saintilan N, Wen L, Kuczera G, Riccardi G, Saco P M. Resilience to drought of dryland wetlands threatened by climate change. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13232.
- [7] Schuerch M, Spencer T, Temmerman S, Kirwan M L, Wolff C, Lincke D, McOwen C J, Pickering M D, Reef R, Vafeidis A T, Hinkel J, Nicholls R J, Brown S. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature*, 2018, 561(7722): 231-234.
- [8] Xi Y, Peng S S, Ciais P, Chen Y H. Future impacts of climate change on inland Ramsar wetlands. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 45-51.

- [9] Murray N J, Thomas A W, Pete B, Stephanie D, Valerie H, Catherine E L, Richard L, Megan I S, Marcus S, Mark S, Nathan J W, Mitchell B L. High-resolution mapping of losses and gains of Earth's tidal wetlands. *Science*, 2022, 376(6594): 744-749.
- [10] Osland M J, Chivoiu B, Enwright N M, Thorne K M, Guntenspergen G R, Grace J B, Dale L L, Brooks W, Herold N, Day J W, Sklar F H, Swarzenki C M. Migration and transformation of coastal wetlands in response to rising seas. *Science Advances*, 2022, 8(26): eabo5174.
- [11] Mao D H, Yang H, Wang Z M, Song K S, Thompson J R, Flower R J. Reverse the hidden loss of China's wetlands. *Science*, 2022, 376(6597): 1061.
- [12] 李贺颖, 张建辰, 郭建忠. 黄河流域湿地景观时空演变格局分析. *测绘通报*, 2021(10): 28-33.
- [13] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [14] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [15] 傅斌, 王新宇. 若尔盖湿地生态资产保护与利用. *中国国土资源经济*, 2023, 36(8): 42-49.
- [16] Gao J. Wetland and Its Degradation in the Yellow River Source Zone.//Gary J B, Xilai L, Carola C, Jay G. *Landscape and Ecosystem Diversity, Dynamics and Management in the Yellow River Source Zone*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 209-232 [2023-12-01]. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30475-5_10.
- [17] 白军红, 欧阳华, 崔保山, 王庆改, 陈辉. 近 40 年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化. *生态学报*, 2008, 28(5): 2245-2252.
- [18] 黄翀, 刘高焕, 王新功, 叶宇, 李亚飞, 黄锦辉. 黄河流域湿地格局特征、控制因素与保护. *地理研究*, 2012, 31(10): 1764-1774.
- [19] Zanaga D, Van D K R, Daems D, De K W, Brockmann C, Kirches G, Wevers J, Cartus O, Santoro M, Fritz S, Lesiv M, Herold M, Tsendbazar N E, Xu P, Ramoino F, Arino O. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200 (Version v200)* [dataset]. Zenodo.
- [20] Brown C F, Brumby S P, Guzder-Williams B, Birch T, Hyde S B, Mazzariello J, Czerwinski W, Pasquarella V J, Haertel R, Ilyushchenko S, Schwehr K, Weisse M, Stolle F, Hanson C, Guinan O, Moore R, Tait A M. Dynamic World, Near real-time global 10m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 2022, 9: 251.
- [21] 明义森, 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.
- [22] 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.
- [23] 丁鹏凯, 李国庆, 王晶, 吕婷, 孔晓霞. 人类活动对若尔盖湿地景观格局的影响. *人民黄河*, 2016, 38(7): 58-63.
- [24] 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.
- [25] 解秦米佳, 张钦彦, 高俊琴, 冯久格, 李谦维. 若尔盖湿地水文连通及重要湿地斑块变化. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(6): 766-772.
- [26] 甄硕, 董李勤, 郑茹敏, 姚鹏举. 2007 年和 2016 年若尔盖高原沼泽湿地景观格局及变化. *湿地科学*, 2017, 15(4): 522-525.
- [27] 黄兰鹰, 张好, 杨育林, 尤继勇, 冯秋红. 1998—2020 年若尔盖地区植被 NDVI 变化特征及驱动因子分析. *自然保护地*, 2024, 4(3): 74-85.
- [28] 冯文兰, 钟昊哲, 王永前, 龚雪梅. 2001—2013 年若尔盖地区植被退化的时空格局分析. *草地学报*, 2015, 23(2): 239-245.
- [29] 张一然, 文小航, 罗斯琼, 李茂善. 近 20 年若尔盖湿地植被覆盖变化与气候因子关系研究. *高原气象*, 2022, 41(2): 317-327.
- [30] 周明亮, 肖星灿, 罗晓林, 吴毅鹏, 赵洪文, 陈天祥, 陈明华, 庞倩, 杨平贵. 若尔盖国家公园创建中的草原畜牧业转型升级问题调研报告. *草学*, 2023(5): 76-80.
- [31] Qiu M Q, Liu Y X, Tian F Y, Wang S, Fu B J. Marsh decrease was much faster than the water increase among the Yellow River Source wetlands during 1986—2022. *Science of the Total Environment*, 2024, 947: 174377.
- [32] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, 2001, 16(3): 235-254.
- [33] 蒋桂芹, 毕黎明, 贺逸清. 若尔盖湿地水源涵养时空变化及影响因素. *科学技术与工程*, 2021, 21(29): 12688-12694.
- [34] 王晶, 李国庆, 丁鹏凯, 吕婷, 安文杰. 若尔盖湿地景观与生态功能变化主导因子分析. *人民黄河*, 2016, 38(5): 77-81, 87.
- [35] 孙玉, 陈建华, 刘帅, 王炳乾, 唐翼鹏, 陈炯玲, 潘芸. 1991—2020 年若尔盖湿地景观格局演变分析. *物探化探计算技术*, 2024, 46(3): 366-376.
- [36] 张晓云, 吕宪国, 顾海军. 若尔盖湿地面临的威胁、保护现状及对策分析. *湿地科学*, 2005, 3(4): 292-297.
- [37] 郭洁, 李国平. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响. *高原气象*, 2007, 26(2): 422-428.
- [38] 李志威, 王兆印, 张晨笛, 韩鲁杰, 赵娜. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制. *水科学进展*, 2014, 25(2): 172-180.
- [39] 汪学华, 田昆. 若尔盖湿地研究进展. *西南林业大学学报*, 2015, 35(6): 104-110.
- [40] 李斌, 董锁成, 江晓波, 李泽红. 若尔盖湿地草原沙化驱动因素分析. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 112-115, 120.
- [41] Ming Y S, Liu Q H, Bai H, Huang C. Classification and change detection of vegetation in the Ruoergai Wetland using optical and SAR remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(6): 1414-1425.
- [42] 贺丽, 苏宇, 陈德朝, 杨靖宇, 鄢武先, 邓东周. 国家公园创建背景下的若尔盖湿地生态保护现状与发展研究. *决策咨询*, 2023(2): 83-88.
- [43] 李威, 李吉平, 张银龙, 李萍萍, 韩建刚. 双碳目标背景下湖泊湿地的生态修复技术. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(6): 157-166.
- [44] 祝惠, 武海涛, 邢晓旭, 谢天, 宋长春, 王国栋, 姜明. 中国湿地保护修复成效及发展策略. *中国科学院院刊*, 2023, 38(3): 365-375.