

DOI: 10.5846/stxb202111153202

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.

Zhang Y H, Yan J Z, Cheng X. Advances in impact of climate change and human activities on wetlands on the Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2180-2193.

气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展

张倚浩^{1,2}, 阎建忠^{2,*}, 程 先²

1 重庆大学管理科学与房地产学院, 重庆 400044

2 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 青藏高原是中国湿地分布最多的区域, 其独特的高寒湿地对区域生态环境安全有着不可或缺的作用。梳理了青藏高原湿地变化的时空特征, 基于此, 重点分析了气候变化与人类活动对不同类型湿地的影响和作用机制。研究发现: (1) 主导不同类型湿地变化的气候因素有差异, 影响存在区域异质性。湖泊湿地主要受降水量影响, 湖泊湿地在北部扩张、南部缩小的趋势与降水量的空间差异存在较强的一致性; 沼泽湿地主要受气温影响, 气温升高导致水分蒸发、植被群落演替, 沼泽湿地向草地转化, 江河源区和若尔盖高原等主要分布区域呈现退化趋势; 河流湿地主要受气温影响, 气温升高加速河源冰川消融、同时也增大河流蒸散发量, 共同作用下河流湿地呈现北部减少、南部增加的趋势。(2) 过度放牧、泥炭开采、水利建设等是影响湿地变化的主要人类活动。若尔盖高原同时存在过度放牧、泥炭开采和沟渠建设多重人类活动影响, 当地沼泽湿地退化明显; 柴达木盆地的人工湿地由于盐业开采迅速扩张。(3) 当前研究存在数据可对比性不足、大区域尺度和野外定点持续监测数据缺乏等问题, 导致对气候变化与人类活动影响机制研究不够深入。未来应加强高寒湿地定期监测与风险评估, 完善高寒湿地生态系统与环境变化和人类活动间的相互作用机制研究, 关注高寒湿地生态过程, 为筑牢国家生态安全屏障提供重要科学支撑。

关键词: 湿地变化; 青藏高原; 气候变化; 人类活动; 影响

Advances in impact of climate change and human activities on wetlands on the Tibetan Plateau

ZHANG Yihao^{1,2}, YAN Jianzhong^{2,*}, CHENG Xian²

1 School of Management Science and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The Tibetan Plateau covers the largest distribution of wetlands in China, and its unique alpine wetlands are indispensable for regional ecological security. This paper summarized the spatiotemporal variation characteristics of wetlands on the Tibetan Plateau, focusing on the impact mechanism of climate change and human activities on different wetland types. The main findings are presented as follows: (1) the climate factors dominated the wetland changes vary with wetland types and regions. Specifically, lacustrine wetlands expand in the north but shrink in the south, which corresponds with the spatial pattern of precipitation, indicating that the lacustrine wetlands variation is mainly driven by precipitation. Palustrine wetlands are mainly affected by temperature. The increase in temperature leads to water evaporation, vegetation community succession, palustrine wetlands conversion to grassland, and degradation of main distribution areas such as the Yangtze, Yellow River source regions and the Zoige Plateau. Furthermore, riverine wetlands are mainly affected by temperature. The increased temperature accelerates the glacier melting of river sources and increases the evapotranspiration of rivers, jointly

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20040201); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0603); 国家自然科学基金项目 (42171098)

收稿日期: 2021-11-15; **网络出版日期:** 2022-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanjzswu@126.com

causing the decrease of riverine wetlands in the north while increasing in the south. (2) Overgrazing, peat mining and water conservancy construction are the main human activities affecting wetland changes. Under the joint influence of overgrazing, peat mining and ditch construction, the palustrine wetlands degrade sharply on the Zoige Plateau. Meanwhile, the constructed wetlands in the Qaidam Basin are rapidly expanding due to salt mining. (3) Less comparability of wetland data, lack of continuous monitoring data at large regional scale and field fixed-points lead to insufficient in-depth research on the impact mechanism of climate change and human activities on alpine wetlands. In the future, it is urgent to strengthen the regular monitoring and risk assessment of alpine wetlands, improve the research on the interaction mechanism between alpine wetland ecosystems, the environmental change and human activities, and pay attention to the ecological process of alpine wetlands, to provide important scientific support for building nationally ecological security barrier.

Key Words: wetland changes; the Tibetan Plateau; climate change; human activities; impact

湿地是地球陆地表层最重要的生态系统之一,在调节径流、缓解洪水和改善水质方面扮演着关键的角色,同时也为许多动植物提供必要的生存环境,对维持生态系统的稳定、保护生物多样性起着至关重要的作用^[1-3]。近 50 年来,全球大多数区域的湿地都在减少^[4],湿地水位和面积的变化会降低湿地系统的生态功能^[5]。随着科学研究深入,人们认识到:气候变化通过改变湿地水文过程、土壤温度、生物地球化学循环、植被状况等影响湿地分布^[6-8];人类活动如城市化,耕地开垦,水利建设,水产养殖和过度放牧对湿地变化也起到了重要作用^[9-11]。气候变化与人类活动是导致湿地变化最重要的因素^[12],影响和改变着湿地的生态结构和功能^[13]。

青藏高原是中国最大、世界海拔最高的高原,孕育了黄河、长江、恒河、湄公河、印度河等七条亚洲的重要河流,被称为“亚洲水塔”^[14]。青藏高原也是我国重要的湿地分布区之一,分布着独特的高寒湿地,其面积达 $10.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15],占全国湿地面积的 20%^[16]。高寒湿地具有极其重要的生态功能,如生态蓄水、供水和气候调节,在适应全球气候变化、防止全球水危机方面起着关键作用^[17]。

青藏高原正在经历强烈的气候变化^[18],气候变暖的过程比全球其他地区速度更快^[19]。青藏高原湿地有着重要的生态功能,对区域环境安全起着不可或缺的作用,但同时也是最脆弱的生态系统之一^[20],受气候变化和人类活动的综合影响,一旦遭到破坏,在短期内难以恢复。由于青藏高原范围较大,不同经纬度的环境条件存在差异,导致气候情形在青藏高原各子流域中有不同^[21]。青藏高原人口分布及活动强度也存在明显的地理分异^[22],气候变化与人类活动对湿地的影响可能具有区域异质性。此外,随着对湿地生态系统服务意识的不断增强,湿地的价值越来越受到重视。截止 2021 年底,中国政府在西藏自治区和青海省已建立 41 个国家湿地公园,并有 7 处入选国际重要湿地名录。因此,系统梳理气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响,对青藏高原生态文明建设和可持续发展至关重要,也可为重点湿地生态保护区的建立提供理论参考。具体地,本文回顾并归纳了青藏高原湿地变化及其特征,重点分析了气候变化与人类活动对不同类型湿地的影响和作用机制,总结了现有研究局限并指出了未来研究展望。

1 青藏高原的湿地变化

在中国,与青藏高原湿地有关的论文自 20 世纪 60 年代就已出版^[23]。受益于遥感卫星的快速发展,自 20 世纪 90 年代以来,我国科研人员开始将遥感技术应用到青藏高原湿地研究^[24],之后对青藏高原湿地变化的研究逐渐增多。青藏高原湿地变化的研究从最初的局部逐渐扩展到整个区域^[15],研究的湿地类型也逐渐细分,取得了一系列的文献成果,为环境保护和生态文明建设提供了宝贵资料。

1.1 青藏高原湿地类型划分

湿地类型的划分是湿地科学理论的核心问题之一^[25]。划分湿地类型服务于不同规模和层次的湿地资源

清查及管理工作的需要,并为跨地域、时间和学科的湿地资源信息交流提供可对比的依据^[2]。湿地类型一般根据湿地的成因、特征或用途进行划分^[26]。根据成因,一般将青藏高原湿地划分为天然湿地和人工湿地两大类。依据天然湿地的特征,进一步细分为河流、湖泊、沼泽等,人工湿地则依据用途划分为盐田、水库、坑塘等。由于不同学者研究青藏高原湿地的空间尺度、具体区域存在差异,对湿地类型的划分不尽相同。Xue 等^[15]以植被、水环境及用途为依据,将青藏高原湿地分为湖泊、淡水沼泽、盐沼、湿草甸和人工湿地 5 类。刘冬等^[27]参考《拉姆萨尔湿地公约》,将雅鲁藏布江流域湿地分为河流、湖泊、沼泽与水库、稻田等 2 类 5 型。Zhang 等^[28]研究拉萨河流域湿地时,根据湿地植被、群落类型并结合野外实地调查划分出草丛沼泽、沼泽化草甸、灌丛沼泽 3 种沼泽湿地类型,并进一步细化到芦苇沼泽等 5 种 3 级类型,深化了青藏高原流域尺度的湿地分类。此外,研究目的也会影响学者们对湿地类型的划分。Zhang 等^[29]研究长江、黄河源区和若尔盖湿地变化及其与气候的相关性时,只划分了河流、湖泊、沼泽三类湿地。人工湿地变化受人类直接影响较大,所以在研究气候与湿地变化的相关性时,有时会忽略对人工湿地的关注。

1.2 不同类型湿地的时空变化

(1) 青藏高原湖泊湿地面积 48737 km²^[30],占青藏高原湿地面积的 42%。近 40 年来,青藏高原湖泊面积总体上明显增加^[31–32],不同时期变化情况存在差异。其中,面积大于 1km²的湖泊从 1976 年到 1995 年总面积减少了 5.6%,但在 2000 年到 2018 年迅速扩张了 22.9%^[33]。从整个高原来看,青藏高原南部少数湖泊有出现萎缩的趋势,北部湖泊呈现扩张趋势^[33–34],由北向南湖泊的扩张趋势减弱并存在萎缩现象^[35],同时内流湖扩张趋势显著,外流湖扩张趋势较为明显^[36]。青藏高原最大的湖泊青海湖面积在 1987—2005 年期间缩小了约 2%,而后在 2005—2016 年期间增加了约 3%^[37]。色林错是青藏高原第二大的湖泊,但与青海湖变化不同的是,色林错面积一直处于扩张的状况,并且扩张面积最大。2000 年之前,纳木错是青藏高原第二大湖泊,而色林错是第三大湖泊。虽然纳木错面积从 1980 年的 1945 km²增加到了 2010 年的 2019 km²,但色林错扩张速度更快,相同的时间段内从 1714 km²扩张到 2359 km²,2000 年以后超过纳木错变成青藏高原第二大湖泊^[38]。虽然大型湖泊能显著影响湖泊整体面积变化,但是青藏高原数量众多的小型湖泊也同样值得关注。位于青藏高原中部羌塘高原的三个小型内流湖托和平错、长条湖、鸭子湖在 1972—1999 年间呈收缩趋势,2000—2015 年间则呈显著扩张趋势,并且发现与这 3 个处于相同纬度带的其他 14 个内流湖泊存在相似的变化趋势^[39]。作为青藏高原南部、位于珠峰保护区内典型湖泊佩枯错,自 1975—2013 年间湖泊面积变化减少 10.68 km²^[40],湖泊水位以 -0.02 m/a 的速度下降,湖泊水储量下降速率达到 -0.27×10⁸ m³/a^[41],在此期间羊卓雍措、玛旁雍措、普莫雍措等湖泊也表现出萎缩现象^[35],说明青藏高原南部大型湖泊变化与其他区域存在显著差异。由于青藏高原的高空每年都存在相当长时间的云覆盖,使得许多中高空间分辨率卫星影像(如 Landsat, Sentinel, CBERS)的可用性有限。因此,大多数研究都集中在青藏高原湖泊长期的年际变化上^[42–43],缺乏对湖泊年内季节性变化的认识^[44]。虽然也可以通过原位测量观测湖泊水位的季节性变化^[45],但由于野外可达性差、操作量大等原因,目前仅有少量湖泊的研究采取这种方式。Zhang 等^[46]利用重复周期短的 Sentinel-1 合成孔径雷达(SAR)数据,发现青藏高原大型湖泊(面积大于 100 km²)面积在 8 月至 9 月达到峰值,而小型湖泊(面积处于 50—100 km²)面积则在 6 月初—7 月达到峰值,内流湖比外流湖表现出更明显的季节性周期。

(2) 青藏高原沼泽湿地面积 34698 km²^[30],占湿地总面积的 30%。沼泽湿地主要分布在黄河流域、长江流域、柴达木盆地、羌塘高原和雅鲁藏布江流域(图 1)。青藏高原沼泽湿地退化较为严重,1970—2010 年期间,淡水沼泽、盐沼和沼泽草甸分别减少了 46.6%、53.9%、15.6%^[15]。位于青藏高原东部,处于黄河流域与长江流域交界的若尔盖高原有着青藏高原最大的高寒沼泽湿地^[47],同时也是沼泽湿地退化最为严重的区域之一^[48],但近年来退化趋势好转。与 1990 年相比,2000—2010 年面积持续减少到原有的 64.75%,2010—2015 年开始逐渐恢复到 72.45%,出现退化的区域逐渐从东北转移到西南^[17]。侯蒙京等^[49]发现,受人为因素影响,青藏高原东部地区(甘南和川西北)沼泽湿地在 1991—2016 年间持续退化,共减少了 1090.54 km²,且湿地

多向草地转化,但近年来减少速率变慢。江河源区的沼泽湿地同样存在大幅度退化的现象,1969—2013 年期间,长江源区泥炭沼泽面积减少了 45.18%,沼泽草甸面积减少了 29.27%,黄河源区泥炭沼泽面积减少了 54.39%,沼泽草甸面积减少了 29.70%,其减少幅度远超湖泊湿地与河流湿地^[50]。

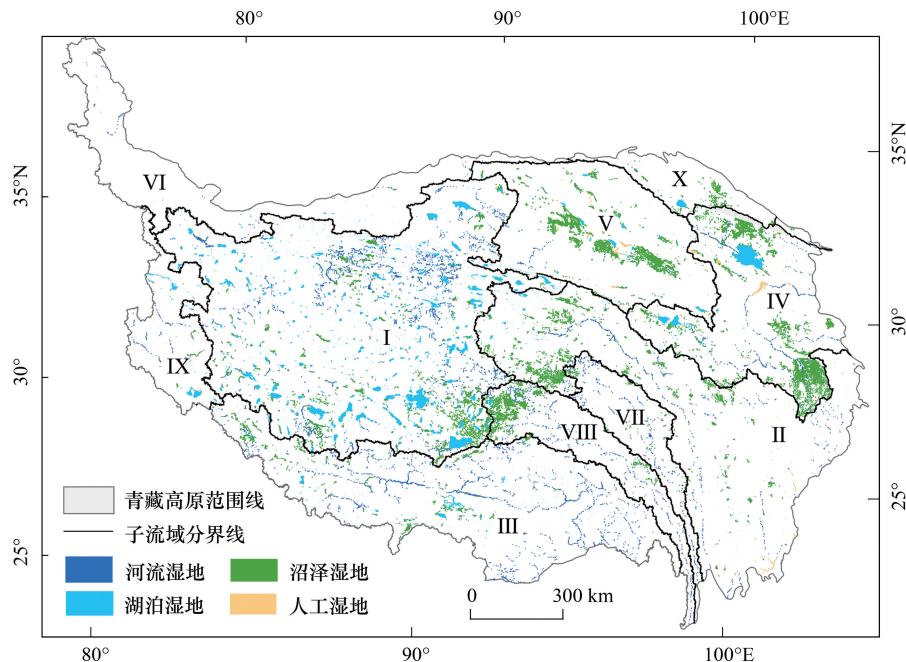


图1 青藏高原湿地分布(2018年)

Fig.1 Wetland distribution on the Tibetan Plateau in 2018

湿地分布数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);流域边界根据青藏高原流域边界数据集(2016)^[57]修改,I:羌塘高原、II:长江流域、III:雅鲁藏布江流域、IV:黄河流域、V:柴达木流域、VI:塔里木流域、VII:澜沧江流域、VIII:怒江流域、IX:森格藏布流域、X:河西走廊

(3) 青藏高原河流湿地面积 15927 km^2 ^[30],占湿地总面积的 14%。青藏高原河流湿地主要分布在中东部和南部地区,主要分布流域在长江流域、黄河流域、雅鲁藏布江流域、澜沧江流域、怒江流域、森格藏布流域(图1)。河流湿地的总体变化呈增加的趋势,自 2008 年到 2016 年,青藏高原河流湿地总体面积增加了 25.5% (3239 km^2)^[30],但是存在地区差异。其中三江源地区作为长江、黄河以及澜沧江的发源地,是青藏高原最重要的河流湿地分布区^[51]。三江源地区河流湿地面积在 1990—2009 年期间减少了 24.78%^[52],但减少的速率变慢,面临的生态环境压力有所缓解;黄河源区河流湿地面积先减少后增加,虽然总体面积减少,但变化趋势逐渐好转^[53];长江源区河流湿地面积一直减少,17.10%的河流湿地转变为洪泛湿地^[54]。在青藏高原南部,河流湿地变化趋势与总体一致,作为西藏最大的河流雅鲁藏布江,其流域河流湿地在 1980—2010 年间面积增加了 24.57% (537.84 km^2),其中拉萨河、年楚河、尼洋河、帕隆藏布和多雄藏布的干流河长都增加^[27]。青藏高原河流湿地变化存在区域差异,青藏高原北部河流湿地呈减少趋势,青藏高原南部河流湿地呈增加趋势^[55]。

(4) 青藏高原人工湿地面积 1188 km^2 ^[30],占湿地总面积的 1%。青藏高原人工湿地的面积较少,主要分布在青藏高原东北部和东部地区,主要分布流域在柴达木盆地、黄河流域和长江流域(图1)。人工湿地在近 20 年增长迅速,总面积扩张了一倍多^[15,30]。柴达木盆地分布着青藏高原面积最多的人工湿地,这些人工湿地主要是采盐场、晒盐池等。由于柴达木盆地存在众多盐湖,为开采盐矿资源,人为对天然盐湖进行改造,以及人工开凿盐坑,形成了采盐场、晒盐池等人工湿地^[56]。

总体来说,近 40 年来青藏高原湿地总体面积减少,不同类型湿地面积变化情况有差异,湖泊湿地面积增加,沼泽湿地面积减少,河流湿地面积增加,人工湿地面积增加。近年来沼泽湿地面积减少速率变缓,总体变

化趋势向好。然而,由于还缺乏整个高原尺度的多种类型、较全面的湿地研究和数据,并且相关研究的连续性和可对比性不足,造成在研判湿地变化趋势、探究湿地变化的驱动因素以及湿地保护方面缺乏科学数据支撑。

2 气候变化对青藏高原湿地的影响

青藏高原是全球气候变化研究热点区域^[58],是全球气候变化的启动区和敏感区^[59]。1961年至2017年,青藏高原年气温每10年升高0.32°C,年降水量每10年增加7.2mm,气候变化情形比我国其他地区强烈,气候总体呈现暖湿化的现象;此外,根据区域气候模型第4版(RegCM4),由于全球变暖,预计2018年至2050年这一趋势将持续,气候升高0.30°C/10a,降水量增加5.9 mm/10a^[60]。

2.1 气候变化对湿地面积和分布的影响

气候变化主要通过气温和降水量变化对湿地生态系统产生影响^[61]。气温是影响湿地增长和退缩最重要的驱动因素^[62],气温升高会引起湿地的水温和土壤温度升高,进而加大湿地的蒸发量^[63],造成湿地生态系统的能量失衡。湿地面积增减也会受到降水量变化的影响,降水量的大小、降水的频次和降水空间分布格局的差异会导致湿地植被生长或枯萎、水文补给充足或紧缺,从而影响湿地的分布情况。气温变化导致蒸散量的不同、降水变化导致的水文补给不同等相关因素从不同方面对湿地变化有所贡献,在研究时需要综合此类因素的影响进行判断。此外,还需考虑极端气候情形造成的不利影响。极端高温可能导致河道断流、湿地水位持续下降、湿地面积逐渐缩小甚至消失;极端降雨有着突发性强、累积水量大的特点,能在短时间内形成地表径流,导致湿地水位升高、物质交换能力加强,并且大雨产生的径流,可能产生面源污染,影响湿地的生长发育^[62]。

湿地面积一般与气温负相关,与降水量正相关^[64-65],但由于青藏高原特殊的地理位置,湿地发育的水源地、水文补给方式和区域气候变化特点不同,并且对于不同类型湿地植被有无、植被状况存在差异,气候变化对不同湿地的影响情形不一,并且存在区域异质性。湖泊湿地变化与降水关系最为密切(表1)。青藏高原湖泊变化存在显著区域差异,南北部湖泊变化趋势相反^[35],这与青藏高原年降水量在南北变化趋势相同,青藏高原年降水量变化从东南向西北出现反转,年降水量在东部、东南部和西南部减少,在中部、北部及西北上升^[18]。降水量增加是湖泊面积增加的主要影响因素,贡献率超过70%,气温上升导致冰川退缩、冰雪消融、冻土退化给湖泊的水文贡献不到30%^[66]。Biskop等^[67]利用水文模型对2001—2011年玛旁雍措、佩枯错变化的影响因素进行了研究,发现降水的贡献分别占85%和70%,冰川的贡献分别只占15%和30%(图2)。青藏高原气温在所有区域都呈现上升趋势,气温升高对湖泊湿地变化的影响除了体现在冰川冻土消融的水文补给外,还影响湖泊湿地的蒸发过程,但研究发现蒸发量的变化对色林错的影响只有14%^[68],远远小于降水量的影响。

沼泽湿地变化与气温关系最为密切(表1)。与湖泊、河流湿地不同,沼泽湿地中存在植被,气温通过影响沼泽湿地植被的代谢过程影响生长,气温升高带来更多的热量使得更有利中生植物,同时气温也影响地表蒸散^[69],不利于沼泽湿地的水文状况,当中生植物生长、入侵成为优势物种,湿生植物就会减少,同时伴随湿地水减少,沼泽湿地逐渐退化为草地^[70]。高寒湿地的NDVI(归一化植被指数)、GPP(总初级生产力)变化与气温相关性最大,也印证了沼泽湿地受气温变化影响显著^[71]。对比沼泽湿地主要分布的区域:若尔盖高原、江河源区(长江、黄河)、雅鲁藏布江流域,三个区域沼泽湿地都处于退化的状态,但区域气候变化趋势有差异。若尔盖高原与雅鲁藏布江流域气温上升,年降水量减少;江河源区气温上升,年降水量上升^[18]。刘冬等^[27]发现,气温上升导致冰雪消融,雅鲁藏布江流域沼泽湿地转变为湖泊湿地;此外,冻土变化对沼泽湿地也有影响。在高寒地区,冻土与沼泽湿地分布存在相关性,气温升高导致的冻土退化使得两者共同生存的水文状况发生改变,沼泽湿地也随之退化^[72-73]。拉萨河源头麦地卡保护区内沼泽湿地从1988—2015年减少了20%,沼泽湿地干旱演替成草地,气温和地表温度升高是影响沼泽湿地退化的主要原因^[74](图2)。若尔盖高原沼泽湿地在1977—2016年间,面积减少了56.54%,减少约667 km²,气温升高直接导致沼泽湿地水文条件的变化,是

最主要的自然驱动因素^[75]。虽然江河源区降水量总体有所上升,但沼泽湿地依然退化严重,对比气温、降水量、湿度三种气候环境因素发现,气温升高是导致江河源区沼泽湿地退化的主要原因^[50](图 2)。

表 1 青藏高原地区湿地变化趋势及主导影响因素
Table 1 Trends in wetlands change and dominant influencing factors on the Tibetan Plateau

湿地类型 Wetland types	研究区域 Study area	研究时段 Period	面积年平均 变化率/% Average annual change rate of area	驱动湿地变化的 主导因素及其影响方向 Dominant factors and their impact trend of driving wetlands change		判别方法 Identification	参考文献 References
				气候变化 Climate change	人类活动 Human activity		
沼泽湿地 Palustrine wetlands	青藏高原	1970—2010	-1.25	气温(-)	\	定性分析法	[15]
	雅鲁藏布江流域	1980—2010	-0.05	气温(-)	\	灰色关联度分析	[27]
	拉萨河源头麦地卡湿地保护区	1988—2015	-0.84	气温(-)	\	Spearman 相关分析	[74]
	若尔盖高原	1977—2016	-1.45	气温(-)	过度放牧(-) 开挖沟渠(-)	双变量相关分析;实地调研	[75]
	江河源区	1969—2013	-1	气温(-)	载畜量(-)	主成分分析;灰色关联度分析	[50]
湖泊湿地 Lacustrine wetlands	青藏高原	1996—2010	1.39	降水(+)	\	陆地水储量(TWS)计算	[66]
	玛旁雍措 纳木错 佩枯错 当惹雍措	2001—2010	\	降水(+)	\	水文、大气模型	[67]
	托和平错流域	1972—2012	2.58	气温(+)	\	多元线性回归	[39]
	青海湖	1987—2016	0.02	降水(+)	\	结构方程模型	[37]
	雅鲁藏布江流域	1980—2010	0.82	气温(+)	\	灰色关联度分析	[27]
河流湿地 Riverine wetlands	黄河源区	1955—2005	\	气温(-)	\	多元线性回归	[78]
人工湿地 Constructed wetlands	柴达木盆地	1956—2000	\	\	盐田开发(+)	定性分析法	[56]

\表示文中无相关数据;青藏高原湖泊湿地受人类活动直接影响较弱,故文献中主要考虑各种气候因素的贡献

河流湿地变化与气温关系最为密切(表 1)。河流湿地变化主要受径流量影响,在青藏高原的众多高山和冰川发育了许多河流,包括长江、黄河、雅鲁藏布江等等,所以河流湿地受源头水文变化以及中游补给影响较大,气温升高使得冰雪消融增加了河流湿地的径流量,导致面积增加^[76]。2000—2010 年雅鲁藏布江流域气温上升达 1.2°C/10a,为 30 年来升温最快的时期,这一时期河流湿地面积增加得最快,气温上升导致冰雪消融,成为河流湿地重要的水源补给,其中以融水补给为主的尼洋河、易贡藏布等支流以及干流径流量快速增加^[27]。另一方面,气温升高导致的蒸散发量变大会抵消冰雪消融带来的水文补给,从而存在不利影响^[77]。由于气温上升显著,黄河源区河流湿地的蒸散发消耗量大于冰雪消融补给,虽然同期降水量也上升,源区河流湿地径流还是在 1955—2005 年间下降^[78]。

2.2 气候变化对湿地生态系统结构和功能的影响

湿地土壤是外部环境要素长期相互作用的产物,由于湿地土壤的碳高积累性和还原性,使其具有物质“源汇”、“养分库”、“净化器”等功能,对调节大气和净化污染物方面发挥着重要作用^[79],是湿地生态系统的重要组成部分。气候变化影响高寒湿地土壤有机碳含量变化,主要体现在:(1)植物生产与凋落速率受气温、

降水变化的影响;(2)微生物活性与气候联系密切,它的变化能够改变地表凋落物和土壤有机碳的分解速率^[80]。随着气候变化的影响,当气温升高后,湿地上层土壤碳排放能力增大,高寒湿地已成为重要的温室气体排放源^[81]。主要原因是气温升高致使表层土壤湿度变低,植被根系变细,土壤氮循环速率加快,同时土壤胞外酶活性与土壤微生物活性增强。衡涛等^[82]通过野外控制试验方法分析青海祁连县气温、降水与高寒草甸土壤碳、氮及微生物生物量碳、氮之间的联系,结果表明高寒草甸表层土壤碳含量受气温影响较大,气温升高使土壤有机碳、全氮含量减少,但降水量与土壤有机碳和氮含量关系不明显,气温、降水对微生物生物量碳、氮含量影响不明显。气候变化不仅影响湿地土壤化学性质,湿地土壤的物理性质也受其影响发生变化。在川西若尔盖湿地的退化过程中,湿地土壤容重显著增加,毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度均呈显著下降,最终致使湿地土壤持水量下降^[83]。

湿地植被同样是湿地生态系统的重要组成部分,也是湿地生态系统的关键属性之一。湿地植被的结构、功能和生态特征能综合反映湿地生态环境的基本特点和功能特性^[84]。气候变化通过对光、温、水等因子的分配而影响湿地植被的组成和分布^[85]。气候因素中,气温能够控制植物生育期发育期提前、正常、延迟以及这一时期的时间跨度来影响植物的生长速率,当气温处在适宜生长的数值范围内,植物才会正常发育、生长;降水量能够影响植被净初级生产力的多少^[86]。气候变暖导致湿地生境和植被的退化,青藏高原祁连山海北地区与长江源区湿地植物优势种群的分化印证了植被的退化^[87-88];这两个地区的高寒湿地植被在气候干暖化趋势加剧的影响下,湿生植物物种减少,中生、中旱生植物物种增多并在群落中占据优势,导致植物群落组成发生变异,物种多样性、生态优势度比湿地原有的湿生植被高,最终高寒沼泽被高寒草甸替代。此外,还有学者发现由于青藏高原气温升高,湿地的 NDVI(归一化植被指数)与 GPP(总初级生产力)指数增加^[71],也印证了湿地中植被有演替的趋势。

高寒湿地向高寒草地退化的这一方向,给高原鼠兔和鼢鼠提供了更多的生存环境。随着这一现象的出现,高原的鼠类种群数量增多,大量窃食退化的湿地植被,并且通过打洞、挖掘土丘,严重破坏原有湿地覆被的土壤内部结构和原有植被,湿地退化、沙化程度恶化;湿地退化、沙化又为害鼠繁衍创造了条件,形成恶性循环,湿地生态环境恶化^[89-90]。

3 人类活动对青藏高原湿地的影响

气候变化是影响湿地变化的重要因素,它能够显著影响湿地的各种生态过程,是控制湿地变化的主要自然因素^[91]。但是,在气候变化的大背景下,也需要重视人类活动对湿地的影响。气候变化为高寒湿地变化提供了内在因素,而人类活动是湿地变化的外在因素,也会在一定程度上对湿地施加影响。人类活动对自然因素影响起到加速的作用,它叠加在自然因素之上,对湿地变化结果产生放大作用^[92]。人口增长带来的生存压力、传统工农业生产和经营方式及人们对经济利益的追求是导致湿地退化的主要人类活动因素。有研究表明,人类活动破坏了湿地的生境,导致生境破碎化,动植物资源减少,湿地生态系统健康状态逐渐下降,湿地生态系统生产能力下降,生态系统内部组织结构混乱,水文调节、水质净化等功能日益减弱,造成环境质量恶化^[93]。影响青藏高原高寒湿地变化的人类活动主要有放牧强度过大、开垦湿地、泥炭开采、水利建设

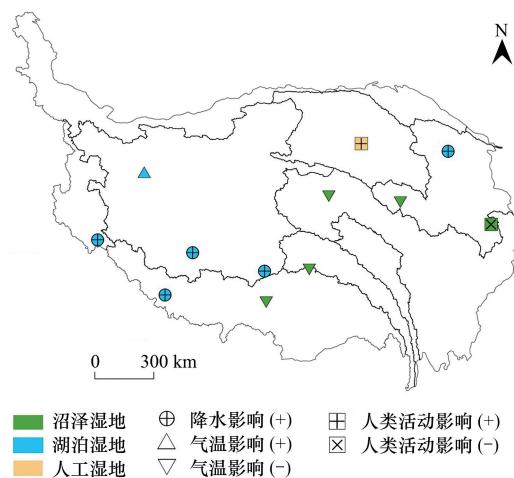


图2 气候变化与人类活动对青藏高原不同地区湿地的主导影响类型和方向

Fig.2 Types and directions of dominant impacts of climate change and human activities on wetlands on the Tibetan Plateau

各类主因素影响的判别依据和判别方法依据表1中的文献

等^[75,94-97],值得注意的是,人类活动主导了一部分重要区域的高寒湿地退化过程^[90,97-98]。

3.1 土地利用对湿地的影响

西藏自治区总人口数在 1980 年至 2018 年期间从 185 万人增长至 344 万人,38 年内增长接近一倍;青海省总人口数在 1980 年至 2018 年期间从 377 万人增长至 603 万人,增长了 226 万人。青藏高原人口的迅速增加,带来的生存压力,使得农牧业迅速发展扩张,并促进了城镇化和基础设施建设,影响了青藏高原的高寒湿地变化。青藏高原在 1992—2015 年期间,耕地、林地、草地、建设用地呈增加趋势^[99],证实了农业和畜牧业对湿地的影响。青藏高原地区人口的大量增长是自然湿地开垦与过度放牧最直接、最重要的驱动因素。过去一段时间里由于缺乏对湿地功能和价值的认识,大面积的湿地被开垦和过度放牧,造成了同时期青藏高原湿地的流失和退化,引发了一系列区域环境问题。虽然青藏高原西部和中部的湿地存在开垦和过度放牧的行为^[50,99-101],但是相比之下,在青藏高原东部,高寒湿地遭受的人类影响更大^[102](图 2)。从 2000 年到 2015 年,若尔盖高原有 57.05%(超过 250.00 km²)的湿地消失,其中 39.22%转化为草地,导致这一现象发生的主要原因是过度放牧和开垦^[103]。在青海隆宝滩国家级自然保护区,居住在湿地周围的大多数牧民以前从每年 6 月到 9 月将牲畜赶到较远的夏季牧场,但是现在许多牧民已经不用偏远的夏季牧场或只使用较短的时间,这导致居住地周围的草地和湿地放牧压力增加,牧民每年将牲畜留在周边地方上的时间变长,这将增加对湿地的干扰,导致湿地退化^[104]。牲畜放牧时对湿地植物的践踏会导致湿地一定程度的萎缩,过度放牧使得植被减少,影响湿地自身净化效率导致退化,进而导致包括黑颈鹤在内的部分湿地野生动物的食物供应减少和栖息地缺失^[105]。并且过度放牧使得牲畜在湿地中留下的尿液和粪便增加,引起尿素等营养物质的高负荷,超过湿地自身净化能力,导致湿地水体富营养化^[106]。过度放牧致使湿地景观格局破碎化,边缘湿地退化及荒漠化,影响了高寒湿地生态环境。并且,湿地植物被啃食后,湿地土壤接触空气的面积变大,在极端的气候条件下容易风化,高寒湿地朝着荒漠化的方向演变。

泥炭地作为湿地的一种特殊类型,是一个特别脆弱的生态系统。其中若尔盖高原分布着中国最大的泥炭地,多种沼泽植物和濒危物种在此生存^[94]。由于缺乏能源供应,从 20 世纪 70 年代开始,泥炭成为主要燃料。通过疏干泥炭沼泽来开采泥炭资源的行为,严重影响了泥炭地的生态环境。如果不采取措施,沼泽将沿着沼泽-沼泽草甸-草甸-沙漠化-荒漠化的模式不断恶化^[90]。如今,随着交通和电力工业的迅猛发展,能源结构发生了变化,泥炭地资源逐渐被煤炭和电力所取代,青藏高原泥炭地生态环境逐渐恢复^[94]。

除了人口增长带来的农业活动生产开垦湿地,不合理的放牧活动和泥炭开采影响外,人类生产生活耗水会造成河流湿地径流减少和湖泊湿地水位下降^[107]。人类生产生活耗水主要包括人畜日常生活用水,农业灌溉用水和工业用水。在青海湖流域,人类生产生活耗水量占青海湖流域输入水(降水,地表径流和地下水流入)的 1.97%和湖泊蒸发的 1.87%,表明对青海湖水位影响贡献较小^[108]。

3.2 工程建设对湿地的影响

土地利用对湿地产生直接影响,工程建设对湿地影响往往是间接的,并且持续时间较长。水利、道路建设导致了湿地景观和生境破碎化、水文联系减弱、生物多样性降低等破坏湿地的问题发生,增加了湿地生态环境的脆弱性。由公路、铁路、堤坝、渠系组成的纵横交错的廊道系统改变了湿地景观格局,即使在景观外形上不会显著改变区域各种土地覆被的类型,但干扰景观和生境状态并起到分割作用。

道路工程促进了地方经济发展,但造成沼泽、湖泊、河流等湿地景观整体波动较大,景观破碎度增加,景观分维数,多样性指数、均匀度指数降低,湿地退化。如青藏铁路的建设,使得唐古拉山口至拉萨段湿地生态风险程度较高,湿地景观存在破碎化的趋势^[109]。

人工沟渠会排干渠道两边,使周边沼泽泥炭脱水变硬。其次,人工沟渠与自然通道的连接扩展了排水网络,进一步促进了沼泽湿地的减少。1950 年到 1990 年期间,若尔盖县、红原县和玛曲县开挖了数百公里的沟渠,以排干沼泽湿地来扩大草地面积,支持畜牧业发展。目前,若尔盖县、红原县和玛曲县的人工沟渠总长已超过 1000 km,受人工沟渠排水影响的沼泽湿地总面积约为 648 km²,占沼泽湿地减少面积的 27%^[97]。大型

水利工程对湿地生态环境的影响是漫长、稳定而复杂的,特别是下游湿地,通常还会受到上游水利工程影响的叠加作用^[110]。上游建坝蓄水以后,减少了洪水发生的频率,下游河流两岸洪泛的几率降低,削弱了河流湿地与洪泛区湿地之间的水文联系,造成洪泛区湿地退化、萎缩,生物食物链中断,生物多样性和生产力下降。但也存在导致湿地扩张的情况(表1),柴达木盆地的盐湖开采工程引发大型盐湖和周边人工湿地显著扩张(图2),修筑水坝阻止盐湖排水以及开发盐湖周围荒地为盐田是其中重要原因^[96,111]。

另一方面,水土保持工程可能会对湿地造成影响。为了防治水土流失,恢复自然植被,减少植被退化面积,近年来在青海湖流域进行了大规模的人工造林种草活动。有研究认为,人工植被主要吸收水以维持其正常生长,林冠截留水分以及土壤水分入渗减少,会导致地表径流减少^[112-113]。青海湖耗水量大,人工造林种草可能会引起青海湖水位下降,面积减少,然而近年来,青海湖水位上升,使得在一定程度上消除了人工造林种草可能导致水位下降的担忧,人工造林种草有效减少地表径流量的耗损作用大于人工造林种草拦截消耗水分,有利于青海湖水位的上升^[108]。

由于近年来政府实施的一系列青藏高原生态工程项目,包括建立湿地保护区和自然保护区^[101,114],以及开展生态补偿项目^[115],高寒湿地状况有所好转,植被净初级生产力提高^[116],湿地生态环境和生态系统得到改善和提升。

青藏高原大部分高寒湿地都受到气候变化和人类活动影响^[102,117-118]。对于青藏高原湿地变化的主要原因,多数学者都归因于气候变化^[15,29,119-121],对于人类活动影响的干扰程度研究相对缺乏,特别是在一些生态脆弱地区,并且实地调查较少,大多研究都使用的统计年鉴数据^[17,49-50,108]。因此,综合探讨气候变化与人为因素影响并在空间上量化其影响程度将是以后关注的重点。

4 问题与展望

4.1 高寒湿地定期监测保护与变化态势问题

缺乏大区域尺度上的湿地变化监测数据及相关研究。目前青藏高原湿地变化研究的连续性和区域可对比性不足,对青藏高原高寒湿地进行长期定期监测,包括整个高原尺度和重点流域尺度进行湿地动态监测,查明不同区域湿地变化情况,进行横向比较,识别湿地生态环境脆弱区,对此类区域进行重点保护。掌握高寒湿地过去变化和现状后,预测高寒湿地未来的变化态势,明确变化态势可能带来的风险,针对存在的湿地生态问题进行治理,未来可能的风险进行防控和规避。同时加强不同遥感数据成果的可比性,使得各类数据之间能够较好的衔接与比较,增加高寒湿地研究数据的准确性与科学性。

4.2 完善气候变化对高寒湿地生态系统作用机制研究

受气候变化影响,高寒湿地生态系统水文过程发生波动,碳排放增加,植被稳定性降低,动植物资源减少。未来气温升高、降水变化幅度增加,造成湿地蒸散发量增大、湿地碳排放增加,可能对气候产生正反馈作用,导致进一步降低区域高寒湿地生态系统植被的稳定性,使得湿地生物多样性降低,造成湿地生物入侵,增加其危害的可能范围。湿地动植物资源减少,部分以水生植物为食或庇护场所的水生动物无法适应环境改变,可能出现大量死亡。作为食物链末端的湿地鸟类由于其赖以生存的食物减少而改变栖息地。气温的升高会导致更多候鸟类改变迁徙路线,使湿地候鸟的组成结构发生变化。

今后需要加强气候变化对高寒湿地水文-生态相互作用过程的研究,气候变化对高寒湿地生态系统碳氮平衡及循环的影响,气候变化对高寒湿地植被生产力的相关性分析,建立高寒湿地生态系统植被-水文-土壤模型,综合气候变化对高寒湿地地上、地下生态过程影响的相互作用机制,掌握高寒湿地生态系统变化的自然规律,预测高寒湿地生态系统对区域气候变化响应。

4.3 深入人类活动对高寒湿地生态系统作用机制研究

人类活动对高寒湿地影响的已有研究通常是只针对局部地区的某一项人类活动的具体影响,局部地区多种人类活动指标影响评价,前者虽然对某一项人类活动影响进行了较为深入研究,但是大多针对于高寒湿地

表层性状,对于高寒湿地生态系统内部植被-水文-土壤影响机制还不够明确;后者对于高寒湿地人类活动影响研究过于笼统、宏观,例如选取指标 GDP、人口数量、牲畜数量等指标,不能体现对生态系统作用的微观机制。因此,今后应在高寒湿地生态系统分析的基础上,综合探讨不同的人类活动方式对其造成的影响,通过高原地区环境的自然变化与人类活动效应的综合对比,以此来揭示人类活动影响下的青藏高原高寒湿地生态系统变化原理和机制,寻求人类活动和高寒湿地生态系统变化的平衡点。

此外,今后应加强气候变化与人类活动对湿地生态模型耦合机制的综合研究,在高原区域尺度和流域尺度探索高寒湿地景观格局-生态过程模型和模拟研究。

4.4 青藏高原高寒湿地变化的环境效应问题

青藏高原是亚洲水塔,其湿地发挥着重要作用,各类湿地蕴含的水资源对区域发展具有重要战略意义,湿地变化引发的连锁效应与当地及下游人民生活和社会发展息息相关。为了更好地理解青藏高原湿地变化的影响,需要识别与模拟湿地变化带来的水供应短缺、洪涝灾害、冰湖溃决等环境效应问题,定量湖泊扩张、河流上游变化及对下游引起的风险,特别是提高对下游影响的水文模型模拟和预估能力,减小不确定性,阐明风险传播机制与叠加效应,保证区域的供水安全、防洪安全和生态安全。

参考文献 (References):

- [1] Guo M, Li J, Sheng C L, Xu J W, Wu L. A review of wetland remote sensing. *Sensors*, 2017, 17(4): 777.
- [2] Mahdavi S, Salehi B, Granger J, Amani M, Brisco B, Huang W M. Remote sensing for wetland classification: a comprehensive review. *GIScience & Remote Sensing*, 2018, 55(5): 623-658.
- [3] Junk W J, An S Q, Finlayson C M, Gopal B, Květ J, Mitchell S A, Mitsch W J, Roberts R D. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences*, 2013, 75(1): 151-167.
- [4] 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.
- [5] Melendez-Pastor I, Navarro-Pedreño J, Gómez I, Koch M. Detecting drought induced environmental changes in a Mediterranean wetland by remote sensing. *Applied Geography*, 2010, 30(2): 254-262.
- [6] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [7] Pester M, Knorr K H, Friedrich M W, Wagner M, Loy A. Sulfate-reducing microorganisms in wetlands-fameless actors in carbon cycling and climate change. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 72.
- [8] Junk W J. Current state of knowledge regarding South America wetlands and their future under global climate change. *Aquatic Sciences*, 2013, 75(1): 113-131.
- [9] Mao D H, Tian Y L, Wang Z M, Jia M M, Du J, Song C C. Wetland changes in the Amur River Basin: differing trends and proximate causes on the Chinese and Russian sides. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111670.
- [10] Wang X L, Ning L M, Yu J, Xiao R, Li T. Changes of urban wetland landscape pattern and impacts of urbanization on wetland in Wuhan City. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(1): 47-53.
- [11] Seto K C, Fragkias M. Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: a remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands. *Global Environmental Change*, 2007, 17(3/4): 486-500.
- [12] Erwin K L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, 17(1): 71-84.
- [13] Kingsford R T. Ecological impacts of dams, water diversions and river management on floodplain wetlands in Australia. *Austral Ecology*, 2000, 25(2): 109-127.
- [14] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [15] Xue Z S, Lyu X, Chen Z K, Zhang Z S, Jiang M, Zhang K, Lyu Y. Spatial and temporal changes of wetlands on the Qinghai-Tibetan Plateau from the 1970s to 2010s. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(6): 935-945.
- [16] Meng W Q, He M X, Hu B B, Mo X Q, Li H Y, Liu B Q, Wang Z L. Status of wetlands in China: a review of extent, degradation, issues and recommendations for improvement. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 146: 50-59.
- [17] 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.
- [18] Kuang X X, Jiao J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(8): 3979-4007.
- [19] Zhang D L, Huang J P, Guan X D, Chen B, Zhang L. Long-term trends of precipitable water and precipitation over the Tibetan Plateau derived from satellite and surface measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 122: 64-71.
- [20] 摆万奇, 尚二萍, 张德铨. 西藏自治区拉萨河流域湿地脆弱性评价与成因分析. *湿地科学*, 2014, 12(1): 7-14.
- [21] Xue Z S, Zhang Z S, Lu X G, Zou Y C, Lu Y L, Jiang M, Tong S Z, Zhang K. Predicted areas of potential distributions of alpine wetlands under different scenarios in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Global and Planetary Change*, 2014, 123: 77-85.
- [22] 戚伟, 刘盛和, 周亮. 青藏高原人口地域分异规律及“胡焕庸线”思想应用. *地理学报*, 2020, 75(2): 255-267.
- [23] 柴岫, 金树仁. 若尔盖高原沼泽的类型及其发生与发展. *地理学报*, 1963, 29(3): 219-240.
- [24] 周华茂, 曾良修, 喻歌农, 刘鼎昌. 川西北高原湿地资源现状及合理利用. *西南农业学报*, 1999, 12(S1): 69-74.
- [25] 杨永兴. 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望. *地球科学进展*, 2002, 17(4): 508-514.
- [26] 唐小平, 黄桂林. 中国湿地分类系统的研究. *林业科学研究*, 2003, 16(5): 531-539.
- [27] 刘冬, 王涛, 沈渭寿, 林乃峰, 邹长新. 近 30a 雅鲁藏布江流域高寒湿地动态变化及其对气候变化的响应. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 243-251.
- [28] 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.
- [29] 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(1/4): 189-199.
- [30] 郎芹, 牛振国, 洪孝琪, 杨鑫莹. 青藏高原湿地遥感监测与变化分析. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2021, 46(2): 230-237.
- [31] 朱立平, 张国庆, 杨瑞敏, 刘翀, 阳坤, 乔宝晋, 韩博平. 青藏高原最近 40 年湖泊变化的主要表现与发展趋势. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1254-1263.
- [32] Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, Zheng G X, Shum C K, Yang K, Piao S, Sheng Y W, Yi S, Li J L, O'Reilly C M, Qi S H, Shen S S P, Zhang H B, Jia Y Y. Regional differences of lake evolution across China during 1960s-2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 386-404.
- [33] Zhang G Q, Luo W, Chen W F, Zheng G X. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1306-1309.
- [34] Liu Z F, Yao Z J, Wang R. Automatic identification of the lake area at Qinghai-Tibetan Plateau using remote sensing images. *Quaternary International*, 2019, 503: 136-145.
- [35] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Yang K, Zhu L P, Shum C K, Bolch T, Yi S, Allen S, Jiang L G, Chen W F, Ke C Q. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103269.
- [36] 闫利, 张廷斌, 易桂花, 苗加庆, 李景吉, 别小娟, 黄祥麟. 2000 年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 573-589.
- [37] Tang L Y, Duan X F, Kong F J, Zhang F, Zheng Y F, Li Z, Mei Y, Zhao Y W, Hu S J. Influences of climate change on area variation of Qinghai Lake on Qinghai-Tibetan Plateau since 1980s. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7331.
- [38] Zhang Z X, Chang J, Xu C Y, Zhou Y, Wu Y H, Chen X, Jiang S S, Duan Z. The response of lake area and vegetation cover variations to climate change over the Qinghai-Tibetan Plateau during the past 30 years. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 443-451.
- [39] Zhao Z L, Liu F G, Zhang Y L, Liu L S, Qi W. The dynamic response of lakes in the Tuohepingco Basin of the Tibetan Plateau to climate change. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(3): 137.
- [40] 德吉央宗, 拉巴卓玛, 拉巴, 尼玛吉, 陈涛. 1975-2013 年西藏佩枯错湖面变化及分析. *湖泊科学*, 2016, 28(6): 1338-1347.
- [41] Zhang X X, Wang R, Yao Z J, Liu Z F. Variations in glacier volume and snow cover and their impact on lake storage in the Paiku Co Basin, in the Central Himalayas. *Hydrological Processes*, 2020, 34(8): 1920-1933.
- [42] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, Belward A S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [43] Zhang G Q, Yao T D, Piao S, Bolch T, Xie H J, Chen D L, Gao Y H, O'Reilly C M, Shum C K, Yang K, Yi S, Lei Y B, Wang W C, He Y, Shang K, Yang X K, Zhang H B. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 252-260.
- [44] Song C Q, Huang B, Ke L H, Richards K S. Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92: 26-37.

- [45] Lei Y B, Yao T D, Yang K, Sheng Y W, Kleinherenbrink M, Yi S, Bird B W, Zhang X W, Zhu L, Zhang G Q. Lake seasonality across the Tibetan Plateau and their varying relationship with regional mass changes and local hydrology. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2): 892-900.
- [46] Zhang Y, Zhang G Q, Zhu T T. Seasonal cycles of lakes on the Tibetan Plateau detected by Sentinel-1 SAR data. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135563.
- [47] Jiang W G, Lv J X, Wang C C, Chen Z, Liu Y H. Marsh wetland degradation risk assessment and change analysis: a case study in the Zoige Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 316-326.
- [48] Bai J H, Lu Q Q, Zhao Q Q, Wang J J, Ouyang H. Effects of alpine wetland landscapes on regional climate on the Zoige Plateau of China. *Advances in Meteorology*, 2013, 2013: 972430.
- [49] 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.
- [50] 杜际增, 王根绪, 杨燕, 张涛, 毛天旭. 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因. *生态学报*, 2015, 35(18): 6173-6182.
- [51] Chu H B, Wei J H, Qiu J, Li Q, Wang G Q. Identification of the impact of climate change and human activities on rainfall-runoff relationship variation in the Three-River Headwaters region. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105516.
- [52] Yang R M, An R, Wang H L, Chen Z X, Quayle-Ballard J. Monitoring wetland changes on the source of the Three Rivers From 1990 to 2009, Qinghai, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(4): 1817-1824.
- [53] Li X L, Xue Z P, Gao J. Dynamic Changes of Plateau Wetlands in Madou County, the Yellow River Source Zone of China: 1990-2013. *Wetlands*, 2016, 36(2): 299-310.
- [54] Zhao Z L, Liu L S, Wang Z F, Zhang Y L, Li L H, Liu F G. Dynamic changes of plateau wetlands in the Damqu River Basin, Yangtze River Source Region, China, 1988-2015. *Wetlands*, 2020, 40(5): 1409-1424.
- [55] 曹建廷, 秦大河, 康尔泗, 李原园. 青藏高原外流区主要河流的径流变化. *科学通报*, 2005, 50(21): 2403-2408.
- [56] 张继承, 姜琦刚, 李远华, 王利花. 近 50 年来柴达木盆地湿地变迁及其气候背景分析. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(4): 752-758.
- [57] 张国庆. 青藏高原流域边界数据集(2016). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. <http://dx.doi.org/10.11888/BaseGeography.tpe.249465.file>.
- [58] Orłowsky B, Seneviratne S I. Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, 2012, 110(3/4): 669-696.
- [59] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [60] Song Y L, Wang C Y, Linderholm H W, Tian J F, Shi Y, Xu J X, Liu Y J. Agricultural Adaptation to Global Warming in the Tibetan Plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(19): 3686.
- [61] Jiang P H, Cheng L, Li M C, Zhao R F, Huang Q H. Analysis of landscape fragmentation processes and driving forces in wetlands in arid areas: a case study of the middle reaches of the Heihe River, China. *Ecological Indicators*, 2014, 46: 240-252.
- [62] 孟焕, 王琳, 张仲胜, 薛振山, 吕宪国, 邹元春. 气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究. *湿地科学*, 2016, 14(5): 710-716.
- [63] 刘立刚. 湿地系统的生态作用与全球变暖的关系研究. *绿色科技*, 2012, (2): 1-2.
- [64] 李凤霞, 常国刚, 肖建设, 周秉荣, 伏洋. 黄河源区湿地变化与气候变化的关系研究. *自然资源学报*, 2009, 24(4): 683-690.
- [65] 李凤霞, 伏洋, 肖建设, 时兴合, 刘宝康. 长江源区湿地消长对气候变化的响应. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 49-56.
- [66] Zhang G Q, Yao T D, Shum C K, Yi S, Yang K, Xie H J, Feng W, Bolch T, Wang L, Behrangi A, Zhang H B, Wang W C, Xiang Y, Yu J Y. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's Endorheic Basin. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550-5560.
- [67] Biskop S, Maussion F, Krause P, Fink M. Differences in the water-balance components of four lakes in the southern-central Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 209-225.
- [68] Guo Y H, Zhang Y S, Ma N, Xu J Q, Zhang T. Long-term changes in evaporation over Siling Co Lake on the Tibetan Plateau and its impact on recent rapid lake expansion. *Atmospheric Research*, 2019, 216: 141-150.
- [69] 靳晓言, 陈艺冉, 郭嘉琛, 罗登泽, 强皓凡. 若尔盖湿地潜在蒸散时空动态特征及影响因子. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 234-239.
- [70] Xiang S, Guo R Q, Wu N, Sun S C. Current status and future prospects of Zoige Marsh in Eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 553-562.
- [71] Wang R, He M, Niu Z G. Responses of alpine wetlands to climate changes on the Qinghai-Tibetan Plateau based on remote sensing. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(2): 189-201.
- [72] 孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 毛谿, 郭跃东, 路永正. 多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展. *生态学报*, 2011, 31(18): 5379-5386.
- [73] 周梅, 余新晓, 冯林, 王林和, 那平山. 大兴安岭林区冻土及湿地对生态环境的作用. *北京林业大学学报*, 2003, 25(6): 91-93.

- [74] 李妍妍, 王景升, 税燕萍, 陈歆, 郑国强, 刘文婧, 包小婷, 王彤. 拉萨河源头麦地卡湿地景观格局及功能动态分析. 生态学报, 2018, 38(24): 8700-8707.
- [75] Dong L Q, Yang W, Zhang K, Zhen S, Cheng X P, Wu L H. Study of marsh wetland landscape pattern evolution on the Zoigê Plateau due to natural/human dual-effects. PeerJ, 2020, 8: e9904.
- [76] 姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响. 自然杂志, 2010, 32(1): 4-8.
- [77] 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 刘星才, 孙赫, 丁劲, 王磊, 冷国勇, 张永强, 桑燕芳, 方海燕, 张士锋, 韩冬梅, 刘小莽, 贺莉, 徐锡蒙, 唐寅, Chen D L. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. 科学通报, 2019, 64(27): 2807-2821.
- [78] 常国刚, 李林, 朱西德, 王振宇, 肖建设, 李凤霞. 黄河源区地表水资源变化及其影响因子. 地理学报, 2007, 62(3): 312-320.
- [79] 王红丽, 李艳丽, 张文佳, 王磊. 湿地土壤在湿地环境功能中的角色与作用. 环境科学与技术, 2008, 31(9): 62-66, 128-128.
- [80] 张伟, 张宏, 泽柏. 我国高寒草甸碳循环研究进展. 山地学报, 2006, 24(S1): 266-274.
- [81] 谭雅懿, 王烜, 王育礼. 中国寒区湿地研究进展. 冰川冻土, 2011, 33(1): 197-204.
- [82] 衡涛, 吴建国, 谢世友, 武美香. 高寒草甸土壤碳和氮及微生物生物量碳和氮对温度与降水量变化的响应. 中国农学通报, 2011, 27(3): 425-430.
- [83] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽巍, 何先进. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(19): 5780-5788.
- [84] 李旭, 谢永宏, 黄继山, 陈心胜. 湿地植被格局成因研究进展. 湿地科学, 2009, 7(3): 280-288.
- [85] 苏洁琼, 王烜. 气候变化对湿地景观格局的影响研究综述. 环境科学与技术, 2012, 35(4): 74-81.
- [86] 梁妙玲, 谢正辉. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟. 气候与环境研究, 2006, 11(5): 582-592.
- [87] 李英年, 赵新全, 赵亮, 王启基, 沈振西. 祁连山海拔高寒湿地气候变化及植被演替分析. 冰川冻土, 2003, 25(3): 243-249.
- [88] 高永恒, 曾晓阳, 周国英, 王根绪. 长江源区高寒湿地植物群落主要种群间关系分析. 湿地科学, 2011, 9(1): 1-7.
- [89] 刘红玉, 白云芳. 若尔盖高原湿地资源变化过程与机制分析. 自然资源学报, 2006, 21(5): 810-818.
- [90] 刘志伟, 李胜男, 韦玮, 宋香静. 近三十年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展. 生态学杂志, 2019, 38(3): 856-862.
- [91] 白军红, 欧阳华, 杨志锋, 崔保山, 崔丽娟, 王庆改. 湿地景观格局变化研究进展. 地理科学进展, 2005, 24(4): 36-45.
- [92] 郭跃东, 何艳芬. 松嫩平原湿地动态变化及其驱动力研究. 湿地科学, 2005, 3(1): 54-59.
- [93] 蒋卫国, 李京, 李加洪, 谢志仁, 王文杰. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价. 生态学报, 2005, 25(3): 408-414.
- [94] Yang G, Peng C H, Chen H, Dong F Q, Wu N, Yang Y Z, Zhang Y, Zhu D, He Y X, Shi S W, Zeng X Y, Xi T T, Meng Q X, Zhu Q. Qinghai-Tibetan plateau peatland sustainable utilization under anthropogenic disturbances and climate change. Ecosystem Health and Sustainability, 2017, 3(3): e01263.
- [95] Wu D, Chen F H, Li K, Xie Y W, Zhang J W, Zhou A F. Effects of climate change and human activity on lake shrinkage in Gonghe Basin of northeastern Tibetan Plateau during the past 60 years. Journal of Arid Land, 2016, 8(4): 479-491.
- [96] Li H Y, Mao D H, Li X Y, Wang Z M, Wang C Z. Monitoring 40-year lake area changes of the Qaidam Basin, Tibetan Plateau, using Landsat time series. Remote Sensing, 2019, 11(3): 343.
- [97] Li Z W, Wang Z Y, Brierley G, Nicoll T, Pan B Z, Li Y F. Shrinkage of the Ruogai Swamp and changes to landscape connectivity, Qinghai-Tibet Plateau. CATENA, 2015, 126: 155-163.
- [98] Huang L B, Bai J H, Yan D H, Chen B, Xiao R, Gao H F. Changes of wetland landscape patterns in Dadu River catchment from 1985 to 2000, China. Frontiers of Earth Science, 2012, 6(3): 237-249.
- [99] 张懿铨, 刘林山, 王兆锋, 摆万奇, 丁明军, 王秀红, 阎建忠, 许尔琪, 吴雪, 张炳华, 刘琼欢, 赵志龙, 刘峰贵, 郑度. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征. 科学通报, 2019, 64(27): 2865-2875.
- [100] Zhang Y H, Yan J Z, Cheng X, He X J. Wetland changes and their relation to climate change in the Pumqu Basin, Tibetan Plateau. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(5): 2682.
- [101] Nie Y, Li A N. Assessment of alpine wetland dynamics from 1976-2006 in the vicinity of mount Everest. Wetlands, 2011, 31(5): 875-884.
- [102] 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.
- [103] Shen G, Yang X C, Jin Y X, Luo S, Xu B, Zhou Q B. Land use changes in the Zoige Plateau based on the object-oriented method and their effects on landscape patterns. Remote Sensing, 2020, 12(1): 14.
- [104] Farrington J D, Zhang X L. The black-necked cranes of the Longbao national nature reserve, Qinghai, China. Mountain Research and Development, 2013, 33(3): 305-313.
- [105] Song H T, Zhang Y S, Gao H F, Guo Y H, Li S N. Plateau wetlands, an indispensable habitat for the black-necked crane (*Grus nigricollis*)-a review. Wetlands, 2014, 34(4): 629-639.
- [106] Yu X F, Ding S S, Zou Y C, Xue Z S, Lyu X, Wang G P. Review of rapid transformation of floodplain wetlands in Northeast China: roles of

- human development and global environmental change. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(4): 654-664.
- [107] Li X Y, Xu H Y, Sun Y L, Zhang D S, Yang Z P. Lake-level change and water balance analysis at Lake Qinghai, West China during recent decades. *Water Resources Management*, 2007, 21(9): 1505-1516.
- [108] Chang B, He K N, Li R J, Sheng Z P, Wang H. Linkage of climatic factors and human activities with water level fluctuations in Qinghai Lake in the northeastern Tibetan Plateau, China. *Water*, 2017, 9(7): 552.
- [109] 汪芳. 青藏铁路沿线湿地生态风险评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [110] 姜翠玲, 严以新. 水利工程对长江河口生态环境的影响. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(6): 547-551.
- [111] 刘世英, 李宗仁, 皮英楠. 基于 Landsat-8 与 GF-1 卫星数据的青海省湿地遥感调查及成果. *青海国土经略*, 2016, (1): 55-59.
- [112] Feng X M, Fu B J, Piao S, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [113] Jackson R B, Jobbagy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, Le Maitre D C, McCarl B A, Murray B C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [114] Zeng J, Chen T Y, Yao X W, Chen W X. Do protected areas improve ecosystem services? A case study of Hoh Xil nature reserve in Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 471.
- [115] Huang L, Shao Q Q, Liu J Y, Lu Q S. Improving ecological conservation and restoration through payment for ecosystem services in Northeastern Tibetan Plateau, China. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 181-193.
- [116] 祁威, 摆万奇, 张懿锂, 吴雪, 李兰晖, 丁明军, 周才平. 生态工程实施对羌塘和三江源国家级自然保护区植被净初级生产力的影响. *生物多样性*, 2016, 24(2): 127-135.
- [117] Miehe G, Schleuss P M, Seeber E, Babel W, Biermann T, Braendle M, Chen F H, Coners H, Foken T, Gerken T, Graf H F, Guggenberger G, Hafner S, Holzapfel M, Ingrisich J, Kuzyakov Y, Lai Z P, Lehnert L, Leuschner C, Li X G, Liu J Q, Liu S B, Ma Y M, Miehe S, Mosbrugger V, Noltie H J, Schmidt J, Spielvogel S, Unteregelsbacher S, Wang Y, Willinghöfer S, Xu X L, Yang Y P, Zhang S R, Opgenoorth L, Wesche K. The *Kobresia pygmaea* ecosystem of the Tibetan highlands-Origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem: *Kobresia* pastures of Tibet. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 754-771.
- [118] 黄麟, 曹巍, 徐新良, 樊江文, 王军邦. 西藏生态安全屏障保护与建设工程的宏观生态效应. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 398-411.
- [119] 蔡迪花, 郭锐, 韩涛. 1990-2001 年黄河玛曲高寒沼泽湿地遥感动态监测. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 874-881.
- [120] 邢宇. 青藏高原 32 年湿地对气候变化的空间响应. *国土资源遥感*, 2015, 27(3): 99-107.
- [121] 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.