

青藏高原高寒湿地生态系统演变、修复与保护

赵志刚, 史小明

兰州大学生命科学学院, 草地农业生态国家重点实验室, 兰州 730000

摘要 探讨了青藏高原高寒湿地的动态变化及演变趋势, 分析了湿地面积变化、生态系统结构与功能退化现状与原因。分析表明, 国家近20年来在青藏高原实施的生态保护、修复及生态工程项目取得了一定的成效, 但高寒湿地生态系统的退化形势依然严峻。生态保护和修复是一项系统、长期的工作, 今后要加强生态修复技术研发项目与工程类项目的衔接, 建立长效管理机制, 提高退化湿地的自然恢复能力。同时, 要构建适于青藏高原高寒湿地保护效应的评价模型和指标体系, 完善重大工程项目的系统监测与评价。在黄河、长江上游源区布局高寒湿地生态系统的长期监测, 将与三江源区同样重要的黄河首曲湿地、若尔盖湿地纳入国家公园管理体系, 统筹规划, 建立健全科技服务平台和信息共享机制。

关键词 青藏高原; 高寒湿地; 生态系统演变; 水源涵养功能; 生态修复与保护

青藏高原素有“世界屋脊”和“地球第三极”之称, 平均海拔大于4000 m, 核心部分更超过5000 m, 是地球上分布面积最大、纬度最低、海拔最高、形成时代最新的巨型地貌单元, 是中国乃至亚洲的重要生态安全屏障^[1]。青藏高原是长江、黄河等10余条河流的发源地, 水资源量约为 $5700 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占中国水资源总量的20%^[2], 是中国和亚洲的“江河”源区。青藏高原独特的地理和气候条件, 孕育了丰富多样、独具特色的生态系统类型和珍稀动植物种类, 是全球生物多样性保护的重要区域和高寒生物自

然种质资源库^[1]。青藏高原高寒环境下发育的生态系统非常脆弱, 对全球气候变化和人类活动响应十分敏感, 是亚洲乃至北半球气候变化的“感应器”和“敏感区”。

青藏高原高寒生态系统主要包括草地、湿地、荒漠及森林等类型。青藏高原拥有世界上独特的高原湿地, 面积超过 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占全国湿地面积的近30%^[3-4], 主要分布在三江源区、羌塘高原东部和南部、甘南高原及若尔盖高原, 具有生态蓄水、水源补给、气候调节等重要的生态功能。青藏高原湿地

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504801)

作者简介: 赵志刚, 教授, 研究方向为植物生态学、恢复生态学, 电子信箱: zhaozhg@lzu.edu.cn

引用格式: 赵志刚, 史小明. 青藏高原高寒湿地生态系统演变、修复与保护[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 33-41; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.17.003

主要包括沼泽湿地、湖泊湿地、河流湿地3类^[5]。根据已发表资料统计,湖泊湿地面积约44000 km²,占青藏高原湿地面积的33%^[6];沼泽湿地面积约为21600 km²^[7],占湿地总面积的17%;河流湿地大多分布于西藏,面积为14000 km²,占湿地总面积的11%^[8]。在日益加剧的气候变化和人类活动下,青藏高原面临严峻的生态与环境问题,如自然灾害增加、冰川退缩、生物多样性受到威胁、草地退化和沙化、湿地萎缩退化,严重威胁青藏高原江河源区的水源涵养功能和生态屏障功能。

1 湿地演变动态及成因

1.1 湿地萎缩与水文变化

近几十年来,青藏高原气候变化表现出“暖湿化”趋势,即温度升高,降水量增多^[9],而典型高寒湿地总体上却呈现退化趋势^[4,7,10]。不同时期的研究都表明了相近的趋势,比如在1970—2006年,青藏高原湿地以每年0.23%的速率退化,湿地总面积减少了2970 km²^[4,11]。而且,地区间差异明显:1986—2000年长江源区湿地萎缩了将近18%,黄河源区湿地面积减少了将近10%,若尔盖地区在1989—2004年湿地面积减少了13%^[10]。这些地区的湿地萎缩以沼泽湿地退化为主,比如长江源区湿地萎缩面积的93%、黄河源区湿地萎缩面积的54%以及若尔盖地区减少的97%均为高寒沼泽湿地的退化^[10]。从时间上看,与20世纪90年代相比,2000—2015年间若尔盖湿地面积依然在萎缩,退化程度减轻^[12];2000年后湿地萎缩态势减缓,大部分地区退化幅度明显减缓、出现局部逆转趋势^[13]。Niu等^[14]发现1978—1990年青藏高原湿地退化达66%,由于1990—2008年期间冰川冻土消融新产生约6000 km²湿地,减缓了青藏高原湿地的退化。不同类型湿地的变化趋势存在显著差异^[15],其中湖泊湿地面积呈现增加趋势,河流湿地、沼泽湿地、泥炭湿地面积先减少后增加。1970—2010年数据显示,淡水沼泽、盐沼和沼泽化草甸分别减少了47%、54%、16%,变化最大的区域是昆仑-阿尔金-祁连

流域和羌塘流域,总体上青藏高原湿地面积减少了6%^[16]。

由于青藏高原面积广泛、地形复杂,高寒湿地变化动态的一个显著特点是呈现“东-西”差异。在青藏高原西北部,由于气候变暖背景下降水量的增加^[7],气候呈现“暖湿化”,使湖泊湿地水位上升、沼泽湿地储水量增加,湖泊水位和水量总体呈升高趋势^[17-19];有些区域如青藏高原中南部,虽降水量呈现下降趋势,但由于受冰川积雪融水补给的影响^[7],水量仍呈现增加趋势^[6]。而在青藏高原东部,若尔盖高原近30年来呈现出“暖干化”趋势,沼泽湿地蒸散量增大、水位下降,因而沼泽湿地的储水量明显减少^[7]。1991—2016年川西北和甘南地区沼泽湿地面积共减少了1090 km²,沼泽湿地主要演变为高寒草地,沼泽湿地的破碎程度增大,人为因素(如畜牧业生产总值和人口数量)是影响该地区沼泽湿地面积变化的首要原因,其次是气候因素(温度和蒸发量)的影响^[20]。

高原湿地承接和调节着高原山区的冰雪融水、地表径流,控制着土壤侵蚀,对维持水量平衡等生态水文过程起着重要作用。气温的增加使每年非冰期(地表未结冰)时间延长^[21-22],导致植物生长季变长,年蒸散速率增大^[23],地表水和地下水减少。在若尔盖地区,相对于黄河源区及白河流域,气温的升高(1985—2007年)使黑河流域对黄河的补给量逐年下降,主要原因是该地区沼泽湿地面积较大(占40%),对气温升高更敏感;而且,长期增温情况下非冰期每年延长约2.64 d,生长季每年延长约0.26 d,地表蒸散量增大,导致地表更干,径流减少^[24]。另一方面,增温同时使冰川和冻土消融,导致湖泊湿地面积扩张,河流水量增大^[25-27]。在长江源区,通天河和直门达的沼泽湿地在1975—2004年分别减少了28%、30%,但是前者的变化导致了雨季径流量的增大,而后者导致径流量的减小,这种影响差异可能与地区的植被盖度变化、永久冻土变化及冰雪消融对雨季径流量的相对贡献大小有关^[27]。Li等^[28]分析了若尔盖黑、白河两大支流径流量变化的气候和人为因素的贡献,以20世纪90年

代前为参考(1960—1989年),1990年(1990—2011年)后黑河和白河径流量变化的55%和64%归因于气候因素,其余是人类活动造成的。

1.2 湿地生态系统退化

从影响因素来看,青藏高原高原湿地变化态势总体上受气候变化控制,自然驱动力(如全球气候变暖)是青藏高原湿地变化的主导因素,但是高强度的人类活动(如人工排水、放牧、泥炭开采等)是局部地区湿地严重退化的重要因素^[10,29]。比如,若尔盖地区是世界上最大的高寒湿地,为了满足放牧需求,该地区20世纪60—90年代大规模人工排水、扩大牧场,仅20世纪70年代就挖掘了约1000 km的沟渠^[30],排水影响湿地近700 km²,占该地区整个湿地萎缩面积的27%^[31]。根据水文变化,青藏高原湿地的退化可以分为3个阶段:第1个阶段是长期积水的沼泽(完整的湿地),第2个阶段为季节性积水的沼泽(沼泽化草甸,中度退化的湿地),第3个阶段是地表无积水的湿地(较干旱的草甸,严重退化的湿地)^[32]。湿地的要素包括湿地水文、湿地植被和湿地土壤,水分的平衡关系决定了湿地的消长,水文特征的微小变化会导致湿地生态系统的变化^[7]。湿地植物是湿地生态系统的生产者,也是湿地其他生物所需能量的主要来源,在维护湿地生态系统平衡方面发挥重要的作用。湿地生态系统退化主要表现为伴随着水文变化出现的群落、土壤以及生态系统功能(如碳排放)的退化。

1.2.1 群落及土壤变化

青藏高原高寒沼泽湿地的演变一般表现为沼泽-沼泽化草甸-典型草甸-退化草甸的退化过程;在一些极端情况下(如放牧严重),沼泽湿地也可直接退化为黑土滩、或者沙化土地^[33]。而土壤一般经历泥炭土-沼泽土-草甸土-风沙土的退化过程^[29]。随着湿地的退化、土壤水分的降低,以湿生和水生植物为主的植物群落逐渐向中生和旱生植物演变^[34]。湿地-沼泽化草甸-草甸演变过程中,植被盖度、地上生物量及植物高度显著降低^[35-36]。湿地退化后土壤碳储量降低,土壤肥力下降,土壤表层碳储量减少16%~32%,有机碳的含量和质量降

低^[37-38],而土壤微生物活性呈现出先增加后降低的变化^[39]。放牧会加剧湿地土壤中C、N、P的周转,使土壤养分输出量增加,土壤有机质及养分含量(如氮元素和磷元素)降低、pH值升高^[35-36,40]。土壤理化性质的变化驱动植物群落的演变^[36,41]。

沼泽湿地退化后,植物群落的物种多样性通常会增加,群落内物种组成也发生变化^[34],禾草类植物减少,而双子叶的非禾草类增加^[35-36]。植物功能群的光合速率有差异,从大到小依次为禾草>莎草>豆科和其他双子叶类杂草,而水分利用效率的表现则是莎草>禾草>豆科和其他双子叶类杂草^[42]。因此,湿地退化过程中双子叶类杂草的比例增加,这类植物的水分利用效率较低,增大了土壤水分的蒸腾散失,进一步加剧群落生境的“干化”。在湿地保护和退化湿地恢复过程中,对典型湿地土著物种的保护和补充要引起重视。随着湿地退化程度加剧(如极度退化或沙化),以植物为食的动物群落也发生了变化,如鼠类种群数量不断增大,啃食牧草、打洞、挖掘土丘,严重破坏土壤结构和原有植被,加剧了湿地退化、沙化程度。重度退化湿地中植物物种多样性和土壤氮含量的降低也会引起土壤线虫群落多样性和丰富度的变化,比如食藻类和杂食类显著降低,而其他类(如植食性、食肉性、食真菌、食细菌类)变化较小^[43]。

1.2.2 碳排放

在全球气候变化过程中,湿地对CH₄和CO₂等气体的固定和释放起着重要的开关作用,被称之为“转换器”。湿地退化严重影响其碳库功能,主要表现为CO₂、CH₄和N₂O等温室气体的固定和释放,进而影响陆地碳循环过程。全球气候变化背景下湿地生态系统的演变会改变碳源/汇关系。例如,Li等^[44]在风火山地区研究发现,增温处理下沼泽化草甸表现为碳汇,高寒草甸表现为碳源,这一趋势在未来持续升温的情况下会进一步增强。若尔盖地区进一步暖干化、地下水位下降可能使该地区变为CH₄汇^[45]。放牧干扰、地表水位、植物地上生物量、湿地类型与CO₂和CH₄等温室气体的排放密切相关^[46-47]。

地下水位降低,湿地逐渐干涸,土壤中氧化作用增强,所累积的有机碳释放回大气中;相反,降雨增多将导致湿地面积的扩张,水淹程度的加深也将导致更多的温室气体释放到大气中^[48]。若尔盖沼泽湿地经疏水排干后,CH₄排放通量显著降低^[49],但是CO₂和N₂O排放量显著增加。模拟提高水位显著增加了CH₄排放通量,降低了生态系统呼吸和总的碳排放^[50]。沼泽化草甸的CH₄排放量要远远低于沼泽湿地,而且由于土壤湿度的变化,沼泽化草甸的CH₄排放表现出极大的空间异质性^[51]。湿地CO₂通量是湿地生态系统碳素同化和异化平衡的结果。在经常性积水条件下,湿地是CO₂的汇;但是当排水后,土壤中有有机物分解速率增大,湿地则变成了CO₂的源^[52]。人们通常主要关注常年积水的沼泽湿地CH₄排放问题,而且大部分研究也只关注生长季的CH₄通量,忽略了非生长季的贡献,那么对整个湿地的排放量估计会有偏差。已有研究发现人工排水导致沼泽变为季节性湿地后,非生长季排放的CH₄占全年的CH₄排放量的1/3^[53]。通过修建拦水坝可以有效恢复水位,降低碳消耗率(植物呼吸和土壤分解),但是不同的植物群落间有很大差异;而且,修复前后环境因子的相对作用可能不同,恢复前的碳排放受土壤温度影响,而恢复后主要与水位相关^[54]。

放牧是影响土壤碳源/汇的关键因素之一,对青藏高原土壤碳排放的影响巨大。放牧显著降低了湿地的CO₂吸收量,增加CH₄排放量^[46,49]。通过比较沼泽化草甸和高寒草甸退化对土壤碳排放的影响,Wang等^[55]发现放牧导致的湿地退化明显增大了土壤碳排放,且CH₄排放速率增大幅度要高于CO₂的增加幅度。但是,放牧因为减少了植物生物量对土壤有机碳的贡献,从长期来看最终会减少CH₄的排放^[56]。在人类活动的干扰下(比如开垦、放牧、污染等),自然湿地的特性发生了改变,在监测湿地类型、水文、植被等的变化的同时,研究CO₂、CH₄排放量的动态变化,特别要加强研究湿地生态系统不同演变阶段(自然湿地和退化湿地)CO₂、CH₄排放的过程和机理,评估这种变化对区域乃至

全球的气候和环境的影响。

2 生态修复与保护

近20年来,国务院及地方政府部门批准并实施了一系列的生态保护规划、建设及生态工程项目,取得了一定的成效。

2005年以来,在青海先后启动实施了《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》和《青海三江源生态保护和建设二期工程规划》,推进了三江源国家公园体制试点;2007年12月,国家发展改革委批复的《甘南黄河重要水源补给生态功能区生态保护与建设规划(2006—2020年)》,以生态保护与修复为主,达到人与自然和谐发展;2009年2月,国务院批准通过了《西藏生态安全屏障保护与建设规划(2008—2030年)》;2011年5月,国务院颁布了《青藏高原区域生态建设与环境保护规划(2011—2030年)》。这些重大生态保护规划与工程建设项目的实施,各类生态系统恢复技术和可持续管理措施的示范与推广,获得了一批阶段性成果^[57-60],取得了较高的生态、社会、经济效益。

“三江源自然保护区生态保护和建设工程”一期通过退耕还林、退牧还草、黑土滩治理、鼠虫害防治等项目,使项目区草地植被覆盖度增加,草地生产力提高,野生动物栖息地生境改善,荒漠化明显遏制,湿地面积呈增加趋势,整个生态系统宏观状况好转^[57]。在此基础上继续实施了三江源生态保护和建设二期工程,国家发展改革委在2018年进行了中期评估,其中对湿地状况的评估表明,通过采取围栏、设立封育区等措施减少人为干扰,湿地面积显著增加,植被盖度逐步提高,湿地生态系统得到了有效保护,湿地功能逐步增强。

“甘南黄河重要水源补给生态功能区生态保护与建设工程”通过重点实施退牧还草、草原鼠害防治、湿地保护与修复工程、森林植被修复与治理、草原自然保护区建设等工程,有效改善和提升了甘南黄河水源补给功能,但还需要系统的科学评估。而且,近年来国家布局“十三五”规划,自2016年已在

青藏高原地区批准实施了6个重点研发专项,开展高寒生态系统的修复、保护、示范与可持续管理,应用基础研究逐渐深入,技术研发、集成与示范也已初见成效。

总体上,青藏高原生态系统退化趋势得到初步遏制,但是生态环境恶化状况并未根本扭转。根据青藏高原高寒湿地的现有研究结果看,在全球气候变化背景下,高寒湿地面积呈现总体减少、局部增加趋势,植被覆盖度总体呈增加趋势,但植物群落和土壤总体呈退化趋势,土壤含水量降低,蒸发量增大,河流径流量减少,碳排放增大,高寒湿地生态系统功能持续退化,形势依然严峻。

3 问题与建议

1) 从各类生态保护、修复项目与工程建设项目的实施效果看,项目间存在脱节现象,加性效应不显著。在三江源、甘南、川西北地区实施的国家科技支撑计划、农业部行业专项、国家重点研发项目等重大生态治理与修复项目研发、集成了许多有效的退化湿地与草地恢复、沙化治理技术措施,但是与政府的重大生态工程衔接不足,科研成果转化比较欠缺,项目成效难以深入推广和累积。比如,若尔盖地区已实施了很多退化湿地修复工程,超过200 km的水沟已被填埋,恢复湿地50000 hm²^[61]。工程治理中一般用木板、泥炭包、水泥、沙土包等建造各种拦水坝,结合播种、禁牧等植被恢复措施,可以显著提高水位、改善土壤、促进水生植被恢复^[62]。但是此类工程项目遇到的普遍问题是拦水坝不耐用,有效期太短,主要原因是前期基础研究成果转化不足,未充分整合现有技术措施,导致工程建设中的科技含量较低,工程期结束后也缺乏系统的管理与维护。

要加强生态修复技术研发项目与工程类项目的衔接,建立长效管理机制,提高退化生态系统的自然恢复能力。退化湿地保护与修复的重大生态工程应该请技术研发项目的主要科研人员全程参与,整合已有的、或开展针对性的基础研究和技

术研发,提高科学家的话语权,确保各项新技术的综合应用和有效实施。例如,筑坝恢复退化湿地要特别注意材料的选用和设计,就地取材(如泥炭土)或研发其他低成本、环保型筑坝材料,注重修复过程监测和湿地功能的恢复。在退化程度较轻的区域,在排除人类活动及放牧干扰后,以近自然恢复为主,因为土壤种子库能够为植被恢复提供种子源^[63-64],发挥生态系统的自我调节能力。同时,地方政府要主动协调、发挥积极作用,除了严禁开渠排水、开矿、泥炭开采、减少放牧压力、保护湿地以外,要配套相应财政补偿和工程投入^[65],积极引入社会资本,要特别重视筑坝工程后期的监管维护,以较小的维护代价换取更长期的生态效益。

2) 以往实施的生态保护规划、建设及生态工程项目普遍缺乏科学、系统、有效、长期的监测与评价,而这是形成生态建设与环境保护决策的重要前提。特别是湿地生态修复与保护建设成效的监测与评估仍不完善,缺乏系统、全面的评价模式和指标体系。例如,排水导致湿地退化、水位下降是逐渐发展的过程,而人工恢复后可以在短期内使水位快速上升,恢复湿地功能显然不是简单的逆向变化,这需要监测不同恢复阶段的生态水文和碳排放过程,分析影响碳循环的主要因素,才能准确评价湿地恢复的短期和长期效应。基于监测的结果,采用先进评估方法构建适于青藏高原高寒湿地的保护效应的评价模型和指标体系。而且,中国高寒湿地修复与保护方面的研究还处于初级阶段,急需加强过程机理及应用基础方面的研究项目,培养一批湿地修复、保护与评价方面的专业人才。

3) 黄河流域生态保护和高质量发展已经成为重大国家战略,习近平总书记特别强调治理黄河,重在保护,要在治理。要坚持山水林田湖草综合治理、系统治理、源头治理,加强协同配合。三江源区已是国家公园试点,而同等重要的黄河首曲湿地、若尔盖湿地这两个国家级自然保护区亦是黄河、长江的关键水源补给区,同样具有代表性、原真性和完整性,应该考虑纳入国家公园管理体系,统筹规划。将青藏高原整个河流源区的高寒湿地统一管

理,实行分类、分区治理,可以划分为不同功能区,比如核心保育区、生态保育修复区、传统利用区等^[66],可以解决不同湿地类型交叉重叠、管理不到位等突出问题。同时,在长江、黄河上游源头,由国家林草局牵头布局湿地生态系统的长期监测站点,健全科技服务平台和服务体系,建立部门间信息共享机制。

4 结论

在日益加剧的气候变化和人类活动下,青藏高原面临严峻的生态与环境问题。典型高寒湿地总体上呈现退化趋势,包括生态水文过程、植物群落、土壤及碳排放的变化,严重威胁青藏高原江河源区的水源涵养功能和生态屏障功能。国家批准、实施了一系列的生态保护规划、建设及生态工程项目,取得了一定的成效,但是生态环境恶化状况并未根本扭转。高寒湿地面积呈现总体减少、局部增加趋势,植被覆盖度总体呈增加趋势,但植物群落和土壤总体呈退化趋势,高寒湿地生态系统功能仍持续退化。这主要是由于全球气候变化的影响,而高强度的人类活动是局部地区湿地退化的主要原因。生态保护和修复是一项系统、长期的工作,要坚持科学恢复,保护优先,自然恢复为主。今后要加强生态修复技术研发项目与工程类项目的衔接,建立长效管理机制,提高退化湿地的自然恢复能力。同时,要构建适于青藏高原高寒湿地的保护效应的评价模型和指标体系,完善重大工程项目的系统监测与评价。黄河流域生态保护和高质量发展已经成为重大国家战略,与三江源区同样重要的黄河首曲湿地、若尔盖湿地应纳入国家公园管理体系,统筹规划。在黄河、长江上游源区布局高寒湿地生态系统的长期监测,建立健全科技服务平台和信息共享机制。

参考文献(References)

[1] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.

[2] 沈大军, 陈传友. 青藏高原水资源及其开发利用[J]. 自然资源学报, 1996, 11(1): 8-14.

[3] 邢宇, 姜琦刚, 李文庆, 等. 青藏高原湿地景观空间格局的变化[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1010-1015.

[4] 赵志龙, 张德铨, 刘林山, 等. 青藏高原湿地研究进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1218-1230.

[5] 白军红, 欧阳华, 徐惠风, 等. 青藏高原湿地研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 1-9.

[6] 张鑫, 吴艳红, 张鑫. 1972-2012年青藏高原中南部内陆湖泊的水位变化[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 993-1001.

[7] 刘志伟, 李胜男, 韦玮, 等. 近三十年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 856-862.

[8] 吴建普, 罗红, 朱雪林, 等. 西藏湿地分布特点分析[J]. 湿地科学, 2015, 13(5): 559-562.

[9] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3023-3035.

[10] 王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 近40年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 481-491.

[11] Zhao Z L, Zhang Y L, Liu L S, et al. Recent changes in wetlands on the Tibetan Plateau: A review[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7): 879-896.

[12] Shen G, Yang X, Jin Y, et al. Remote sensing and evaluation of the wetland ecological degradation process of the Zoige Plateau Wetland in China[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 48-58.

[13] 车向红, 冯敏, 姜浩, 等. 2000—2013年青藏高原湖泊面积 MODIS 遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2015(1): 99-107.

[14] Niu Z, Zhang H, Gong P. More protection for China's wetlands[J]. Nature, 2011, 471(7338): 305.

[15] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3048-3056.

[16] Xue Z, Lü X, Chen Z, et al. Spatial and temporal changes of wetlands on the Qinghai-Tibetan Plateau from the 1970s to 2010s[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(6): 935 - 945.

[17] 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化[J]. 科学通报, 2014, 59(8): 701-714.

[18] 张淑萍, 张虎才, 陈光杰, 等. 1973—2010年青藏高原西部昂拉仁错流域气候、冰川变化与湖泊响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 267-276.

[19] 李均力, 盛永伟. 1976—2009年青藏高原内陆湖泊变

- 化的时空格局与过程[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 571-581.
- [20] 侯蒙京, 高金龙, 葛静, 等. 青藏高原东部高寒沼泽湿地动态变化及其驱动因素研究[J]. 草业学报, 2020, 29(1): 13-27.
- [21] Zhao L, Ping C, Yang D, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China[J]. *Global & Planetary Change*, 2004, 43: 19-31.
- [22] Li X, Pan X, Guo J, et al. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17(12): 33-42.
- [23] Zhang Y, Wang G, Wang Y. Changes in alpine wetland ecosystems of the Qinghai-Tibetan plateau from 1967 to 2004[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 180(1): 189-199.
- [24] Zhang W, Yi Y, Song K, et al. Hydrological response of alpine wetlands to climate warming in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 336.
- [25] Niu Z, Zhang H, Wang X, et al. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2813-2823.
- [26] Yao T, Thompson L, Yang W. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 663-667.
- [27] Li J, Shi W. Effects of alpine swamp wetland change on rainfall season runoff and flood characteristics in the headwater area of the Yangtze River[J]. *Catena*, 2015, 127: 116-123.
- [28] Li B, Yu Z, Liang Z, et al. Effects of climate variations and human activities on runoff in the Zoige Alpine Wetland in the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(5): 1026-1035.
- [29] Xiang S, Guo R, Wu N, et al. Current status and future prospects of Zoige Marsh in Eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 553-562.
- [30] 杨永兴. 若尔盖高原生态环境恶化与沼泽退化及其形成机制[J]. 山地学报, 1999, 17(4): 318-323.
- [31] Li Z, Wang Z, Brierley G, et al. Shrinkage of the Ruergai Swamp and changes to landscape connectivity, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2015, 126: 155-163.
- [32] Huo L, Chen Z, Zou Y. Effect of Zoige alpine wetland degradation on the density and fractions of soil organic carbon[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51(Pt. A): 287-295.
- [33] 何池全, 赵魁义. 若尔盖高原湿地生物多样性保护及其可持续利用[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 238-244.
- [34] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨. 若尔盖高原退化沼泽群落植物多样性及种间相关性沿排水梯度的变化[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 411-419.
- [35] Wu G L, Wang D, Shi Z H, et al. Above- and below-ground response to soil water change in an alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476(4): 120-127.
- [36] Ren G H, Deng B, Shang Z H, et al. Plant communities and soil variations along a successional gradient in an alpine wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61(Pt. A): 110-116.
- [37] Luan J, Cui L, Xiang C, et al. Soil carbon stocks and quality across intact and degraded alpine wetlands in Zoige, east Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Wetlands Ecology & Management*, 2014, 22(4): 427-438.
- [38] Gao J, Zhang X, Lei G, et al. Soil organic carbon and its fractions in relation to degradation and restoration of wetlands on the Zoigê Plateau, China[J]. *Wetlands*, 2014, 34(2): 235-241.
- [39] 李飞, 刘振恒, 贾甜华, 等. 高寒湿地和草甸退化及恢复对土壤微生物碳代谢功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6006-6015.
- [40] 何贵永, 孙浩智, 史小明, 等. 青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 12-20.
- [41] Shang Z H, Feng Q S, Wu G L. Grasslandification has significant impacts on soil carbon, nitrogen and phosphorus of alpine wetlands on the Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58(4): 170-179.
- [42] 李宏林, 徐当会, 杜国祯. 青藏高原高寒沼泽湿地在退化梯度上植物群落组成的改变对湿地水分状况的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 403-410.
- [43] Wu P, Zhang H, Cui L, et al. Impacts of alpine wetland degradation on the composition, diversity and trophic structure of soil nematodes on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 837.
- [44] Li N, Wang G, Yang Y, et al. Plant production, and carbon and nitrogen source pools, are strongly intensified by experimental warming in alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(5): 942-953.

- [45] Yang G, Chen H, Wu N, et al. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH₄ emissions from the Zoige peatland in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78(2014): 83–89.
- [46] Hirota M, Tang Y, Hu Q, et al. The potential importance of grazing to the fluxes of carbon dioxide and methane in an alpine wetland on the Qinghai–Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(29): 5255–5259.
- [47] 陈槐, 高永恒, 姚守平, 等. 若尔盖高原湿地甲烷排放的时空异质性[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3425–3437.
- [48] Mitsch W J, Nahlik A, Wolski P, et al. Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(5): 573–586.
- [49] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 等. 放牧对若尔盖高原湿地 CH₄排放的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 851–859.
- [50] Cui L, Kang X, Li W, et al. Rewetting decreases carbon emissions from the Zoige alpine peatland on the Tibetan Plateau[J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 948.
- [51] Wei D, Xu R, Tarchen T, et al. Revisiting the role of CH₄ emissions from alpine wetlands on the Tibetan Plateau: evidence from two in situ measurements at 4758 and 4320 m above sea level[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120(9): 473–484.
- [52] 胡启武, 吴琴, 刘影, 等. 湿地碳循环研究综述[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2381–2386.
- [53] Zhang H, Yao Z, Ma L, et al. Annual methane emissions from degraded alpine wetlands in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657 (2019): 1323–1333.
- [54] Luan J, Liu S, Wu J, et al. The transient shift of driving environmental factors of carbon dioxide and methane fluxes in Tibetan peatlands before and after hydrological restoration[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2018, 250–251: 138–146.
- [55] Wang J, Wang G, Hu H, et al. The influence of degradation of the swamp and alpine meadows on CH₄ and CO₂ fluxes on the Qinghai–Tibetan Plateau[J]. *Environmental Geology*, 2010, 60(3): 537–548.
- [56] Falk J M, Schmidt N M, Strom L. Effects of simulated increased grazing on carbon allocation patterns in a high arctic mire[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 119: 229–244.
- [57] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 等. 2005—2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估[J]. *地理研究*, 2013, 32(9): 1645–1656.
- [58] 摆万奇, 土艳丽, 李建川, 等. 筑坝在湿地恢复中的作用: 以拉萨市拉鲁湿地为例[J]. *资源科学*, 2010, 32(9): 1666–1671.
- [59] Zhang Y, Wang C, Bai W, et al. Alpine wetlands in the Lhasa River Basin, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(3): 375–388.
- [60] 徐新良, 王靓, 李静, 等. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(1): 50–58.
- [61] Wang G, Li Y, Chen L, et al. Impacts of permafrost changes on alpine ecosystem in Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(11): 1156–1169.
- [62] Zhang X H, Liu H Y, Baker C, et al. Restoration approaches used for degraded peatlands in Ruorgai (Zoige), Tibetan Plateau, China, for sustainable land management[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 38(1): 86–92.
- [63] Ma M, Zhou X, Ma Z, et al. Soil seed bank dynamics in alpine wetland succession on the Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2011, 346: 19–28.
- [64] Ma Z, Ma M, Zhou X. Composition of the soil seed bank and vegetation changes after wetland drying and soil salinization on the Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44(3): 18–24.
- [65] Yang G, Peng C, Chen H, et al. Qinghai–Tibetan Plateau peatland sustainable utilization under anthropogenic disturbances and climate change[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2017, 3(3): e01263.
- [66] 付梦娣, 田俊量, 朱彦鹏, 等. 三江源国家公园功能分区与目标管理[J]. *生物多样性*, 2017, 25(1): 71–79.

Ecosystem evolution of alpine wetland in Tibetan Plateau and consideration for ecological restoration and conservation

ZHAO Zhigang, SHI Xiaoming

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems; School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract Tibetan Plateau as a shelter plays an important role in ecological security in China, even in Asia, which is also the key source region of many rivers. Under the joint effects of global changes and anthropogenic activities, many serious ecological and environmental issues have occurred in Tibetan Plateau. Particularly, typical alpine wetland generally shows a trend of degradation. By analyzing the current studies of wetland area change and degradation in the structure and function of ecosystems and potential causes of wetland degradation, this study addresses dynamical changes and evolutionary trend of alpine wetland in Tibetan Plateau. The ecological protection and restoration projects conducted by Chinese government have played a large role in recent twenty years, but the degradation of alpine wetland is still a great challenge. As a long-term work, it is needed to strengthen the active cooperation of technology research and development projects and engineering projects of ecological restoration in the future and to increase natural capacity of recovery of wetland through establishing a long-term management mechanism. At the same time, to construct complete evaluation models and indicator systems for protection of alpine wetland, and further to improve monitoring system and evaluating system for project implementation effect are necessary. By conducting a long-term ecological monitoring for alpine wetland ecosystem in the source regions of the Yellow River and Yangtse Rive, Shouqu wetland of Yellow river and Zoige wetland should be merged into the management scope of National Park as Sanjiangyuan, which can be planed as a whole to establish a platform of scientific service and mechanism of information sharing.

Keywords Tibetan Plateau; alpine wetland; ecosystem evolution; water conservation function; ecological restoration and conservation ●



(责任编辑 刘志远)