

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.021 CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.021

王嘉琪, 胡健, 曹永强, 等. 若尔盖高原高寒泥炭湿地水碳过程研究进展[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4):12-21.

WANG Jiaqi, HU Jian, CAO Yongqiang, et al. Research progress on water-carbon processes in alpine peat wetlands on the Zoige Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):12-21.

若尔盖高原高寒泥炭湿地水碳过程研究进展

王嘉琪¹, 胡健^{1,2}, 曹永强¹, 陈江枚¹, 孙欢¹, 段东东^{1,2},
周青平^{1,2}, 张伟^{1,2}, 黄秋成^{1,2}, 雷俊锋^{1,2}

(1.西南民族大学草地资源学院, 成都 610041; 2.西南民族大学四川若尔盖高寒湿地
生态系统国家野外科学观测研究站, 成都 610041)

摘要: [目的] 针对水土过程与碳流失过程耦合研究不足、长期连续观测数据缺乏、流域尺度水碳通量定量评估薄弱等问题, 系统综述若尔盖高原高寒泥炭湿地水碳过程的研究进展, 为湿地可持续管理与“双碳”目标提供科学依据。 [方法] 基于国内外若尔盖高原已有研究成果开展系统性文献综述, 从地球关键带视角解析水-碳-生物多圈层耦合机制, 阐明水文条件、植被演替与气候变化对碳循环的协同调控作用; 同时, 结合生态修复工程实践与政策演进历程, 分析湿地保护技术(如复湿、植被重建)的恢复成效及其对区域碳平衡的影响。 [结果] 水文条件是调控泥炭湿地碳汇功能的核心因子, 其波动通过氧化还原作用直接驱动碳积累与排放动态; 植被群落演替显著影响根系碳输入效率, 但关键生物地球化学过程的微观耦合机制仍缺乏系统性验证。挖沟排水、超载放牧等人类活动通过破坏水文连通性加速泥炭氧化与碳流失, 复湿工程、植被恢复等修复技术虽能局部恢复水位并提升碳汇能力, 但其长期生态效应仍需深化研究。现有水碳耦合模型在复杂地形特征的高寒湿地的应用不足, 需精准模拟影响溶解有机碳的迁移路径; 流域尺度联网观测体系薄弱, 制约水文-侵蚀-碳流失等多过程耦合机制的系统认知。野外站发展取得显著成效, 支撑高寒泥炭湿地生态保护和修复。 [结论] 未来研究应重点开展的工作为: 1) 建立高寒泥炭湿地长期定位观测样地, 系统监测水源涵养和碳汇功能动态。2) 构建多尺度(样地-流域-区域)、多要素(气候-植被-土壤-水文)联网观测体系, 综合运用定位观测、模型模拟等方法, 定量解析高寒泥炭湿地关键带水土过程及其碳的迁移规律。3) 建立控制试验平台, 深入研究全球变化(气候变化、超载放牧、挖沟排水和复湿等)对高寒泥炭湿地水碳过程的影响机制。4) 强化高寒泥炭湿地生态修复关键技术研发, 构建区域生态质量评价技术体系。该研究成果将为高寒湿地生态保护修复和可持续管理提供重要科学支撑。

关键词: 青藏高原; 高寒湿地; 景观格局; 生态过程; 水碳耦合

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)04-0012-10

Research Progress on Water-Carbon Processes in Alpine Peat Wetlands on the Zoige Plateau

WANG Jiaqi¹, HU Jian^{1,2}, CAO Yongqiang¹, CHEN Jiangmei¹, SUN Huan¹, Duan Dongdong^{1,2},
ZHOU Qingping^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, HUANG Qiucheng^{1,2}, LEI Junfeng^{1,2}

(1. College of Grassland Resources, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Zoige Alpine Wetland
Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: [Objective] In response to the insufficient research on the coupling of soil and water processes with carbon loss processes, the lack of long-term continuous observation data, and the weak quantitative assessment of water-carbon fluxes at the watershed scale, this paper systematically reviews the research progress of water-carbon processes in alpine peat wetlands on the Zoige Plateau. The aim is to provide a scientific basis for

收稿日期: 2024-12-30 修回日期: 2025-04-04 录用日期: 2025-04-28 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-23

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0307); 四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0106); 西南民族大学“双一流”项目(CX2023012)

第一作者: 王嘉琪(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事湿地水碳过程研究。E-mail: wanrj7@163.com

通信作者: 胡健(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事景观格局-水土-生态过程、生态恢复的生态效应研究。E-mail: jianhu@swun.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

sustainable wetland management and achieving the "dual carbon" goals. [Methods] Based on existing domestic and international research on the Zoige Plateau, a systematic literature review was conducted. From the perspective of the Earth Critical Zone, the coupled mechanisms among hydrological, carbon, and biotic processes across multiple spheres were analyzed, and the synergistic regulation of hydrological conditions, vegetation succession, and climate change on the carbon cycle was clarified. In conjunction with the practical implementation of ecological restoration projects and policy evolution, the effectiveness of wetland protection and restoration technologies (such as rewetting and vegetation restoration) and their impact on regional carbon balance were analyzed. [Results] Hydrological conditions are the key factors regulating the carbon sink function of alpine peat wetlands, with water table fluctuations directly driving carbon accumulation and emission dynamics via redox reactions. Vegetation succession significantly impact root carbon input efficiency, yet the micro-scale coupling mechanisms of key biogeochemical processes still lack systematic verification. Human activities such as ditch drainage and overgrazing accelerate peat oxidation and carbon loss by disrupting hydrological connectivity. Although restoration techniques such as rewetting and vegetation recovery can partially restore water levels and enhance carbon sequestration, their long-term ecological effects require further investigation. The existing water-carbon coupling models are insufficient in their application to alpine wetlands with complex terrain characteristics, necessitating more accurate simulations of dissolved organic carbon transport pathways. The lack of a network observation system at the watershed scale restricts the systematic understanding of the coupled mechanisms of multiple processes, such as hydrology, erosion and carbon loss. The development of field stations has achieved remarkable results, supporting the ecological protection and restoration of alpine peat wetlands. [Conclusion] Future research should focus on the following aspects: 1) Establishing long-term observation plots to systematically monitor water retention and carbon sink dynamics in alpine peat wetlands. 2) Building a multi-scale (plot-watershed-region) and multi-element (climate-vegetation-soil-hydrology) observation network, and employing integrated methods such as fixed-point monitoring and model simulation to quantitatively analyze critical zone water and soil processes and carbon transport patterns. 3) Developing controlled experiment platforms to investigate the impact of global change (e. g., climate change, overgrazing, ditch drainage and rewetting) on water-carbon processes. 4) Strengthening the research and development of key technologies for ecological restoration of alpine peat wetlands, and building a technical system for evaluating regional ecological quality. These efforts will provide critical scientific foundations for ecological protection, restoration, and sustainable management of alpine wetlands.

Keywords: Qinghai-Tibetan Plateau; alpine wetland; landscape pattern; ecological process; water-carbon coupling

Received: 2024-12-30

Revised: 2025-04-04

Accepted: 2025-04-28

Online(www.cnki.net): 2025-05-23

若尔盖高寒泥炭湿地是世界上面积最大、保存最完好的高原泥炭沼泽湿地,其土壤碳储量显著高于其他生态系统类型,是全球重要的“储碳库”及气候变化的“缓冲器”^[1]。泥炭湿地定义为有机质超过50%或泥炭层厚度达30 cm以上的湿地生态系统^[2],其形成可追溯至全新世早期(约10 000 a前),受高寒湿润气候、稳定水文条件与植被演替的协同驱动^[1,3]。在低温缺氧环境下,植物残体分解速率显著降低,而莎草科等湿生植物通过持续输入有机物质,促使泥炭以年均0.5~1.0 mm的速率积累,其碳固定潜力可达0.3 Mg/(hm²·mm)^[4]。黄河上游水系演变与季节

性降水为泥炭发育提供持续水源补给,平坦地形则促进水分长期滞留,形成厚达3~10 m、有机质质量分数50%~70%的泥炭层^[3,5]。

作为青藏高原生态安全屏障的关键组成部分,若尔盖泥炭湿地碳储量约占全球泥炭湿地的10%^[6],其碳汇功能对全球气候变化响应敏感。碳汇功能主要表现为通过植被光合作用固定大气CO₂,并将有机碳储存于泥炭层中;而碳源则源于泥炭氧化分解,向大气释放CO₂和CH₄等温室气体^[7]。然而,近50 a来,在全球变暖与人类活动(如超载放牧、挖沟排水等)的双重压力下,若尔盖泥

炭湿地水位下降(0.5~1.0 m)导致泥炭氧化进程加速,局部退化区域年平均萎缩速率达1.5%^[8],此过程促使碳循环由“汇”向“源”转变,威胁区域生态安全并加剧全球碳失衡^[9]。在此背景下,系统解析泥炭湿地水碳耦合机制,对基于水碳过程的生态保护与修复、实现“双碳”目标及维持高原生态屏障功能至关重要。

因此,本文基于国内外若尔盖泥炭湿地水碳循环的研究,对若尔盖泥炭湿地水碳过程进行知识梳理并加深对泥炭湿地的多圈层、多过程、多要素及多尺度的理解,提出未来研究重点,为高寒泥炭湿地生态保护修复和可持续管理提供科学依据。

1 高寒泥炭湿地的水碳循环

泥炭湿地的水碳循环是复杂的生物地球化学过程(图1),主要包括植被光合固碳、土壤碳积累、水体碳迁移和温室气体排放等多个相互关联的环节^[10-11]。长期观测与模型研究^[12]表明,全新世气候波动与水文条件共同调控泥炭湿地的碳积累速率,而水文连通性

则对碳通量的影响存在显著的时空异质性(如CO₂排放量随水位下降可增加20%~30%)^[13]。植被通过光合作用吸收大气中的二氧化碳(CO₂),并将其转化为有机碳储存于生物量中。在若尔盖高寒泥炭湿地,植被的年平均固碳速率可达0.8~1.2 Mg/hm²^[7]。植物残体和根系分泌物通过微生物分解形成泥炭,年平均积累速率为0.5~1.0 mm,泥炭的积累速率直接影响其碳汇潜力,泥炭年均积累速率每增加0.1 mm,可多固定0.3 Mg/hm²的有机碳^[4]。水体中的碳迁移是泥炭湿地水碳循环的重要组成部分,溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)通过地表径流和地下水向河流、湖泊迁移。若尔盖泥炭湿地的DOC浓度从湿地边缘的20 mg/L增至中央区域的50 mg/L,反映水文连通性对碳迁移的调控作用^[14-15]。水位下降导致泥炭氧化,CO₂排放量增加20%~30%,而CH₄排放量减少15%~20%^[14]。此耦合过程维系着若尔盖泥炭湿地水碳循环的动态平衡,其碳汇效应对全球气候变化具有重要的调节作用。

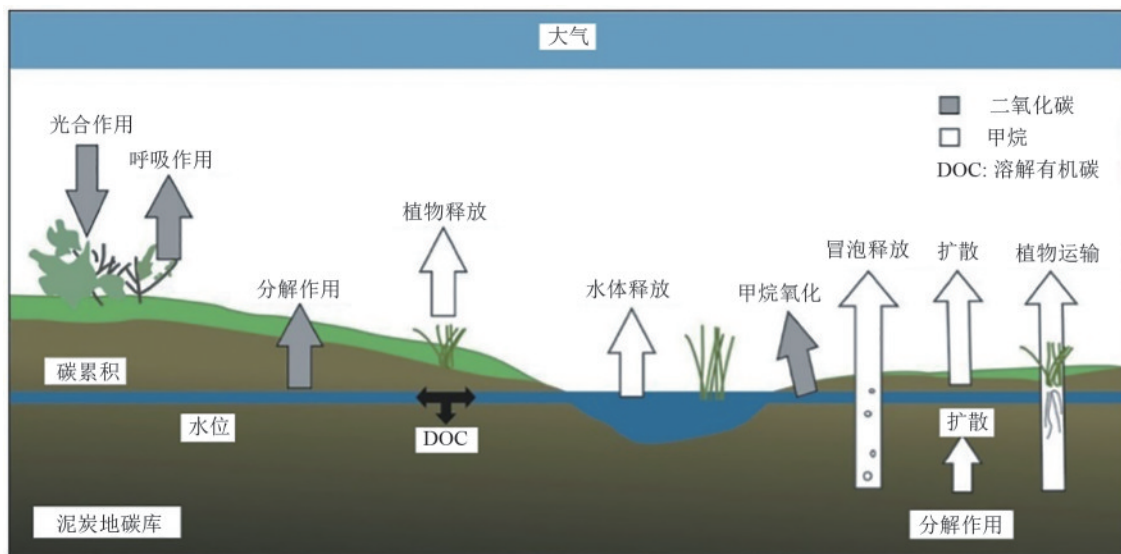


图1 泥炭湿地主要碳循环过程^[16]

Fig. 1 Simplified diagram of the main carbon cycle processes in peat wetlands^[16]

地球关键带(earth critical zone)是从植被冠层到深层基岩的连续体,涵盖大气、植被、土壤、水体和岩石等多个圈层(图2a),是地球表层物质和能量交换最活跃的区域^[17-18]。在泥炭湿地生态系统中,地球关键带的概念为理解水碳循环提供全新视角。泥炭湿地的水碳循环呈现多尺度耦合特征,既受局部环境因子调控,又与流域水文过程、生物地球化学循环及生态系统动态密切相关^[18-19]。若尔盖高寒泥炭湿地的关键带结构展示从地表植被到深层基岩的层次分布,揭示碳循环和生态系统功能的重要信息(图2b)。例如,地表层和浅层的高有机质表明,强烈的生物活

动和碳固定过程,而更深层则反映长期的地质过程和物质循环^[20]。地球关键带视角强调泥炭湿地水碳循环的多圈层相互作用。水文过程作为关键带的纽带,不仅调控水资源的时空分布,还通过驱动碳氮迁移深刻影响生态系统^[21-22]。例如,若尔盖泥炭湿地的水文条件直接影响泥炭的积累速率和碳汇功能的稳定性^[3,23]。水位下降导致泥炭氧化,加速有机质分解和碳流失,而水位上升则有助于泥炭的积累和碳的长期固定^[24]。因此,地球关键带的研究为揭示泥炭湿地水碳循环的驱动机制及其对全球变化的响应模式提供重要的理论框架。

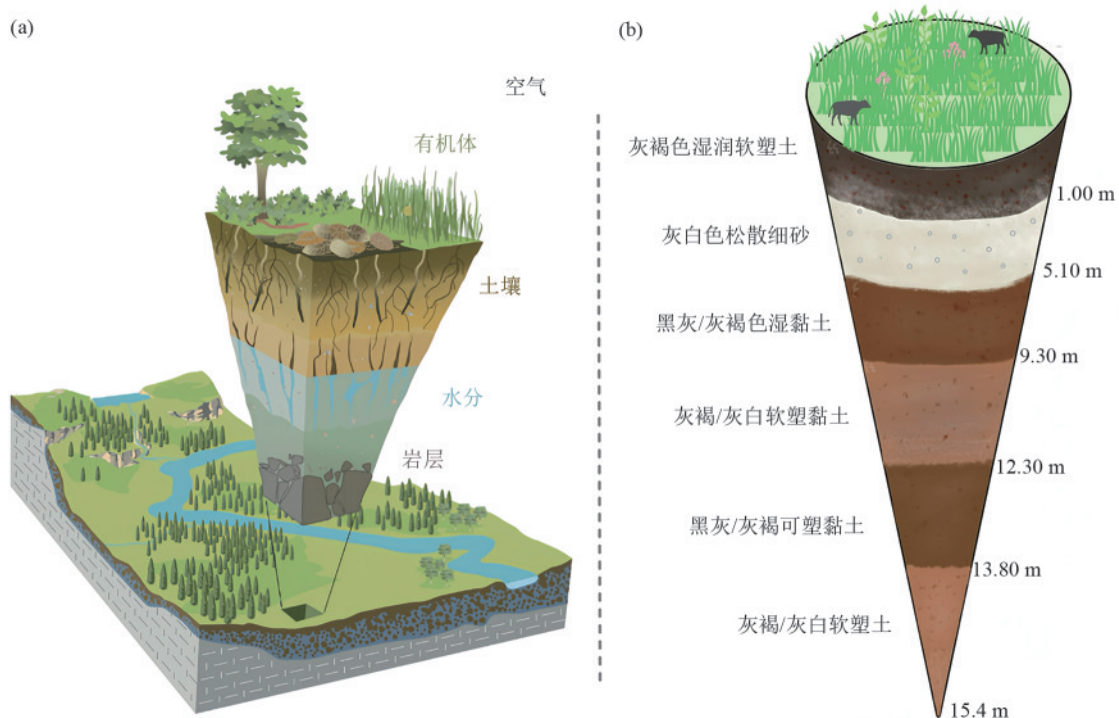


图 2 地球关键带示意及高寒泥炭湿地关键带^[20]

Fig. 2 Schematic diagram of the Earth Critical Zone and critical zone in alpine peat wetland^[20]

地球关键带的多圈层相互作用对泥炭湿地水碳循环的调控至关重要。气候变化和人类活动通过改变关键带的结构和功能,深刻影响泥炭湿地的水碳过程^[17-18]。例如,全球气候变暖导致若尔盖泥炭湿地的冻土融化和水位下降,加速泥炭氧化和碳流失^[25-26]。人类活动(如过度放牧和挖沟排水)通过改变水文条件,进一步加剧泥炭湿地的退化和碳流失^[26-27]。此外,关键带的研究还揭示泥炭湿地水碳循环的时空异质性。若尔盖泥炭湿地平坦区域的泥炭积累速率显著高于边缘区域,主要归因于水分条件的差异^[28]。植被类型(如莎草科和禾本科植物)通过提供大量有机残体,直接参与泥炭的形成过程,而地质条件(如基岩类型和地形起伏)则通过影响水分滞留和有机质分解速率,间接调控泥炭发育的空间分布^[3,28]。综上所述,地球关键带的视角为理解泥炭湿地水碳循环提供全面的理论框架。通过揭示多圈层相互作用及其对全球变化的响应,关键带研究为泥炭湿地保护和修复提供重要的科学依据。然而,当前研究虽明确水碳循环的基本框架,但对多圈层交互作用的动态解析仍显薄弱。例如,植被根系分泌物对微生物活性的调控机制多基于短期试验,缺乏长期连续观测验证^[21];泥炭层碳积累速率的估算高度依赖静态模型^[13],未能充分纳入冻融循环对有机质分解的非线性影响。同时,现有数据多聚焦平坦区,对边缘过渡带的水碳通量异质性(如部分区域

DOC 浓度梯度差异达 30 mg/L)关注不足^[15],可能低估地形空间异质性对区域碳平衡的调控作用。未来需结合原位监测与动态模型,揭示关键带多圈层耦合的时空尺度效应。

2 高寒泥炭湿地的水碳循环研究进展

高寒泥炭湿地水碳过程的耦合机制是近年来重要的研究方向,植被—土壤—水体间的相互作用通过水文过程驱动碳的固定、储存和迁移^[10-11]。例如,若尔盖泥炭湿地的水文条件直接影响泥炭层氧化还原状态,进而调控有机质分解速率和温室气体排放^[7,14]。2018—2022 年,泥炭湿地水文模型(如 MUSLE 模型与 GIS 技术融合)的应用显著增加,成为解析水碳交互作用的主流工具^[29-30],该模型揭示水文过程对碳循环的非线性反馈特征,如局部水位下降 0.5 m 可导致泥炭氧化速率提高 40%,CO₂排放量增加 20%~30%^[14,26]。此外,挖沟排水等人类活动通过改变水文连通性,进一步加剧碳流失,导致湿地从碳汇向碳源转变^[9,27]。植被在耦合机制中扮演关键角色,莎草科和禾本科植物的根系分泌物通过促进微生物活性,加速有机碳向土壤碳库的输入^[31-32]。若尔盖湿地植被退化(如湿生植物向中生植物转变)减少根系碳沉积量达 50%,显著降低土壤有机碳的稳定性^[33-34]。气候变化与人类活动的交互作用则通过改变植被群落结构和生物量分配,间接影响水碳耦合的时空格局^[7,9]。例如,气候变暖导致植物生长季延长,

但干旱胁迫下植被碳固定效率下降,削弱湿地的碳汇潜力^[7,35]。

若尔盖高寒泥炭湿地的碳库分布与垂直通量具有显著的空间异质性。植被碳库主要集中在泥炭沼泽和沼泽化草甸,其碳储量平均为 12.8 Mg/hm²,占生态系统总碳储量的 15%~20%^[36-37]。土壤碳库则以泥炭层为核心,有机碳浓度从湿地边缘的 3.8%增至中央区域的 7.2%,深层泥炭(>1 m)的碳储量占总量的 60%~70%^[38-39]。垂直通量方面,植被光合作用年平均固碳量为 0.8~1.2 Mg/hm²,而土壤呼吸释放的 CO₂通量为 1.5~2.0 Mg/hm²,净碳汇能力为 0.3~0.4 Mg/hm²,表明湿地碳汇功能高度依赖于水文条件的稳定性^[7,35]。温室气体排放的垂直通量对气候变化响应敏感。若尔盖泥炭湿地的 CH₄排放通量在植物生长初期达到峰值,冻融循环通过改变土壤微生物活性,进一步影响碳通量的季节性变化,春季冻融期土壤 CO₂排放量占全年总量的 40%~50%^[25,40]。退化湿地(如沙化草甸)的碳库活度指数较原生湿地上升 40%,碳稳定性显著降低^[8,33]。水文驱动下的碳横向迁移是理解高寒泥炭湿地碳循环研究的关键。溶解有机碳(DOC)是碳横向迁移的主要形式,占水体总碳通量的 60%~80%^[14-15],该碳流失过程与土壤侵蚀中的选择性迁移机制类似^[41]。受水文连通性和泥炭氧化程度的调控,若尔盖泥炭湿地的 DOC 浓度呈显著的空间梯度^[14-15],如极端降水事件可通过地表径流将 DOC 输出量提高 2~3 倍,而干旱年份则通过增强泥炭矿化作用增加 DOC 释放量^[15,42];若尔盖湿地土壤碳矿化速率对气温升高的敏感性高于青藏高原高寒草甸生态系统^[43]。

目前,碳的横向迁移研究仍面临长期观测数据和方法限制,当前模型虽能模拟侵蚀驱动的碳流失,但对 DOC 迁移路径的定量预测精度不足^[29-30]。流域尺度的碳通量联网观测数据缺乏,限制横向碳循环的精确评估^[15,17]。未来需结合遥感、GIS、同位素示踪等技术,揭示碳迁移的时空动态及其对生态系统过程的级联响应。因此,未来需构建高寒泥炭湿地植被、水文、土壤、地形等多要素耦合模型,集成极端气候情景,提升模拟和预测精度。

3 高寒泥炭湿地的水文和土壤侵蚀过程

高寒泥炭湿地的水文与侵蚀过程是驱动碳横向迁移和流失的关键机制。若尔盖湿地的年平均降水量为 650~750 mm,而蒸发量高达 1 200~1 400 mm,水分平衡高度依赖地表径流和地下水补给^[1,44]。近

年来,气候变化与人类活动导致地下水位下降,改变湿地的水文格局^[26,45]。水文条件的变化直接加剧土壤侵蚀,如侵蚀过程中约 20%~30% 的流失碳以 CO₂形式释放至大气,其余通过地表径流迁移至下游水体,加剧碳平衡的不确定性^[5,29]。若尔盖湿地的年平均侵蚀模数从 20 世纪 70 年代的 500 t/km²增至目前的 800 t/km²,泥炭层破坏和有机碳流失现象日益严重^[26,46]。沟谷侵蚀、河岸侵蚀和冻融侵蚀是若尔盖湿地碳流失的主要形式。沟谷侵蚀速率年均达 1.5~2.0 cm,导致泥炭层破裂和下伏细沙层暴露,加速有机碳氧化和 CO₂排放^[26,29]。河岸侵蚀则受黄河上游河床深刻影响,冻融作用下的张力裂缝和边坡坍塌进一步加剧侵蚀速率^[47-48]。若尔盖湿地地处高寒区域,季节性冻融交替通过改变土壤孔隙结构和导水能力,调控水分运移路径^[49-50]。冻融期土壤冻结阻碍水分下渗,增加地表径流量,而融化期土壤解冻后水分快速渗透,导致泥炭层干湿交替,加速有机质分解^[25,40]。该种水文连通性的动态变化直接影响溶解有机碳(DOC)的迁移,进一步加剧碳流失。如排水沟渠导致泥炭层水分流失率达 25%~35%,引发泥炭收缩和沟壑侵蚀连锁反应^[26,30]。此类活动不仅降低土壤团聚体稳定性,还改变微生物群落组成(如甲烷氧化菌丰度减少 30%),削弱碳汇功能^[30,51]。为应对此问题,近年来,若尔盖湿地实施复湿工程,通过布设生态沙障等植被恢复分散侵蚀区径流,使侵蚀速率降低^[26,30]。

当前若尔盖高寒泥炭湿地的水文与侵蚀过程研究仍面临长期观测数据缺乏、水碳耦合过程研究不足等挑战。例如,冻融侵蚀的年内动态和极端气候对 DOC 迁移的瞬时效应缺乏连续监测数据支撑^[15,17],水文与碳循环的耦合机制研究多局限于单一学科,微生物响应侵蚀驱动碳流失的机理尚未明晰^[17,19],而现有模型对高寒湿地独特地形与气候的适应性不足,限制 DOC 迁移路径的定量预测^[29-30]。未来需整合遥感、同位素示踪与原位传感技术,构建多尺度长期监测网络,定量解析水文侵蚀与碳迁移的时空动态;从地球关键带多圈层作用出发,揭示冻融循环、水文连通性与微生物—土壤—水体耦合的微观机制;同时,开发机器学习与物理模型融合的高寒湿地专用的水碳模型,提升极端气候和人类活动干扰的预测能力,为湿地修复与碳平衡管理提供科学工具^[9,17,29]。

4 高寒泥炭湿地保护与修复

4.1 基于水碳过程的生态保护与修复实践

若尔盖高原沼泽湿地作为全球重要的泥炭湿

地生态系统,不仅是中亚地区碳循环的关键节点^[52],更是青藏高原生态安全屏障的核心组成部分。该湿地在全球气候变化背景下发挥着重要的碳汇功能和气候调节作用。然而,近年来,在全球气候变暖和人类活动的双重压力下,湿地生态系统出现严重退化^[53-54],具体表现为生态系统发生逆向演替(沼泽→沼泽草甸→草甸→沙化草地)、水文连通性断裂和泥炭层萎缩^[26,41],并形成以斑块状裸露泥炭为特征的退化景观^[51],伴随典型高寒湿地退化特征,如植被群落简化和土壤有机质下降^[55]。该退化过程不仅导致区域碳排放量增加、生物多样性下降,还严重削弱湿地的碳汇能力。因此,开展基于水碳耦合过程的科学保护与修复工作,对恢复若尔盖湿地的生态功能和维持区域生态安全具有重大意义。研究^[14]表明,水文条件是碳汇功能的核心调控因子,水位下降引发的泥炭氧化是退化的关键驱动因素,而恢复自然水文条件可抑制有机质分解,使碳汇功能提升30%~40%^[7,14]。全球整合分析^[56]发现,水位回升0.3 m可使泥炭湿地CO₂排放量减少40%~50%,欧洲通过复湿工程成功将退化泥炭湿地碳汇功能恢复至原生状态的70%以上^[57],为若尔盖高寒泥炭湿地修复提供技术参考。若尔盖湿地近年实施的复湿工程通过阻断排水沟渠,重建水文连通性,使退化区地下水水位回升0.3~0.5 m,泥炭积累速率恢复至0.3~0.6 mm/a^[26,51];夏季适度降低水位还可减少CH₄排放^[7,23],为优化碳固存与甲烷调控提供科学依据^[54]。

高寒泥炭湿地生态修复影响水碳过程,如布设高山柳生态沙障等植被恢复分散侵蚀区径流,使沟谷侵蚀速率从年均1.5~2.0 cm降至0.5~0.8 cm,同时通过根系分泌物促进土壤团聚体形成,有机碳稳定性提升20%~30%^[26,30];优先种植藏北嵩草等湿生植物,可增加根系碳沉积量40%~50%,并通过调控根际微生物群落(甲烷氧化菌丰度增加25%)抑制CH₄排放^[32,58]。2022年启动的“山水林田湖草沙一体化”工程累计修复退化湿地20.49 km²,修复区土壤有机碳损失速率降低40%,水源涵养能力提升15%~20%^[51],有效逆转湿地退化对碳循环(如有机质质量分数下降、土壤温度升高)^[39,59]和生物多样性的负面影响,为高寒湿地生态保护和修复提供重要实践经验。

4.2 若尔盖泥炭湿地生态保护和修复进展

若尔盖湿地的保护与修复植根于长期的科学积累与多阶段政策演进,以下侧重梳理若尔盖湿地生态保护和修复进展(图3)。自1958年长春地理研究

所对若尔盖沼泽和泥炭进行综合考察以来,中国在湿地生态学研究方面取得显著进展^[60-61]。《若尔盖高原的沼泽》^[62]系统梳理高原沼泽的分布与发育规律,为湿地保护奠定理论基础。2000年,UNDP/GEF项目覆盖若尔盖等4个湿地区域,推动保护理念与国际接轨。中国生态系统研究网络(CERN)通过长期定位试验站积累湿地生态过程的关键数据,而《湿地科学》期刊的创刊(2003年)标志着学科体系的完善^[63-64]。近年来,随着若尔盖国家公园建设的推进,生态修复工程从单一技术转向多目标协同治理,如“四川黄河上游若尔盖草原湿地山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目”(简称“若尔盖山水工程项目”)成功入围全国第二批山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目。野外站建设方面,目前若尔盖高原区域已建设四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站、甘肃甘南草原生态系统国家野外科学观测研究站、中国科学院若尔盖高原湿地生态系统研究站、中国科学院若尔盖湿地生态研究站、四川若尔盖高寒湿地生态系统国家定位观测研究站、黄河上游若尔盖生态修复野外科学观测研究站6个野外站,其中,四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站是科技部唯一的高寒泥炭沼泽湿地国家野外站,为高寒湿地长期规范化观测和科学研究提供重要平台,而黄河上游若尔盖生态修复野外科学观测研究站是实施“若尔盖山水工程项目”的重要平台,有力支撑区域泥炭湿地生态保护和修复。科研项目层面,“高寒泥炭地演化及其对气候变化的响应与适应机制”国家重点研发计划项目、“中国泥炭地碳库演变规律与稳定性维持机制”国家自然科学基金重大项目等泥炭湿地相关项目获得立项实施。政策层面,四川省六部门发布的行动方案提出整合科技手段提升黄河流域水源涵养能力,计划到2025年建成生态保护科技支撑体系,重点攻关退化湿地恢复、碳汇功能提升等关键技术。此外,若尔盖国家公园的创建统筹水文修复、侵蚀防控与社区参与,推动湿地保护向系统性管理转型。若尔盖高寒泥炭湿地的保护与修复工作,不仅显著改善区域生态环境,也为全球气候变化应对和生物多样性保护提供重要范例。通过政策引导、工程实施与科研支撑的协同推进,湿地生态系统功能逐步恢复,水源涵养能力显著提升,碳汇潜力得到有效释放。未来,随着若尔盖国家公园建设的深入推进和“双碳”目标的全面落实,高寒泥炭湿地保护将迎来新的发展机遇,为实现区域生态安全与可持续发展奠定坚实基础。

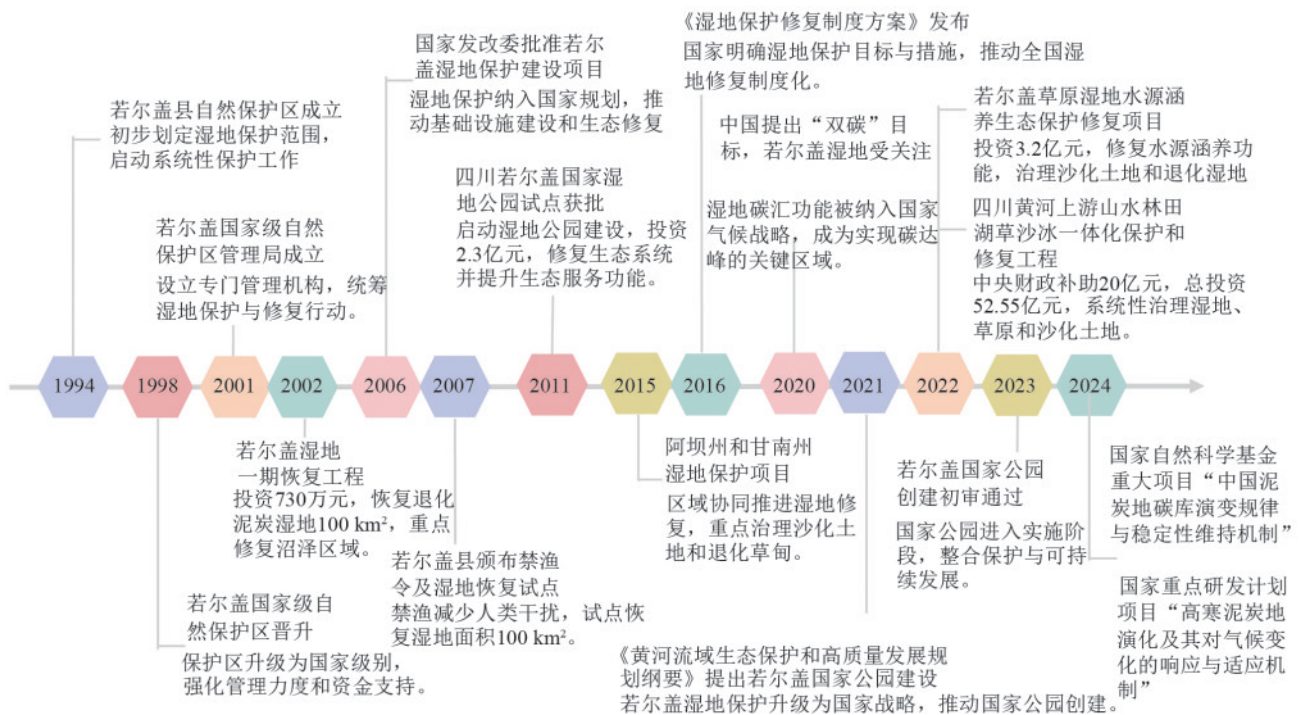


图3 若尔盖高寒泥炭湿地保护修复历程(1994—2024年)

Fig. 3 Conservation and restoration timeline of the Zoige alpine peat wetland (1994–2024)

5 研究不足与展望

5.1 研究不足

通过对若尔盖高寒泥炭湿地水碳循环及其研究进展、水土过程与碳流失过程耦合研究、生态保护和修复实践、政策和野外站支撑等方面的梳理发现,亟待解决的关键科学问题为:

1)多尺度水碳耦合机制研究薄弱。坡面、沟渠、小流域、流域和区域多尺度的水碳迁移过程缺乏系统性观测,高寒泥炭湿地的水土过程及其驱动的物质循环研究尚未明晰。

2)地球关键带视角的跨学科整合研究不足。泥炭湿地作为典型地球关键带单元,其碳—水—生物耦合过程的研究仍局限于生态学、水文学等单一学科,缺乏地理科学、关键带科学与生态系统科学的深度融合,制约多圈层相互作用的系统性解析。

3)长期控制试验研究不足。缺乏针对气候变化(如增温、降水变异)和人类活动(如挖沟排水、复湿等)的长期控制试验平台,限制气候变化和人类活动对泥炭湿地影响机制的深入研究。

4)泥炭湿地生态保护与恢复的水碳过程机制不清。对泥炭湿地退化和恢复的临界水位、植被变化及其与碳损失的定量关系缺乏实证研究,导致泥炭湿地生态修复目标设定缺乏科学依据。同时,泥炭湿地生态修复监测、评估与管理技术体系仍需完善。

5.2 研究展望

针对研究不足,通过多学科交叉、多尺度联网和长期监测,深化对高寒泥炭湿地水碳过程及其生态功能的科学认知,为若尔盖高寒泥炭湿地的保护与修复提供理论依据和技术支撑,提出未来可能的重点研究方向:

1)加强长期监测与多尺度联网研究。建立高寒泥炭湿地水源涵养和碳汇功能的长期观测样地,系统开展定位监测,定量评估其生态功能的时空演变。同时,强化若尔盖高原区域内高校和科研院所的科研合作,构建多尺度(样地、流域、区域)、多要素(气候、植被、土壤、水文)联网试验平台,揭示水碳过程的驱动机制及其对全球变化的响应。

2)深化地球关键带视角下的多学科交叉研究。从地球关键带视角出发,综合研究泥炭湿地碳—水—生物耦合过程,揭示关键带水土过程及其物质迁移,重点探究泥炭湿地关键带中碳的生物地球化学循环过程,及其对气候变化和人类活动的响应。

3)构建控制试验平台,揭示高寒泥炭湿地对全球变化的响应机制。建立高寒泥炭湿地水碳过程与气候变化的控制试验平台,揭示泥炭湿地水碳过程的驱动因素及其对气候变化和人类活动的响应与适应机制。同时,强化人类活动(如超载放牧、挖沟排水)、生态恢复措施(如复湿、水位调控)对泥炭湿地水碳过程的影响机制研究,为泥炭湿地生态保护和

恢复提供科学依据。

4)探究泥炭湿地保护与恢复的机理机制和评估方法。深入研究泥炭湿地退化过程中生态系统的临界点(如水位下降、植被演替)及其对碳循环的影响,强化高寒泥炭湿地生态保护与修复关键技术研发,通过若尔盖国家公园建设和山水林田湖草沙一体化保护和系统治理等保护和修复项目实施,构建高寒泥炭湿地保护与修复的区域生态质量评价技术体系。

参考文献:

- [1] GAFFNEY O, TANG Q H, LI Q W, et al. The impacts of land-use and climate change on the Zoige peatland carbon cycle: A review[J]. *Wires Climate Change*, 2023, e862.
- [2] 刘利娟,刘欣蔚,鞠佩君,等.15000年以来若尔盖高原泥炭地发育及其碳动态[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6493-6501.
- LIU L J, LIU X W, JU P J, et al. Peatland development and carbon dynamics histories of Zoige peatlands for 15000 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6493-6501.
- [3] CHARMAN D J. Peatlands and their response to global climate change[J]. *Progress in Physical Geography*, 2002, 26(4): 555-578.
- [4] 马学慧,夏玉梅,王瑞山.我国泥炭形成时期的探讨[J]. *地理研究*, 1987, 6(1): 31-42.
- MA X H, XIA Y M, WANG R S. A study of the peat-forming periods in China[J]. *Geographical Research*, 1987, 6(1): 31-42.
- [5] YUE Y, NI J, CIAIS P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO₂ flux induced by water erosion in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(24): 6617-6622.
- [6] ZHOU W C, CUI L J, WANG Y F, et al. Carbon emission flux and storage in the degraded peatlands of the Zoige alpine area in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(1): 72-82.
- [7] KANG X M, YAN L, CUI L J, et al. Reduced carbon dioxide sink and methane source under extreme drought condition in an alpine peatland[J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): e4285.
- [8] LI H L, LI T T, SUN W J, et al. Degradation of wetlands on the Qinghai-Tibetan Plateau causing a loss in soil organic carbon in 1966—2016[J]. *Plant and Soil*, 2021, 467(1): 253-265.
- [9] CHEN H, ZHU Q, PENG C H, et al. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [10] LIMPENS J, BERENDSE F, BLODAU C, et al. Peatlands and the carbon cycle: From local processes to global implications: A synthesis[J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(5): 1475-1491.
- [11] 刘赵文.湿地生态系统的碳循环研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(6): 121-124.
- LIU Z W. Research progress of carbon cycle in the wetland ecosystem[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(6): 121-124.
- [12] LOISEL J, GALLEGRO-SALA A V, AMESBURY M J, et al. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 70-77.
- [13] DING W, LI S, DU Z, et al. Water table decline alters CO₂ and CH₄ fluxes in a Tibetan peatland: Implications for carbon cycling under climate change[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(8): e2020JG005798.
- [14] WU H D, YAN L, LI Y, et al. Drought-induced reduction in methane fluxes and its hydrothermal sensitivity in alpine peatland[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e8874.
- [15] ZHANG Z Y, QIN J H, SUN H, et al. Spatiotemporal dynamics of dissolved organic carbon and freshwater browning in the zoige alpine wetland, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Water*, 2020, 12(9): e2453.
- [16] 张卉,郭正堂,赵艳.泥炭地碳源汇功能与“双碳”目标[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 324-335.
- ZHANG H, GUO Z T, ZHAO Y. Peatland carbon cycling and its contribution to carbon peak and carbon neutrality[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 324-335.
- [17] BANWART S A, CHOROVER J, GAILLARDET J, et al. Sustaining Earth's critical zone: Basic science and interdisciplinary solutions for global challenges[M]. Sheffield: The University of Sheffield, 2013.
- [18] BRANTLEY S L, WHITE T S, WHITE A F. Frontiers in exploration of the critical zone[R]. Alexandria: National Science Foundation, 2007.
- [19] RICHTER D D, BILLINGS S A. 'one physical system': Tansley's ecosystem as earth's critical zone[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(3): 900-912.
- [20] CHOROVER J, KRETZSCHMAR R, GARCIA-PICHEL F, et al. Soil biogeochemical processes within the critical zone[J]. *Elements*, 2007, 3(5): 321-326.
- [21] TRUMBORE S. Carbon fluxes in the critical zone: The rhizosphere as a hub for organic matter transformations[J]. *Plant and Soil*, 2006, 282(1/2): 15-28.
- [22] FROLKING S, TALBOT J, JONES M C, et al. Peatlands in the Earth's 21st century climate system[J]. *Environmental Reviews*, 2011, 19: 371-396.

- [23] ZHANG Z, WADDINGTON J M, YAO Y, et al. Effects of water level alteration on carbon cycling in peatlands [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1):e1806113.
- [24] GORHAM E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming [J]. *Ecological Applications*, 1991, 1(2):182-195.
- [25] LIU L F, CHEN H, JIANG L, et al. Response of anaerobic mineralization of different depths peat carbon to warming on Zoige plateau [J]. *Geoderma*, 2019, 337:1218-1226.
- [26] LI Z W, WANG Z Y, BRIERLEY G, et al. Shrinkage of the Ruergai Swamp and changes to landscape connectivity, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Catena*, 2015, 126:155-163.
- [27] MA K, LIU J G, BALKOVIČ J, et al. Changes in soil organic carbon stocks of wetlands on China's Zoige plateau from 1980 to 2010 [J]. *Ecological Modelling*, 2016, 327:18-28.
- [28] YU Z, LOISEL J, BROUSSEAU D P, et al. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13):eL13402.
- [29] DOETTERL S, BERHE A A, NADEU E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154:102-122.
- [30] ZHANG Y, DEGROOTE J, WOLTER C, et al. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk [J]. *Land Degradation and Development*, 2009, 20(1):84-91.
- [31] 孙庆超, 李令仪, 乔建晨, 等. 植物根际碳沉积及影响因素研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(3):12-15.
- SUN Q C, LI L Y, QIAO J C, et al. Research progress on carbon deposition in rhizosphere and its influencing factors [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(3):12-15.
- [32] 贺意. 青藏高原沼泽化草甸和高寒草甸土壤微生物群落的差异及其对根际沉积碳的利用 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- HE Y. Difference of soil microbial community between swamp meadow and alpine meadow in Qinghai-Xizang Plateau and its utilization of rhizosphere sedimentary carbon [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [33] 马维伟, 李广, 宋捷, 等. 植被退化对尕斯海湿地土壤有机碳库及碳库管理指数的影响 [J]. *草地学报*, 2019, 27(3):687-694.
- MA W W, LI G, SONG J, et al. Effect of vegetation degradation on soil organic carbon pool and carbon pool management index in the Gahai wetland, China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3):687-694.
- [34] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 等. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式 [J]. *生态学报*, 2011, 31(20):5946-5955.
- HAN D Y, YANG Y X, YANG Y, et al. Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20):5946-5955.
- [35] HAO Y B, CUI X Y, WANG Y F, et al. Predominance of precipitation and temperature controls on ecosystem CO₂ exchange in zoige alpine wetlands of southwest China [J]. *Wetlands*, 2011, 31(2):413-422.
- [36] 冯进, 袁伟影, 高俊琴, 等. 青藏高原海北高寒湿地和草甸生态系统碳库对比 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9):2293-2298.
- FENG J, YUAN W Y, GAO J Q, et al. Comparison of carbon pools of alpine wetland and meadow ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9):2293-2298.
- [37] 高俊琴, 雷光春, 李丽, 等. 若尔盖高原三种湿地土壤有机碳分布特征 [J]. *湿地科学*, 2010, 8(4):327-330.
- GAO J Q, LEI G C, LI L, et al. The distribution characteristics of soil organic carbon in three kinds of wetland soils in zoigé plateau [J]. *Wetland Science*, 2010, 8(4):327-330.
- [38] BEER F, MUNHOZ C B R, COUWENBERG J, et al. Peatlands in the Brazilian cerrado: Insights into knowledge, status and research needs [J]. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2024, 22(3):260-269.
- [39] LUAN J W, CUI L J, XIANG C H, et al. Soil carbon stocks and quality across intact and degraded alpine wetlands in Zoige, east Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2014, 22(4):427-438.
- [40] GAO Y H, ZENG X Y, XIE Q Y, et al. Release of carbon and nitrogen from alpine soils during thawing periods in the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2015, 226:e209.
- [41] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究 [J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4):88-90.
- JIA S W, HE X B, CHEN Y M, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon loss on the loess hilly areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4):88-90.
- [42] STRACK M, WADDINGTON J M, BOURBONNIERE R A, et al. Effect of water table drawdown on peatland dissolved organic carbon export and dynamics [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(17):3373-3385.
- [43] 王丹, 吕瑜良, 徐丽, 等. 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(20):6436-6443.
- WANG D, LV Y L, XU L, et al. The effect of moisture and temperature on soil C mineralization in wetland and steppe of the Zoige region, China [J]. *Acta Ecologica*

- Sinica, 2013, 33(20): 6436-6443.
- [44] 田应兵,熊明标,宋光煜.若尔盖高原湿地土壤的恢复演替及其水分与养分变化[J].生态学杂志,2005,24(1):21-25. TIAN Y B, XIONG M B, SONG G Y. Restoration succession of wetland soils and their changes of water and nutrient in Ruorgai Plateau[J].Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(1): 21-25.
- [45] GAO Y, JIA Y L, YU G R, et al. Anthropogenic reactive nitrogen deposition and associated nutrient limitation effect on gross primary productivity in inland water of China[J].Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 530-540.
- [46] 胡健,曹全恒,刘小龙,等.草灌植被转变对草地生态系统及其水碳过程的影响研究进展[J].生态学报,2022, 42(11):4324-4333. HU J, CAO Q H, LIU X L, et al. Research progress on the effect of the transition between shrub and grass vegetation on grassland ecosystem and its water-carbon processes [J].Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4324-4333.
- [47] LIU L, ZHU L K, CHEN D, et al. Assessing the modulation of outer bank erosion by slump blocks: A case study from Marqu meadow, China[J].Geomorphology, 2024, 458: e109261.
- [48] GAO P, LI Z W, YANG H Y. Variable discharges control composite bank erosion in Zoige meandering rivers [J].Catena, 2021, 204: e105384.
- [49] LIU Q, SU L J, ZHANG C L, et al. Dynamic variations of interception loss-infiltration-runoff in three land-use types and their influence on slope stability: An example from the eastern margin of the Tibetan Plateau [J].Journal of Hydrology, 2022, 612: e128218.
- [50] 汤秋鸿,刘星才,李哲,等.陆地水循环过程的综合集成与模拟[J].地球科学进展,2019,34(2):115-123. TANG Q H, LIU X C, LI Z, et al. Integrated water systems model for terrestrial water cycle simulation [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(2): 115-123.
- [51] LIU H Y, ZHANG X H, BAKER C. et al. Ecological restoration of degraded peatlands in the Zoige Plateau: Challenges and opportunities[J].Ecological Engineering, 2023, 180, e106678.
- [52] PU Y L, LANG S X, WANG A B, et al. Distribution and functional groups of soil aggregate-associated organic carbon along a marsh degradation gradient on the Zoige Plateau, China[J].Catena, 2022, 209: e105811.
- [53] 杨永兴,李珂,杨杨.排水疏干胁迫下若尔盖高原沼泽退化评价指标体系[J].应用生态学报,2013,24(7):1826-1836. YANG Y X, LI K, YANG Y. Evaluation index system of swamp degradation in Zoige Plateau of Sichuan, southwest China under drainage stress [J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1826-1836.
- [54] TEMMINK R J M, ROBROEK B J M, VAN DIJK G, et al. Wetscapes: Restoring and maintaining peatland landscapes for sustainable futures[J].Ambio, 2023, 52: 1519-1528.
- [55] 王婷,张永超,赵之重.青藏高原退化高寒湿地植被群落结构和土壤养分变化特征[J].草业学报,2020,29(4):9-18. WANG T, ZHANG Y C, ZHAO Z Z. Characteristics of the vegetation community and soil nutrient status in a degraded alpine wetland of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(4): 9-18.
- [56] EVANS C D, PEACOCK M, BAIRD A J, et al. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions[J].Nature, 2021, 593(7860): 548-552.
- [57] ANDERSEN R, FARRELL C, GRAF M, et al. An overview of the progress and challenges of peatland restoration in western Europe[J].Restoration Ecology, 2017, 25(2): 271-282.
- [58] ZHANG Y F, CUI M M, DUAN J B, et al. Abundance, rather than composition, of methane-cycling microbes mainly affects methane emissions from different vegetation soils in the Zoige alpine wetland [J].Microbiologyopen, 2018, 7(3): e00699.
- [59] BAI J H, LU Q Q, ZHAO Q Q, et al. Effects of alpine wetland landscapes on regional climate on the zoige plateau of China[J].Advances in Meteorology, 2013, 2013: 1-7.
- [60] 林鹏.红树林研究论文集:1980—1989[M].福建 厦门:厦门大学出版社,1990. LIN P. Papers on Mangrove Research: 1980—1989[M]. Xiamen, Fujian: Xiamen University Press, 1990.
- [61] 王颖,吴小根.海平面上升与海滩侵蚀[J].地理学报, 1995, 50(2): 118-127. WANG Y, WU X G. Sea level rise and beach response [J].Acta Geographica Sinica, 1995, 50(2): 118-127.
- [62] 柴岫,金树仁.若尔盖高原沼泽的类型及其发生与发展[J].地理学报,1963,29(3):219-240. CHAI X, JIN S R. Types, occurrence and development of swamps in Zoige Plateau[J].Acta Geographica Sinica, 1963, 18(3): 219-240.
- [63] 陈宜珍.《湿地科学》发刊词[J].湿地科学,2003,1(1):e1. CHEN Y Z. Publication of wetland science [J].Wetland Science, 2003, 1(1): e1.
- [64] 黄锡畴.湿地科学建设的浅议:祝贺《湿地科学》创刊[J].湿地科学,2003,1(1):2-6. HUANG X C. Consideration of wetland science construction in China-congratulations on “wetland science” [J]. Wetland Science, 2003, 1(1): 2-6.