

DOI: 10.20103/j.stxb.202409262352

陈靖松, 刘焱序, 刘涛, 王晨旭, 张叶, 王璟, 杨猛, 秦杰, 向国萍. 若尔盖高寒泥炭地生态修复对气候减缓的影响评估. 生态学报, 2025, 45(16):

Chen J S, Liu Y X, Liu T, Wang C X, Zhang Y, Wang J, Yang M, Qin J, Xiang G P. Assessment of the impact of ecological restoration on climate mitigation in the alpine peatland of Zoige. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16):

若尔盖高寒泥炭地生态修复对气候减缓的影响评估

陈靖松¹, 刘焱序^{1,*}, 刘涛², 王晨旭¹, 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: 科学评估气候变暖背景下高寒泥炭地生态修复对气候减缓变化的贡献, 对于识别和预测高寒泥炭地碳源汇特征、指导湿地生态修复具有重要理论和实践意义。土地管理和气候变化显著影响着若尔盖高寒泥炭地碳汇功能, 基于自然气候解决方案的气候减缓潜力核算体系, 通过荟萃分析修正高寒泥炭地气候减缓潜力系数, 系统评估若尔盖高寒泥炭地历史恢复对减缓气候变化的贡献, 并预测其未来修复的气候减缓能力。结果表明: (1) 2000—2020 年, 泥炭地退化趋势得到有效遏制, 到 2020 年泥炭地总面积净增加 42.77 km²。(2) 泥炭地退化每年会增加 1204.50 g CO₂e m⁻² 的碳排放, 减少 878.96 g CO₂e m⁻² 的甲烷排放; 与之相反, 恢复退化的泥炭地每年可以减少 1281.67 g CO₂e m⁻² 的碳排放, 增加 987.71 g CO₂e m⁻² 的甲烷排放。(3) 2000—2020 年, 若尔盖高寒泥炭地共减少碳排放 190.86 Gg CO₂e a⁻¹, 预计到 2035 年有潜力抵消历史泥炭地退化增加的碳排放总量。研究结果有助于为若尔盖高寒泥炭地区采取自然气候解决方案提供科学支撑, 并对其他地区泥炭地生态修复固碳效益评估具有参数借鉴意义。

关键词: 若尔盖; 高寒泥炭地; 自然气候解决方案; 气候减缓潜力; 固碳能力

Assessment of the impact of ecological restoration on climate mitigation in the alpine peatland of Zoige

CHEN Jingsong¹, LIU Yanxu^{1,*}, LIU Tao², WANG Chenxu¹, 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: Evaluating the role of ecological restoration in alpine peatlands for climate mitigation is both theoretically and practically important. Understanding how these restored peatlands contribute to carbon sequestration amid climate change will help us identify and predict the characteristics of carbon source and sink. This insight will also inform more effective strategies for peatland restoration, which is crucial for optimizing their impact on climate regulation. Land management and climate change significantly affected the carbon sink function of Zoige alpine peatlands. Based on the climate mitigation potential accounting framework of Natural Climate Solutions, this study refined the climate mitigation potential coefficient of

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFF1309200)

收稿日期: 2024-09-26; **网络出版日期:** 2025-00-00

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

alpine peatlands through meta-analysis, systematically evaluated the contribution of historical restoration in Zoige alpine peatlands to climate change mitigation, and projected their future climate mitigation capacity through restoration. The results indicated that: (1) Peatland degradation was effectively curbed between 2000 and 2020, resulting in a net increase of 42.77 km² in the total peatland area by 2020. Between 2000 and 2005, the study area experienced severe peatland degradation, during which approximately 750 km² of peatland was drained and converted to grassland. Following 2005, this degradation was effectively arrested; the rate of grassland rewetting and reconversion to peatland increased to roughly three times that observed from 2000 to 2005, resulting in a significant net expansion of peatland area. (2) Degraded peatlands contributed to higher carbon emissions, at 1204.50 g CO₂e m⁻² a⁻¹, and lower methane emissions, at 878.96 g CO₂e m⁻² a⁻¹. In contrast, restored peatlands reduced carbon emissions by 1281.67 g CO₂e m⁻² a⁻¹ and increased methane emissions by 987.71 g CO₂e m⁻² a⁻¹. (3) Between 2000 and 2020, the region's net carbon balance comprised two distinct phases: a high-emission period from 2000 to 2005, followed by a net sequestration period from 2005 to 2020. Over the entire 2000—2020 interval, the Zoige alpine peatlands reduced carbon emissions by a total of 190.86 Gg CO₂e m⁻² a⁻¹. It is anticipated that by 2035, they will have the potential to offset the total increase in carbon emissions resulting from historical peatland degradation. The comprehensive analysis demonstrated that integrating multi-source spatial and temporal data reduced assessment bias and provided a robust quantitative basis for characterizing the long-term average greenhouse gas emission rates of Zoige's alpine peatlands. The results of the study provided scientific support for the adoption of natural climate solutions in the Zoige alpine peatlands and had parametric implications for assessing the carbon sequestration benefits of peatland ecological restoration in other regions.

Key Words: Zoige; alpine peatland; natural climate solutions; climate mitigation potential; carbon sequestration capacity

泥炭地是缓解气候变化的重要战略区域,在全球气候变化中发挥着重要作用。虽然泥炭地仅占地球陆地表面的3%,但却储存了约三分之一的土壤碳,总碳储量超过大气自然储存^[1]。然而,当前许多泥炭地面临着气候变暖、火灾、排水农业、种植园开发、放牧等多重压力,全球已有超过11%的泥炭地发生退化^[2-3]。其中,仅因土地利用变化发生退化的泥炭地便占据了约全球剩余泥炭地的10%,并且其退化引发的二氧化碳排放量占据了全球每年人为排放量的5—10%,增加了泥炭地逆转为净碳源的可能性^[4-5]。这些受干扰的泥炭地不仅直接造成碳储存的快速流失,使一些泥炭地逆转为碳源,甚至还影响其他关键的生态系统服务,例如水源涵养和生物多样性^[6-8]。尽管已有研究证明保护和再湿润泥炭地是遏制二氧化碳排放的具有成本效益的气候缓解措施,但恢复泥炭地也会增加甲烷排放,给地区碳源/汇特征界定带来不确定性^[9-10]。因此,基于本地化参数定量化评估泥炭地生态修复的固碳效益,对泥炭地可持续管理和应对气候变化具有重要意义。

自然气候解决方案(natural climate solutions, NCS)是一系列离散的、易于实施的土地管理方案,它包括保护、恢复和可持续管理生态系统在内的一套土地管理备选方案,可以促进陆地生态系统碳封存并减少温室气体排放^[11]。与其他新兴的碳捕集技术不同,NCS兼具经济与高效双重优势,拥有广泛的可扩展性和可部署性,并可以提供除减缓气候变化之外的其他共同效益,被认为是当下应对气候变化的最可行和最具成本效益的解决方案^[12]。当前已在全球和国家尺度证明其巨大的固碳效益^[13-15],但对于局地尺度 NCS 气候减缓潜力的研究略有欠缺,尤其是在不同类型泥炭地 NCS 的气候减缓潜力评估方面,无法精确指导地区生态系统管理及方案实施。例如,有研究预测了考虑生物物理约束条件下中国四大气候区泥炭地 NCS 活动的总气候减缓潜力^[14],但使用的评估参数仅适用于国家和区域尺度,难以指导具体的泥炭地生态修复工程。

土地利用变化引起的碳通量变化对全球碳收支的确定至关重要,同时也有助于评估土地管理从大气中去除碳的潜力^[16-17]。因此,要理解泥炭地生态系统碳汇潜力及其机制,并确定气候减缓措施的基线,就必须准确测量生态系统碳通量^[18]。当前陆地生态系统碳通量的观测方法主要有微气象法和箱法式两种,在泥炭地碳通量测量中分别以涡度相关法和静态箱-气相色谱法较为常见^[19-22]。然而,前者受地形限制且成本高昂,

后者测量范围有限且通常只能用于短期测量^[23],导致缺乏长期连续的碳通量监测数据。退化泥炭地恢复可以迅速减少碳损失甚至促进净碳积累,但无法迅速、甚至可能不会使退化场地恢复到所有生态系统服务的原始状态^[24]。通过荟萃分析整合不同样区、不同时间尺度的多源碳通量数据,可以克服传统采样因地域或时间限制导致的样本量不足问题,为以点推面提供更多基础支撑信息^[25-26]。其次,当前研究集中于局地单一退化或恢复泥炭地固碳效益的评估^[27-29],缺乏对区域整体的考量,未能将退化排碳和恢复固碳的复合效益考虑在内,无法准确反映地区整体的碳源汇功能变化趋势。另外,研究热点区域主要集中在北方平原泥炭地^[30]、温带非永久冻土泥炭地^[31]以及热带泥炭地^[32],对高寒泥炭地碳汇功能变化的探索略显不足。相较于其他泥炭地,高寒泥炭地生态环境极为脆弱,对全球气候变化更为敏感^[33],恢复难度也更大,因此,评估其在自然-人类活动复合作用下生态修复固碳潜力尤为必要。

若尔盖高原拥有世界上最大且现存保存最完整的高寒泥炭地,是重要的陆地生态系统碳库和碳汇^[34-35]。与世界各地的许多泥炭地一样,若尔盖高寒泥炭地在上世纪 50 年代以来持续遭受人为排水干扰^[36]。虽然上世纪末便已开启系列生态保护修复活动,但当前泥炭地恢复的固碳效益并未得到完全量化,退化泥炭地固碳能力恢复到何种水平仍然未知。因此,本研究基于 NCS 理论背景及研究缺口,拟完善高寒泥炭地 NCS 气候减缓潜力计算方法,评估 2000—2020 年历史泥炭地恢复的固碳效益,并尝试预测未来恢复高寒泥炭地的固碳能力,以期为地区进一步制定固碳政策措施促进“双碳”目标实现提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概括

本研究选取的黄河上游若尔盖高寒泥炭地位于青藏高原东部边缘,涵盖四川省阿坝藏族羌族自治州的若尔盖县、红原县、阿坝县和松潘县等地区,平均海拔超过 3500m,总面积约 1.72 万 km²(图 1)。地区属于高原寒带湿润季风气候,平均相对湿度保持在 65%左右,年均气温约为 0.7—1.1℃,年平均降水量约为 656 毫米^[37]。若尔盖泥炭地的生长季节短,通常为 5—9 月,泥炭发育极为缓慢,平均一年累积厚度不足 1mm^[38]。同时,若尔盖属典型断陷盆地,对气候变化敏感,构造运动较为强烈,并面临冻融侵蚀威胁^[34,39]。研究区特殊的地理位置、地质构造及气候特征,使得若尔盖高寒泥炭地极具脆弱性,一旦遭到破坏,将严重影响其碳库功能和生态系统服务。

1.2 数据来源

本研究使用的数据主要是 Qiu 等^[40]绘制的土地利用数据,空间分辨率为 30m,年份为 2000、2005、2010、2015、2020 年。该数据是基于 Landsat 5/7/8 数据集,采用随机森林和决策树样本迁移方法生成所得,平均整体精度超过 95%。同时,为预测未来若尔盖高寒泥炭地 NCS 的气候减缓潜力大小,本研究采用了《四川黄河上游若尔盖草原湿地山水林田湖草沙冰一体化保护和修复工程》规划目标:到 2024 年恢复泥炭地 6711.33hm²,以及《阿坝藏族羌族自治州国土空间生态修复规划(2021—2035 年)》相关规划目标:2021—2035 年恢复退化泥炭地 2.39 万 hm²。

2 研究方法

本研究基于 NCS 气候减缓潜力核算体系,采用土地利用转移矩阵提取若尔盖高寒泥炭地退化及恢复面

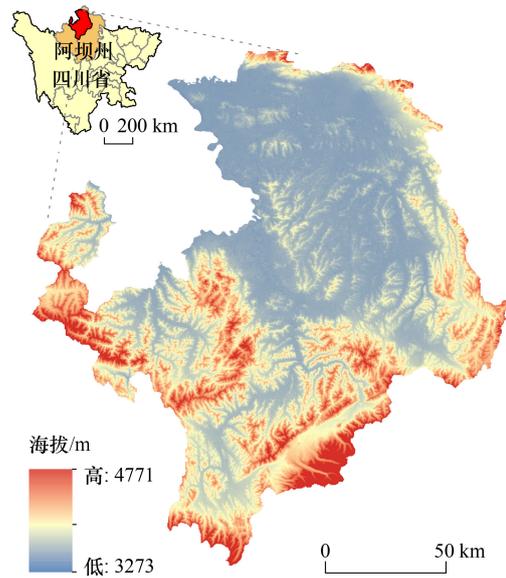


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

积,同时通过文献综合分析修正温室气体排放系数,最后通过整合退化泥炭地的碳排放量与恢复泥炭地的固碳增量确定研究区实际的固碳效益。

其中,由于若尔盖高寒泥炭地退化形式主要是泥炭地排干退变为草地,修复也主要针对排干泥炭地复湿,并且泥炭地与其他地类(例如建设用地开发)之间的转换对温室气体排放的影响尚不明确,因此,本研究只关注泥炭地与草地之间的转换,并未考虑向除此以外的其他土地利用类型的转换。同时,由于缺乏若尔盖高寒泥炭地退化/修复前后溶解有机碳(DOC)观测数据,因此只考虑了二氧化碳及甲烷排放的影响。

2.1 泥炭地退化与恢复面积确定

基于 Qiu 等^[40]绘制的 2000—2020 年 30m 分辨率若尔盖土地覆被图,使用土地利用转移矩阵提取研究区 2000—2020 年泥炭地退化及恢复的面积及位置。土地利用转移矩阵的计算公式如下:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, A_{ij} 表示第 i 种地类转化为第 j 种地类的面积; n 为土地利用类型数,包括水域、湿地、草地、林地、建设用地和裸地 6 个类型。由于缺乏中国泥炭地的历史面积数据,而研究区湿地绝大部分由泥炭地组成,因此本研究将 Qiu 等^[40]解译的湿地面积作为研究区的泥炭地总面积,但仅取湿地面积变化数据参与计算。

2.2 温室气体排放系数修正

为确定若尔盖高寒泥炭地退化后二氧化碳与甲烷排放的变化情况,本研究使用关键词:青藏高原/高寒/若尔盖(Tibetan Plateau * or Alpine * or Zoige *)、泥炭地/湿地/沼泽(peatland * or wetland * or fen * or marsh *)、甲烷/二氧化碳/温室气体(methane * or CH₄ * or carbon dioxide * or CO₂ * or greenhouse gas *)、排水/退化/变化/转换(drainage * or degradation * or degeneration * or change * or convert * or deterioration *),从 Web of Science(<https://www.webofscience.com>)和中国知网(<https://www.cnki.net>)系统检索了相关同行评议文献,共检索到 266 篇包括 1996 年至 2024 年期间发表的相关文章,经过标题、摘要初筛及全文浏览复筛,最终筛选出 10 篇有效文献^[41–50],具体的文献检索及筛选过程见图 2。最后,从纳入分析文献中的摘要、图表和结果部分提取出泥炭地退化前后二氧化碳及甲烷通量的平均值,并计算出退化前后两种温室气体通量的变化值。具体计算公式如下:

$$\text{FluxCO}_{2\text{dechange}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCO}_{2\text{degi}} - \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCO}_{2\text{nati}} \quad (2)$$

$$\text{FluxCH}_{4\text{dechange}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCH}_{4\text{degi}} - \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCH}_{4\text{nati}} \quad (3)$$

式中, n 为搜集到的相关文献数量; $\text{FluxCO}_{2\text{dechange}}$ 与 $\text{FluxCH}_{4\text{dechange}}$ 分别表示若尔盖高寒泥炭地退化后二氧化碳及甲烷通量的变化值; $\text{FluxCO}_{2\text{degi}}$ 与 $\text{FluxCH}_{4\text{degi}}$ 分别表示从文献中搜集到的退化泥炭地二氧化碳及甲烷通量; $\text{FluxCO}_{2\text{nati}}$ 与 $\text{FluxCH}_{4\text{nati}}$ 分别表示从文献中搜集到的自然泥炭地二氧化碳与甲烷通量。

相同的,为确定若尔盖高寒泥炭地恢复后二氧化碳与甲烷排放的变化情况,本研究使用关键词:青藏高原/高寒/若尔盖(Tibetan Plateau * or Alpine * or Zoige *)、泥炭地/湿地/沼泽(peatland * or wetland * or fen * or marsh *)、甲烷/二氧化碳/温室气体(methane * or CH₄ * or carbon dioxide * or CO₂ * or greenhouse gas *)、水文/复湿/恢复/修复(hydrological * or rewet * or restoration * or rehabilitation * or revegetation * or recovery * or reconstruction * or reclamation * or restored * or restoring * or recovering *),从 Web of Science(<https://www.webofscience.com>)和中国知网(<https://www.cnki.net>)系统检索了相关同行评议文献,共检索到 175 篇包括 1995 年至 2024 年期间发表的相关文章,经过标题、摘要初筛及全文浏览复筛,最终筛选出 15 篇有效文献^[44,46,51–63],具体的文献检索及筛选过程见图 3。最后,从纳入分析文献中的摘要、图表和结果部分提取出泥

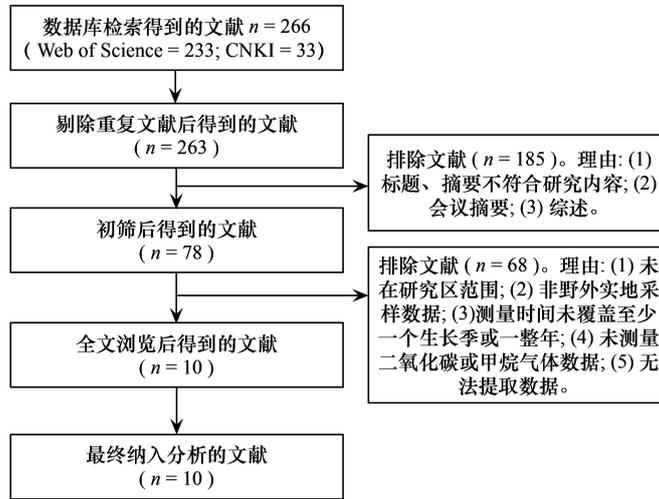


图 2 退化泥炭地文献筛选过程

Fig.2 Literature screening process for degraded peatland

炭地恢复前后二氧化碳及甲烷通量的平均值,并计算出恢复前后两种温室气体通量的变化值。具体计算公式如下:

$$\text{FluxCO}_{2\text{reschange}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCO}_{2\text{resi}} - \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCO}_{2\text{degi}} \quad (4)$$

$$\text{FluxCH}_{4\text{reschange}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCH}_{4\text{resi}} - \frac{1}{n} \sum_i^n \text{FluxCH}_{4\text{degi}} \quad (5)$$

式中, $\text{FluxCO}_{2\text{reschange}}$ 与 $\text{FluxCH}_{4\text{reschange}}$ 分别表示若尔盖高寒泥炭地恢复后二氧化碳及甲烷通量的变化值; $\text{FluxCO}_{2\text{resi}}$ 与 $\text{FluxCH}_{4\text{resi}}$ 分别表示从文献中搜集到的恢复泥炭地二氧化碳及甲烷通量。

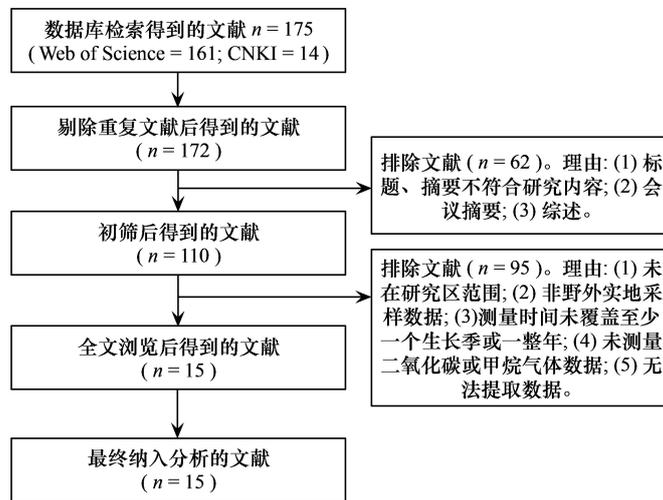


图 3 恢复泥炭地文献筛选过程

Fig.3 Literature screening process for restored peatland

2.3 泥炭地固碳效益计算

若尔盖高寒泥炭地历史实际固碳效益为恢复泥炭地固碳增量与退化泥炭地排碳增量的总合,未来的固碳潜力则依据规划文件设定的潜在恢复面积进行预测。其中,泥炭地恢复的气候减缓效益采用 NCS 恢复路径

核算体系,即将温室气体年度通量与 NCS 实施的土地面积相乘得出 NCS 恢复路径的气候减缓潜力。为更好度量不同温室气体对气候变化的相对影响,本研究将所有温室气体均转换成二氧化碳当量(CO₂e),同时仅将土地覆被恢复为历史状态的活动考虑在内,剔除了不太可能恢复的地点(例如开阔水域、冰盖区和城市用地等)。另外,泥炭地退化的碳排放增量也采用通量与规模相乘的形式计算,并且温室气体通量与 NCS 活动规模的处理方式与恢复路径保持一致。具体计算方式如下:

$$TCE = PCE + PCS \quad (6)$$

$$PCE = (\text{FluxCO}_{2\text{degchange}} + 34 \times \text{FluxCH}_{4\text{degchange}}) \times A_{\text{deg}} \quad (7)$$

$$PCS = (\text{FluxCO}_{2\text{reschange}} + 34 \times \text{FluxCH}_{4\text{reschange}}) \times A_{\text{res}} \quad (8)$$

式中,TCE 表示研究区实际碳排放量,负值代表碳汇,正值代表碳源;PCE 表示研究区退化泥炭地排碳增量;PCS 表示恢复泥炭地固碳增量; A_{deg} 与 A_{res} 分别表示泥炭地退化与恢复面积,数据来源于公式(1),未来阶段只考虑规划恢复面积数据,无退化面积数据;同时,采用百年尺度甲烷全球增温潜势值(GWP = 34)将温室气体通量单位统一为二氧化碳当量(CO₂e)^[64]。

3 结果分析

3.1 2000—2020 年高寒泥炭地退化与恢复

2000—2020 年若尔盖高原土地利用转移情况如图 4 所示。总体来看,若尔盖高原约 70% 的区域被草地覆盖,但覆盖率呈下降趋势;25% 的区域被泥炭地覆盖,且占比逐渐增大,反映地区泥炭地复湿恢复的显著效果。分阶段来看,2000—2005 年,研究区泥炭地呈严重退化状态,这一时期约有 750km² 的地区被排干流转为草地,占比超过泥炭地总面积的 15%。2005 年以后,若尔盖高寒泥炭地退化趋势得到有效遏制,转出率下降了约 64%;草地复湿为泥炭地的速率较 2000—2005 年阶段也提高了三倍左右,复湿面积超过同期草地总转出面积的 60%。值得注意的是,2005—2020 年阶段,地区泥炭地恢复速率超过了其退化速率,泥炭地面积呈显著净增长趋势。截至 2020 年,泥炭地恢复面积已超过历史退化面积,泥炭地恢复取得积极成效。

3.2 温室气体排放系数修正

若尔盖高寒泥炭地退化会显著提高地区碳排放能力,平均每年新增二氧化碳排放当量 325.54 g m⁻²;恢复退化的泥炭地虽然会降低地区碳排放水平,但每年减缓的碳排放当量低于泥炭地损失所增加的碳排放当量,仅为 293.96 g CO₂e m⁻² a⁻¹(表 1)。从不同温室气体类型来看,与自然泥炭地相比,退化泥炭地将显著增强地区二氧化碳排放强度,平均每年增加二氧化碳排放 1204.50 g m⁻²,但同时也会降低甲烷排放,从每年 1010.29 g CO₂e m⁻² 下降至每年 131.33 g CO₂e m⁻²。与退化泥炭地相比,恢复泥炭地每年可以减少二氧化碳排放 1281.67 g CO₂e m⁻²,但同时也会增加甲烷排放,并且恢复后的泥炭地甲烷排放水平超过了自然泥炭地,高至 1119.04 g CO₂e m⁻² a⁻¹。

表 1 若尔盖高寒泥炭地温室气体通量变化情况/(g CO₂e m⁻² a⁻¹)

Table 1 Changes in greenhouse gas fluxes in Zoige alpine peatland

类型 Type	自然 Natural	退化 Degraded	恢复 Restored	退化变化 Change in degradation	恢复变化 Change in restoration
二氧化碳 Carbon dioxide	1209.39	2413.89	1132.22	1204.50	-1281.67
甲烷 Methane	1010.29	131.33	1119.04	-878.96	987.71

3.3 2000—2035 年泥炭地恢复的气候减缓潜力

2000—2020 年若尔盖高寒泥炭地碳排放呈现出先减后增再减的波状特征,整体碳排放增加超过 708.58 Gg CO₂e a⁻¹;而地区固碳潜力表现为先增后减的型特征,共增加了 650.24 Gg CO₂e a⁻¹ 的固碳量(图 5)。同时,2000—2020 年期间,地区整体净碳排放可以分为两个阶段,包括 2000—2005 年的高碳排放阶段以及 2005—2020 年的碳固存阶段。值得注意的是,2000—2020 年,若尔盖高寒泥炭地恢复并不能完全抵消 2000

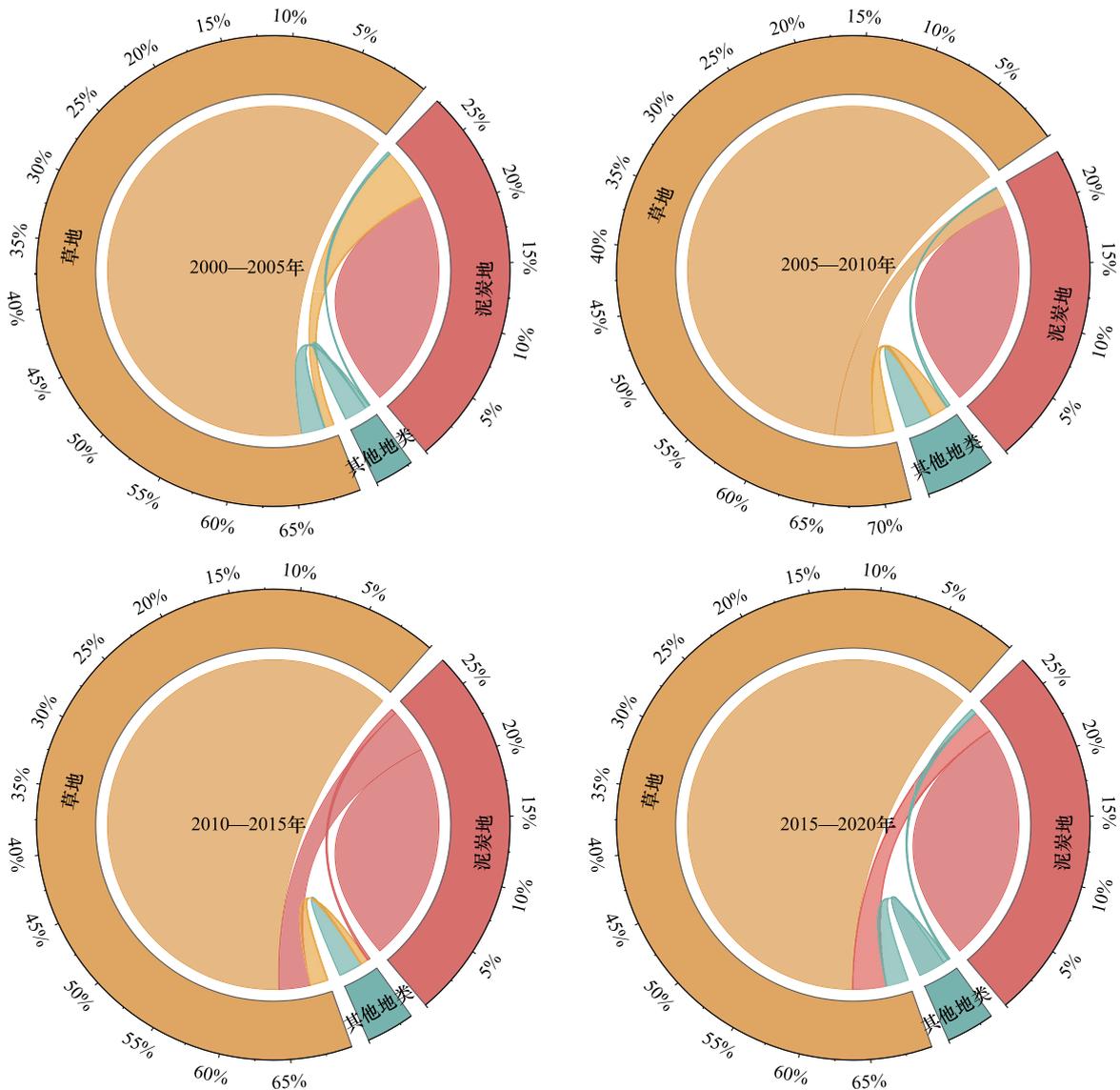


图 4 2000—2020 年若尔盖高寒泥炭地土地利用变化

Fig.4 Land use changes in Zoige alpine peatland from 2000 to 2020

年以来由于泥炭地退化增加的碳排放量,整体仍然呈现碳源特征(图 6)。并且,即使基于《四川黄河上游若尔盖草原湿地山水林田湖草沙冰一体化保护和修复工程》规划目标,预计到 2024 年若尔盖山水工程结束也仅能将地区碳排放强度降低至 2005 年左右水平。但根据《阿坝藏族羌族自治州国土空间生态修复规划(2021—2035 年)》内容,预测未来 2021—2035 年继续恢复若尔盖高寒泥炭地会增加 $70.26 \text{ Gg CO}_2\text{e a}^{-1}$ 的固碳量,完全抵消历史退化泥炭地增加的碳排放,并可以额外增加 $11.91 \text{ Gg CO}_2\text{e a}^{-1}$ 的固碳量。

4 讨论

4.1 泥炭地恢复的气候减缓潜力

本研究采用荟萃分析对若尔盖高寒泥炭地温室气体通量进行系统评估,通过整合多源野外观测数据提升样本容量,降低单一研究的时空局限性。该方法在生态系统过程研究中具有重要实践价值,尤其在解析生态系统对大气 CO_2 浓度升高与气候变暖的响应机制,以及评估土地利用变化的气候反馈效应等方面^[65—67]。分析发现,不同研究间若尔盖高寒泥炭地温室气体通量估值存在一定差异。以天然泥炭地为例,本研究测算的

碳通量均值为 $1209.39 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 接近 Cao 等^[45] 的观测值 $1116 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 但低于 Zhang 等^[56] 报道的 $1661.65 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 甲烷通量均值为 $1010.29 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 较 Zhang 等^[52] 和 Chen 等^[62] 的测量结果分别呈现 24.3% 的增幅和 25.3% 的降幅。这种差异主要源于采样时间(季节变异)和空间异质性(微地形)对通量观测的影响。综合分析表明, 荟萃分析通过多源数据整合, 可在一定程度上缓解时空异质性导致的评估偏差, 为揭示若尔盖高寒泥炭地温室气体排放的长期平均特征提供更为可靠的量化依据。

本研究表明, 2000—2020 年若尔盖高寒泥炭地恢复可提供约 $650.24 \text{ Gg CO}_2\text{e a}^{-1}$ 的气候减缓, 预计到 2035 年可额外增加约 $70.26 \text{ Gg CO}_2\text{e a}^{-1}$ 的气候减缓潜力, 这一结果低于 Lu 等^[14] 核算的到 2030 年中国青藏高原泥炭地恢复每年可提供约 $4 \text{ Tg CO}_2\text{e}$ 的最大气候减缓潜力。这是因为该研究在预测未来泥炭地恢复的气候减缓潜力时将历史泥炭地退化总面积设定为未来泥炭地恢复的总潜在机会, 并假设每年以均匀速度恢复(每年恢复 3470 公顷的高寒泥炭地)。但实际上, 泥炭地恢复受自然本底条件、人类活动强度与投资基金等限制^[68–69], 并不一定能一直维持一定的恢复速率。本研究在预测未来若尔盖高寒泥炭地恢复 NCS 潜在机会时采用的是地方政策规划数据(估计 2020 至 2035 年存在 2.39 万公顷的潜在机会), 该数据是以国家发展战略为导向, 整合省级行政规划目标, 统筹区域生态保护需求与社会经济发展综合研判形成, 更贴合 NCS 活动的实际实施, 能更准确表征泥炭地恢复 NCS 的气候减缓潜力。

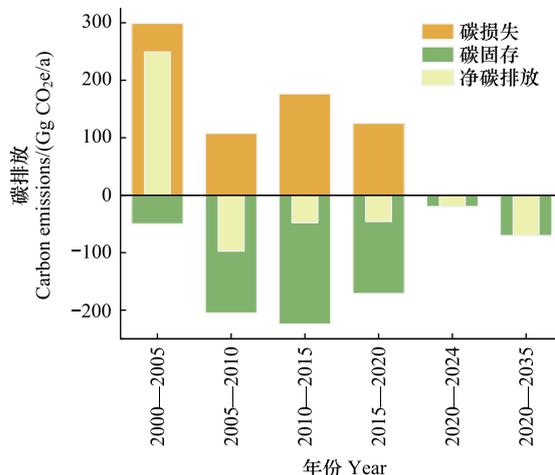


图 5 2000—2035 年若尔盖高寒泥炭地碳排放变化

Fig.5 Changes in carbon emissions from Zoige alpine peatlands from 2000 to 2035

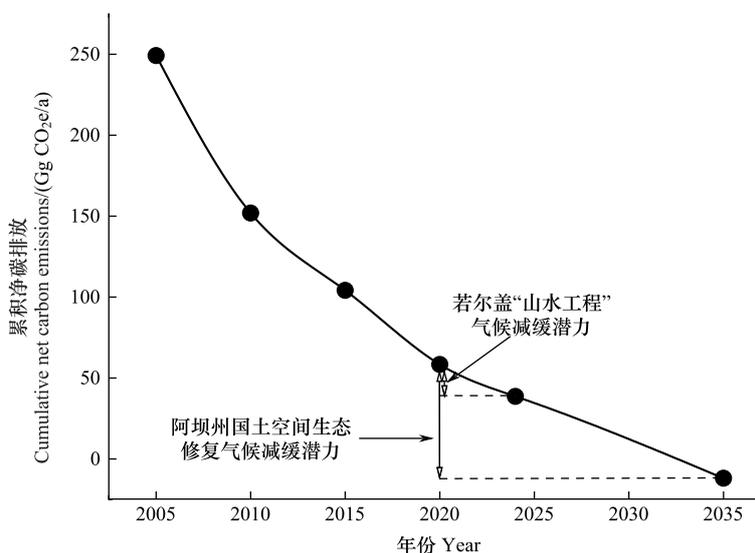


图 6 若尔盖高寒泥炭地相对于 2000 年的累积碳排放变化

Fig.6 Changes in cumulative carbon emissions in Zoige alpine peatlands relative to 2000

与其他气候区泥炭地恢复研究相比, 高寒泥炭地 NCS 恢复活动所能提供的气候减缓潜力明显低于热带和温带等地区。例如, Novita 等^[70] 分析发现, 在热带泥炭地区印度尼西亚持续开展退化泥炭地 NCS 恢复活动, 预计到 2030 年可以提供约 $171.60 \text{ Tg CO}_2\text{e a}^{-1}$ 的气候减缓潜力, 期间每年可恢复退化泥炭地约 2285.

71 km²;而在加拿大,考虑了该国 NCS 实施的可行性以及复杂的生物物理限制后,估计每年仅存在 3400 hm² 的恢复机会,但预计 2020—2030 年间,北方和温带泥炭地恢复 NCS 活动也能提供约 0.20 Tg CO₂e a⁻¹ 的减缓潜力^[12]。这是因为高寒泥炭地区较低的温度会限制微生物活动,从而限制土壤呼吸,而温带地区高光照水平及气温升高会诱导光合活性的快速发生^[71],并且上述两个地区泥炭地恢复的潜在机会也都远高于若尔盖高寒泥炭地,这进一步增加了地区间的固碳差异。

另外,与既有研究不同的是,本研究还考虑了若尔盖高寒泥炭地排水退化造成的碳排放增量。结果表明,2000—2020 年若尔盖高寒泥炭地恢复提供的气候减缓并不足以抵消由于泥炭地退化增加的碳排放,但如果未来继续实施泥炭地恢复 NCS 活动,并加强保护泥炭地避免其退化,那么若尔盖高寒泥炭地将具有更大的固碳效益。

4.2 泥炭地恢复的协同效益与可持续管理

泥炭地人工排水可能会增加下游地表水和地下水富营养化的风险,并且排水后转换泥炭地用途还会影响水文稳定性,减少动植物和微生物多样性^[24,72]。重新湿润排干的泥炭地则可能促进新的泥炭堆积,改善土壤性质^[73],并且恢复的时间越长,有机物累积越多。同时,恢复泥炭地有利于恢复自然植被,改善水质与季节供水^[74—75],并恢复其水文缓冲功能^[36]。此外,泥炭地恢复还可以降低泥炭地火灾发生的风险,进而减小火灾对气候、环境、经济和人类健康的影响^[76]。然而,泥炭地恢复的周期却十分缓慢,生物多样性和土壤过程的恢复可能需要数十年或更长时间,部分关键的物理和化学特性甚至可能需要几十年到几个世纪才能达到自然状态^[77]。因此,迫切需要制定泥炭地保护与恢复的优先行动计划,推动泥炭地可持续管理作为一种基于自然的气候解决方案来部署,以提高泥炭地气候变化适应能力,减缓温室气体排放增加与气候变暖之间的正反馈,进一步增进泥炭地地区居民的民生福祉。

4.3 不足与展望

由于既有研究对若尔盖高寒泥炭地退化与恢复前后生长季与非生长季温室气体排放变化差异的研究不足,且非生长季温室气体通量远低于生长季,因此本研究在测算气候减缓效益时仅考虑了生长季阶段(即 5—9 月),这在一定程度上可能造成结果的低估。另外,当前缺乏高精度泥炭地区土地利用模拟数据,所以并未将 NCS 泥炭地保护路径的气候减缓潜力纳入考量,也就是说,未来若尔盖高寒泥炭地的气候减缓潜力可能被低估了。因此,未来应提高泥炭地区土地利用模拟精度,并在保证泥炭地正常结构功能的条件下加强地区温室气体通量的连续观测,以获得更长时间序列区域地表通量空间变化数据集,助力地区提高碳源/汇监测精度,准确识别碳汇功能改善的潜在位置。

5 结论

本研究选取若尔盖高寒泥炭地为研究对象,基于荟萃分析完善高寒泥炭地气候减缓潜力核算体系,系统评估地区历史生态修复活动对气候减缓的影响,并尝试预测该地区未来气候减缓潜力。主要结论如下:

(1) 2000—2020 年间,若尔盖高寒泥炭地面积呈先下降后上升趋势,总面积增长了 42.77 km²。其中,2005 年以前泥炭地退化速率高于恢复速率,整体呈现严重退化状态;2005 年以后恢复效果逐渐改善,泥炭地面积呈净增长趋势。

(2) 与自然泥炭地相比,泥炭地退化会使地区二氧化碳排放强度提高两倍左右,但同时也会使甲烷排放强度降低至原来的十分之一;恢复退化的泥炭地则会使二氧化碳排放强度与甲烷排放强度基本恢复至自然泥炭地状态。

(3) 截至 2020 年,若尔盖高寒泥炭地生态修复活动可以将泥炭地面积恢复至 2000 年退化前水平,但无法抵消历史泥炭地退化增加的碳排放。预计到 2024 年若尔盖“山水工程”项目竣工也仅能将地区碳排放强度降低至 2005 年左右水平,直到 2035 年阿坝藏族羌族自治州国土空间生态修复项目结束,有潜力完全抵消历史退化泥炭地增加的碳排放。

参考文献 (References):

- [1] Dargie G C, Lewis S L, Lawson I T, Mitchard E T A, Page S E, Bocko Y E, Ifo S A. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 2017, 542(7639): 86-90.
- [2] Wang H J, Richardson C J, Ho M. Dual controls on carbon loss during drought in peatlands. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 584-587.
- [3] Turetsky M R, Benscoter B, Page S, Rein G, van der Werf G R, Watts A. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 2014, 8(1): 11-14.
- [4] Nugent K A, Strachan I B, Roulet N T, Strack M, Frolking S, Helbig M. Prompt active restoration of peatlands substantially reduces climate impact. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12): 124030.
- [5] Swindles G T, Morris P J, Mullan D J, Payne R J, Roland T P, Amesbury M J, Lamentowicz M, Turner T E, Gallego-Sala A, Sim T, Barr I D, Blaauw M, Blundell A, Chambers F M, Charman D J, Feurdean A, Galloway J M, Gałka M, Green S M, Kajukalo K, Karofeld E, Korhola A, Lamentowicz Ł, Langdon P, Marcisz K, Mauquoy D, Mazei Y A, McKeown M M, Mitchell E A D, Novenko E, Plunkett G, Roe H M, Schoning K, Sillasoo Ü, Tsyganov A N, van der Linden M, Väliranta M, Warner B. Widespread drying of European peatlands in recent centuries. *Nature Geoscience*, 2019, 12(11): 922-928.
- [6] Leifeld J, Wüst-Galley C, Page S. Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 945-947.
- [7] Turetsky M R, Abbott B W, Jones M C, Anthony K W, Olefeldt D, Schuur E A G, Grosse G, Kuhry P, Hugelius G, Koven C, Lawrence D M, Gibson C, Sannel A B K, McGuire A D. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 2020, 13(2): 138-143.
- [8] Miettinen J, Shi C H, Liew S C. Land cover distribution in the peatlands of Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with changes since 1990. *Global Ecology and Conservation*, 2016, 6: 67-78.
- [9] Leifeld J, Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications*, 2018, 9: 1071.
- [10] Günther A, Barthelmes A, Huth V, Joosten H, Jurasinski G, Koebisch F, Couwenberg J. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nature Communications*, 2020, 11: 1644.
- [11] 傅伯杰, 吕楠, 吕一河. 中国基于自然的气候解决方案. *前沿科学*, 2023, 17(1): 82-85.
- [12] Drever C R, Cook-Patton S C, Akhter F, Badiou P H, Chmura G L, Davidson S J, Desjardins R L, Dyk A, Fargione J E, Fellows M, Filewod B, Hessing-Lewis M, Jayasundara S, Keeton W S, Kroeger T, Lark T J, Le E, Leavitt S M, LeClerc M E, Lemprière T C, Metsaranta J, McConkey B, Neilson E, St-Laurent G P, Puric-Mladenovic D, Rodrigue S, Soolanayakanahally R Y, Spawn S A, Strack M, Smyth C, Thevathasan N, Voicu M, Williams C A, Woodbury P B, Worth D E, Xu Z, Yeo S, Kurz W A. Natural climate solutions for Canada. *Science Advances*, 2021, 7(23): eabd6034.
- [13] Griscom B W, Adams J, Ellis P W, Houghton R A, Lomax G, Miteva D A, Schlesinger W H, Shoch D, Siikamäki J V, Smith P, Woodbury P, Zganjar C, Blackman A, Campari J, Conant R T, Delgado C, Elias P, Gopalakrishna T, Hamsik M R, Herrero M, Kiesecker J, Landis E, Laestadius L, Leavitt S M, Minnemeyer S, Polasky S, Potapov P, Putz F E, Sanderman J, Silvius M, Wollenberg E, Fargione J. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(44): 11645-11650.
- [14] Lu N, Tian H Q, Fu B J, Yu H Q, Piao S L, Chen S Y, Li Y, Li X Y, Wang M Y, Li Z D, Zhang L, Ciais P, Smith P. Biophysical and economic constraints on China's natural climate solutions. *Nature Climate Change*, 2022, 12(9): 847-853.
- [15] Fargione J E, Bassett S, Boucher T, Bridgman S D, Conant R T, Cook-Patton S C, Ellis P W, Falcucci A, Fourqurean J W, Gopalakrishna T, Gu H, Henderson B, Hurteau M D, Kroeger K D, Kroeger T, Lark T J, Leavitt S M, Lomax G, McDonald R I, Megonigal J P, Miteva D A, Richardson C J, Sanderman J, Shoch D, Spawn S A, Veldman J W, Williams C A, Woodbury P B, Zganjar C, Baranski M, Elias P, Houghton R A, Landis E, McGlynn E, Schlesinger W H, Siikamäki J V, Sutton-Grier A E, Griscom B W. Natural climate solutions for the United States. *Science Advances*, 2018, 4(11): eaat1869.
- [16] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Bakker D C E, Hauck J, Landschützer P, C L Q, Luijckx I T, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Schwingshackl C, Sitch S, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S R, Anthoni P, Barbero L, Bates N R, Becker M, Bellouin N, Decharme B, Bopp L, Brasika I B M, Cadule P, Chamberlain M A, Chandra N, Chau T, Chevallier F, Chini L P, Cronin M, Dou X, Enyo K, Evans W, Falk S, Feely R A, Feng L, Ford D J, Gasser T, Ghattas J, Gkritzalis T, Grassi G, Gregor L, Gruber N, Gürses Ö, Harris I, Hefner M, Heinke J, Houghton R A, Hurtt G C, Iida Y, Ilyina T, Jacobson A R, Jain A, Jarníková T, Jersild A, Jiang F, Jin Z, Joos F, Kato E, Keeling R F, Kennedy D, Goldewijk K K, Knauer J, Korsbakken J I, Körtzinger A, Lan X, Lefèvre N, Li H, Liu J, Liu Z, Ma L, Marland G, Mayot N, McGuire P C, McKinley G A, Meyer G, Morgan E J, Munro D R, Nakaoka S, Niwa Y, O'Brien K M, Olsen A, Omar A M, Ono

- T, Paulsen M, Pierrot D, Pocock K, Poulter B, Powis C M, Rehder G, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Rosan T M, Schwinger J, Séférian R, Smallman T L, Smith S M, Sospedra-Alfonso R, Sun Q, Sutton A J, Sweeney C, Takao S, Tans P P, Tian H, Tilbrook B, Tsujino H, Francesco Tubiello F, Werf G R, Ooijen E, Wanninkhof R, Watanabe M, Wimart-Rousseau C, Yang D, Yang X, Yuan W, Yue X, Zaehle S, Zeng J, Zheng B. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 2023, 15(12): 5301-5369.
- [17] Houghton R A, Nassikas A A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850—2015. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(3): 456-472.
- [18] Wang T, Zhang Y, Yue C, Wang Y L, Wang X Y, Lyu G T, Wei J J, Yang H, Piao S L. Progress and challenges in remotely sensed terrestrial carbon fluxes. *Geo-spatial Information Science*, 2025, 28(1): 1-21.
- [19] Miao Y Q, Song C C, Wang X W, Meng H N, Sun L, Wang J Y. Annual carbon gas emissions from a boreal peatland in continuous permafrost zone, Northeast China. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2016, 44(5): 456-463.
- [20] Cheuk Hei Marcus Tong, Noumonvi K D, Ratcliffe J, Laudon H, Järveoja J, Drott A, Nilsson M B, Peichl M. A drained nutrient-poor peatland forest in boreal Sweden constitutes a net carbon sink after integrating terrestrial and aquatic fluxes. *Global Change Biology*, 2024, 30(3): e17246.
- [21] Liu Z W, Ge J W, Yang S Y, Li X, Xiong J, Zheng A X. Carbon dioxide and methane fluxes in the growing and non-growing season in the Dajiuhe subtropical peatland: a five-year measurement using the eddy covariance technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 355: 110135.
- [22] Zhang J, Chen H, Wang M, Liu X W, Peng C H, Wang L, Yu D X, Zhu Q A. An optimized water table depth detected for mitigating global warming potential of greenhouse gas emissions in wetland of Qinghai-Tibetan Plateau. *iScience*, 2024, 27(2): 108856.
- [23] 邹建文, 黄耀, 郑循华, 王跃思, 陈玉泉. 基于静态暗箱法的陆地生态系统-大气 CO₂ 净交换估算. *科学通报*, 2004, 49(3): 258-264.
- [24] Loisel J, Gallego-Sala A. Ecological resilience of restored peatlands to climate change. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3: 208.
- [25] Bender D J, Contreras T A, Fahrig L. Habitat loss and population decline: a meta-analysis of the patch size effect. *Ecology*, 1998, 79(2): 517-533.
- [26] Vander Werf E. Lack's clutch size hypothesis: an examination of the evidence using meta-analysis. *Ecology*, 1992, 73(5): 1699-1705.
- [27] Wille E A, Lenhart C F, Kolka R K. Carbon dioxide emissions in relation to water table in a restored Fen. *Agricultural & Environmental Letters*, 2023, 8(2): e20112.
- [28] Mander Ü, Espenberg M, Melling L, Kull A. Peatland restoration pathways to mitigate greenhouse gas emissions and retain peat carbon. *Biogeochemistry*, 2024, 167(4): 523-543.
- [29] Laine A M, Ojanen P, Lindroos T, Koponen K, Maanavilja L, Lampela M, Turunen J, Minkkinen K, Tolvanen A. Climate change mitigation potential of restoration of boreal peatlands drained for forestry can be adjusted by site selection and restoration measures. *Restoration Ecology*, 2024, 32(7): e14213.
- [30] Strack M, Keith A M, Xu B. Growing season carbon dioxide and methane exchange at a restored peatland on the Western Boreal Plain. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 231-239.
- [31] Wilkinson S L, Andersen R, Moore P A, Davidson S J, Granath G, Waddington J M. Wildfire and degradation accelerate northern peatland carbon release. *Nature Climate Change*, 2023, 13(5): 456-461.
- [32] Deshmukh C S, Julius D, Desai A R, Asyhari A, Page S E, Nardi N, Susanto A P, Nurholis N, Hendrizal M, Kurnianto S, Suardiwerianto Y, Salam Y W, Agus F, Astiani D, Sabiham S, Gauci V, Evans C D. Conservation slows down emission increase from a tropical peatland in Indonesia. *Nature Geoscience*, 2021, 14(7): 484-490.
- [33] 何奕忻, 吴宁, 朱求安, 陈槐, 朱单, 彭长辉, 杨刚, 高永恒, 赵川. 青藏高原东北部 5000 年来气候变化与若尔盖湿地历史生态学研究进展. *生态学报*, 2014, 34(7): 1615-1625.
- [34] 朱耀军, 马牧源, 赵娜娜. 若尔盖高寒泥炭地修复技术进展与展望. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 4185-4192.
- [35] Gaffney P P J, Tang Q H, Li Q W, Zhang R Y, Pan J X, Xu X M, Li Y, Niu S L. The impacts of land-use and climate change on the Zoige peatland carbon cycle: a review. *WIREs Climate Change*, 2024, 15(1): e862.
- [36] Tan Y C, Wang Y F, Chen Z, Yang M Y, Ning Y, Zheng C Y, Du Z L, Bol R, Wu D. Long-term artificial drainage altered the product stoichiometry of denitrification in alpine peatland soil of Qinghai-Tibet Plateau. *Geoderma*, 2022, 428: 116206.
- [37] 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.
- [38] 刘利娟, 刘欣蔚, 鞠佩君, 朱单, 薛丹, 刘建亮, 何奕忻, 陈槐. 15000 年以来若尔盖高原泥炭地发育及其碳动态. *生态学报*, 2018, 38(18): 6493-6501.
- [39] 李建军, 张军龙, 郭玉涛. 晚更新世以来若尔盖盆地的地层划分及构造-气候意义. *地震地质*, 2016, 38(4): 950-963.
- [40] 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.

- [41] Zhang H, Yao Z S, Ma L, Zheng X H, Wang R, Wang K, Liu C Y, Zhang W, Zhu B, Tang X Y, Hu Z H, Han S H. Annual methane emissions from degraded alpine wetlands in the eastern Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment*, 2019, 657: 1323-1333.
- [42] Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, Li W, Kang X M. Carbon emission flux and storage in the degraded peatlands of the Zoige alpine area in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Use and Management*, 2021, 37(1): 72-82.
- [43] Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, Li W. Methane emissions from natural and drained peatlands in the Zoigê, eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(3): 539-547.
- [44] Cui L J, Kang X M, Li W, Hao Y B, Zhang Y, Wang J Z, Yan L, Zhang X D, Zhang M Y, Zhou J, Kardol P. Rewetting decreases carbon emissions from the zoige alpine peatland on the Tibetan Plateau. *Sustainability*, 2017, 9(6): 948.
- [45] Cao R, Chen Y, Wu X, Zhou Q, Sun S. The effect of drainage on CO₂, CH₄ and N₂O emissions in the Zoige peatland; a 40-month in situ study. *Mires and Peat*, 2018(21): 1-15.
- [46] Luan J W, Liu S R, Wu J H, Wang M, Yu Z. The transient shift of driving environmental factors of carbon dioxide and methane fluxes in Tibetan peatlands before and after hydrological restoration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250: 138-146.
- [47] Yang G, Tian J Q, Chen H, Jiang L, Zhan W, Hu J, Zhu E X, Peng C H, Zhu Q A, Zhu D, He Y X, Li M X, Dong F Q. Peatland degradation reduces methanogens and methane emissions from surface to deep soils. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105488.
- [48] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 李伟, 康晓明. 排水对若尔盖高寒沼泽 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 3040-3047.
- [49] 周文昌. 人类活动对若尔盖高原泥炭地碳通量和碳储量的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [50] 李丽. 若尔盖自然湿地 CH₄ 排放及不同利用方式下温室气体通量估算[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [51] Liu X W, Zhu D, Zhan W, Chen H, Zhu Q A, Zhang J, Wu N, He Y X. Dominant influence of non-thawing periods on annual CO₂ emissions from Zoige peatlands: Five-year eddy covariance analysis. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107913.
- [52] Zhang W T, Kang X M, Kang E Z, Audet J, Davidson T A, Zhang X D, Yan L, Li Y, Yan Z Q, Zhang K R, Wang J Z, Hu Z Y. Soil water content, carbon, and nitrogen determine the abundances of methanogens, methanotrophs, and methane emission in the Zoige alpine wetland. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(2): 470-481.
- [53] Ding W X, Cai Z C, Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(5): 751-759.
- [54] Peng H J, Chi J S, Yao H, Guo Q, Hong B, Ding H W, Zhu Y X, Wang J, Hong Y T. Methane emissions offset net carbon dioxide uptake from an alpine peatland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(19): e2021JD034671.
- [55] Yang G, Chen H, Wu N, Tian J Q, Peng C H, Zhu Q A, Zhu D, He Y X, Zheng Q Y, Zhang C B. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH₄ emissions from the Zoige peatland in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 83-89.
- [56] Zhang W T, Wang J Z, Hu Z Y, Li Y, Yan Z Q, Zhang X D, Wu H D, Yan L, Zhang K R, Kang X M. The primary drivers of greenhouse gas emissions along the water table gradient in the zoige alpine peatland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231(5): 224.
- [57] Chen H, Wu N, Yao S P, Gao Y H, Wang Y F, Tian J Q, Yuan X Z. Diurnal variation of methane emissions from an alpine wetland on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 164(1): 21-28.
- [58] 王德宣. 若尔盖高原泥炭沼泽二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放通量研究. *湿地科学*, 2010, 8(3): 220-224.
- [59] Zhu D, Chen H, Zhu Q A, Wu Y, Wu N. High carbon dioxide evasion from an alpine peatland lake: the central role of terrestrial dissolved organic carbon input. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(5): 2563-2569.
- [60] Chen H, Wu N, Wang Y F, Gao Y H, Peng C H. Methane fluxes from alpine wetlands of zoige plateau in relation to water regime and vegetation under two scales. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 217(1): 173-183.
- [61] Peng H J, Guo Q, Ding H W, Hong B, Zhu Y X, Hong Y T, Cai C, Wang Y, Yuan L G. Multi-scale temporal variation in methane emission from an alpine peatland on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau and associated environmental controls. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276: 107616.
- [62] Chen H, Wu N, Gao Y H, Wang Y F, Luo P, Tian J Q. Spatial variations on methane emissions from Zoige alpine wetlands of Southwest China. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(3): 1097-1104.
- [63] Chen H, Yao S P, Wu N, Wang Y F, Luo P, Tian J Q, Gao Y H, Sun G. Determinants influencing seasonal variations of methane emissions from alpine wetlands in Zoige Plateau and their implications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D12): 2006JD008072.
- [64] Zou J Y, Ziegler A D, Chen D L, McNicol G, Ciais P, Jiang X, Zheng C M, Wu J, Wu J, Lin Z Y, He X Y, Brown L E, Holden J, Zhang Z T, Ramchunder S J, Chen A P, Zeng Z Z. Rewetting global wetlands effectively reduces major greenhouse gas emissions. *Nature Geoscience*, 2022, 15(8): 627-632.
- [65] Wu D H, Du E Z, Eisenhauer N, Mathieu J, Chu C J. Global engineering effects of soil invertebrates on ecosystem functions. *Nature*, 2025, 640(8057): 120-129.

- [66] He T H, Ding W X, Cheng X L, Cai Y J, Zhang Y L, Xia H J, Wang X, Zhang J H, Zhang K R, Zhang Q F. Meta-analysis shows the impacts of ecological restoration on greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 2024, 15: 2668.
- [67] Pan J C, Chen S T, He D J, Zhou H, Ning K, Ma N, Li K Y, Liao D X, Mi W H, Wu Q C, Zhang C Z, Dong Z. Agroforestry increases soil carbon sequestration, especially in arid areas; a global meta-analysis. *Catena*, 2025, 249: 108667.
- [68] Andersen R, Farrell C, Graf M, Muller F, Calvar E, Frankard P, Caporn S, Anderson P. An overview of the progress and challenges of peatland restoration in Western Europe. *Restoration Ecology*, 2017, 25(2): 271-282.
- [69] Puspitaloka D, Kim Y S, Purnomo H, Fulé P Z. Analysis of challenges, costs, and governance alternative for peatland restoration in Central Kalimantan, Indonesia. *Trees, Forests and People*, 2021, 6: 100131.
- [70] Novita N, Subarno, Lestari N S, Anshari G Z, Lugina M, Yeo S, Malik A, Asyhari A, Putra C A S, Gangga A, Ritonga R P, Albar I, Djaenudin D, Arifanti V B, Poor E, Jupesta J, Tryanto D H, Basuki I, Ellis P. Natural climate solutions in Indonesia; wetlands are the key to achieve Indonesia's national climate commitment. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(11): 114045.
- [71] Helbig M, Živković T, Alekseychik P, Aurela M, El-Madany T S, Euskirchen E S, Flanagan L B, Griffis T J, Hanson P J, Hattakka J, Helfter C, Hirano T, Humphreys E R, Kiely G, Kolka R K, Laurila T, Leahy P G, Lohila A, Mammarella I, Nilsson M B, Panov A, Parmentier F J W, Peichl M, Rinne J, Roman D T, Sonntag O, Tuittila E S, Ueyama M, Vesala T, Vestin P, Weldon S, Weslien P, Zaehle S. Warming response of peatland CO₂ sink is sensitive to seasonality in warming trends. *Nature Climate Change*, 2022, 12(8): 743-749.
- [72] Erkens G, van der Meulen M, Middelkoop H. Double trouble: subsidence and CO₂ respiration due to 1000 years of Dutch coastal peatlands cultivation. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(3): 551-568.
- [73] Guo J, Jiang H B, Bian H F, Sheng L X, He C G, Gao Y Z. Natural succession is a feasible approach for cultivated peatland restoration in Northeast China. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 39-44.
- [74] Grand-Clement E, Anderson K, Smith D, Luscombe D, Gatis N, Ross M, Brazier R E. Evaluating ecosystem goods and services after restoration of marginal upland peatlands in South-West England. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(2): 324-334.
- [75] Yakubson, Sumiadi. Performance assessment of existing canal-blocking in restoration management of peatland conservation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1311(1): 012059.
- [76] Kiely L, Spracklen D V, Arnold S R, Papargyropoulou E, Conibear L, Wiedinmyer C, Knot C, Adrianto H A. Assessing costs of Indonesian fires and the benefits of restoring peatland. *Nature Communications*, 2021, 12: 7044.
- [77] Andras J P, Rodriguez-Reillo W G, Truchon A, Blanchard J L, Pierce E A, Ballantine K A. Rewilding the small stuff: the effect of ecological restoration on prokaryotic communities of peatland soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 2020, 96(10): fiae144.