



不同退化程度高寒草甸生态系统碳通量

徐千君 柴永煜 颜亮 吴胜义 李勇 康恩泽 汪晓东 杨澳 康晓明 张骁栋

Dynamics of carbon flux of alpine meadows along a degradation gradient

XU Ganjun, CHAI Yongyu, YAN Liang, WU Shengyi, LI Yong, KANG Enze, WANG Xiaodong, YANG Ao, KANG Xiaoming, ZHANG Xiaodong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0676>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

梯度增温对青藏高原高寒草甸生态系统碳交换的影响

Ecosystem carbon exchange of an alpine meadow under simulated gradient warming in the Tibetan Plateau, China

草业科学. 2017, 11(12): 2407 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0090>

城市绿地生态系统碳交换动态及其与环境控制因子的关系

Dynamics of CO₂ exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Fuzhou City

草业科学. 2017, 11(5): 966 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0435>

氮、磷添加对呼伦贝尔草甸草原生态系统净CO₂交换的影响

Effects of nitrogen and phosphorus addition on the net ecosystem CO₂ exchange of meadow steppe in Hulunbuir, Inner Mongolia

草业科学. 2020, 37(8): 1428 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0205>

青藏高原高寒草地生态系统的适应性管理

Adaptive management of alpine grassland ecosystems over Tibetan Plateau

草业科学. 2019, 36(4): 933 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0224>

贵阳市不同栽培草地生态系统呼吸特征及其影响因子

Factors influencing ecosystem respiration in different cultivated grassland ecosystems in Guiyang

草业科学. 2020, 37(11): 2211 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0251>

土壤水分波动对高寒草甸生态系统CO₂和N₂O排放的影响

Effect of soil moisture fluctuations on CO₂ and N₂O emission in alpine meadow ecosystem

草业科学. 2018, 12(2): 266 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0241>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0676

徐干君, 柴永煜, 颜亮, 吴胜义, 李勇, 康恩泽, 汪晓东, 杨澳, 康晓明, 张骁栋. 不同退化程度高寒草甸生态系统碳通量. 草业科学, 2022, 39(9): 1733-1742.

XU G J, CHAI Y Y, YAN L, WU S Y, LI Y, KANG E Z, WANG X D, YANG A, KANG X M, ZHANG X D. Dynamics of carbon flux of alpine meadows along a degradation gradient. Pratacultural Science, 2022, 39(9): 1733-1742.



不同退化程度高寒草甸生态系统碳通量

徐干君¹, 柴永煜¹, 颜亮^{2,3}, 吴胜义¹, 李勇^{2,3}, 康恩泽^{2,3},
汪晓东^{2,3}, 杨澳^{2,3}, 康晓明^{2,3}, 张骁栋^{2,3}

(1. 国家林业和草原局西北调查规划院, 陕西 西安 710048; 2. 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室 / 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091; 3. 四川若尔盖高寒湿地生态系统定位观测研究站, 四川 阿坝 624500)

摘要: 高寒草甸是青藏高原的主要植被类型之一。受气候变化和人类活动的影响, 高寒草甸面临不同程度的退化, 生态系统碳通量也随之改变。当前, 高寒草甸退化过程中的碳通量组分变化特征仍不明晰, 对于深入理解高寒草甸碳源汇格局对全球变化的响应产生阻碍。本研究以 4 个退化梯度(对照样地、轻度退化、中度退化和重度退化)的高寒草甸为研究对象, 利用静态箱法测定了夏季不同退化程度的高寒草甸生态系统净交换(NEE)、生态系统呼吸(ER)、总生态系统生产力(GEP)和甲烷(CH₄)通量以及相关环境因子。结果表明: 1) 夏季不同退化程度的高寒草甸为显著的 CO₂ 汇, NEE 范围为 -1 437.55 ~ -98.45 mg·(m²·h)⁻¹ (CO₂), NEE、ER 和 GEP 随着高寒草甸退化而显著减弱 ($P < 0.05$); 同时高寒草甸呈微弱的 CH₄ 汇, 平均吸收速率为 0.029 mg·(m²·h)⁻¹ (CH₄), CH₄ 通量随退化加剧无显著变化 ($P > 0.05$)。2) 土壤有机碳含量和植被盖度是影响 NEE、GEP 和 ER 的主要环境因素。本研究发现高寒草甸碳汇从轻度退化到中度退化急剧减弱了约 55%, 说明加强预防高寒草甸从轻度到中度退化的演替, 将有效维持高寒草甸的碳汇功能。

关键词: 草地退化; 生态系统净交换; 生态系统呼吸; 总生态系统生产力; 二氧化碳通量; 甲烷通量; 青藏高原

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)09-1733-10

Dynamics of carbon flux of alpine meadows along a degradation gradient

XU Ganjun¹, CHAI Yongyu¹, YAN Liang^{2,3}, WU Shengyi¹, LI Yong^{2,3}, KANG Enze^{2,3},
WANG Xiaodong^{2,3}, YANG Ao^{2,3}, KANG Xiaoming^{2,3}, ZHANG Xiaodong^{2,3}

(1. Northwest Surveying and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration / Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Sichuan Zoige Wetland Ecosystem Research Station, Aba 624500, Sichuan, China)

Abstract: Alpine meadow is one of the main vegetation types in the Qinghai-Tibet Plateau. Alpine meadows are variably degraded under the influence of climate change and human activities. The carbon flux in alpine meadows changes with the degradation. However, the characteristics of carbon flux components during degradation in alpine meadows are still unclear, hindering our understanding of the transition between carbon sink and source in responding to global changes. In this study, four degradation degrees of alpine meadows, including enclosure as control check, lightly degraded, moderately degraded, and severely degraded meadows were studied. The net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (ER), gross

收稿日期: 2021-11-12 接受日期: 2022-03-31

基金项目: 国家林业和草原局西北调查规划院科技创新项目 (GLXD-2021-QT-20); 国家自然科学基金 (31770511)

第一作者: 徐干君 (1979-), 男, 浙江浦江人, 高级工程师, 本科, 主要从事森林经营和碳汇计量研究。E-mail: 13789255@qq.com

通信作者: 张骁栋 (1984-), 女, 浙江杭州人, 副研究员, 博士, 主要从事生态系统生态学研究。E-mail: zhangxiaodong@caf.ac.cn

ecosystem productivity (GEP), methane (CH_4) fluxes, and related environmental factors were measured during the growing season by the static chamber method. Results showed that: 1) Alpine meadows with different degrees of degradation in summer were significant CO_2 sinks, with NEE ranging from $-1\,437.55$ to $-98.45\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ (CO_2); NEE, ER, and GEP decreased significantly with the degradation of alpine meadow (CH_4) ($P < 0.05$). The alpine meadow presented a weak CH_4 sink with a mean rate of $0.029\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ (CH_4), showing no significant difference among degradation degrees ($P > 0.05$). 2) Soil organic carbon content and vegetation coverage were the two main environmental factors that affected NEE, GEP, and ER. Our study found that the capacity of carbon sequestration of alpine meadows decreased by 55% from lightly degraded to moderately degraded in the growing season, indicating that more attention should be paid to the succession of alpine meadows from light to moderate degradation, which is crucial to maintaining the carbon sequestration function of alpine meadow.

Keywords: grassland degradation; net ecosystem exchange; ecosystem respiration; gross ecosystem productivity; CO_2 flux; CH_4 flux; Qinghai-Tibet Plateau

Corresponding author: ZHANG Xiaodong E-mail: zhangxiaod@caf.ac.cn

联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次评估报告指出, 人类活动造成温室气体排放急剧增加, 全球地表温度持续上升, 进一步改变了陆地生态系统的碳水循环格局^[1]。青藏高原因其独特的海拔高度和地理环境, 对全球气候变化的响应敏感而迅速^[2]。高寒草甸作为青藏高原植被覆盖的主要类型, 广泛分布于青藏高原腹地以及周围的山地区域, 占青藏高原总面积的 35%^[3]。全球变暖和人类活动引起青藏高原高寒草甸退化面积增加, 水源涵养功能衰退, 生态系统生产力降低, 生物多样性下降, 削弱了生态系统多功能性^[4]。

退化的高寒草甸生态系统植物群落组成、土壤理化特征、土壤微生物群落结构均发生改变。随着高寒草甸生态系统退化加剧, 植物群落由禾本科和莎草科植物逐渐被杂草取代, 地上和地下生物量均随着退化程度的加剧而显著下降^[5-7]。同时, 退化的高寒草甸土壤孔隙度降低^[8], 土壤有机碳、全碳、全氮和全磷降低^[6-7], 葡萄糖苷酶、脲酶、蔗糖酶等土壤酶活性显著降低^[9-11]。不同地区的高寒草甸退化对土壤 CO_2 排放的影响不同, 例如海北地区的土壤 CO_2 排放量随着退化加剧而减弱^[12], 而风火山地区的土壤 CO_2 排放量随着退化加剧而升高^[13]。地区间土壤 CO_2 排放变化趋势不同是由于地域气候条件和生态系统各自特征差异引起的。目前普遍认为温度和土壤水分是驱动土壤碳排放的主要因素, 而土壤质地、植被组成和物候差异, 都会引起土壤呼吸的敏感性有较大差异^[14]。青藏高原的气候为雨热同

期, 夏季植物生长旺盛, 光合有效辐射和叶面积指数主导了生态系统碳交换, 多数研究表明夏季高寒草甸为明显的碳汇^[15-16]。随着高寒草甸退化, 生态系统生产力可能因植被组成和盖度的变化而削弱, 使夏季的碳汇减弱或转为碳源^[14]。然而, 有关不同退化程度高寒草甸生态系统碳通量组分的研究仍不充分, 植被生产力和土壤呼吸如何影响高寒草甸的碳源/汇变化还不清楚。

基于此, 本研究提出“在高寒草甸退化过程中, 不同碳通量组分对环境变化的响应存在差异, 共同影响生态系统碳源/汇特征”的假设, 以青藏高原高寒草甸为研究对象, 选取围封到重度退化 4 个退化梯度, 测定不同退化梯度下生态系统碳通量、植被和环境因子等指标, 探讨不同退化梯度下高寒草甸生态系统碳通量变化规律, 以及环境因子对不同退化梯度高寒草甸生态系统碳通量组分的影响。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究野外调查于 2021 年 7 月末在青海省果洛藏族自治州东北部的玛沁县 ($98^{\circ}48'\sim 100^{\circ}55'\text{ E}$, $33^{\circ}43'\sim 35^{\circ}16'\text{ N}$) 开展。玛沁县是典型的高原山地, 平均海拔 4 100 m 以上, 属于高原寒冷气候。2021 年玛沁县年均气温 1.52°C , 最冷月 1 月平均气温 -9.3°C , 最热月 7 月平均气温 11.6°C 。年均降水量 628 mm, 全年 75% 降水集中于 6 月—9 月 (图 1)。全县总面积 134 万 hm^2 , 其中草地面积 117.57 万 hm^2 , 可利

用草地面积 108.53 万 hm^2 , 占草地面积的 92.3%^[17]。玛沁县的主要植被类型为以高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、矮生嵩草 (*Kobresia humilis*) 为优势种的高寒草甸和沼泽化草甸, 以及以金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 为优势种的高寒灌丛^[18]。主要土壤类型为高山草甸土、高山灌丛草甸土和沼泽土^[19-20]。玛沁县属于典型牧业区, 生态系统敏感和脆弱, 也是黄河重要的流经区域与水源涵养地。

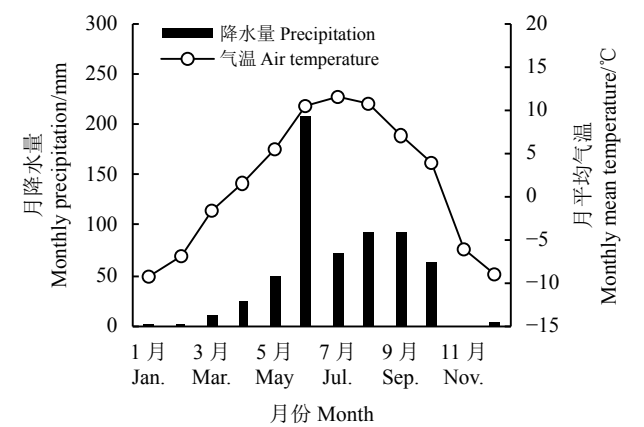


图 1 2021 年玛沁县月降水量和月平均气温
Figure 1 Monthly precipitation and mean temperature of Maqin County in 2021
数据来源: 中国气象数据网。
Data source: China Meteorological Data Service Centre.

1.2 样地选择与样品采集分析

在玛沁县选择 3 个不同退化程度的高寒草甸样地和 1 个围封 3 年的样地作为对照 (表 1), 轻度退化和中度退化样地为夏季牧场, 重度退化样地于 2020 年起实施退牧还草工程处于围封状态。高寒草

甸的退化程度依据植被覆盖度 (vegetation cover, VC) 和优势植物划分^[21]。轻度退化: $\text{VC} \geq 70\%$, 可食牧草相对盖度 $\geq 70\%$; 中度退化: $50\% \leq \text{VC} < 70\%$, $30\% \leq$ 可食牧草相对盖度 $< 70\%$; 重度退化: $\text{VC} < 50\%$, 可食牧草相对盖度 $< 30\%$ 。每个样地随机选择 3 个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 样方, 调查样方内 VC, 收割植物地上部分, 分层采集土壤样品, 并原位测定 CO_2 和 CH_4 通量, 表层 0–10 cm 土壤温度用土壤水分仪 (TDR 300, Spectrum, 美国) 测定。

植物地上部分全部收割后装入信封, 在 65°C 烘箱中烘 72 h 至恒质量后称重获得植物地上生物量 (above ground biomass, AGB)。在样方内以直径 3.8 cm 的土钻分层钻取 0–10、10–30、30–50 cm 土层的土壤样品。现场将土壤样品过 2 mm 筛并去除细根, 分成两份。一份土壤样品用烘干法测定土壤含水量 (soil water content, SWC); 另一份样品风干后用球磨机研磨, 采用元素分析仪 (Vario EL III, EA GmbH, 德国) 测定土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC), 用 1 : 2.5 土水混合悬浊液测定土壤 pH (PHS-3C, 雷磁, 中国)。

1.3 生态系统 CO_2 和 CH_4 通量测定

生态系统 CO_2 通量组分包括生态系统净交换 (net ecosystem exchange, NEE)、生态系统呼吸 (ecosystem respiration, ER) 和总生态系统生产力 (gross ecosystem productivity, GEP)。生态系统 CO_2 通量和 CH_4 通量采用静态箱法测定^[22], 选择无云晴朗日 09:00–12:00 进行。每个样地选择典型样方安装一个 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 铝合金框, 方框的下侧边向下嵌入土壤 3 cm。

表 1 样点地理位置与植被覆盖					
Table 1 Location and plant cover of sampling sites					
退化梯度 Degradation degree	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m	植被盖度 Vegetation coverage/%	优势物种 Dominant plant
对照 Control	34°28'47.28" N	100°11'59.64" E	3 723.98	76.67 ± 1.20	垂穗披碱草、早熟禾 <i>Elymus nutans</i> 、 <i>Poa annua</i>
轻度退化 Lightly degraded	34°18'55.8" N	100°34'35.76" E	4 057.28	74.67 ± 1.45	高山嵩草、矮生嵩草、钉柱委陵菜 <i>Kobresia pygmaea</i> 、 <i>Kobresia humilis</i> 、 <i>Potentilla saundersiana</i>
中度退化 Moderately degraded	34°20'3.12" N	100°29'47.04" E	3 962.70	66.00 ± 2.00	蒿草、田葛缕子、紫花针茅 <i>Carex</i> spp.、 <i>Carum buriaticum</i> 、 <i>Stipa purpurea</i>
重度退化 Severely degraded	34°20'18.24" N	100°34'15.24" E	4 049.41	29.67 ± 0.88	黄帚橐吾、单子麻黄、铺散亚菊 <i>Ligularia virgaurea</i> 、 <i>Ephedra monosperma</i> 、 <i>Ajania khartensis</i>

铝合金方框的上侧边有一个 3 cm 宽的槽, 槽中注满水后扣盖一个自制的透明同化箱 (长 50 cm × 宽 50 cm × 高 50 cm), 使箱内处于封闭状态。同化箱内有两个小风扇用于混合箱内气体, 箱体有一气管与温室气体分析仪 (UGGA-30p, LGR, 美国) 相连接。测定时同化箱扣在铝合金方框上, 待系统稳定后开始计数, 每 10 s 记一次 CO₂ 和 CH₄ 浓度, 连续记录 9~12 次, 根据测定时间内 (90~120 s) CO₂ 和 CH₄ 浓度的变化计算出 CO₂ 和 CH₄ 随时间的变化斜率, 由此斜率结合测定期间的空气温度、水分压和气压等参数计算出单位时间内同化箱中 CO₂ 和 CH₄ 的通量。

$$F_c = \frac{d_c}{d_t} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H。$$

式中: F_c 为气体通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 对气体浓度进行线性回归分析求解直线斜率 d_c/d_t , M 和 V_0 分别为气体摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) 和标准摩尔体积 $22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$, P 和 P_0 分别为测量大气压与标准大气压 (Pa), T 与 T_0 分别为箱内空气温度平均值和绝对温度, H 为静态箱高度 (cm)。

CO₂ 通量测定首先在光照条件下进行, 此时测定的值为 NEE (正值为碳排放, 负值为碳吸收, 以下 ER 和 CH₄ 相同); 然后将同化箱盖上不透光黑布测定, 此时测定的值为 ER; 总生态系统生产力 (GEP) 为 ER 与 NEE 的差值 (正值为碳吸收, 负值为碳排放)。生态系统的 CH₄ 通量光照条件下与 NEE 同步测定。

1.4 数据分析

退化梯度对高寒草甸生态系统 NEE、GEP、ER 和 CH₄ 通量的效应采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验, 然后用 Duncan.test 对不同退化程度下高寒草甸 NEE、GEP、ER 和 CH₄ 通量进行多重比较。NEE、GEP、ER 和 CH₄ 通量与 VC、AGB、分层土壤性质的相关性采用 Spearman 相关系数表示。本研究统计基于 R 4.0 平台完成^[23]。

2 结果

2.1 不同退化程度高寒草甸的碳通量特征

玛沁县高寒草甸 7 月 NEE 为 $-1\,437.55 \sim -98.45 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (CO₂), 表现为碳汇 (图 2a)。NEE 随着高

寒草甸退化加剧而减弱, 与对照样地相比, 轻度、中度和重度退化高寒草甸生态系统 NEE 分别减弱了 30%、70% 和 80%。GEP [$778.8 \sim 2\,481.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] (CO₂) 和 ER [$342.6 \sim 1\,238.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] (CO₂) 随着高寒草甸退化加剧呈先降低后增高的趋势。从轻度退化到中度退化样地 GEP 和 ER 分别降低了 49% 和 44%, 而中度和重度退化样地的 GEP 和 ER 均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 2b, c)。GEP、ER 和 NEE 三者间相关性显著 ($P < 0.05$) (图 3), 其中 GEP 与 ER 呈显著负相关关系, 与 NEE 呈显著正相关关系, NEE 与 ER 呈显著负相关关系。各个退化程度的高寒草甸样地均为弱小的 CH₄ 吸收汇, CH₄ 平均吸收速率为 $0.029 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (CH₄), 不同退化程度样地间 CH₄ 的吸收速率无显著差异 (图 2d)。CH₄ 与 GEP、ER 和 NEE 均无显著相关性。

2.2 环境因子对高寒草甸碳通量的影响

不同退化程度高寒草甸的 GEP、ER 和 NEE 与 VC 显著相关 ($P < 0.1$), 而 CH₄ 通量与 AGB 显著相关 (图 4)。高寒草甸的 0—10、10—30、30—50 cm 的 SOC 含量分别为 35.56、17.61、11.41 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。0—50 cm 平均 SOC 含量为轻度退化 ($34.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 对照 ($25.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 中度退化 ($16.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 重度退化 ($9.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。轻度退化样地 0—50 cm 平均 SOC 含量比对照高 37%, 但从轻度退化到中度退化 SOC 含量下降了 52%。不同退化程度高寒草甸的 NEE 与各层 SOC 含量均显著负相关, GEP、ER 仅与 30—50 cm 的 SOC 含量显著正相关, CH₄ 与 SOC 含量无显著相关性 (图 4)。GEP、ER、NEE 和 CH₄ 通量与不同深度的 SWC、土壤 pH 和表层土壤温度无显著相关关系 (图 4)。

3 讨论

3.1 夏季高寒草甸的碳汇作用

本研究结果表明, 玛沁高寒草甸在夏季表现为显著的 CO₂ 汇, 同时也能吸收少量 CH₄ (图 2a, d), 与大多数的研究结果一致^[12, 24]。与相同区域基于涡度相关法的研究比较, 玛沁县极度退化的“黑土滩”测定 7 月的 NEE 为 $-232.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (CO₂)^[25], 与本研究重度退化样地 [$-272.69 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] (CO₂) 接近。建植 1 年和 4 年的垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)

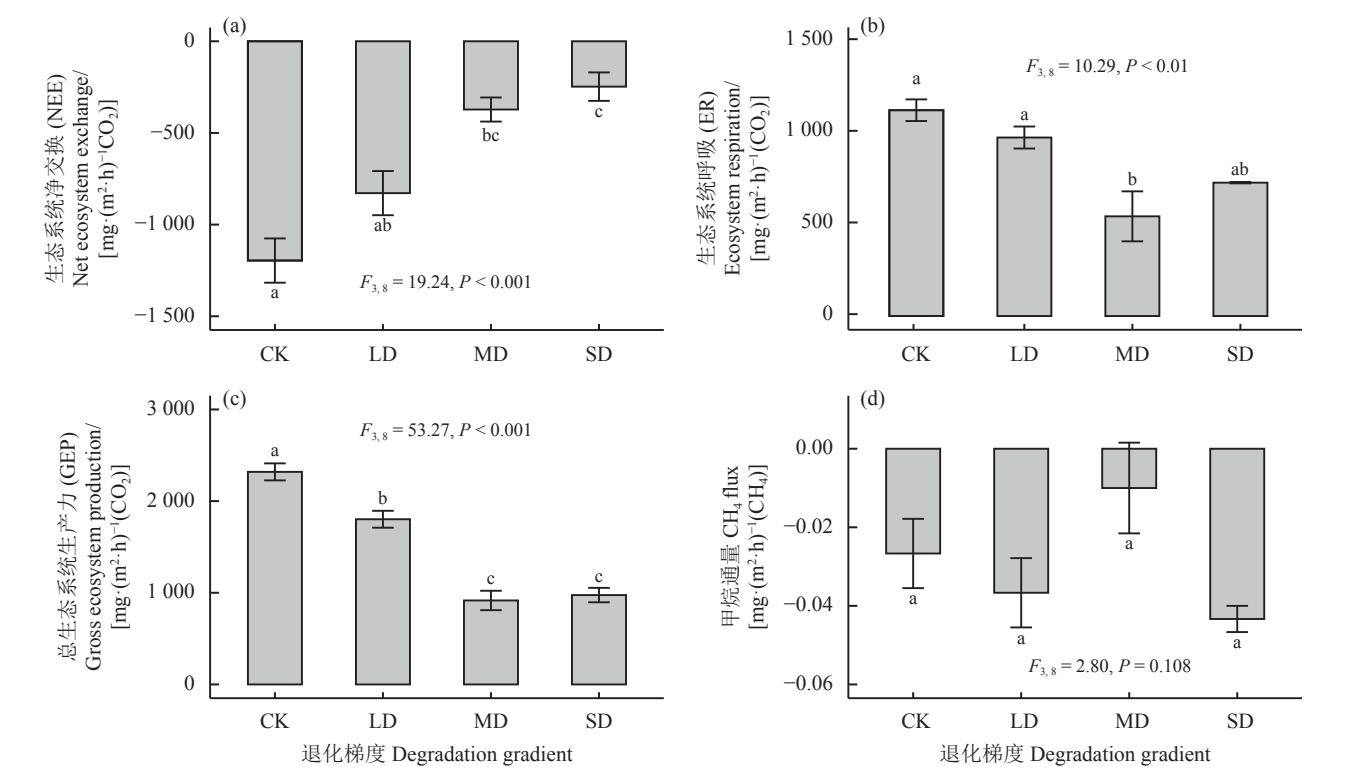


图 2 不同退化程度高寒草甸生态系统净交换、生态系统呼吸、总生态系统生产力和甲烷通量
Figure 2 Net ecosystem exchange, ecosystem respiration, gross ecosystem productivity, and methane flux in alpine meadows among different degradation degrees

不同小写字母表示不同退化程度高寒草甸碳通量差异显著 ($P < 0.05$)。CK: 对照; LD: 轻度退化; MD: 中度退化; SD: 重度退化。
Different lowercase letters indicate significant differences among different degradation degrees at the 0.05 level. CK: control check; LD: lightly degraded; MD: moderately degraded; SD: severely degraded.

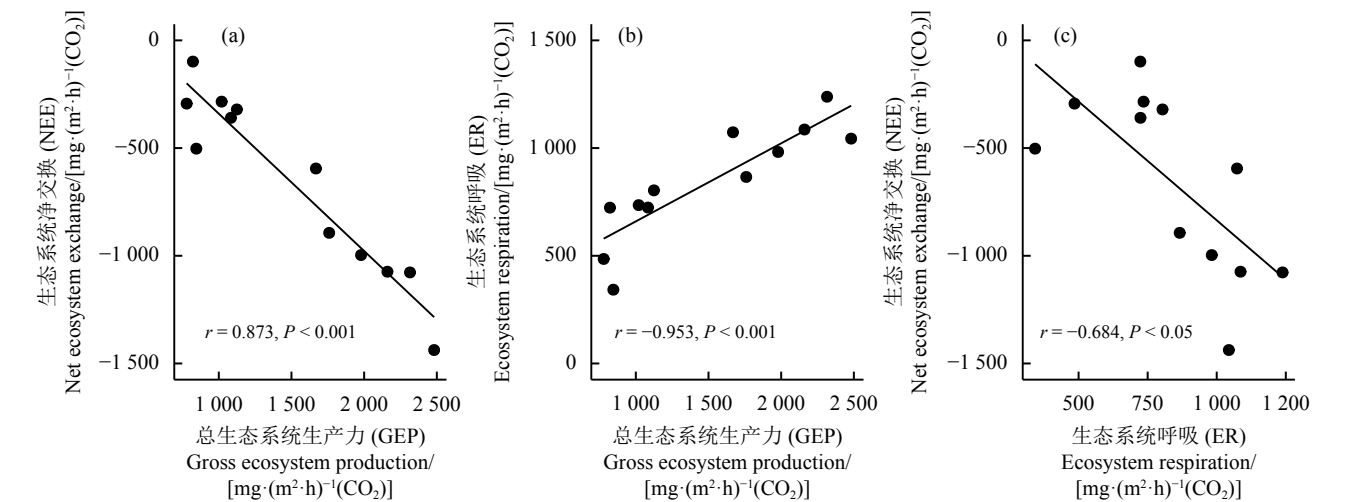


图 3 二氧化碳通量组分的相关性分析
Figure 3 Correlation tests among the components of CO₂ fluxes

栽培草地 NEE 一年中最大日值发生于夏季, 分别为 $-363.61^{[26]}$ 和 $-270 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1} (\text{CO}_2)^{[27]}$ 。考虑到基于涡度相关法测定的 NEE 包含了昼夜波动, 垂穗披碱草栽培草地的夏季 NEE^[26-27] 应高于本研究中的中度退化样地测得的昼间值 $[-372.30 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}] (\text{CO}_2)$, 可能与轻度退化样地 $[-828.35 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}] (\text{CO}_2)$ 相

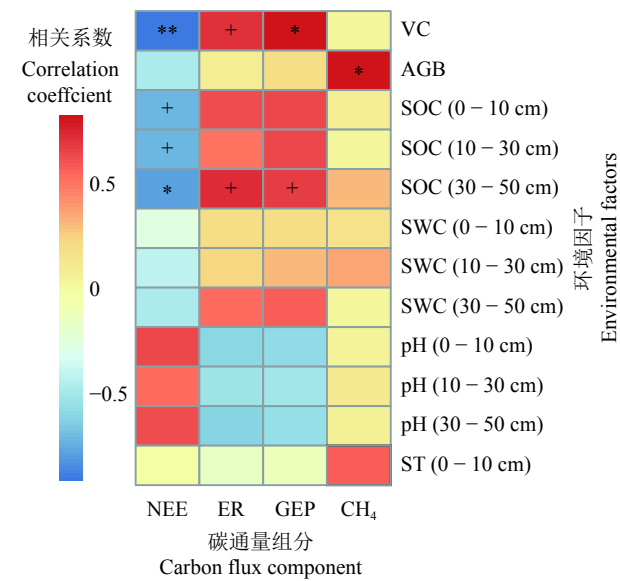


图 4 高寒草甸碳通量组分与环境因子的相关性热图

Figure 4 Heatmap for the correlation between CO₂ flux components and environmental factors

VC: 植被覆盖度; AGB: 植物地上生物量; SOC: 土壤有机碳; SWC: 土壤含水量; ST: 表层土壤温度; NEE: 生态系统净交换; ER: 生态系统呼吸; GEP: 总生态系统生产力; CH₄: 甲烷通量; ***, **, *和+分别表示 0.001、0.01、0.05 和 0.1 水平差异显著。

VC: vegetation cover; AGB: aboveground biomass; SOC: soil organic carbon; SWC: soil water content; ST: surface soil temperature; NEE: net ecosystem exchange; ER: ecosystem respiration; GEP: gross ecosystem productivity; CH₄: methane flux; ***, **, *, and + indicate significance at 0.001, 0.01, 0.05, and 0.1 levels, respectively.

当。基于以上多个研究得出,不同退化程度的高寒草甸在夏季均表现出较强的碳汇作用。

在气候变化和人类活动的双重影响下,高寒草甸退化引起碳汇功能发生改变^[28]。本研究中 NEE 随着草地退化加剧而减弱,且从轻度退化到中度退化阶段的降幅最大达 55% (图 2),同时 SOC 含量下降约 50%,说明 SOC 可能在这一阶段大量释放,削弱了生态系统的碳汇功能^[29]。另一方面,与轻度退化的样地相比,植物物种结构从莎草科为优势种转为杂草为优势种 (表 1),植物功能群变化使地下根系组成变化^[30],旧根系分解可能也是削弱生态系统碳汇的因素之一。

3.2 退化高寒草甸不同碳通量组分变化

与对照样地相比,本研究轻度和中度退化的高寒草甸 NEE 和 GEP 显著相关 (图 3a),说明高寒草甸在退化过程中碳汇减弱主要是由于 GEP 减弱引起的。王斌等^[25]的研究也发现高寒草甸退化过程中生态系统全年总初级生产力的降幅大于 ER,使全年 NEE 从负值转为正值。高寒草甸夏季 GEP 受光合有效辐射和叶面积指数共同调控^[15],退化样地中较低的植被盖度使光合作用强度减弱,从而降低了 GEP (图 4)。本研究中未发现 AGB 与 GEP 的相关性 (图 4),与前人的研究不一致^[31-32],可能是中度

表 2 不同退化程度高寒草甸土壤和植被特征

Table 2 Soil and vegetation characteristics in alpine meadows with different degradation degrees

退化程度 Degradation degree	土层 Soil layer/cm	土壤有机碳 Soil organic carbon/(g·kg ⁻¹)	土壤含水量 Soil water content/%	土壤pH Soil pH	表层土壤温度 Surface soil temperature/℃	地上生物量 Aboveground biomass/(g·m ⁻²)
对照 Control	0—10	35.23 ± 2.71	19.47 ± 1.05	7.47 ± 0.07	12.37 ± 0.28	190.05 ± 20.09
	10—30	22.18 ± 1.72	27.37 ± 9.92	8.17 ± 0.09		
	30—50	18.27 ± 1.63	15.50 ± 0.57	8.33 ± 0.07		
轻度退化 Lightly degraded	0—10	63.39 ± 4.67	31.70 ± 1.25	6.40 ± 0.06	8.43 ± 0.19	143.49 ± 22.15
	10—30	25.33 ± 0.59	20.03 ± 1.07	6.83 ± 0.07		
	30—50	15.01 ± 1.78	16.60 ± 0.25	7.30 ± 0.36		
中度退化 Moderately degraded	0—10	27.08 ± 1.44	24.83 ± 0.27	8.20 ± 0.06	14.20 ± 0.80	195.68 ± 40.57
	10—30	15.39 ± 2.03	20.50 ± 0.25	8.47 ± 0.03		
	30—50	7.53 ± 1.30	15.00 ± 1.50	8.63 ± 0.03		
重度退化 Severely degraded	0—10	16.55 ± 2.15	15.00 ± 1.19	8.20 ± 0.15	8.37 ± 0.38	76.66 ± 23.12
	10—30	7.54 ± 1.35	13.13 ± 1.61	8.47 ± 0.13		
	30—50	4.85 ± 0.91	11.87 ± 0.87	8.67 ± 0.09		

退化样地中的杂草繁殖体占据了较大生物量比例导致。本研究调查的中度退化样地中的田葛缕子 (*Carum buriaticum*) 为优势种之一 (表 1), 该植物正处于盛花期, 白色伞形花序对光合作用贡献甚微, 使 AGB 和 GEP 的相关性分析呈不显著。除去中度退化样地, 本研究中对照样地、轻度退化样地和重度退化样地的 AGB 和 GEP 呈显著正相关关系 ($r = 0.817$, $P < 0.01$)。

随着生态系统退化 ER 呈下降趋势, 中度退化样地的 ER 均值最低 (图 2b)。ER 与 GEP 及 VC 的显著相关性 (图 3b, 图 4) 说明植物呼吸可能在 ER 的变化中占主导作用, 前人研究表明高寒草甸中植物呼吸占 ER 的 50%~80% [33-34]。随着退化高寒草甸中 VC 降低, 植物呼吸也随之降低 [35-36]。SOC 与 ER 显著正相关 (图 4), 可能是土壤中充足的碳底物促进微生物异养呼吸 [37-38], 对 ER 的变化有一定贡献。本研究发现调查的样地中 SOC 在轻度退化的样地中最高, 尤其是 0—10 cm SOC 比对照样地高 1 倍 (表 2), 可能是牧场的牛粪输入引起的。轻度退化的草地 SOC 升高促进微生物异养呼吸, 弥补了因植被减少而降低的植物呼吸, 使对照和轻度退化样地的 ER 差异不显著 (图 2b)。然而, 随着高寒草甸的进一步退化, SOC 快速流失造成了从轻度退化到中度退化样地 ER 显著减弱。

本研究中发现 SWC 对 NEE、GEP 和 ER 的作用不明显 (图 4), 与部分已有研究结果不同 [39-40]。从对

照到中度退化的样地, 土壤 SWC 均在 20% 左右且无明显降低 (表 2)。本研究调查当月降水量仅为 76 mm (图 1), 低于往年平均水平 100 mm, 而玛沁县 7 月的蒸发量为 130~140 mm, 高于降水量近 1 倍。因此, 调查期间玛沁可能正经历轻度干旱。夏季降水是高寒草甸植物生长和微生物活动的主要水分来源 [41-42], 进而驱动了碳循环过程。本研究中可能是研究地 SWC 正处于较低水平, 从而对 NEE、GEP 和 ER 的影响较弱。另外, 本研究也未发现表层土壤温度与碳通量有相关性 (图 4), 可能是由于较高的土壤温度促进土壤水分蒸发, 加剧环境干旱胁迫, 使其与对微生物活动的促进作用抵消 [43]。

4 结论

本研究的调查发现, 夏季不同退化程度的高寒草甸总体上为 CO_2 汇, 范围为 $-98.45 \sim -1\,437.55 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (CO_2), 随着退化加剧生态系统 CO_2 汇能力减弱。同时高寒草甸也呈微弱的 CH_4 汇, 平均 CH_4 吸收速率为 $-0.029 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CH_4 通量随退化程度无明显趋势。植被盖度和土壤有机碳是影响高寒草甸碳汇能力的主要因素。高寒草甸从轻度向中度退化演替时系统碳汇能力下降 55%, 可能是这个阶段植物群落组成变化, 土壤有机碳快速流失引起的。因此, 在恢复治理退化高寒草甸时, 需加强防止草地从轻度退化到中度退化演替, 将有助于维持高寒草甸的碳汇功能。

参考文献 References:

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] HU Y G, JIANG L L, WANG S P, ZHANG Z H, LUO C Y, BAO X Y, NIU H S, XU G P, DUAN J C, ZHU X X, CUI S J, DU M Y. The temperature sensitivity of ecosystem respiration to climate change in an alpine meadow on the Tibet Plateau: A reciprocal translocation experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 93-104.
- [3] 韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 张法伟, 李以康, 林丽, 李婧, 唐艳鸿, 古松. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力. *生态学报*, 2011, 31(24): 7408-7417.
HAN D R, CAO G M, GUO X W, ZHANG F W, LI Y K, LIN L, LI J, TANG Y H, GU S. The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24): 7408-7417.
- [4] 徐伟, 马志远, 井新, 贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望. *生物多样性*, 2016, 24(1): 55-71.
XU W, MA Z Y, JING X, HE J S. Biodiversity and ecosystem multifunctionality: Advances and perspectives. *Biodiversity*, 2016, 24(1): 55-71.

- [5] 张帆, 李元淳, 王新, 朱剑霄. 青藏高原高寒草甸退化对草地群落生物量及其分配的影响. 草业科学, 2021, 38(8): 1451-1458.
ZHANG F, LI Y C, WANG X, ZHU J X. Effect of rangeland degradation on biomass allocation in alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Pratacultural Science*, 2021, 38(8): 1451-1458.
- [6] 詹天宇, 侯阁, 刘苗, 孙建, 付顺. 青藏高原不同退化梯度高寒草地植被与土壤属性分异特征. 草业科学, 2019, 36(4): 1010-1021.
ZHAN T Y, HOU G, LIU M, SUN J, FU S. Different characteristics of vegetation and soil properties along degraded gradients of alpine grasslands in the Qinghai-Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 1010-1021.
- [7] 郝爱华, 薛娟, 彭飞, 尤全刚, 廖杰, 段翰晨, 黄翠华, 董斯扬. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究. 生态学报, 2020, 40(3): 964-975.
HAO A H, XUE X, PENG F, YOU Q G, LIAO J, DUAN H C, HUANG C H, DONG S Y. Different vegetation and soil degradation characteristics of a typical grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 964-975.
- [8] 孙哲, 王一博, 刘国华, 高泽永. 基于多重分形理论的多年冻土区高寒草甸退化过程中土壤粒径分析. 冰川冻土, 2015, 37(4): 980-990.
SUN Z, WANG Y B, LIU G H, GAO Z Y. Heterogeneity analysis of soil particle size distribution in the process of degradation of alpine meadow in the permafrost regions based on multifractal theory. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 980-990.
- [9] 喻岚晖, 王杰, 廖李容, 张超, 刘国彬. 青藏高原退化草甸土壤微生物量、酶化学计量学特征及其影响因素. 草地学报, 2020, 28(6): 217-225.
YU L H, WANG J, LIAO L R, ZHANG C, LIU G B. Soil Microbial biomass, enzyme activities and ecological stoichiometric characteristics and influencing factors along degraded meadows on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(6): 217-225.
- [10] 李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2109-2118.
LI J H, YANG G J, WANG S P. Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2109-2118.
- [11] 何芳兰, 金红喜, 王锁民, 韩生慧, 曾荣, 马俊梅. 沙化对玛曲高寒草甸土壤微生物数量及土壤酶活性的影响. 生态学报, 2016, 36(18): 5876-5883.
HE F L, JIN H X, WANG S M, HAN S H, ZENG R, MA J M. Effect of desertification on soil microbial biomass and enzyme activities in Maqu alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5876-5883.
- [12] 郭小伟, 戴黎聪, 李以康, 张法伟, 林丽, 李茜, 钱大文, 樊博, 柯浔, 舒铠, 朋措吉, 杜岩功, 曹广民. 不同退化程度下的高寒草甸主要温室气体通量. 水土保持研究, 2019, 26(5): 188-194, 209.
GUO X W, DAI L C, LI Y K, ZHANG F W, LIN L, LI Q, QIAN D W, FAN B, KE X, SHU K, PENG C J, DU Y G, CAO G M. Major greenhouse gas fluxes in different degradation levels of alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5): 188-194, 209.
- [13] 王俊峰, 王根绪, 王一博, 李元寿. 青藏高原沼泽及高寒草甸生长期内 CO₂ 排放. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(5): 17-23.
WANG J F, WANG G X, WANG Y B, LI Y S. CO₂ emissions from swamp and alpine meadow during the growing seasons on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2007, 43(5): 17-23.
- [14] 刘敏, 金会军, 罗栋梁, 王庆峰, 金晓颖, 李晓英, 吕兰芝. 青藏高原土壤碳排放研究进展. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1544-1554.
LIU M, JIN H J, LUO D L, WANG Q F, JIN X Y, LI X Y, LYU L Z. Progress in studies of carbon emission from soil on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(6): 1544-1554.
- [15] SHI P, SUN X, XU L, ZHANG X, HE Y, ZHANG D, YU G. Net ecosystem CO₂ exchange and controlling factors in a steppe:

- Kobresia* meadow on the Tibetan Plateau. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 207-218.
- [16] ZHAO L, LI Y N, ZHAO X Q, XU S X, TANG Y H, YU G R, GU S, DU M Y, WANG Q X. Comparative study of the net exchange of CO₂ in 3 types of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(16): 1767-1774.
- [17] 冯亚杰. 2005-2015 年三江源地区玛沁县植被覆盖度变化分析. *大连民族大学学报*, 2016, 18(5): 450-456.
- FENG Y J. Changes of vegetation coverage from 2005 to 2015 of Maqin County in Three-River headwater region. *Journal of Dalian Minzu University*, 2016, 18(5): 450-456.
- [18] 贾顺斌, 赵建中, 周华坤. 1995—2004 年玛沁县气温与降水的变化趋势及相关性分析. *安徽农业科学*, 2011, 39(18): 10960-10961, 11037.
- JIA S B, ZHAO J Z, ZHOU H K. Variation trend of temperature and precipitation and correlation analysis in Maqin county during 1995—2004. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(18): 10960-10961, 11037.
- [19] 韩艳莉, 陈克龙, 汪诗平. 黄河源区高寒草地植被碳储量研究: 以果洛藏族自治州为例. *国土与自然资源研究*, 2010, 129(5): 93-94.
- HAN Y L, CHEN K L, WANG S P. Study on carbon stack of alpine grassland in the source regions of the Yellow River: In case of Guoluo Tibetan autonomous prefecture in Qinghai Province. *Territory & Natural Resources Study*, 2010, 129(5): 93-94.
- [20] 孙金金, 焦婷, 李亚娟, 王芳, 汪鹏斌, 鱼小军. 高寒区草地—家畜优化配置研究: 以青海省玛沁县 1 牧户为例. *草地学报*, 2019, 27(3): 728-735.
- SUN J J, JIAO T, LI Y J, WANG F, WANG P B, YU X J. A study on the optimal allocation of the alpine pasture grassland-livestock: A case of a herder in Maqin County, Qinghai Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3): 728-735.
- [21] 青海省质量技术监督局. DB63/T 608—2006 高寒草甸中、轻度退化草地植被恢复技术规程. 西宁: 青海省质量技术监督局, 2006.
- Administration for Quality and Technical Supervision of Qinghai Province. DB63/T 608—2006. Technical Regulations for Vegetation Restoration of Moderately and Lightly Degraded Grassland in Alpine Meadow. Xining: Administration for Quality and Technical Supervision of Qinghai Province, 2006.
- [22] NIU S L, WU M Y, HAN Y, XIA J Y, ZHANG Z, YANG H J, WAN S Q. Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 144-155.
- [23] R Foundation for Statistical Computing. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Development Core Team, 2020.
- [24] YAN L, ZHOU G S, WANG Y H, HU T Y, SUI X H. The spatial and temporal dynamics of carbon budget in the alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau using the Terrestrial Ecosystem Model. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107: 195-201.
- [25] 王斌, 李洁, 姜微微, 赵亮, 古松. 草地退化对三江源区高寒草甸生态系统 CO₂ 通量的影响及其原因. *中国环境科学*, 2012, 32(10): 1764-1771.
- WANG B, LI J, JIANG W W, ZHAO L, GU S. Impacts of the rangeland degradation on CO₂ flux and the underlying mechanisms in the Three-River Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau. *China Environmental Science*, 2012, 32(10): 1764-1771.
- [26] 赵亮, 古松, 周华坤, 徐世晓, 赵新全, 李英年. 青海省三江源区人工草地生态系统 CO₂ 通量. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 544-554.
- ZHAO L, GU S, ZHOU H K, XU S X, ZHAO X Q, LI Y N. CO₂ fluxes of artificial grassland in the source region of the three rivers on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 544-554.
- [27] 吴力博, 古松, 赵亮, 徐世晓, 周华坤, 冯超, 徐维新, 李英年, 赵新全, 唐艳鸿. 三江源地区人工草地的生态系统 CO₂ 净交换、总初级生产力及其影响因子. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 770-780.
- GU L B, GU S, ZHAO L, XU S X, ZHOU H K, FENG C, XU W X, LI Y N, ZHAO X Q, TANG Y H. Variation in net CO₂

- exchange, gross primary production and its affecting factors in the planted pasture ecosystem in Sanjiangyuan Region of the Qinghai-Tibetan Plateau of China. *Chines Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(7): 770-780.
- [28] LI W, WANG J L, ZHANG X J, SHI S L, CAO W X. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2018, 111: 134-142.
- [29] LI Z F, GAO J X, WEN L Q, ZOU C X, FENG C Y, LI D Q, XU D L. Dynamics of soil respiration in alpine wetland meadows exposed to different levels of degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Scientific Reports*, 2019, 9: 7469.
- [30] ZHANG Z C, LIU M, SUN J, WEI T X. Degradation leads to dramatic decrease in topsoil but not subsoil root biomass in an alpine meadow on the Tibetan Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(5): 806-818.
- [31] GANJURJAV H, GAO Q Z, ZHANG W N, LIANG Y, LI Y W, CAO X J, WAN Y F, LI Y, DANJIU L. Effects of warming on CO₂ fluxes in an alpine meadow ecosystem on the central Qinghai-Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 2015, 10(7): e0132044.
- [32] PENG F, QUANGPANG Y, XUE X, GUO J, WANG T. Effects of rodent-induced land degradation on ecosystem carbon fluxes in an alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Solid Earth*, 2015, 6(1): 303-310.
- [33] HU Q W, WU Q, CAO G M, LI D, LONG R J, WANG Y S. Growing season ecosystem respirations and associated component fluxes in two alpine meadows on the Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(3): 271-279.
- [34] ZHANG P C, TANG Y H, HIROTA M M, YAMAMOTO A, MARIKO S. Use of a regression method to partition sources of ecosystem respiration in an alpine meadow. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(4): 663-670.
- [35] YOU Q G, XUE X, PENG F, XU M H, DUAN H C, DONG S Y. Comparison of ecosystem characteristics between degraded and intact alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 133-143.
- [36] CHEN J, LUO Y Q, XIA J Y, SHI Z, JIANG L F, NIU S L, ZHOU X H, CAO J J. Differential responses of ecosystem respiration components to experimental warming in a meadow grassland on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 21-29.
- [37] WANG Y B, WANG D L, SHI B K, SUN W. Differential effects of grazing, water, and nitrogen addition on soil respiration and its components in a meadow steppe. *Plant and Soil*, 2020, 447(1): 581-598.
- [38] GUO H, YE C L, ZHANG H, PAN S, JI Y G, LI Z, LIU M Q, ZHOU X H, DU G Z, HU F, HU S J. Long-term nitrogen & phosphorus additions reduce soil microbial respiration but increase its temperature sensitivity in a Tibetan alpine meadow. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 26-34.
- [39] LUAN J W, SONG H T, XIANG C H, ZHU D, SUOLANG D E J. Soil moisture, species composition interact to regulate CO₂ and CH₄ fluxes in dry meadows on the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 101-112.
- [40] 张远, 郝彦宾, 崔丽娟, 李伟, 张骁栋, 张曼胤, 李林峰, 杨思, 康晓明. 极端干旱对若尔盖高原泥炭地生态系统 CO₂ 通量的影响. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(4): 462-470.
- ZHANG Y, HAO Y B, CUI L J, LI W, ZHANG X D, ZHANG M Y, LI L F, YANG S, KANG X M. Effects of extreme drought on CO₂ fluxes of Zoige alpine peatland. *Journal of University of Chinese Academy of Science*, 2017, 34(4): 462-470.
- [41] ZHANG W G, CHENG B, HU Z B, AN S Q, XU Z, ZHAO Y J, CUI J, XU Q. Using stable isotopes to determine the water sources in alpine ecosystems on the east Qinghai-Tibet Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(22): 3270-3280.
- [42] LI H Q, ZHANG F W, ZHU J B, GUO X W, LI Y K, LIN L, ZHANG L M, YANG Y S, LI Y N, CAO G M, ZHOU H K, DU M Y. Precipitation rather than evapotranspiration determines the warm-season water supply in an alpine shrub and an alpine meadow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 300: 108318.
- [43] ROMEROP-OLIVARES A L, ALLISON S D, TRESEDER K K. Soil microbes and their response to experimental warming over time: A meta-analysis of field studies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 32-40.

(责任编辑 苟燕妮)