



黄河源高寒草甸退化过程中 CO₂ 通量的变化

孙华方¹,李希来¹,苏晓雪¹,金立群^{1,2},张 静¹,阿卓毛世吉¹,刘 凯³

(1. 青海大学 农牧学院,西宁 810016; 2. 湟源县草原站,青海湟源 812100; 3. 青海省草原总站,西宁 810008)

摘 要 为研究草地退化对高寒草甸碳排放的影响,选取青海省黄南州河南县的未退化(No degraded, ND)、中度退化(Moderate degraded, MD)和重度退化(Serious degraded, SD)高寒草甸,利用 LI-8100A 红外气体分析仪测定 CO₂ 通量。结果表明:草地退化能够显著降低高寒草甸 CO₂ 通量。未退化高寒草甸 CO₂ 通量为 12.44 μmol/(m²·s),显著高于重度退化高寒草甸 4.64 μmol/(m²·s),中度与重度退化草甸差异不显著。全氮含量在重度退化区最高,全磷含量表现出相反趋势;速效养分随着退化的加剧逐渐减少。随机森林模型分析发现,植被特征中杂类草盖度和地上生物量是降低 CO₂ 通量的关键因子,各土层中土壤 pH, 0~2、2~5 cm 土壤细砂粒比例和 5~10 cm 土壤全磷含量为关键因子,均与 CO₂ 通量呈显著正相关。说明高寒草甸的退化引起植被类型和土壤特征发生变化,进而导致 CO₂ 通量发生变化,且不同土层关键因子具有差异,因此,研究黄河源高寒草甸碳排放的过程中需要密切关注植被类型和土壤变化。

关键词 CO₂ 通量;退化高寒草甸;植被特征;土壤特征;随机森林

中图分类号 S812

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2022)12-1544-09

随着全球气候变暖,广大学者对于大气 CO₂ 浓度变化的研究日益重视^[1],碳源和碳汇以及碳源、碳汇与其影响因子之间的关系已成为国际焦点^[2-3]。草地作为陆地生态系统重要的组成部分,不仅能保持水土,提供草产品,还能通过光合作用维持生态系统的碳循环^[4]。中国作为草地大国,草地总面积近 4 亿 hm²^[5],对全国 CO₂ 释放起到重要作用。高寒地区草地的碳储量约占全国草地生态系统的 48.1%,因此高寒草甸碳释放变化在全国碳循环平衡中起着重大作用^[6-7]。近年来,由于放牧过度,鼠害增加,导致中国高寒草甸退化严重,中国草地有 90% 以上处于不同程度的退化之中^[8],草地退化使得植被特征和土壤特征发生改变^[9-11],进而导致 CO₂ 通量也发生变化。王斌等^[4]发现高寒草甸退化过程中,植被生物量、物候期、多样性以及土壤含水量等因素均会导致草地碳通量发生变化。李其等^[12]研究了川西北高寒草地生态系统在沙化治理恢复中碳通量的变化机制。郭小伟等^[13]研究了不同退化程度高寒草甸的 CO₂ 通量,发现草地退化与 CO₂ 通量存在一

定的联系,但黄河源区高寒草甸退化过程中 CO₂ 通量如何变化以及影响 CO₂ 通量变化的关键因子还不清楚。

本试验区位于青海省黄南州河南县,是生态环境脆弱地区^[14],近年来,在长期不合理的土地资源利用下,高寒草甸发生严重退化,已经对当地畜牧业赖以生存发展的基础产生严重影响,对黄河流域的生态环境造成严重危害^[15]。高寒草甸的退化不仅使草地生产力降低,还使土壤理化性质发生改变,对 CO₂ 通量产生了重大影响,引起该地区生态系统功能和碳收支格局发生变化^[16]。本研究通过调查不同退化程度高寒草甸 CO₂ 通量变化特征以及探索影响 CO₂ 通量的关键因子,旨在探索高寒草甸 CO₂ 通量对退化的响应特征,为了解高寒草甸碳循环和平衡以及了解高寒草甸的碳源和碳汇效应提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于青海省黄南藏族自治州河南蒙

收稿日期:2021-04-18 修回日期:2021-08-29

基金项目:青海省科技厅项目(2020-ZJ-904);国家自然科学基金(31872999);三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-08);高等学校学科创新引智计划(D18013)。

第一作者:孙华方,女,博士研究生,研究方向为高寒生态修复与环境保护。E-mail:1219493914@qq.com

通信作者:李希来,男,教授,研究方向为高寒生态修复与环境保护。E-mail:xilai-li@163.com

古族自治县克其合滩的退化高寒草甸,经纬度为 34°41′07″N、101°46′02″E,海拔为 3 750 m 左右。研究地为阳坡滩地,坡度为 5°左右。草地类型为高寒草甸。每年 5—10 月温暖多雨,11 月—次年 4 月寒冷干燥,多大风天气。春秋时日短,四季不分明,无绝对无霜期。年均气温为 9.2℃~14.6℃,年降水量为 597.1~615.5 mm,降水总量为 41.9 m³。平均年蒸发量为 1 349.7 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与植被调查方法 2020 年 8 月在青海省黄南州河南县研究区通过无人机拍照调查不同退化程度的高寒草甸,面积约 10 hm²,结合实地踏查确定高寒草甸的退化程度。高寒草甸退化程度的判断依据 Li 等^[17]和马玉寿等^[18]的分级标准,根据草地秃斑地面积和植被盖度等指标将调查样地分为未退化区(No degraded, ND)、中度退化区(Moderate degraded, MD)和重度退化区(Serious degraded, SD),其中未退化区约占调查面积的 30%,中度退化区约占 20%,重度退化区约占 50%。利用样方法调查植被特征,在不同退化样地内随机布置调查样方,重复 6 次,样方面积为 1 m²。目测估算样方内植被总盖度和各经济类群(禾本科、莎草科、杂类草)盖度,草地齐地面刈割法测定经济类群植物的鲜质量。人工清点样方内各经济类群的密度,钢卷尺测定高度。

1.2.2 土壤样品采集及理化性质测定 分层随机挖取样方内 5 处土壤混合为 1 个样品,获得不同土层土壤样品(0~2、2~5、5~10 cm),共获得 54 个土壤样品,分别装入自封袋并做好记录。实验室内利用 AA3 连续流动分析仪(德国, SEAL)测定土壤全氮(Total nitrogen, TN)、铵态氮(Ammonium nitrogen, NH₄⁺-N)、全磷(Total phosphorus, TP)、速效磷(Available phosphorus, AP)的含量,利用火焰光度法测定土壤全钾(Total potassium, TK)的含量,利用电位法测定土壤 pH。利用干筛法筛分不同粒径土壤,并计算各粒径土壤的质量占比。

1.2.3 呼吸测定 利用土壤碳通量测量系统 LI-8100A 红外气体分析仪(美国, IR-GA)原位测定不同退化程度高寒草甸的 CO₂ 通量。CO₂ 通量测定时间为 9:00—11:00^[19]。为减小误差,测量时需将气室垂直砸入土壤 0.5~1 cm,测定 90 s,记录 CO₂ 通量变化。

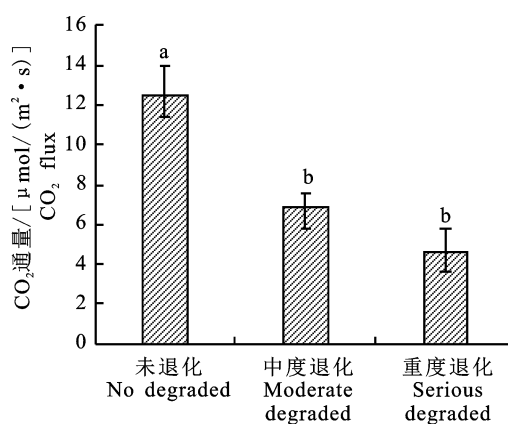
1.3 数据处理与分析

利用 Excel 2016 对数据进行整理,利用 SPSS 21.0 对不同退化阶段的 CO₂ 通量、植被和土壤理化性质进行单因素方差分析、多重比较。利用 R4.0 随机森林对 CO₂ 通量影响因子的重要性进行排序,并绘图。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 通量变化

对不同退化程度下的 CO₂ 通量分析发现(图 1),高寒草甸 CO₂ 排放能力随高寒草甸退化程度加重逐渐减少。中度退化高寒草甸和重度退化高寒草甸 CO₂ 通量分别为 6.83 μmol/(m²·s), 4.64 μmol/(m²·s),显著低于未退化高寒草甸($P<0.05$),重度退化高寒草甸与中度退化高寒草甸差异不显著($P>0.05$)。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters show significant difference($P<0.05$)

图 1 不同退化程度高寒草甸 CO₂ 通量

Fig. 1 CO₂ flux of alpine meadow with different degradation degrees

2.2 植被特征变化

从表 1 中能够看出不同退化程度高寒草甸的植被特征有较大差异,未退化高寒草甸植被总盖度为 95.83%;随着退化,植被总盖度逐渐降低,其中重度退化阶段最低,为 73.00%。分析不同退化程度的不同经济类群(莎草科、禾本科、杂类草)盖度发现,未退化高寒草甸禾本科和莎草科植物最高,分别为 29.88%和 60.67%,重度退化最低,约为未退化的 1/60 和 1/36。杂类草盖度变化相反,重度退化区最高,为 73.50%,显著高于未退化和中度退化区($P<0.05$)。就高度而言,未退化区的禾本科和莎草科高度均显著高于重度

退化区($P<0.05$)。重度退化区的杂类草高度最大,为 5.21 cm。未退化区的莎草科植物地上生物量显著高于退化区域。禾本科植物的生物量在中度退化区显示最大值,杂类草生物量在重度退化区最高,约是未退化区的 6 倍。对比相同退化程度下不同经济类群分布特征发现,未退化和中度退化区的莎草科植物盖度表现出较大值,在重

度退化区杂类草盖度显著高于其他经济类群植物($P<0.05$)。未退化和中度退化区莎草科和禾本科植物的高度显著高于杂类草($P<0.05$)。重度退化区域各高度表现出相反趋势,即重度退化区杂类草高度最大(5.21 cm),地上生物量显著高于未退化和中度退化区($P<0.05$)。

表 1 不同退化程度高寒草甸植被分布特征

Table 1 Vegetation distribution characteristics in alpine meadow with different degradation degrees

退化程度 Degradation degree	总盖度/% Total coverage	盖度/% Coverage			高度/cm Height			地上生物量/(g/m ²) Aboveground biomass		
		莎草科 Sedge	禾本科 Grass	杂类草 Forb	莎草科 Sedge	禾本科 Grass	杂类草 Forb	莎草科 Sedge	禾本科 Grass	杂类草 Forb
未退化 No degraded	95.83±1.33 a	60.67±2.50 Aa	29.88±3.76 Ba	9.83±1.72 Cc	4.77±0.86 Aa	4.63±0.63 Aa	1.17±0.43 Bc	14.90±6.39 Ba	8.02±3.94 Cb	20.76±7.31 Ac
中度退化 Moderate-degraded	77.50±8.22 b	41.50±2.56 Ab	22.83±3.60 Bb	43.16±4.71 Ab	3.18±1.38 ABb	4.02±1.38 Aa	2.43±0.57 Bb	9.77±7.3 Cb	14.74±7.99 Ba	83.22±30.19 Ab
重度退化 Seriously degraded	73.00±6.32 b	1.67±1.51 Bc	0.50±0.84 Cc	73.50±6.44 Aa	1.84±0.00 Cb	2.3±0.00 Bb	5.21±1.49 Aa	0.35±0.28 Bc	0.45±0.71 Bc	122.58±49.62 Aa

注:表中数据为“平均值±标准差”(n=6)。同列不同小写字母表示不同退化程度植被特征差异显著($P<0.05$),同行不同大写字母表示相同退化程度不同经济类群差异显著($P<0.05$)。

Note: The data are “mean ± standard” deviation. The different lowercase letters within the same columns indicate statistical difference of vegetation characteristics among alpine meadow with different degradation degrees ($P<0.05$). The uppercase letters within the same rows indicate statistical difference of vegetation characteristics among different economic groups ($P<0.05$).

2.3 土壤特征变化

通过对不同退化程度不同土层土壤养分的分析(表 2)发现,不同退化程度下土壤全效养分变化特征不同。就土壤全氮、全钾含量而言,重度退化区不同土层全氮含量均显著高于未退化区($P<0.05$),但全磷含量分布与全氮、全钾分布相反,即重度退化区不同土层全磷含量最低,约是未退化区和中度退化区含量的一半,分别为 0.59、0.71、0.62 g/kg。就速效养分而言,在 0~2 cm 土层土壤中,未退化区土壤铵态氮含量与中度退化区差异不大,但显著高于重度退化区,约大 1 倍($P<0.05$)。就速效磷而言,除 5~10 cm 土层土壤速效磷含量在不同退化区表现出较大差异($P<0.05$),其他土层的速效磷含量随退化现象的发生并没有表现出显著差异。分析不同土层的养分变化特征发现,不同土层土壤全氮含量对退化十分敏感。未退化区不同土层土壤全氮含量没有发生显著变化,但随着退化发生,尤其当高寒草甸发生严重退化时,不同土层土壤全氮含量发生显著变化($P<0.05$)。但不同土层土壤全磷、全钾含量的差异性没有表现出相似规律,即随着退化,不同土层全磷、全钾含量无显著性变化。就铵态氮而言,未退化和中度退化土壤中不同土层土壤铵态氮含量差异显著($P<0.05$),且各退化区

0~2 cm 土层的铵态氮含量均最高,分别为 33.43、32.69 和 15.03 mg/kg。未退化区和重度退化区的 0~2 和 2~5 cm 土层土壤速效磷含量显著高于 5~10 cm 土壤,中度退化区的各土层速效磷含量之间差异显著($P<0.05$)。

对不同退化程度土壤粒径组成的分布特征分析可以看出(表 3),不同退化程度高寒草甸土壤粒径组成具有一定差异。重度退化区 0~2、2~5 cm 土层土壤石砾含量最高,中度退化区 5~10 cm 土层土壤石砾含量显著高于未退化、重度退化区相同土层石砾含量($P<0.05$)。随着退化的加剧,各土层的粗砂粒含量整体呈上升趋势,而细砂粒和黏粉粒含量却逐渐减少,尤其是在表土层土壤中。

从图 2 可以看出,在高寒草甸不同退化阶段,0~2 与 2~5 cm 土层土壤 pH 具有显著差异($P<0.05$),随退化程度的增大,pH 呈现增加趋势。不同土层中 5~10 cm 的土壤呈弱酸性,随着退化加剧,其 pH 逐渐呈中性;2~5 cm 土层土壤最接近中性;表层的 pH 最大,其中未退化阶段的 pH 为 7.64,随着退化加剧,该土层 pH 呈现先增加后小幅度下降的趋势。

由图 3 可知,杂类草对 CO₂ 通量影响最大,杂类草的盖度和生物量是 CO₂ 通量的关键影响

表 2 不同退化程度高寒草甸的土壤养分特征
Table 2 Soil nutrient of alpine meadow with different degradation degrees

退化程度 Degradation degree	全氮/(g/kg) Total nitrogen			全磷/(g/kg) Total phosphorus			全钾/(g/kg) Total potassium			铵态氮/(mg/kg) Ammonium nitrogen			速效磷/(mg/kg) Available phosphorus		
	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm
未退化 No degraded	1.30±0.11 Ab	1.47±0.34 Ab	1.30±0.08 Ab	1.32±0.15 Aa	1.24±0.09 Ab	1.44±0.10 Aa	24.41±0.79 Ab	23.10±0.85 Ab	23.91±0.26 Ab	33.42±6.72 Aa	14.44±2.31 Bb	8.87±0.79 Cb	1.17±0.06 Aa	0.97±0.32 Aa	0.68±0.22 Bb
	1.42±0.20 Aab	1.14±0.04 Bc	1.34±0.14 Ab	1.27±0.01 Aa	1.34±0.08 Aa	1.11±0.2 Ab	23.24±0.64 Aa	23.03±0.55 Ab	24.38±2.20 Ab	32.69±2.13 Aa	22.07±7.06 Ba	13.05±5.22 CAa	1.08±0.24 Aa	0.84±0.11 Ba	0.56±0.02 Ch
中度退化 Moderate degraded	1.53±0.21 Ca	1.89±0.24 Aa	1.74±0.11 Ba	0.59±0.04 Ab	0.71±0.07 Ac	0.62±0.16 Ac	26.78±2.13 Aa	25.93±2.51 Aa	26.57±1.66 Aa	15.03±2.76 Ab	12.60±2.88 Bb	11.98±0.37 Bbb	1.07±0.03 Aa	0.97±0.15 Aa	0.84±0.05 Ba

注:表中数据为“平均值±标准差”(n=6)。同列不同小写字母表示不同退化程度差异显著(P<0.05),同行不同大写字母表示不同层次土壤养分分布特征差异显著(P<0.05)。

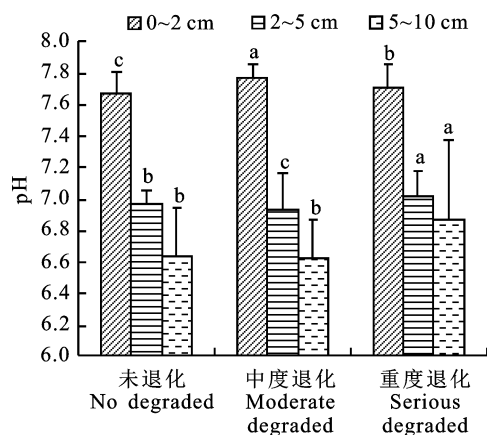
Note; The data are “mean ± standard” deviation(n=6). The different lowercase letters within the same columns indicate statistical difference of soil nutrient among alpine meadow with different degradation degrees (P<0.05). The different uppercase letters within the same rows indicate statistical difference of soil nutrient among different soil layers of the same degradation degree (P<0.05).

表 3 不同退化程度高寒草甸的土壤粒径组成特征
Table 3 Soil particle size composition of alpine meadow with different degradation degrees

退化程度 Degradation degree	石砾(>2 mm) Gravel			粗砂粒(0.25~2 mm) Sand			细砂粒(0.075~0.25 mm) Fine sand			粘粉粒(<0.075 mm) Clay			%
	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm	
未退化 No degraded	41.8±0.06 Ab	41.0±1.59 Aab	49.4±3.82 Ab	24.7±2.19 Ab	28.3±1.67 Ac	28.5±1.23 Ab	22.8±2.16 Aa	20.0±2.52 Aa	13.5±2.55 Ba	13.7±2.18 Aa	12.8±2.87 Aa	8.7±0.71 Ba	
	37.9±3.75 Bb	37.2±2.32 Bb	58.5±2.33 Aa	29.8±2.15 ABa	31.2±0.95 Ab	27.1±1.32 Bb	20.7±0.97 Aa	18.6±0.67 Aa	13.1±1.96 Ba	11.6±2.09 Aa	13.1±0.81 Aa	7.1±0.36 Bb	
中度退化 Moderate degraded	49.0±6.33 Aa	44.3±6.09 Aa	42.5±2.79 Bc	31.4±4.08 Ba	36.5±0.21 Ba	40.1±3.07 Aa	12.0±2.94 Ab	14.5±0.43 Bb	10.0±0.93 Cb	7.7±0.29 Bb	9.2±1.17 Ab	7.2±0.73 Bb	

注:表中数据为“平均值±标准差”(n=6)。同列不同小写字母表示不同退化程度粒径组成差异显著(P<0.05),同行不同大写字母表示相同退化程度不同层次土壤粒径组成差异显著(P<0.05)。

Note; The data are “mean ± standard” deviation (n=6). The different lowercase letters within the same columns indicate statistical difference of soil particle size composition among alpine meadow with different degradation degrees (P<0.05). The different uppercase letters within the same rows indicate statistical difference of soil particle size composition among different soil layers of the same degradation degree (P<0.05).



不同小写字母表示不同退化程度下相同土层土壤 pH 差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences in soil pH of the same soil layer under different degradation degrees ($P < 0.05$)

图2 高寒草甸不同退化阶段土壤 pH 的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of soil pH of alpine meadow with different degradation degrees

因子,禾本科植物和苔藓厚度影响较少。不同土层土壤 pH 均是影响 CO_2 通量的首要因子。在 0~2 和 2~5 cm 土层中土壤团聚体(土壤粒径)组成也是影响 CO_2 通量的重要因子,尤其是粗砂粒和黏粉粒含量。5~10 cm 土层土壤中除 pH 之外,养分如全磷含量十分重要。

3 讨论

3.1 草地退化对高寒草甸植被和土壤理化性质的影响

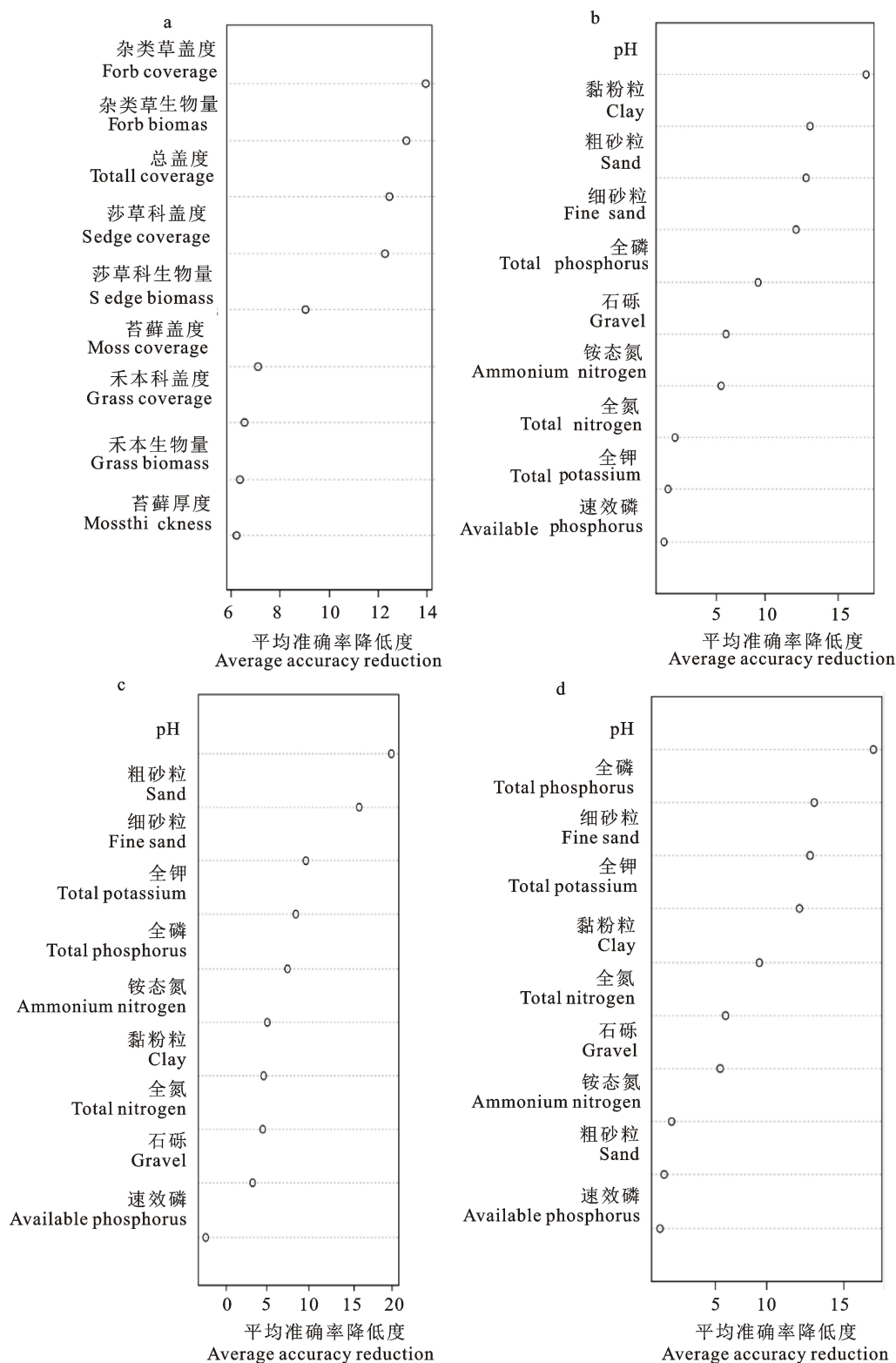
过度放牧和全球气候的变化,导致黄河源区高寒草甸发生退化,出现大面积“黑土滩”退化草地,严重破坏高寒草甸生态环境和降低生产力^[20]。伴随着草地退化程度加剧,草地植被群落特征发生显著变化^[21]。本研究结果表明,随着高寒草甸的退化,莎草科植物如矮嵩草和小嵩草等优势物种逐渐被毒杂草所取代。在未退化区,莎草科植物盖度为 60.67%,随着草地退化程度加大,莎草科植物盖度逐渐降低。在草地严重退化区,莎草科植物盖度是未退化区的 1/36,杂类草盖度是未退化区的 7.48 倍,该结果与尚占环等^[22]研究结果相似。研究表明杂类草植物更适应于干燥疏松的土壤环境,随着高寒草甸的退化,秃斑地增加,土壤含水量降低,为直根系杂类草的生长提供了良好条件。同时杂类草的根系分泌物也影响其他优良植被建植^[23]。本研究发现未退

化区具有较高的植被盖度和生物量,随着退化程度加大可食牧草盖度降低,优良牧草逐渐消失,毒杂草增加,草地生产力明显下降。

草地退化不仅对植被造成影响,还会引起土壤的退化。本研究结果表明,未退化区的土壤全氮含量显著低于重度退化区,且 2~10 cm 土层的土壤养分含量高于 0~2 cm,该结果与侯扶江等^[24]、孙华方等^[25]研究结果不同。研究表明,较高的植被覆盖能够降低淋溶效应^[26],高寒草甸退化会引起草地养分淋溶效应增加。有报道表明,由于植被能够从土壤中吸收氮素等养分,会降低草地土壤的全氮含量^[27]。高寒草甸植被凋落物由于气温偏低,微生物活动微弱,氮素返回土壤需要较长时间,因此高寒地区草地氮素输入效率很低^[28]。速效养分如铵态氮含量在退化过程中表现出与全效养分相反的趋势。本研究结果表明,随着退化程度加剧,铵态氮含量降低,尤其在重度退化区,土壤铵态氮含量仅是未退化区和中度退化区土壤的一半。可能是随着高寒草甸退化,土壤微生物数量和多样性减少的缘故^[29-30]。土壤微生物是土壤养分转化的关键因子,较高微生物数量和多样性有利于速效养分的转化和积累^[31],所以,本研究中未退化区土壤速效氮含量显著高于重度退化区。

3.2 草地退化对高寒草甸 CO_2 通量的影响

CO_2 释放是碳酸盐风化、植物体和根系的自养呼吸、土壤微生物的异养呼吸、菌根的分解代谢和土壤动物的呼吸作用的总和^[32],这一过程受到许多因素影响。本研究发现,随着草地退化的加剧, CO_2 通量减小,这种变化趋势可能与植被盖度变化相关。未退化区域植被盖度最大,且莎草科植物占绝对优势(表 1)。莎草科植物根系十分发达,较大的地下生物量可能对 CO_2 通量有较大的贡献^[14,33],因此未退化区 CO_2 通量最大。Kheirfam^[34]研究发现, CO_2 通量与有机体地上生物量密切相关,本文研究也得出相似结论。本研究中重度退化区莎草科地上生物量为未退化的 1/42,其 CO_2 通量显著低于未退化区。随机森林分析表明,杂类草盖度和生物量是影响 CO_2 通量的关键因子(图 3)。随着高寒草甸发生退化,杂类草盖度和生物量逐渐增加, CO_2 通量呈现逐渐下降的趋势,这可能是由于杂类草呼吸速率较低导致较低的 CO_2 通量。此外,退化高寒草甸土壤呼吸减弱^[4],也会降低高寒草甸 CO_2 通量。除植



a. 植被特征重要性排序; b. 0~2 cm 土壤理化性质重要性排序; c. 2~5 cm 土壤理化性质重要性排序; d. 5~10 cm 土壤理化性质重要性排序

a. The importance ranking of vegetation characteristics; b. The importance ranking of 0—2 cm soil physical and chemical properties; c. The importance ranking of 2—5 cm soil physical and chemical properties; d. The importance ranking of 5—10 cm soil physical and chemical properties

图 3 不同退化高寒草甸 CO₂ 通量影响因子重要性排序

Fig. 3 Importance ranking of influencing factors of CO₂ flux of alpine meadow with different degradation degrees

被对 CO₂ 通量产生影响外,土壤理化性质也是引起 CO₂ 通量变化的重要环境因子。本研究结果表明各土层的土壤 pH 是影响 CO₂ 通量的重要因子。pH 是评价土壤健康的一项重要指标,直接影响土壤物理性质,影响土壤动物和微生物的生长。土壤动物和微生物是土壤呼吸的主要贡献者。pH 的高低会引起土壤微生物和动物的数量和群落结构发生明显变化,间接对土壤 CO₂ 通量产生影响^[32,35]。除 pH 之外,土壤团聚体也是影响 CO₂ 通量的重要因子。土壤团聚体是土壤组成的基本单元^[36],直径较小的土壤团聚体因具有胶体特性,能够吸附和聚集土壤养分,显著影响土壤的养分和水分含量,影响植被的生长。本研究发现,随着草地退化的加剧,各土层的粗砂粒含量整体呈上升趋势,而直径较小的细砂粒和黏粉粒含量却逐渐减少,导致退化区土壤速效养分降低,不利于植被和土壤动物微生物的生长,间接影响高寒草甸 CO₂ 通量。

4 结 论

不同退化程度高寒草甸 CO₂ 通量具有显著差异性,随高寒草甸退化程度加剧,CO₂ 通量随之降低。草地植被特征和土壤理化性质直接影响高寒草甸 CO₂ 通量变化,其中杂类草盖度与 CO₂ 通量呈现极显著负相关($P < 0.01$),与植被总盖度呈现极显著正相关($P < 0.01$);土壤 pH 和土壤粒径能够明显提高高寒草甸 CO₂ 通量。因此,在研究黄河源区高寒草甸碳排放时,应考虑植被特征和土壤团聚体组成的影响。

参考文献 Reference:

- [1] 曹明奎,于贵瑞,刘纪远,等.陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟[J].中国科学(D辑:地球科学),2004(S2):1-14.
CAO M K, YU G R, LIU J Y, *et al.* Multi scale experimental observation and cross scale mechanism simulation of terrestrial ecosystem carbon cycle[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2004(S2):1-14.
- [2] BLACK T A, HARTOG G D, NEUMANN H H, *et al.* Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2(3):219-229.
- [3] SCHULZE E D, WIRTH C, HEIMANN M. Managing forests after Kyoto [J]. *Science*, 2000, 289(5487):2058-2059.
- [4] 王 斌,李 洁,姜微微,等.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[J].中国环境科学,2012,32(10):1764-1771.
WANG B, LI J, JIANG W W, *et al.* Impacts of the rangeland degradation on CO₂ flux and the underlying mechanisms in the Three-River Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(10):1764-1771.
- [5] 於 方,朱文泉,曹 东,等.青海省因草地生态破坏造成土壤流失的经济损失核算[J].中国环境科学,2009,29(1):90-94.
YU F, ZHU W Q, CAO D, *et al.* Economic cost of soil erosion from grassland degradation in Qinghai province[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):90-94.
- [6] 刘敏超,李迪强,栾晓峰,等.三江源地区生态系统服务功能与价值评估[J].植物资源与环境学报,2005,14(1):40-43.
LIU M CH, LI D Q, LUAN X F, *et al.* Ecosystem services and its value evaluation of Sanjiangyuan Region[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2005, 14(1):40-43.
- [7] 龙 晶.三江源区位置面积及景观生态遥感研究[J].林业资源管理,2005(4):30-34.
LONG J. Remote sensing analysis of the Three-rivers' head-stream region [J]. *Forestry Resource Management*, 2005(4):30-34.
- [8] 陈国明.三江源地区“黑土滩”退化草地现状及治理对策[J].四川草原,2005,10(2):1-3.
CHEN G M. The status of the degraded pasture and its strategies of management in black beach of the headwater region of the Three River[J]. *Journal of Sichuan Grassland*, 2005, 10(2):1-3.
- [9] 汪诗平.青海省“三江源”地区植被退化原因及其保护策略[J].草业学报,2003,12(6):1-9.
WANG SH P. Vegetation degradation and protection strategy in the “Three rivers fountainhead” area in the Qinghai province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(6):1-9.
- [10] 蔡晓布,张永青,邵 伟.藏北高寒草原草地退化及其驱动力分析[J].土壤,2007,39(6):855-858.
CAI X B, ZHANG Y Q, SHAO W. Degradation and mechanism of grassland of north Tibet alpine prairie[J]. *Soils*, 2007, 39(6):855-858.
- [11] 王 谋,李 勇,潘 胜,等.气候变化对青藏高原腹地可持续发展的影响[J].中国人口·资源与环境,2004,14(3):92-95.
WANG M, LI Y, PAN SH, *et al.* Impact of climate change on sustainable development in the hinterland of Qinghai Tibet Plateau[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2004, 14(3):92-95.
- [12] 李 其,刘 琳,蔡义民,等.川西北高寒沙化草地治理恢复过程中 CO₂ 通量变化[J].应用与环境生物学报,2018,24(3):441-449.
LI Q, LIU L, CAI Y M, *et al.* Changes in CO₂ flux for different recovery processes of desertification in the alpine meadows of Northwest Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2018, 24(3):441-449.
- [13] 郭小伟,戴黎聪,李以康,等.不同退化程度下的高寒草甸主要温室气体通量[J].水土保持研究,2019,26(5):188-194,209.
GUO X W, DAI L C, LI Y K, *et al.* Major greenhouse gas fluxes in different degradation levels of alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5):188-194,209.

- [14] SHI P L, SUN X M, XU L L, *et al.* Net ecosystem CO₂ exchange and controlling factors in a steppe-Kobresia meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2006(S2): 207-218.
- [15] 周青平, 杨 阳. 青海草地资源可持续发展道路的探索[J]. 青海畜牧兽医杂志, 1999, 29(2): 31-34.
ZHOU Q P, YANG Y. Sustainable development of grassland resources in Qinghai Province[J]. *Qinghai Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 1999, 29(2): 31-34.
- [16] LASHOF D A. The dynamic greenhouse: feedback processes that may influence future concentrations of atmospheric trace gases and climatic change[J]. *Climatic Change*, 1989, 14(3): 213-242.
- [17] LI Q L, PERRY G, BRIERLEY G, *et al.* Quantitative assessment of degradation classifications for degraded alpine meadow (heitutan), Sanjiangyuan, Western China [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 25(5): 417-427.
- [18] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 等. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J]. 草业科学, 2002, 19(9): 1-5.
MA Y SH, LANG B N, LI Q Y, *et al.* Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow river source region [J]. *Prataculturae Science*, 2002, 19(9): 1-5.
- [19] KHEIRFAM H. Increasing soil potential for carbon sequestration using microbes from biological soil crusts[J]. *Journal of Arid Environments*, 2020, 172: 104022.
- [20] 李雪萍, 李建宏, 刘永刚, 等. 甘南草原不同退化草地植被和土壤微生物特性[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1252-1259.
LI X P, LI J H, LIU Y G, *et al.* The vegetation and soil microorganism characteristics of different degraded grassland in Gannan steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1252-1259.
- [21] 刘育红, 魏卫东, 杨元武, 等. 高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J]. 西北农业学报, 2018, 27(4): 480-490.
LIU Y H, WEI W D, YANG Y W, *et al.* Redundancy analysis on relationships between grassland vegetation and soil factors on degraded alpine meadow[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(4): 480-490.
- [22] 尚占环, 丁玲玲, 龙瑞军, 等. 江河源区退化高寒草地土壤微生物与地上植被及土壤环境的关系[J]. 草业学报, 2007, 16(1): 34-40.
SHANG ZH H, DING L L, LONG R J, *et al.* Relationship between soil microorganisms, above-ground vegetation, and soil environment of degraded alpine meadows in the headwater areas of the Yangtze and Yellow Rivers, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(1): 34-40.
- [23] 史刚荣. 植物根系分泌物的生态效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 97-101.
SHI G R. Ecological effects of plant root exudates[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 97-101.
- [24] 侯扶江, 南志标, 肖金玉, 等. 重牧退化草地的植被、土壤及其耦合特征[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 915-922.
- [25] 孙华方, 李希来, 金立群, 等. 黄河源区人工草地植被群落和土壤养分变化[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 25-30, 38.
SUN H F, LI X L, JIN L Q, *et al.* Changes of vegetation community and soil nutrients of artificial grassland in the source zone of the Yellow River[J]. *Water and soil conservation Bulletin*, 2019, 39(3): 25-30, 38.
- [26] 杨 阳, 田莉华, 田浩琦, 等. 增温对川西北高寒草甸草场植物凋落物分解的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(10): 35-46.
YANG Y, TIAN L H, TIAN H Q, *et al.* Effect of climate warming on decomposition of plant litter in alpine meadow pastures in Northwestern Sichuan[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 35-46.
- [27] 李以康, 韩 发, 冉 飞, 等. 三江源区高寒草甸退化对土壤养分和土壤酶活性影响的研究[J]. 中国草地学报, 2008, 30(4): 51-58.
LI Y K, HAN F, RAN F, *et al.* Effect of typical alpine meadow degradation on soil enzyme and soil nutrient in source region of three rivers [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(4): 51-58.
- [28] MOHAMED A, ASTLEY H, KUN C, *et al.* A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(8): 2530-2543.
- [29] 于健龙, 石红霄. 高寒草甸不同退化程度土壤微生物数量变化及影响因子[J]. 西北农业学报, 2011, 20(11): 77-81.
YU J L, SHI H X. Changes of microbes population in the different degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(11): 77-81.
- [30] 孙华方, 李希来, 金立群, 等. 黄河源人工草地土壤微生物多样性对建植年限的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 46-58.
SUN H F, LI X L, JIN L Q, *et al.* Response of soil microbial diversity to planting years of artificial grassland in the source of Yellow River[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(2): 46-58.
- [31] 郭 晨. 浅析微生物对土壤肥力的影响[J]. 吉林农业, 2018(12): 69.
GUO CH. Effect of microorganism on soil fertility[J]. *Jilin Nongye*, 2018(12): 69.
- [32] HANSON P J, EDWARDS N T, GARTEN C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [33] 李成一, 李希来, 孙华方, 等. 高寒湿地旱化过程及其对 CO₂ 交换的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 750-758.
LI CH Y, LI X L, SUN H F, *et al.* Drought processes of alpine wetland and their influences on CO₂ exchange[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(3): 750-758.
- [34] KHEIRFAM H. Increasing soil potential for carbon sequestration using microbes from biological soil crusts[J].

- Journal of Arid Environments*, 2020, 172:104022.
- [35] 孙华方,李希来,李成一,等. 黄河源区建植 19 年人工草地生物结皮 CO₂ 通量与叶绿素荧光参数的变化[J]. 草地学报, 2021, 29(5):894-903.
- SUN H F, LI X L, LI CH Y, *et al.* Changes of CO₂ fluxes and chlorophyll fluorescence of biological soil crusts in a 19-year artificial grassland in the source zone of the yellow river[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(5):894-903.
- [36] 魏茂宏,林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3):679-686.
- WEI M H, LIN H L. Soil particle size distribution and its fractal dimension among degradation sequences of the alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow River, Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3):679-686.

Variation of CO₂ Flux in Process of Alpine Meadow Degradation in Zone of Yellow River Source

SUN Huafang¹, LI Xilai¹, SU Xiaoxue¹, JIN Liquan^{1,2},
ZHANG Jing¹, Azhuomaoshiji¹ and LIU Kai³

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Grassland Station of Huangyuan County, Huangyuan Qinghai 812100, China;

3. Qinghai Provincial Grassland Station, Xining 810008, China)

Abstract The CO₂ flux in the process of alpine meadow degradation was measured by portable CO₂ measuring system (LI-8100A), so as to quantify the effect of degradation on carbon emission in Henan county of Qinghai province. The results showed that the CO₂ flux of alpine meadow was significantly reduced along with the severity of degradation. The CO₂ emission of non-degraded alpine meadow [12.44 μmol/(m² · s)] was significantly higher than that of the severely degraded alpine meadow [4.64 μmol/(m² · s)], and there was no significant difference between moderate and severely degraded alpine meadows. The content of total nitrogen (TN) and the available nutrients increased with the severity of the degradation, but the content of total phosphorus (TP) presented an inverse trend. Random forest analysis showed that the coverage and biomass of forbs were the key factors to reduce CO₂ flux. Soil characteristics, such as soil pH, fine sand content (0—2 cm and 2—5 cm soil layers) and TP of 5—10 cm soil layer, played significant role in promoting CO₂ flux. Thus, vegetation and soil conditions altered by degradation were the vital process of carbon emission in alpine grassland. Therefore, it is necessary to pay attention to the changes of vegetation and soil for studying carbon emission of alpine meadow in the zone of the Yellow River source.

Key words CO₂ flux; Alpine meadow degradation; Vegetation characteristics; Soil characteristics; Random forest

Received 2021-04-18

Returned 2021-08-29

Foundation item Department of Science and Technology of Qinghai Province (No. 2020-ZJ-904); National Natural Science Foundation of China (No. 31872999); Technology Integration and Demonstration of Ecological Restoration and Function Improvement of Sanjiangyuan National Park (No. LHZX-2020-08); the Project of Innovation and Talent Introduction Program of Colleges and Universities (No. D18013).

First author SUN Huafang, female, doctoral student. Research area: alpine ecological restoration and environmental protection. E-mail: 1219493914@qq.com

Corresponding author LI Xilai, male, professor. Research area: alpine ecological restoration and environmental protection. E-mail: xilai-li@163.com

(责任编辑: 顾玉兰 Responsible editor: GU Yulan)