

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0014

ZHANG Guangru, ZHANG Fawei, YANG Yongsheng, et al. Vegetation and soil respiration at different degradation stages of an alpine meadow in the Sanjiangyuan region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):662-670. [张光茹, 张法伟, 杨永胜, 等. 三江源高寒草甸不同退化阶段植被和土壤呼吸特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):662-670.]

## 三江源高寒草甸不同退化阶段植被和土壤呼吸特征

张光茹<sup>1,5</sup>, 张法伟<sup>2</sup>, 杨永胜<sup>1,6</sup>, 贺慧丹<sup>3</sup>, 祝景彬<sup>1,5</sup>, 罗 谨<sup>1</sup>,  
王春雨<sup>1,5</sup>, 罗方林<sup>1,5</sup>, 王军邦<sup>1,4</sup>, 李英年<sup>1,6</sup>

(1. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 洛阳师范学院 生命科学学院, 河南 洛阳 471934; 3. 枣庄学院, 山东 枣庄 277100; 4. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 5. 中国科学院大学, 北京 100049; 6. 中国科学院 高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810008)

**摘 要:** 通过监测三江源玛沁县高寒草甸 2017 年度植被特征及土壤呼吸通量, 探讨了不同退化阶段植被群落、土壤呼吸特征及其协同关系, 并分析了土壤呼吸的温度敏感性。结果表明: 随着高寒草甸退化程度加剧, 禾本科植物重要值降低, 毒杂草显著增加( $P < 0.05$ ); 植被盖度、物种数、多样性指数显著下降( $P < 0.05$ ), 重度退化阶段的地上生物量比轻度、中度退化阶段降低了 25.36%、22.37%( $P < 0.05$ ); 在中度退化条件下, 均匀度指数和地下生物量显著增多( $P < 0.05$ )。在各退化阶段, 土壤呼吸年内均呈单峰式变化过程, 表现出生长季高、非生长季低的特征, 植物生长旺季(7-8 月)最高, 且与 5 cm 深度处土壤温度之间呈显著指数关系( $P < 0.05$ ); 2017 年轻度退化、中度退化和重度退化阶段的土壤呼吸碳排放总量分别为  $626.89 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $386.66 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $393.81 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 同时, 土壤呼吸与植被群落演替具有显著的协同性, 随着退化程度加剧土壤呼吸速率下降。轻度退化、中度退化、重度退化阶段土壤呼吸的温度敏感性系数( $Q_{10}$ )分别为 2.82、3.54 和 2.35, 表明中度退化条件下的温度敏感性最强, 重度退化条件下最弱。

**关键词:** 高寒草甸; 退化阶段; 植被群落特征; 土壤呼吸; 协同关系; 三江源

**中图分类号:** S812.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0662-09

### 0 引言

草地占陆地生态系统总面积的 40%<sup>[1]</sup>, 在全球碳循环中发挥着重要的碳汇功能<sup>[2]</sup>。青藏高原素有“中华水塔”之称, 草地面积为  $0.82 \times 10^6 \text{ km}^2$ <sup>[3]</sup>, 其中高寒草甸是青藏高原分布最为广泛的植被类型之一<sup>[4]</sup>, 是中国生态安全和水源涵养的重要功能区<sup>[5]</sup>, 也是农牧业发展的重要根基<sup>[6]</sup>, 在青藏高原生态安全中占有十分重要的地位<sup>[7]</sup>。

青藏高原高寒草甸对气候变化和人类活动的反应极为敏感, 自 20 世纪 80 年代以来, 气候变暖 and 人类活动加剧, 导致高寒草甸生态系统退化严

重, 表现为珍稀动植物消失, 植被群落结构恶化<sup>[8]</sup>, 牧草产量降低等<sup>[9]</sup>。草地的退化进一步破坏了区域生态系统平衡和稳定<sup>[10]</sup>, 不仅直接或间接影响到区域居民的生活生计, 也导致水涵养功能、固碳能力、物种多样性衰减等问题<sup>[11]</sup>。土壤呼吸是土壤碳输出的主要途径<sup>[12]</sup>, 据估计, 全球土壤每年释放大气的  $\text{CO}_2$  量可达  $76.5 \text{ Pg C}^{[13-14]}$ , 土壤呼吸的微小变化都会对大气  $\text{CO}_2$  浓度产生重大影响<sup>[15]</sup>。当草地发生退化时, 其土壤呼吸格局将发生较大的改变, 进而影响生态系统的碳收支<sup>[16]</sup>。已有青藏高原地区的研究较多地集中在生物量与生产力<sup>[5]</sup>、多样

收稿日期: 2019-11-11; 修订日期: 2020-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604802); 国家自然科学基金项目(41877547; 31270523); 青海省科技基础条件平台项目(2018-ZJ-T09)资助

作者简介: 张光茹(1994-), 女, 山东潍坊人, 2017 年在山西农业大学获学士学位, 现为中国科学院西北高原生物研究所在读硕士研究生, 从事全球变化生态学研究. E-mail: 18404967849@163.com

通信作者: 李英年, 研究员, 从事全球变化生态学研究. E-mail: ynli@nwipb.cas.cn.

性<sup>[17]</sup>及土壤理化性质等方面,对于不同退化阶段的土壤呼吸研究相对较少<sup>[16,18-19]</sup>。虽然也有学者进行了高寒草甸植被不同退化阶段土壤呼吸的研究<sup>[20-22]</sup>,但因地域条件、植被类型、植物种类组成和土壤环境的限制,以及对于退化阶段的界定不同,其结果可出现较大的不稳定性。因此,不同地区不同退化阶段土壤呼吸及其与植被分布特征的关系仍是值得关注的科学问题。本文以三江源玛沁县不同退化程度的高寒草甸为研究对象,分析不同退化阶段高寒草甸植被分布特征及与土壤呼吸的协同关系,以期为青藏高原高寒草甸退化修复治理以及土壤碳循环研究提供科学依据。

## 1 研究区与方法

### 1.1 研究区概况及样地设置

研究区位于青海南部三江源玛沁县大武镇西 5 km 处具有代表性的冬季放牧草场,中心区地理坐标为 100°12' E、34°28' N,海拔 3 715 m。果洛州气象局气象数据显示,所在区域年平均气温为 -0.5 °C,气温低,日温差大。年平均降水量为

514 mm,降水多集中在 6-9 月(占年降水量的 80%)。研究区域属高原大陆性半湿润气候,冬半年干燥少雨,夏半年凉爽湿润。研究区草地类型为高寒矮嵩草草甸,植被优势种为矮嵩草(*Kobresia humilies*)、高原早熟禾(*Poa alpigena* Lindm.)等。伴生种有鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、异叶米口袋(*Gueldenstaedtia diversifolia* Maxim)、麻花苣(*Gentiana straminea* Maxim)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、高原毛茛(*Ranunculaceae*)等<sup>[23]</sup>。植被群落结构简单、分异不明显。土壤为高山草甸土,土壤有机质含量高,粗骨性强<sup>[24]</sup>。

根据赵新全<sup>[25]</sup>对高寒草甸植被退化等级的划分标准,在相近的毗邻区分别选择因放牧干扰导致的轻度退化、中度退化和重度退化等 3 个不同退化阶段的样地(表 1),并于 2016 年 8 月进行围栏封育。在每个退化阶段草地设置一个大小为 20 m×30 m 的样地,在 15 m×25 m 范围内按对角设置“X”型观测样方(即 4 个角点和中心点,共 5 个)。

表 1 不同退化阶段样地植被特征

Table 1 Vegetation characteristics of the plots at different degradation stages

退化阶段	总盖度	平均高度/cm	放牧干扰	优势种
轻度退化(LD)	80% ~ 100%	1 ~ 4	较小	高原早熟禾、矮嵩草、钝叶银莲花( <i>Anemone obtusiloba</i> )等
中度退化(MD)	60% ~ 80%	4 ~ 6	适中	矮火绒草、麻花苣、黄帚橐吾( <i>Ligularia virgaurea</i> )等
重度退化(HD)	60% 以下	6 ~ 10	较大	矮火绒草、黄帚橐吾等

### 1.2 土壤温度测量

在每个样地“X”中心点北侧 1 m 处架设土壤湿度自动观测仪(美国 Onset 公司 HOBO USB Micro Station),自动测量地表下 5 cm 处土壤温度,每 30 min 记录一次数据。

### 1.3 植被群落特征分析

在每个样地内设置的“X”型 4 个角点和中心点的东侧 1 m 处,用刈割收获法收集 50 cm×50 cm 样方内植物群落地上部分,并置入信封内。然后,在样方内采用内径 8 cm 的根钻,分 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 三个土层收集地下部分(每个样方 3 钻混合),根系土柱带回实验室经孔径 0.28 mm 筛选、分拣、冲洗后置入信封,与地上部分一并置入 65 °C 烘箱中烘干 48 h 以上达恒重时称重,获得地上、地下生物量数据。

在上述生物量观测样方的西侧 1 m 处设定

50 cm×50 cm 的固定样方,2017 年 8 月底调查植物群落结构,调查样方内组成物种单种的盖度和群落总盖度,用卷尺测量样方内植物群落平均高度和频度,并计算不同物种的重要值、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数<sup>[26]</sup>。

计算公式为

$$\text{物种重要值} = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3 \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^R (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

$$E = H / \ln R \quad (3)$$

上述式中:  $H$  为 Shannon-Wiener 多样性指数;  $E$  为 Pielou 均匀度指数;  $R$  为物种数;  $P_i$  为第  $i$  个种的重要值占所有种重要值之和的比例。

### 1.4 土壤呼吸测量与分析

在每个样地内设置的“X”型中心点南侧,自东向西每 2 m 并排布设土壤碳通量自动测量系统(美国 LI-COR 公司 LI-8100A),采用内径为 20 cm 的

PVC管底座,并在监测前日齐地面剪去活体植物和清理枯落物以使地表裸露。在年内随机选择不同日期,于北京时间09:00-11:00对样地监测土壤呼吸速率和地表下5 cm土壤温度,每个样地3次重复,取平均值。共进行了40次监测。

大量研究表明,利用LI-8100A监测的土壤呼吸速率与地表下5 cm土壤温度具有极显著的幂指数关系<sup>[27]</sup>。基于此,本文通过年内不同时期监测的土壤呼吸速率资料,依据地表下5 cm土壤温度的指数关系以及土壤温度的连续观测值,来计算得到土壤呼吸的全年变化状况。为了比较不同退化阶段土壤呼吸速率对温度的敏感性,还计算了敏感性系数( $Q_{10}$ ),即温度每升高10℃土壤呼吸速率增加的倍数( $Q_{10}=e^{10b}$ )<sup>[27]</sup>。

土壤呼吸速率计算公式为

$$SR=ae^{bT} \quad (4)$$

式中:SR为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $T$ 为地表下5 cm土壤温度(℃); $a$ 、 $b$ 为回归系数,分别表征截距和温度反应系数。

### 1.5 数据分析

本研究数据为2017年的观测值,其中土壤 $\text{CO}_2$ 呼吸速率在全年随机监测,植被群落调查在8月底9月初进行。采用SPSS 24对观测数据进行统计和分析,采用Excel 2016、Origin 2018作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同退化阶段土壤温度变化

图1为多层次土壤温湿度自动观测仪监测到的2017年不同退化程度地表下5 cm土壤温度逐日变化。重度退化阶段在生长季(5-9月)温度高,在冬季温度最低,年变化振幅较大,而中度退化和轻度退化样地振幅较小。在生长季(5-9月),轻度退

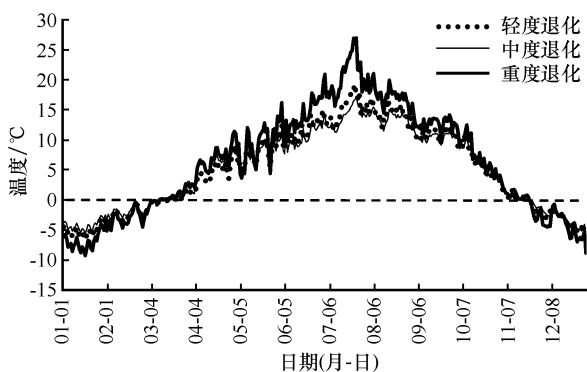


图1 5 cm深度土壤温度变化

Fig. 1 Variation of daily mean soil temperature at 5 cm depth

化、中度退化和重度退化阶段地表下5 cm土壤平均温度分别为11.98、11.26、14.77℃;在非生长季(1-4月及10-12月)平均温度分别为0.15、0.55、0.13℃;全年平均温度分别为5.08、5.01、6.23℃。

### 2.2 不同退化阶段植物群落结构特征

#### 2.2.1 物种组成及重要值

根据刘晓琴等<sup>[17]</sup>的研究,将植物调查物种划分为禾本科、莎草科、豆科、杂类草等(表2)。与轻度退化相比,中度和重度退化条件下禾本科植物在总体重要值分别降低了0.13、0.10。值得注意的是,在轻度退化条件下,早熟禾与垂穗披碱草的重要值分别为0.10和0.08;而在重度退化条件下,早熟禾的重要值为0.07,未观测到垂穗披碱草。即随着退化程度的加剧,群落上层逐渐由共优势种的早熟禾和垂穗披碱草变为单优势种的早熟禾。莎草科植物总体重要值随退化程度的加剧而升高,中度退化、重度退化较轻度退化条件下分别增加了0.08、0.03,矮蒿草和二柱头藜草在重度退化条件下重要值增加显著( $P<0.05$ )。豆科植物在不同退化阶段的变化不显著( $P>0.05$ )。杂类草植物的总体重要值在轻度、中度、重度退化条件下分别为0.53、0.58、0.57;矮火绒草和狼毒重要值显著增加( $P<0.05$ ),兰石草重要值显著降低( $P<0.05$ ),说明退化对其群落内部物种的组成及重要值产生了较大影响。随着退化程度的加剧,物种数、多样性指数显著降低( $P<0.05$ ),均匀度指数显著增加( $P<0.05$ )(表3)。

#### 2.2.2 植被生物量分布特征

监测不同退化阶段的植被地上、地下生物量(表4)发现,中度退化条件下地下生物量显著增加( $P<0.05$ ),重度退化下地上生物量分别比轻度、中度退化条件下降低了25.36%、22.37%,地下生物量分别较轻度退化、重度退化条件下高出54.82%、91.12%。重度退化下分种总盖度(指分盖度总和)较轻度、中度退化下分别降低了24.03%、24.58%。

### 2.3 不同退化阶段土壤呼吸特征及与植被结构、土壤温度的关系

土壤呼吸速率与地表下5 cm土壤温度日均值具有极显著的指数关系( $P<0.01$ )(图2)。不同退化程度下对应的拟合公式分别为

$$\text{轻度退化 } SR = 0.722e^{0.1047T} \quad (R^2=0.637) \quad (5)$$

$$\text{中度退化 } SR = 0.386e^{0.1267T} \quad (R^2=0.727) \quad (6)$$



表2 不同退化阶段物种重要值  
Table 2 Important values of species at different degradation stages

功能群	物种	重要值		
		轻度退化	中度退化	重度退化
禾本科	山地早熟禾( <i>Poa orinosa</i> )	0.10±0.03 <sup>a</sup>	0.05±0.01 <sup>a</sup>	0.07±0.02 <sup>a</sup>
	紫花针茅( <i>Stipa purpurea</i> )	0.03±0.02 <sup>a</sup>	0.03±0.02 <sup>a</sup>	0.02±0.02 <sup>a</sup>
	垂穗披碱草( <i>Elymus nutans</i> )	0.08±0.03		
莎草科	矮嵩草( <i>Kobresia humilis</i> )	0.05±0.00 <sup>b</sup>	0.07±0.00 <sup>ab</sup>	0.08±0.01 <sup>a</sup>
	二柱头藨草( <i>Scirpus distigmaticus</i> )	0.05±0.00 <sup>b</sup>	0.04±0.00 <sup>b</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>
	小嵩草( <i>Kobresia myosuroides</i> )	0.00±0.00 <sup>b</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>	
豆科	黄花棘豆( <i>Oxytropis ochrocephala</i> )	0.05±0.01 <sup>a</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>
	异叶米口袋( <i>Gueldenstaedtia diversifolia</i> )	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.03±0.01 <sup>b</sup>	0.05±0.01 <sup>ab</sup>
	青海黄芪( <i>Astragalus tanguticus</i> )	0.01±0.01 <sup>a</sup>	0.03±0.01 <sup>a</sup>	0.01±0.01 <sup>a</sup>
杂类草	矮火绒草( <i>Leontopodium nanum</i> )	0.01±0.00 <sup>b</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.10±0.01 <sup>a</sup>
	獐牙菜( <i>Swertia tetraptera</i> )	0.06±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.06±0.01 <sup>a</sup>
	麻花艽( <i>Gentiana straminea</i> )	0.05±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.06±0.01 <sup>a</sup>
	雪白委陵菜( <i>Potentilla nivea</i> )	0.02±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>	0.02±0.01 <sup>a</sup>
	黄帚橐吾( <i>Ligularia virgaurea</i> )	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.05±0.01 <sup>a</sup>
	线叶龙胆( <i>Gentiana farreri</i> )	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.04±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.01 <sup>a</sup>
	钝叶银莲花( <i>Anemone obtusiloba</i> )	0.04±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>	0.05±0.01 <sup>a</sup>
	兰石草( <i>Lancea tibetica</i> )	0.04±0.01 <sup>a</sup>	0.01±0.01 <sup>b</sup>	0.01±0.00 <sup>b</sup>
	青海刺参( <i>Morina kokonorica</i> )	0.01±0.01 <sup>a</sup>	0.05±0.03 <sup>a</sup>	
	蒙古蒲公英( <i>Taraxacum mongolicum</i> )	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.00±0.00 <sup>b</sup>	0.03±0.01 <sup>a</sup>
	短穗兔耳草( <i>Lagotis brachystachya</i> )	0.03±0.00		
	三裂叶毛茛( <i>Halerpestes tricuspis</i> )	0.01±0.01		
	独一味( <i>Lamiophlomis rotata</i> )	0.03±0.01		
	狼毒( <i>Stellera chamaejasme</i> )	0.01±0.01 <sup>b</sup>	0.05±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>
	柔软紫菀( <i>Aster tataricus</i> )	0.01±0.01		
	三脉梅花草( <i>Parnassia trinervis</i> )	0.00±0.00		
	纤杆蒿( <i>Artemisia demissa</i> )	0.02±0.01 <sup>a</sup>	0.02±0.01 <sup>a</sup>	0.03±0.01 <sup>a</sup>
	乳白香青( <i>Anaphalis lactea</i> )	0.01±0.01		
	鹅绒委陵菜( <i>Potentilla anserina</i> )	0.00±0.00 <sup>b</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.01±0.00 <sup>b</sup>
	湿生扁蕾( <i>Gentianopsis paludosa</i> )	0.00±0.00 <sup>a</sup>		0.02±0.01 <sup>a</sup>

注:同行不同字母表示在不同退化阶段同一物种差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表3 不同退化阶段植被多样性特征

Table 3 Vegetation diversity indices at different degradation stages

退化阶段	物种数/个	多样性指数	均匀度指数
轻度退化	20.0±0.63 <sup>a</sup>	2.85±0.03 <sup>a</sup>	0.95±0.00 <sup>b</sup>
中度退化	17.6±0.40 <sup>b</sup>	2.80±0.02 <sup>ab</sup>	0.98±0.00 <sup>a</sup>
重度退化	16.8±0.73 <sup>b</sup>	2.73±0.04 <sup>b</sup>	0.97±0.01 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示在不同退化阶段同一指标差异显著 ( $P < 0.05$ )。

$$\text{重度退化 } SR = 0.421e^{0.085T} (R^2=0.599) \quad (7)$$

上述式中:SR为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $T$ 为地表下5cm土壤温度( $^{\circ}\text{C}$ )。公式的决定系数 $R^2$ 较大,因此利用土壤温度观测资料可以拟合估算不同退化阶段的土壤呼吸速率。根据该方程进一步计

表4 不同退化阶段植被盖度和生物量

Table 4 Vegetation coverage and biomass at different degradation stages

退化阶段	群落分种 总盖度/%	地上生物量/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	地下生物量/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )
轻度退化	163.80±3.57 <sup>a</sup>	283.83±15.04 <sup>a</sup>	528.30±72.40 <sup>b</sup>
中度退化	165.00±5.68 <sup>a</sup>	272.87±63.15 <sup>a</sup>	817.91±56.99 <sup>a</sup>
重度退化	124.44±1.24 <sup>b</sup>	211.83±56.07 <sup>a</sup>	427.95±28.80 <sup>b</sup>

注:同列不同字母表示在不同退化阶段同一指标差异显著 ( $P < 0.05$ )。

算得到相应退化阶段土壤呼吸速率的温度敏感系数,轻度、中度和重度退化下 $Q_{10}$ 分别为2.82、3.54和2.35,可见中度退化条件下的温度敏感性最强,重度退化条件下最弱。

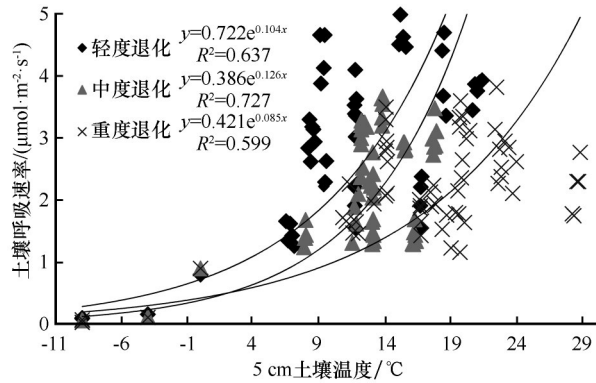


图2 高寒草甸不同退化阶段土壤呼吸速率与5 cm深度日均土壤温度的关系

Fig. 2 Relationship between soil respiration rate and daily mean soil temperature at 5 cm depth at different degradation stages of alpine meadow

利用指数关系和2017年地表下5 cm土壤温度日均值,拟合得到2017年不同退化程度高寒草甸土壤呼吸日排放量变化(图3)。可见,全年土壤日呼吸量在轻度退化下最高,中度和重度退化阶段变化趋势基本一致,只是在7月日间差异稍大。其月排放量也具有相同的规律(图4)。在大部分月份,土壤呼吸量表现出随退化阶段的加重而降低,但在7月出现了中度退化阶段排放量明显降低的现象,具体原因尚需要探究。

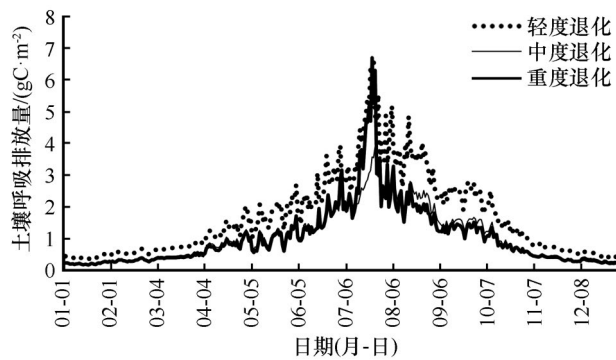


图3 高寒草甸不同退化阶段土壤呼吸日排放量变化  
Fig. 3 Variation of daily soil respiration at different degradation stages of alpine meadow

2017年轻度、中度、重度退化下土壤呼吸碳排放总量分别为626.89、386.66、393.81 gC·m<sup>-2</sup>。为更好地描述不同退化阶段植被群落特征与土壤呼吸的关系,对其进行了主成分分析。根据提取主成分所对应的特征值大于1的原则,共提取出3个主成分,累计贡献率达86.62%。其中第一主成分(排序轴1)贡献率为44.75%,所占权重最大,第二主

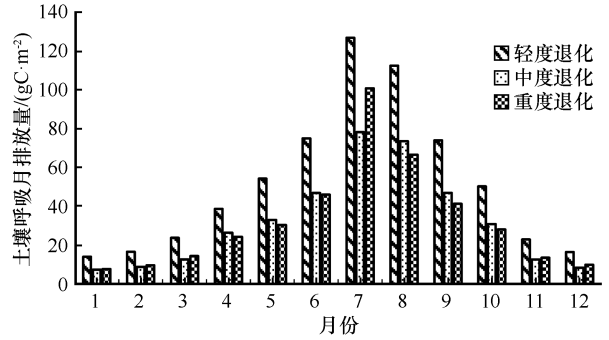
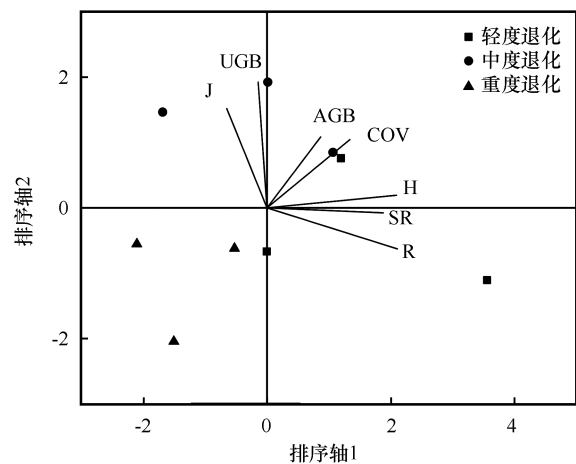


图4 高寒草甸不同退化阶段土壤呼吸月排放量

Fig. 4 Monthly soil respiration at different degradation stages of alpine meadows

成分(排序轴2)贡献率为24.49%,第三主成分贡献率为17.38%。本文只解释第一主成分和第二主成分。由图5可知,第一主成分轴主要反映高寒草原退化程度,自右向左表示草地退化程度的加剧,表现出地上生物量、盖度、多样性指数、物种数、土壤呼吸与第一主成分轴夹角较小,说明第一主成分轴主要反映这5个指标的变化。5个指标与第一主成分轴的夹角大小依次为土壤呼吸<多样性指数<物种数<盖度<地上生物量,故这5个指标与草地退化的相关程度依次为土壤呼吸>多样性指数>物种数>盖度>地上生物量。地下生物量、均匀度指数与第二主成分轴夹角较小,即这2个指标与第二主成分轴相关性较高,说明第二主成分轴反映地下生物



注: R为物种数 (species index); H为多样性指数 (diversity index); J为均匀度指数 (evenness index); COV为分种总盖度 (coverage); AGB为地上生物量 (aboveground biomass); UGB为地下生物量 (underground biomass); SR为土壤呼吸速率 (soil respiration rate)

图5 不同退化阶段样地群落与土壤呼吸特征的二维排序  
Fig. 5 Community and soil respiration characteristics of the plots at different degradation stages in a two-dimensional sequence

量与均匀度指数随草地退化的变化。由退化样地与草地群落特征的关系可知:地下生物量、均匀度指数与中度退化样地关联性较强;其他指标与轻度退化样地关联性较强;所有群落特征与重度退化样地关联性弱。进一步分析可知,地下生物量和均匀度指数在中度退化下具有更好的效果,地上生物量、盖度、多样性指数与物种数在轻度退化下效果更好,表明中度退化条件易对地下生物量与均匀度指数产生影响。

### 3 讨论

高寒草甸退化的原因主要是人类活动和自然因素<sup>[28]</sup>。其生态系统极其脆弱<sup>[29]</sup>,由于气候暖干化严重<sup>[30]</sup>,加上超载放牧<sup>[29]</sup>,极容易导致高寒草甸的退化。高寒草甸在退化过程中,植物群落结构和功能退化最为直观和敏感<sup>[31]</sup>。植物群落特征变化是反映草地退化程度的一种重要指征,也是退化导致草地生态系统功能改变的主要测度<sup>[32]</sup>。

群落多样性、均匀度等指标反映了群落的结构类型、发展阶段、稳定程度和生境差异<sup>[33]</sup>。在轻度退化条件下,草地群落物种多样性可以指示草地生态系统的稳定性和持续性<sup>[34]</sup>。研究显示,随着高寒草原退化程度加剧,植物种类组成简单化且多以杂类草为主,具有原生顶级群落代表性的物种(禾草科与莎草科植物)锐减,多样性指数呈降低趋势。均匀度在中度退化下增加,说明家畜采食和踩踏等活动使得适口性好的牧草丧失竞争能力和生机,最终被一些适口性较差的牧草植物所取代<sup>[35]</sup>,物种有所减少,物种多样性指数显著降低<sup>[36]</sup>,这与杨晓玫等<sup>[8]</sup>的研究结论相似。

生物量是植物群落转换能量能力的主要体现,是衡量生态系统生产能力强弱的最基本指标<sup>[37]</sup>,也是生态系统健康评价的重要依据<sup>[38]</sup>。调查结果显示,重度退化下地上生物量分别比轻度和中度退化条件下降低了 25.36%、22.37%,这是由于放牧系统中牲畜采食、踩踏等行为伤害了植物的正常组织、形态,抑制了植物生长<sup>[39]</sup>,植物在干扰下对地上和地下生物量重新分配。在中度退化条件下,由于牛羊对优质牧草的采食,植被盖度和物种数下降,优势物种多为黄帚囊吾、麻花苻等根系粗大杂草,导致其地下生物量有所增加<sup>[40]</sup>,分别较轻度退化和重度退化条件下高出 54.82%、91.12%,差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。

随着高寒草甸退化程度的加剧,植物群落结构简单化,土壤呼吸速率呈下降趋势,这可能是因为退化导致地下生物量降低,根系的自养呼吸减少,或放牧通过家畜采食、踩踏以及排泄直接地和间接地影响了草甸生态系统的土壤环境,从而影响到土壤呼吸<sup>[41]</sup>。出现这种现象的原因是,随着高寒草甸植被的退化,输入土壤的有机质等减少,土壤水分含量下降,同时土壤的退化改变了微生物的生活环境,造成土壤  $\text{CO}_2$  释放速率降低<sup>[42]</sup>。土壤呼吸的控制因子很多,除温度外,还有微生物活性<sup>[43]</sup>、氮素有效性<sup>[44]</sup>等。研究显示,中度退化条件下地下生物量增多,而土壤呼吸量减少,表明土壤呼吸可能受到其他条件的影响,需进一步研究。研究发现土壤呼吸速率与地表下 5 cm 土壤温度之间呈显著的指数关系,这与魏卫东等<sup>[42]</sup>、吴启华等<sup>[18]</sup>的结果相似。温度影响根呼吸<sup>[45]</sup>和微生物呼吸<sup>[46]</sup>,温度升高,根系和微生物活动加强,促进了呼吸速率的增加。轻度、中度和重度退化阶段的  $Q_{10}$  分别为 2.82、3.54 和 2.35,土壤呼吸的温度敏感性表现为中度退化下最强,重度退化下最弱,说明重度退化下土壤呼吸速率低,对温度变化的反应小,而中度退化时二者稳定性差,对温度变化响应大,而  $Q_{10}$  的差异主要受到温度、土壤含水量及有机碳有效性等的影响<sup>[47]</sup>。魏卫东等<sup>[42]</sup>的研究表明,不同退化程度下高寒草甸  $Q_{10}$  值变化范围为 2.78 ~ 3.42,本研究发现中度退化下  $Q_{10}$  值达到了 3.54,略有差异,对退化高寒草甸温度敏感性的影响有待进一步研究。土壤呼吸速率年内均呈单峰式变化过程,表现出生长季高,非生长季低。

### 4 结论

随着退化程度的加剧,植被盖度、地上生物量、物种数、多样性指数显著下降( $P < 0.05$ )。中度退化下地下生物量显著增多( $P < 0.05$ )。土壤呼吸速率随退化程度加剧而下降,与地表下 5 cm 土壤温度之间呈显著( $P < 0.05$ )的指数关系。土壤呼吸排放在中度退化条件下的温度敏感性最强,重度退化条件下最弱。与地表下 5 cm 土壤温度的拟合关系表明,年内土壤呼吸量呈现明显的单峰式变化过程,在生长季高,非生长季低,特别是在植物旺盛生长的 7-8 月最高。分析发现,三江源玛沁高寒草甸区轻度退化、中度退化、重度退化下 2017 年土壤呼吸碳排放总量分别为 626.89、386.66、393.81  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。



## 参考文献(References):

- [1] Lecain D R, Morgan J A, Schuman G E, et al. Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the shortgrass steppe of Colorado[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 93(1): 421 - 435.
- [2] Scurlock J M O. The global carbon sink: a grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 2010, 4(2): 229 - 233.
- [3] Ni J. A simulation of biomes on the Tibetan Plateau and their responses to global climate change[J]. *Mountain Research and Development*, 2009, 20: 80 - 89.
- [4] Zhou Huakun, Zhou Li, Zhao Xinquan, et al. A quantitative study on the plant population phenology in *Kobresia humilis* meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(4): 279 - 286. [周华坤, 周立, 赵新全, 等. 矮嵩草草甸植物种群物候学定量研究[J]. *草地学报*, 2002, 10(4): 279 - 286.]
- [5] Yang Yongsheng, Li Hongqin, Zhang Li, et al. Effects of fencing measurement on vegetation community structure and soil water-holding capacity in Batang alpine meadow [J]. *Mountain Research*, 2016, 34(5): 606 - 614. [杨永胜, 李红琴, 张莉, 等. 封育措施对巴塘高寒草甸植被群落结构及土壤持水能力的影响[J]. *山地学报*, 2016, 34(5): 606 - 614.]
- [6] Zhan Tianyu, Hou Ge, Liu Miao, et al. Different characteristics of vegetation and soil properties along degraded gradients of alpine grasslands in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 97 - 108. [詹天宇, 侯阁, 刘苗, 等. 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[J]. *草业科学*, 2019, 36(4): 97 - 108.]
- [7] Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3 - 12. [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3 - 12.]
- [8] Yang Xiaomei, Yao Tuo, Wang Lide, et al. Community structure and plant diversity under different degrees of degraded grassland in Tianzhu, Gansu [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(6): 11 - 18. [杨晓玫, 姚拓, 王理德, 等. 天祝不同退化程度草地植物群落结构与物种多样性研究[J]. *草地学报*, 2018, 26(6): 11 - 18.]
- [9] Zhang Deqiang, Zhou Guoyi, Wen Dazhi, et al. Effects of base fertilizer on yield and quality of forage grasses [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000 (Suppl 1): 22 - 27. [张德强, 周国逸, 温达志, 等. 不同基肥对退化坡地及牧草产量和质量的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2000 (增刊 1): 22 - 27.]
- [10] Jian S, Qin X. Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4): 291 - 299.
- [11] Li Hongqin, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Interannual variations of production and water use efficiency of the vegetation in alpine meadow [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 475 - 482. [李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 475 - 482.]
- [12] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 2001, 414(6860): 169 - 172.
- [13] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23 - 36.
- [14] Jing Yanli, Guan Dexin, Wu Jiabing, et al. Research progress on photosynthesis regulating and controlling soil respiration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 269 - 276. [井艳丽, 关德新, 吴家兵, 等. 光合作用调控土壤呼吸研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 269 - 276.]
- [15] Lin Litao, Sun Xuekai, Lei Qian, et al. The role of ecosystem photosynthetic rate and photosynthetic conditions in regulating soil respiration in a sandy grassland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 2107 - 2113. [林力涛, 孙学凯, 雷倩, 等. 光合速率与光合条件对沙质草地土壤呼吸的调控作用[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2107 - 2113.]
- [16] Wen Jun, Zhou Huakun, Yao Buqing, et al. Characteristics of soil respiration in different degraded alpine grassland in the source region of Three-River [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 209 - 218. [温军, 周华坤, 姚步青, 等. 三江源区不同退化程度高寒草原土壤呼吸特征[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 209 - 218.]
- [17] Liu Xiaoqin, Zhang Xiang, Zhang Lifeng, et al. Effects of enclosure duration on the community structure and species diversity of an alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5150 - 5162. [刘晓琴, 张翔, 张立锋, 等. 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5150 - 5162.]
- [18] Wu Qihua, Li Yingnian, Liu Xiaoqin, et al. Ecosystem respiration and carbon sink strength of the alpine weeds meadow in Qinghai-Tibetan Plateau under grazing gradient [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(4): 390 - 395. [吴启华, 李英年, 刘晓琴, 等. 牧压梯度下青藏高原高寒杂类草甸生态系统呼吸和碳汇强度估算[J]. *中国农业气象*, 2013, 34(4): 390 - 395.]
- [19] Wei Weidong, Liu Yuhong. The influence of different degraded degradation of alpine steppe in source area of Lantsang, Yellow and Yangtze River on soil respiration [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014(8): 1769 - 1773. [魏卫东, 刘育红. 三江源区高寒草原不同退化程度对土壤呼吸的影响[J]. *湖北农业科学*, 2014(8): 1769 - 1773.]
- [20] Lai Zhimin, Xue Xian, Lai Riwen, et al. Alpine meadows at different levels of degradation in the Beiluhe basin of Tibetan Plateau characteristics of soil respiration [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 39 - 46. [赖焱敏, 薛娴, 赖日文, 等. 青藏高原北麓河流域不同退化程度高寒草甸土壤呼吸特征[J]. *草业科学*, 2019, 36(4): 39 - 46.]
- [21] Zou Hua, Chang Xiyun, De Kejia, et al. Study on spatial heterogeneity of soil respiration of alpine meadow in the Three-River headwater region [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(21): 117 - 119. [邹华, 畅喜云, 德科加, 等. 三江源区高寒草甸土壤呼吸空间异质性的研究[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2014(21): 117 - 119.]
- [22] Wang Yan. Effects of land use patterns on soil respiration characteristics in alpine meadow [J]. *Gansu Livestock Veterinary*, 2017, 47(12): 107 - 108. [王延. 土地利用形式对高寒草甸土壤呼吸特征的影响[J]. *甘肃畜牧兽医*, 2017, 47(12): 107 - 108.]
- [23] Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Zhao Liang, et al. The community characteristics and stability of the *Elymus nutans* artificial grassland in alpine meadow [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(2): 13 - 25. [周华坤, 赵新全, 赵亮, 等. 高山草甸垂穗披碱草人工草地群落特征及稳定性研究[J]. *中国草地学报*, 2007, 29(2): 13 - 25.]
- [24] He Huidan, Zhu Jingbin, Wei Yaxi, et al. Response of soil water storage to fencing measures in the alpine meadow [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 214 -

220. [贺慧丹, 祝景彬, 未亚西, 等. 高寒草甸土壤贮水量对封育措施的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 214 - 220.]
- [25] Zhao Xinquan. Restoration and sustainable management of degraded grassland ecosystem in Sanjiangyuan district [M]. Beijing: Science Press, 2011: 44 - 57. [赵新全. 三江源区退化草地生态系统恢复与可持续管理[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 44 - 57.]
- [26] Ma Keping, Huang Jianhui, Yu Shunli, et al. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II: species richness, evenness and species diversities [J]. Acta Ecologica Sinica, 1994, 15(3): 268 - 277. [马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II: 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1994, 15(3): 268 - 277.]
- [27] Yu Guirui, Sun Xiaomin. Study on characteristics of time and space change of carbon flux observation technology in China's terrestrial ecosystem [M]. Beijing: Science Press, 2008: 353 - 356. [于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 353 - 356.]
- [28] Zhou Huakun, Zhou Li, Zhao Xinquan, et al. Degradation process and integrated treatment of "black soil beach" grassland in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers [J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(5): 51 - 55. [周华坤, 周立, 赵新全, 等. 江河源区"黑土滩"型退化草场的形成过程与综合治理[J]. 生态学杂志, 2003, 22(5): 51 - 55.]
- [29] Xie Wendong, Danjiu Luobu, He Shicheng, et al. Study on vegetation degradation of alpine grassland in northern Tibet and its countermeasures [J]. Chinese Livestock and Poultry Industry, 2019(8): 9 - 11. [谢文栋, 旦久罗布, 何世丞, 等. 藏北高寒草地植被退化及其治理对策研究[J]. 中国畜禽种业, 2019(8): 9 - 11.]
- [30] Lü Xiaorong, Lü Xiaoying. Climate tendency analysis of warming and drying in grassland of northeast Qingzang Plateau of China [J]. Grassland of China, 2002(4): 9 - 14. [吕晓蓉, 吕晓英. 青藏高原东北部草地气候暖干化趋势分析[J]. 中国草地, 2002(4): 9 - 14.]
- [31] Shao Liye, Dong Guangrong, Lu Fugen. Developmental and adverse processes of steppe desertification and law of vegetation succession in Gonghe Basin [J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(1): 30 - 40. [邵立业, 董光荣, 陆福根. 共和盆地草原沙漠化的正、逆过程与植被演替规律[J]. 中国沙漠, 1988, 8(1): 30 - 40.]
- [32] Li Xuebin, Ma Lin, Yang Xinguo, et al. Ecohydrology function of representative plant community litter in desert steppe [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(5): 834 - 838. [李学斌, 马琳, 杨新国, 等. 荒漠草原典型植物群落枯落物生态水文功能[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 834 - 838.]
- [33] Peng Shaolin, Zhou Houcheng, Chen Tianxing, et al. The quantitative characters of organization of forest communities in Guangdong [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1989, 13(1): 10 - 17. [彭少麟, 周厚诚, 陈天杏, 等. 广东森林群落的组成结构数量特征[J]. 植物生态学报, 1989, 13(1): 10 - 17.]
- [34] Zheng Shuhua, Guo Huiqing, Zhao Mengli, et al. Relationship between rangeland condition and biodiversity in meadow steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(4): 9 - 14. [郑淑华, 郭慧清, 赵萌莉, 等. 草甸草原草地基况与生物多样性关系的研究[J]. 中国草地学报, 2007, 29(4): 9 - 14.]
- [35] Zhao Gang, Cui Zeren. Selective grazing of animals and the response of plants [J]. Grassland of China, 1999(1): 62 - 67. [赵钢, 崔泽仁. 家畜的选择性采食对草地植物的反应[J]. 中国草地, 1999(1): 62 - 67.]
- [36] Qu Xingle, Fang Jiangping. Influences of fencing on soil properties and vegetation in degraded shrub-grass community [J]. Northern Horticulture, 2019(3): 115 - 121. [屈兴乐, 方江平. 围栏封育对退化灌丛草地群落土壤特性和植被的影响[J]. 北方园艺, 2019(3): 115 - 121.]
- [37] Yang Qian, Wang Wei, Zeng Hui. Effects of nitrogen addition on the plant diversity and biomass of degraded grasslands of Nei Mongol, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(4): 1044 - 1055. [杨倩, 王妮, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 1044 - 1055.]
- [38] Liu Xueming, Nie Xuemin. Effects of enclosure on the quantitative characteristics of alpine vegetation [J]. Pratacultural Science, 2012, 29(1): 112 - 116. [刘雪明, 聂学敏. 围栏封育对高寒草地植被数量特征的影响[J]. 草业科学, 2012, 29(1): 112 - 116.]
- [39] Fang Kai, Song Naiping, Wei Le, et al. The effect of different grazing systems on aboveground and interspecific relationship in desert steppe [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2012, 21(5): 12 - 22. [方楷, 宋乃平, 魏乐, 等. 不同放牧制度对荒漠草原地上生物量及种间关系的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 12 - 22.]
- [40] Su Lei, Yang Yongsheng, Li Xiaoya, et al. Increasing plant diversity and forb ratio during the revegetation processes of trampled areas and trails enhances soil infiltration [J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(11): 4025 - 4034.
- [41] Guo Mingying, Zhao Ketu, You Jincheng, et al. Soil microbial characteristic and soil respiration in grassland under different use patterns [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(1): 42 - 48. [郭明英, 朝克图, 尤金成, 等. 不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性[J]. 草地学报, 2012, 20(1): 42 - 48.]
- [42] Wei Weidong, Liu Yuhong. Effects of alpine meadow degradation on soil respiration in the Sanjiangyuan area [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2014(19): 102 - 105. [魏卫东, 刘育红. 三江源区高寒草甸退化对土壤呼吸的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(19): 102 - 105.]
- [43] Qu Ran, Li Junsheng, Luo Zunlan, et al. Influence of soil microbial and organic acids on soil respiration rate [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010(4): 244 - 247. [屈冉, 李俊生, 罗遵兰, 等. 土壤微生物和有机酸对土壤呼吸速率的影响[J]. 水土保持学报, 2010(4): 244 - 247.]
- [44] Wang Zexi, Chen Qianmei, Huang Youyou, et al. Response of soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen to nitrogen application in subalpine forests of western Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7197 - 7207. [王泽西, 陈倩妹, 黄尤优, 等. 川西亚高山森林土壤呼吸和微生物生物量碳氮对施氮的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7197 - 7207.]
- [45] Tang Yanfei, Wang Guobing, Ruan Honghua. A review on the sensitivity of soil respiration to temperature [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2008, 32(1): 124 - 128. [唐燕飞, 王国兵, 阮宏华. 土壤呼吸对温度的敏感性研究综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 124 - 128.]
- [46] Zhang Chongbang, Yang Jingchun. Preliminary study on respiration rate of soil microorganism and different vegetations



- on *Aneurolepidium chinense* grassland of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 293 - 298. [张崇邦, 杨婧春. 东北羊草草原不同植被类型土壤微生物呼吸速率的初步研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 293 - 298.]
- [47] Fan Zhiping, Wang Hong, Deng Dongzhou, et al. Measurement methods of soil heterotrophic respiration and key factors affecting the temperature sensitivity of the soil heterotrophic respiration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1221 - 1226. [范志平, 王红, 邓东周, 等. 土壤异养呼吸的测定及其温度敏感性影响因子[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1221 - 1226.]

## Vegetation and soil respiration at different degradation stages of an alpine meadow in the Sanjiangyuan region

ZHANG Guangru<sup>1,5</sup>, ZHANG Fawei<sup>2</sup>, YANG Yongsheng<sup>1,6</sup>, HE Huidan<sup>3</sup>, ZHU Jingbin<sup>1,5</sup>,  
LUO Jin<sup>1</sup>, WANG Chunyu<sup>1,5</sup>, LUO Fanglin<sup>1,5</sup>, WANG Junbang<sup>1,4</sup>, LI Yingnian<sup>1,6</sup>

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. College of Life Sciences, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, Henan, China; 3. Zaozhuang University, Zaozhuang 277100, Shandong, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

**Abstract:** Vegetation community, soil respiration characteristics and their relationships at different degradation stages were explored, and the temperature sensitivity of soil respiration was analyzed by monitoring the vegetation and soil respiration at different degradation stages of an alpine meadow in Maqen County, Sanjiangyuan region in 2017. The results show that: As the degree of degradation increase, the Gramineae decreases, but poisonous weed increases significantly ( $P < 0.05$ ); vegetation coverage, species index, and diversity index decrease significantly ( $P < 0.05$ ). The aboveground biomass under the condition of heavy degradation has decreased by 25.36% and 22.37% in comparison with light and moderate degradation ( $P < 0.05$ ). Under the condition of moderate degradation, evenness index and underground biomass increased significantly ( $P < 0.05$ ). Soil respiration at each degradation stage has a unimodal change during the year, showing high in growing season and low in non-growing season, especially in a highest peak growth period (July - August) of the vegetation and a significant exponential relationship with soil temperature at 5 cm depth ( $P < 0.05$ ); total soil respiration emissions in 2017 under light, moderate and heavy degradation are  $626.89 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $386.66 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $393.81 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectively. Soil respiration rate decreases with the degree of degradation. Temperature sensitivity coefficients ( $Q_{10}$ ) of soil respiration at light degradation, moderate degradation and heavy degradation stages are 2.82, 3.54, and 2.35, respectively, indicating that the temperature sensitivity is the highest under moderate degradation and the lowest under heavy degradation. These results would be useful for understanding the vegetation and soil respiration characteristics at different degradation stages of alpine meadows on the Tibetan Plateau.

**Key words:** alpine meadow; degradation stages; vegetation community characteristics; soil respiration; synergistic relationship; Sanjiangyuan region

(责任编辑: 吴晓东; 编辑: 武俊杰)