

# 青藏高原放牧高寒草甸主要温室气体通量及其主控因素研究

郭小伟<sup>1</sup>,戴黎聪<sup>1,2</sup>,李茜<sup>1</sup>,李以康<sup>1</sup>,林丽<sup>1</sup>,钱大文<sup>1</sup>,樊博<sup>1</sup>,  
柯浔<sup>1,2</sup>,舒锴<sup>1,2</sup>,朋措吉<sup>1,2</sup>,杜岩功,曹广民<sup>1</sup>

(1. 青海省寒区恢复生态学重点实验室/中国科学院西北高原生物研究所,青海 西宁 810001;

2. 中国科学院大学,北京 100039)

**摘要:**在青藏高原高寒草地不同放牧强度区设4个试验样地,分别为原生草甸(NM)、轻度退化草甸(LM)、中度退化草甸(MM)和重度退化草甸(HM),监测草地温室气体通量。结果表明:不同放牧强度对草地温室气体通量影响显著,放牧活动对高寒草甸的影响首先表现在植被上,而土壤环境的变化比较迟滞。通过逐步回归分析和因子拆分得知,草甸甲烷通量影响较大的环境因素为土壤紧实度和有机质,分别能解释44.6%和28.4%的总变异,CO<sub>2</sub>通量影响较大的环境因素为紧实度和生物量,分别能解释36.1%和32.8%的总变异,氧化亚氮通量影响较大的环境要素为紧实度和有机质,分别能解释50.1%和22.9%的总变异,家畜的践踏作用使退化草地紧实度增加,进而引起温室气体通量的改变,高寒草甸退化演替发展到重度退化阶段时释放大量温室气体。

**关键词:**高寒草甸;草地退化;温室气体;环境因子

中图分类号:S812 文献标志码:A 文章编号:1009-5500(2019)03-0072-07

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2019.03.010

人类对大陆和多数海洋的观测证据表明,自然系统正受到区域气候变化,特别是受到温度升高的影响<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O是3种重要的温室气体,自工业革命以来3种气体在大气中的含量急剧上升。目前,CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的浓度年增加量分别为1.5 mL/m<sup>3</sup>,4 μL/m<sup>3</sup>和0.8 μL/m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。CO<sub>2</sub>的温室作用占总温室效应的50%<sup>[3]</sup>,CH<sub>4</sub>贡献了20%的温室效应,并且CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O百年增温潜势是CO<sub>2</sub>的23、296倍<sup>[2]</sup>,量小但是其造成的增温效应严重。已有的研究显示气候变化(模拟温度和降水改变)能够显著的影响

生态系统C、N的循环,同时又反馈给正在发生的气候变化,即气候变化作用于生态系统,而生态系统又可以反馈给气候变化,加快气候变化的进程,目前,青藏高原地区的植被类型改变,植被退化是否正反馈于气候变化(加快温室气体排放),还有待于评估。

青藏高原作为欧亚大陆最大的地貌单元,对全球气候变化和人类活动十分敏感,过去30年里,极度退化的高原草地生态系统释放大约3.02 Pg 贮存碳<sup>[4]</sup>,其中,土地利用格局改变、高强度土地利用方式、土壤侵蚀、人类草地管理方式改变是系统碳源汇转化的重要因素<sup>[5]</sup>。加之高海拔、低温的地理气候特征使得青藏高原的植被和土壤对全球气候变化显得极为敏感,因此,被称为全球变化研究的敏感区<sup>[6]</sup>。如此巨大的土壤封存碳库与大气温室气体库频繁而又大量的发生着气体通量交换,土壤产生与排放CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O等温室气体的过程,是陆地生态系统碳氮循环的一个重要过程,是土壤碳氮库的主要输出途径<sup>[7]</sup>。据报道青藏高原高寒草地年CH<sub>4</sub>吸收量被估计为0.2 Tg<sup>[8]</sup>,高寒草地是重要的大气N<sub>2</sub>O源,年N<sub>2</sub>O贡献量达0.3

收稿日期:2018-11-03; 修回日期:2019-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41730752、3170039 5);  
青海省自然科学基金项目(2016-ZJ-918Q,2018-ZJ-914)资助

作者简介:郭小伟(1985-),男,山东潍坊人,博士,高级工程师,主要从事植物生态学研究。

E-mail: xwguo1206@163.com

杜岩功为通讯作者。

E-mail: ygdu@nwipb.cas.cn

Tg<sup>[9]</sup>, 而 CO<sub>2</sub> 的年贡献量达 46.5 Tg<sup>[10-11]</sup>。

青藏高原高寒草地面积为  $1.28 \times 10^8$  km<sup>2</sup>, 是“世界第三极”地区重要的碳库, 对该地区生态系统的碳源—碳库的平衡具有重要的调节作用<sup>[13]</sup>。据 IPCC 最新预测, 到 2100 年全球气温将上升 1.8~4.0℃<sup>[14]</sup>。利用 2014 年建立的青海省海北州皇城乡高寒草甸放牧演替平台, 研究高寒草甸退化过程中主要温室气体通量特征及其关键影响因子, 有助于人类理解青藏高原高寒草甸对气候变化的响应。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区地理位置

试验设置于青海省海北州门源县皇城乡, 地理位置 N 37°39.023', E 101°10.638', 海拔 3 230 m。年均温度 -1.7℃, 最暖月为 7 月 (9.8℃), 最冷月为 1 月 (-14.8℃), 年均降水量 618 mm, 主要集中在植物的生长季 (数据来自中科院高寒草甸海北定位研究站), 该地区代表性植被为高寒矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸。

### 1.2 样地设置与样品采集

于 2016 年 10 月~2017 年 9 月进行草地温室气体通量原位观测试验, 样地设置于青海省海北州皇城

乡, 根据植被生长状况, 设置原生高寒草甸、轻度退化高寒草甸、中度退化高寒草甸和重度退化高寒草甸。于植物分布比较均匀, 地形平坦地段进行试验, 设置地框进行静态箱温室气体采集。静态箱法测定温室气体通量, 采用 50 cm×50 cm×50 cm 的箱体, 箱体外包有白色塑料泡沫和白色纱布, 不透明。植物生长季 5~9 月, 每月测定 4 次即每周进行 1 次, 冬季每月测定 2 次温室气体通量, 于月中和月末进行气体采集。

放牧梯度试验区分别设置不同放牧强度的原生草甸 (NM)、轻度退化草甸 (LM)、中度退化草甸 (MM) 和重度退化草甸 (HM) 4 个样地, 放牧样地的总面积为 13.33 hm<sup>2</sup> (表 1)。本研究中 4 种不同类型高寒草甸有机质、地上生物量、植被盖度采用样方法获得, 活根生物量、死根生物量采用跟钻法获得, 全磷、紧实度和 pH 数据从青海海北高寒草地生态系统定位站共享数据库 (<http://hbg.cern.ac.cn/meta/metaData>) 申请获得。

### 1.3 样品分析

气体测定采用气相色谱法 (HP4890D, Agilent)。检测器为 FID 离子火焰化检测器, 分离柱为 SS-2 m×2 mm×13XMS(60/80), 检测器温度为 230℃, 分离柱

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of study plots

放牧样地	放牧强度 (/羊单位·hm <sup>-2</sup> )	样地概况
NM	3.65	草地类型为禾草—矮嵩草草甸, 具有明显的片层结构, 上层以针茅 ( <i>Stipa</i> spp.) 和羊茅 ( <i>Festuca</i> spp.) 等禾本科植物为优势种, 下层以矮嵩草等莎草科植物为优势种, 禾本科植物出现的频率和盖度高于莎草科植物; 草毡表层厚度不高于 5 cm; 放牧时间为每年 3~5 月底; 放牧家畜主要为藏系绵羊
LM	7.50	草地类型为矮嵩草草甸, 草地片层结构较为明显, 上层以针茅 ( <i>Stipa</i> spp.) 和羊茅 ( <i>Festuca</i> spp.) 等禾本科植物为优势种, 下层以矮嵩草等莎草科植物为优势种, 矮嵩草植物的频度及盖度高于禾本科植物; 表层厚度 5 cm; 放牧时间为前年的 12 月至次年的 5 月底; 放牧家畜主要为藏系绵羊
MM	11.25	草地类型为小嵩草 ( <i>K. pygmaea</i> ) 草甸, 演替所处阶段为小嵩草草甸草毡表层加厚期; 草地为单片层结构, 禾本科植物出现的频率小, 小嵩草等莎草科植物为优势种, 并呈明显的斑块化分布, 小嵩草斑块边缘出现一定深度的裂缝, 裂缝面积不超过样地总面积的 5%, 裂缝内矮嵩草和禾本科植物分布较多; 放牧时间为前年的 12 月至次年的 5 月底; 放牧家畜主要为藏系绵羊
HM	13	草地类型为小嵩草草甸, 演替所处阶段为小嵩草草甸草毡表层开裂期; 草地为单片层结构, 禾本科植物出现的频率小, 小嵩草等莎草科植物为优势种, 并呈明显的斑块化分布, 小嵩草斑块中心区域存在大量空地, 其上附着黑色或白色休眠或死亡的生物结皮, 边缘裂缝宽度较 MM 样地大, 裂缝交接处出现大量水蚀三角区, 区域内偶有裸露底土层, 裂缝面积在 5%~30%; 放牧时间为前年的 12 月至次年的 5 月底; 放牧家畜主要为藏系绵羊和牦牛

温度为 55℃。标准气中 CH<sub>4</sub> 浓度为 2.24 μL/L, 最小检测限 0.08 μL/L<sup>[14]</sup>。

#### 1.4 计算公式

通量计算公式:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt}$$

式中:  $F$  为温室气体通量,  $V$  是静态箱内空气体积,  $A$  是静态箱覆盖面积,  $C_t$  是  $t$  时刻箱内被测气体的体积混合比浓度,  $t$  是时间,  $\rho$  是标准状态下的被测气体密度,  $T_0$  和  $P_0$  分别为标准状况下的空气绝对摄氏温度和气压,  $P$  为采样地点的气压,  $T$  为采样时的绝对温度。

#### 1.5 数据处理

温室气体通量和土壤温度以及湿度的关系采用相关性分析、不同草地温室气体通量间差异比较、逐步回归分析和因子拆分采用  $R$  统计软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同退化草甸甲烷通量特征

随着草地退化程度的加剧, 草地甲烷吸收逐渐增加, 原生草甸、轻度退化草甸、中度退化草甸和重度退化草甸样地甲烷通量分别为  $-40.1 \pm 12.3$ 、 $-37.8 \pm 11.6$ 、 $-45.1 \pm 16.8$  和  $56.7 \pm 19.3 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。其中, 中度和重度退化草甸甲烷通量显著高于原生草甸和轻度退化草甸(LM) ( $P < 0.05$ ), 原生草甸甲烷吸收能力和轻度退化草甸差异不显著。高寒草甸在退化过程中甲烷吸收能力增加, 其中, 中度退化草甸甲烷通量比原生草甸甲烷吸收能力增加 41.3%(图 1)。

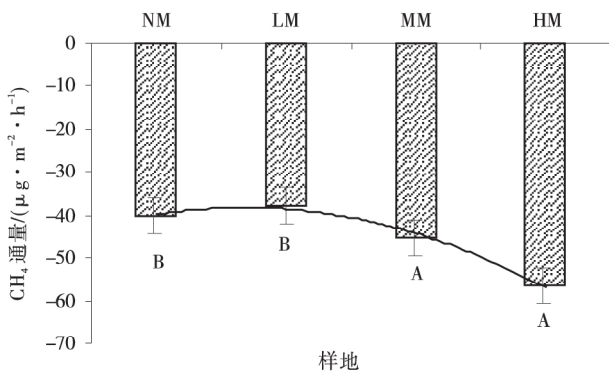


图 1 不同退化高寒草甸甲烷通量

Fig. 1 CH<sub>4</sub> flux in different degradation stages

注: 误差线表示标准误, 下同

### 2.2 不同退化草甸 CO<sub>2</sub> 通量特征

同时期的不同退化阶段高寒草甸 CO<sub>2</sub> 通量也与

甲烷通量变化相似, 表现为生长季通量高, 而休眠季低。由于采用的静态箱法为暗箱, 所以草地 CO<sub>2</sub> 通量仅表示草地的呼吸能力。原生草甸、轻度退化草甸、中度退化草甸和重度退化草甸 4 个样地的 CO<sub>2</sub> 通量分别为  $294.5 \pm 63.5$ 、 $400.1 \pm 52.1$ 、 $513.3 \pm 53.7$  和  $521.2 \pm 113.8 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 四者差别较大(图 2), 其中, 中度退化草甸 CO<sub>2</sub> 通量比原生草甸增加 76.9%。但方差分析结果显示 4 个样地的 CO<sub>2</sub> 排放能力差异不显著( $P > 0.05$ ), 可能是观测次数较少和休眠季差异较小的原因。

对 4 种草甸生长季 CO<sub>2</sub> 通量分析发现, 原生草甸 CO<sub>2</sub> 排放能力最低, 中度退化草甸甲烷排放能力最高, 方差分析结果显示原生草甸甲烷排放速率显著低于中度和重度退化草甸, 中度退化草甸 CO<sub>2</sub> 排放量相比原生草甸增加 81.2%。

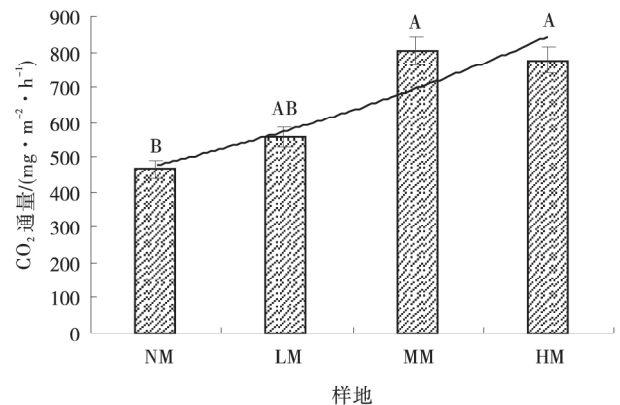


图 2 不同退化高寒草甸生长季 CO<sub>2</sub> 通量

Fig. 2 CO<sub>2</sub> flux in different degradation stages

### 2.3 不同退化草甸 N<sub>2</sub>O 通量特征

同时期 N<sub>2</sub>O 通量观测值都为正值, 相比甲烷和二氧化碳其季节变化特征不明显(图 3), 而仅表现为在生长季末有一个峰值。N<sub>2</sub>O 的通量对于草地退化

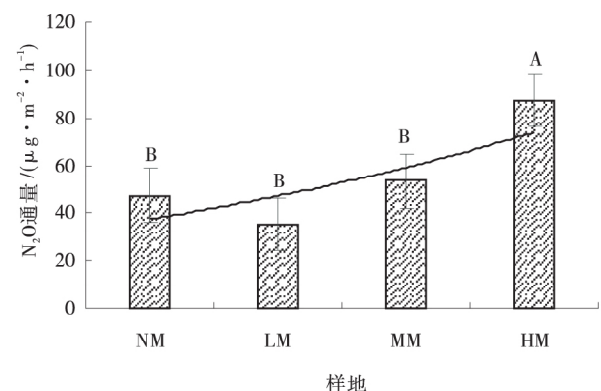


图 3 不同退化高寒草甸 N<sub>2</sub>O 平均通量特征

Fig. 3 N<sub>2</sub>O flux in different degradation stages

的响应更加明显。退化越严重草地 N<sub>2</sub>O 排放能力越强。

原生草地、轻度退化草地、中度退化草地和重度退化草地 N<sub>2</sub>O 通量分别为 47.20±9.3、35.17±7.5、53.40±11.3 和 87.07±8.9 μg/(m<sup>2</sup>·h)。小嵩草开裂阶段 N<sub>2</sub>O 排放能力显著高于禾草-矮嵩草阶段(P<0.05),N<sub>2</sub>O 排放能力增加了 84%。

在不同退化高寒草甸 3 种主要的温室气体通量都大幅增加,相比禾草-矮嵩草阶段小嵩草开裂阶段甲烷吸收能力增加 41.33%,CO<sub>2</sub> 排放增加 76.9%、N<sub>2</sub>O

排放能力增加 84%。

### 2.4 草甸生态系统要素对退化的响应

随退化演替的进行,高寒草甸自身构建属性发生显著改变,有机质、活根生物量、死根生物量、地上生物量、植被盖度发生显著变化,其土壤中有机质含量、活根生物量、死根生物量总的变化趋势为先增加后减少,有机质含量与死根生物量有较好的对应关系,但是死根生物量在轻度退化阶段就表现出增加趋势,而活根生物量直到中度退化阶段才表现出增加(图 4)。高寒草甸生物量和植被盖度在退化过程中先增加后减少,

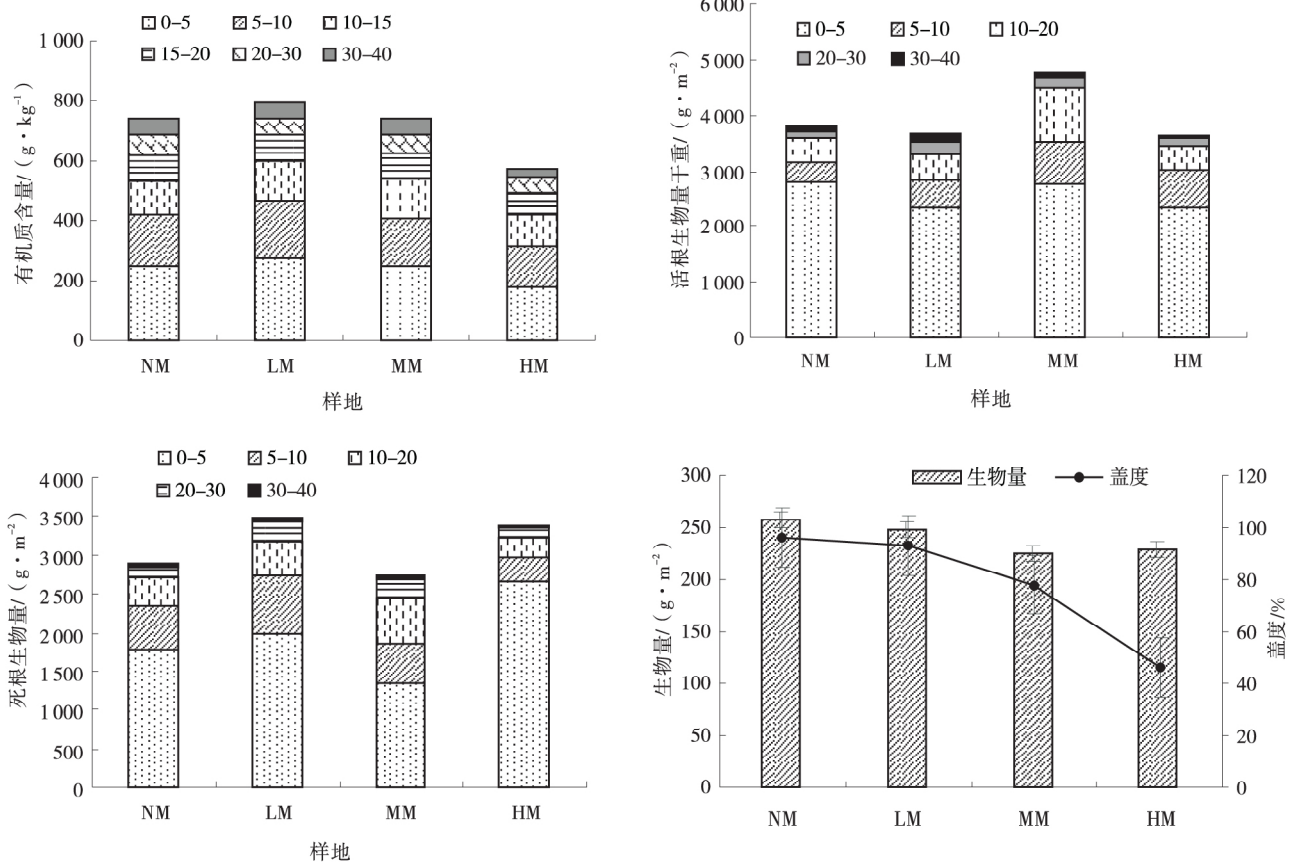


图 4 植被特征对于退化的响应

Fig. 4 Response of vegetation features to degradation

原生草甸相比重度退化草甸其盖度减少 52±8.2%,生物量减少 11.2±4.3%。

### 2.5 草甸关键变化对放牧的影响

通过试验分析,从分析的环境要素中选取了有机质、5~10 活根、5~10 死根、0~5 全氮、10~15 全磷、生物量、盖度、20~30 紧实度和 pH 10 个环境要素作为主要的影响因子,与温室气体进行逐步回归分析,结果显示,草地 CH<sub>4</sub> 吸收量主要由草地土壤紧实度、有机质和盖度控制;草地 CO<sub>2</sub> 通量主要受全磷、盖度和全氮控制,而草地 N<sub>2</sub>O 主要受草地有机质、紧实

度和死根控制(表 2)。

利用 R 语言中随机森林模型分析各环境因子、植被属性对 3 种温室气体通量的影响大小(图 5),结果显示,草甸 CH<sub>4</sub> 通量影响较大的环境因素为土壤紧实度和有机质,分别能解释 44.6%和 28.4%的总变异,CO<sub>2</sub> 通量影响较大的环境因素为紧实度和生物量,分别能解释 36.1%和 32.8%的总变异,N<sub>2</sub>O 通量影响较大的环境要素为紧实度和有机质,分别能解释 50.1%和 22.9%的总变异。草地紧实度是影响草地温室气体通量的最为重要的环境因子,家畜的践踏作用使

表 2 主要温室气体影响因子逐步回归分析

Table 2 Stepwise regression analysis of major factors affecting greenhouse gas

温室气体	逐步回归保留因子	回归方程	解释度
CH <sub>4</sub> 吸收量	土壤紧实度、有机质、盖度	$Y=51.77+0.328 \text{ 紧实度}-0.26 \text{ 有机质}-0.11 \text{ 盖度}$	$r^2=0.74(P<0.01)$
CO <sub>2</sub> 通量	全磷、盖度、全氮	$Y=-1635.81+2767.9 \text{ 全磷}-3.15 \text{ 盖度}+43.79 \text{ 全氮}$	$r^2=0.66(P<0.01)$
N <sub>2</sub> O 通量	有机质、紧实度、死根	$Y=126.88-0.149 \text{ 有机质}+0.606 \text{ 紧实度}-0.008 \text{ 死根}$	$r^2=0.83(P<0.01)$

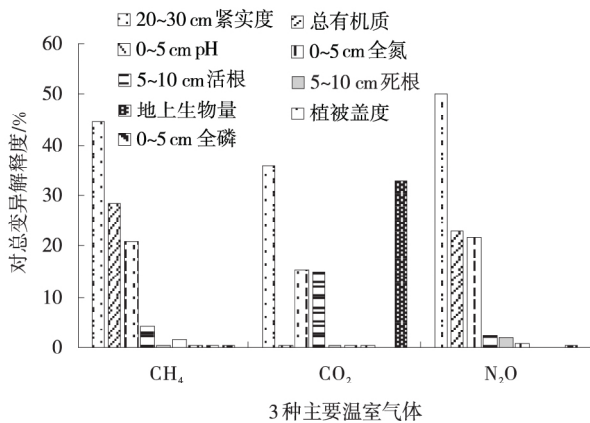


图 5 温室气体关键影响因子

Fig. 5 Key factors affecting greenhouse gas flux

退化草地紧实度增加,进而引起温室气体通量的改变。

### 3 讨论

#### 3.1 放牧活动对草地的影响

土壤温室气体的源汇效应就是土壤中温室气体不断产生与释放平衡的过程,凡是能影响 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的吸收和释放过程的均能影响土壤温室气体通量<sup>[14]</sup>,研究显示土壤微生物、土壤温度、土壤湿度、土壤有机质、土壤 pH、土壤氧化还原电势、土壤质地、土壤透气性等均影响土壤温室气体通量<sup>[15]</sup>。土壤微生物主要类群有细菌、真菌、放线菌、藻类和原生动物等,属于草地生态系统中的分解者,温室气体排放与土壤微生物、土壤养分密切相关<sup>[16]</sup>,土壤中微生物呼吸作用占据了土壤总呼吸的 50%<sup>[17]</sup>。土壤中 CH<sub>4</sub> 吸收与排放量大部分是其菌释放和甲烷氧化菌吸收及相互作用的结果,80% 的土壤 CH<sub>4</sub> 通量是微生物的代谢活动释放(吸收)的<sup>[18]</sup>,青藏高原高寒草甸发现的土壤甲烷氧化菌数量出乎意料的高,较华中地区高出一个数量级<sup>[19]</sup>。N<sub>2</sub>O 通量与土壤中硝化细菌和反硝化细菌分别进行的硝化作用和反硝化作用密切相关<sup>[20]</sup>。在全

球气候变化的背景下,CO<sub>2</sub> 浓度的升高亦能改变根系分泌或残体的组成和总量,并影响到土壤细菌、真菌、放线菌等的数量<sup>[21]</sup>,这是气候变化回馈土壤碳库的方式之一。放牧活动对于草地的影响是多方面的,试验中草地构建属性相比草地土壤环境因子对于放牧更加敏感,草地植被盖度、生物量、根系生物量在放牧压力增加时很快就发生改变,而土壤环境需要 3~5 年的时间甚至一些环境因子需要更长的时间才会发生改变,因此,在探讨放牧对于草地温室气体通量变化影响是必须考虑到草地的退化年限。

#### 3.2 草地温室气体通量与环境因子的关系

试验中不同退化阶段的高寒草甸其 CH<sub>4</sub> 吸收速率差异较大,而本研究所得 CH<sub>4</sub> 通量与先前关于高寒草甸、高寒草原、羊草草原、大针茅草原差别不大<sup>[14]</sup>,但是研究中重度退化草甸相比原生草甸 CH<sub>4</sub> 通量增加 41.33%,且中度和重度退化草甸 CH<sub>4</sub> 通量要显著高于先前大多数类型生态系统,说明放牧促进了草地的甲烷氧化作用,草地的 CH<sub>4</sub> 吸收能力主要是来自元甲烷氧化菌的作用,草地退化过程中一些环境条件的改变,根据逐步回归分析和因子贡献拆分得知,草甸 CH<sub>4</sub> 吸收能力影响最为重要的因素是土壤紧实度和有机质,分别能解释 44.6% 和 28.4% 的 CH<sub>4</sub> 通量总变异,土壤紧实度越大,CH<sub>4</sub> 吸收能力越大,有机质是影响甲烷通量的次要因素,随着土壤有机质含量的增加,CH<sub>4</sub> 氧化菌营养底物越多,所以甲烷氧化能力也就增强了,而先前的研究对于草地影响因子的分析大多都是温度、水分、土壤孔隙<sup>[22]</sup>,草地土壤在退化过程中温度变化不大,但水分逐渐降低,水分下降后通气性增加,因此,可理解为草地甲烷吸收能力随通气性的增加而增加,而试验却发现紧实度、有机质于草地 CH<sub>4</sub> 通量影响最大,是对草地甲烷通量影响研究理论的一种补充。草地生态系统呼吸在放牧作用下得到了促

进,这一发现与 Frank 等<sup>[23]</sup>在北美混合草草原的研究结果一致,即适度放牧增加了草地生物量,而研究采用静态箱法监测草地呼吸,得到的呼吸作用使草地在暗环境下的呼吸值,不包括植物的光合作用,中度干扰理论认为适度的放牧会促进植被生长( $\text{CO}_2$  排放的最大值出现在中度退化高寒草甸阶段)。  $\text{N}_2\text{O}$  的 通 量 主 要 受 土 壤 微 生 物 的 硝 化 作 用 和 反 硝 化 作 用 控 制<sup>[9]</sup>, 因 此, 土 壤 中 有 机 质 含 量 多 少 起 很 大 作 用。 原 生 草 甸、 轻 度 退 化 草 甸、 中 度 退 化 草 甸 和 重 度 退 化 草 甸  $\text{N}_2\text{O}$  通 量 分 别 为 47.20、35.17、53.40 和 87.07  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 其 中, 重 度 退 化 草 甸  $\text{N}_2\text{O}$  通 量 显 著 高 于 其 余 3 种 草 甸 ( $P < 0.05$ )。 草 地 的  $\text{N}_2\text{O}$  通 量 主 要 依 赖 于 微 生 物 的 硝 化 和 反 硝 化 作 用<sup>[33]</sup>, 草 甸 的 退 化 演 替 过 程 中, 由 原 生 退 化 为 轻 度 再 到 中 度 的 过 程 草 甸  $\text{N}_2\text{O}$  通 量 变 化 并 不 明 显, 这 种 不 明 显 的 变 化 更 加 体 现 了 草 地 退 化 过 程 中 土 壤 环 境 相 对 于 植 被 变 化 的 迟 滞 性, 而 草 地 在 持 续 的 过 渡 放 牧 压 力 下, 到 达 重 度 退 化 阶 段 后,  $\text{N}_2\text{O}$  通 量 大 幅 增 加, 能 力 相 比 原 生 草 甸 增 加 了 84%。 高 寒 草 地 生 态 系 统 土 壤 中 有 较 高 的 根 系 密 度 和 有 机 碳 含 量, 其 缓 慢 的 分 解 周 速 率<sup>[24]</sup>, 形 成 了 一 个 大 气  $\text{CO}_2$  汇 的 功 能。 但 是 近 年 来 在 人 类 活 动 和 气 候 变 化 的 双 重 干 扰 下, 天 然 草 地 的 碳 汇 作 用 被 减 弱 甚 至 逆 转 为 碳 源<sup>[8]</sup>。 研 究 目 前 最 有 意 义 的 发 现 就 在 于 草 地 退 化 后 期 大 量 的 草 地 封 存 碳 通 过 温 室 气 体 排 放, 但 草 地 碳 流 失 具 体 格 局 还 有 待 进 一 步 研 究, 虽 然 草 地 退 化 增 强 了 草 地 大 气 甲 烷 汇 功 能, 但 是  $\text{CH}_4$  的 吸 收 远 小 于  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排 放 的 增 加, 所 以 草 地 退 化 使 其 由 大 气 碳 汇 变 为 大 气 碳 源。 因 此, 高 寒 草 地 只 有 在 合 理 的 利 用 下 才 能 发 挥 其 大 气 碳 汇 的 功 能。

#### 4 结 论

不同退化程度高寒草甸, 3 种主要的温室气体通量都大幅增加, 相比禾草-矮嵩草阶段小嵩草开裂甲烷吸收能力增加 41.33%,  $\text{CO}_2$  排放增加 76.9%、 $\text{N}_2\text{O}$  排放能力增加 84%。 放牧活动对于高寒草甸的影响首先表现在植被上, 而土壤环境的变化比较迟滞, 因此, 退化年限对草地温室气体通量影响较重要。 草甸  $\text{CH}_4$  通量影响较大的环境因素为土壤紧实度和有机质,  $\text{CO}_2$  通量影响较大的环境因素为紧实度和生物量,  $\text{N}_2\text{O}$  通量影响较大的环境要素为紧实度和有机质。 草地紧实度是影响草地温室气体通量的最为重要的环

境因子, 家畜的践踏作用使退化草地紧实度增加, 进而引起温室气体通量的改变。

参考文献:

- [1] Bowen G J, Ehleringer J R, Chesson L A, et al. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(3): 336-341.
- [2] Chen A, Huang H Z, Zhang Z N, et al. Livestock grazing ingestion suppressed the dominant species population (*Stipa aliena*) germination; a laboratory experiment [J]. *Nordic Journal of Botany*, 2012, 30(5): 635-639.
- [3] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. *Science*, 1990, 321: 1217-1219.
- [4] Genxu W, Ju Q, Guodong C, et al. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 291: 207-217.
- [5] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [6] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 933-942.
- [7] Koponen H T, Flójt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures; a laboratory microcosm study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 757-766.
- [8] Cao G, Xu X, Long R, et al. Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai Tibet Plateau [J]. *Biology Letters*, 2008, 4(6): 681.
- [9] Du Y, Cui Y, Xu X, et al. Nitrous oxide emissions from two alpine meadows in the Qinghai Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2008, 311: 245-254.
- [10] Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 124(1): 121-134.
- [11] 赵亮, 古松, 周华坤, 等. 青海省三江源区人工草地生态系统  $\text{CO}_2$  通量 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 544-554.
- [12] Krümmelbein J, Peth S, Zhao Y, et al. Grazing-induced alterations of soil hydraulic properties and functions in Inner Mongolia, PR China [J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2010, 172(6): 769-776.
- [13] Kumbasli M, Makineci E, Caki R M, et al. Long term

- effects of red deer(*Cervus elaphus*) grazing on soil in a breeding area[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2010,31(1-2):185.
- [14] 郭小伟,杜岩功,林丽,等. 青藏高原北缘3种高寒草地的CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O通量特征的初步研究[J]. *草业科学*, 2016,33(1):27-37.
- [15] 李海防,夏汉平,熊燕梅,等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. *生态环境*, 2007(6):1781-1788.
- [16] Richardson D, Felgate H, Watmough N, *et al.* Mitigating release of the potent greenhouse gas N<sub>2</sub>O from the nitrogen cycle-could enzymic regulation hold the key[J]. *Trends in biotechnology*, 2009,27:388-397.
- [17] 易志刚,蚁伟民,周国逸,等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究[J]. *生态学报*, 2003,24(8):1673-1678.
- [18] 冯虎元,程国栋,安黎哲. 微生物介导的土壤甲烷循环及全球变化研究[J]. *冰川冻土*, 2004,26(4):411-419.
- [19] Zheng Y, Yang W, Sun X, *et al.* Methanotrophic community structure and activity under warming and grazing of alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2009,93:2193-2203.
- [20] 方华军,程淑兰,于贵瑞,等. 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展[J]. *土壤学报*, 2015(2):262-271.
- [21] 苑学霞,林先贵,褚海燕,等. 大气CO<sub>2</sub>浓度升高对不同施氮土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2006,26(1):48-53.
- [22] 郭小伟,韩道瑞,张法伟,等. 青藏高原高寒草原碳增贮潜力的初步研究[J]. *草地学报*, 2011,19(5):740-745.
- [23] Frank A. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002,34(9):1235-1241.
- [24] Hirota M, Tang Y, Hu Q, *et al.* Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004,36(5):737-748.

## Study on flux of main greenhouse gases and its affecting factors of grazing alpine meadow under different degradation levels on the Qinghai-Tibetan Plateau

GUO Xiao-wei<sup>1</sup>, DAI Li-cong<sup>1,2</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, LI Yi-kang<sup>1</sup>, LIN Liv<sup>1</sup>, QIAN Da-wen<sup>1</sup>,  
FAN Bo<sup>1</sup>, KE Xun<sup>1,2</sup>, SHU Kai<sup>1,2</sup>, PENG Cu-ji<sup>1,2</sup>,  
DU Yan-gong<sup>1</sup>, CAO Guang-min<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China*; 2. *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The alpine meadow under 4 degradation stages (ND, non-degraded; lightly degraded, LD; moderately degraded, MD; heavily degraded, HD) were selected to measure the greenhouse gas fluxes by using the static chambers and gas chromatography. The result indicated that the grassland greenhouse gas flux were significant different among 4 degradation stages ( $P < 0.05$ ). The important factors affecting CH<sub>4</sub> flux were soil compaction and organic matter (44.6% and 28.4%). And they were soil compaction and biomass for CO<sub>2</sub> flux (36.1% and 32.8%). And they were still soil compaction and organic matter (50.1% and 22.9%) for N<sub>2</sub>O flux. The trampling of animals increased the soil compaction and then changed the greenhouse gas flux. And a large amount of greenhouse gas was released while the alpine meadow was at severe degradation stage.

**Key words:** alpine meadow; grassland degeneration; greenhouse gas; environmental factor