

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0087

郭小伟 杜岩功 林丽 李以康 张法伟 李茜 刘淑丽 欧阳经政 曹广民. 青藏高原北缘3种高寒草地的CH₄、CO₂和N₂O通量特征的初步研究. 草业科学 2016 33(1):27-37.

Guo X W, Du Y G, Li Y K, Zhang F W, Li Q, Liu S L, Ouyang J Z, Cao G M. CH₄, CO₂ and N₂O flux among three types of alpine meadow in the north regions of Qinghai-Tibetan Plateau. Pratacultural Science 2016 33(1):27-37.

青藏高原北缘3种高寒草地的CH₄、 CO₂和N₂O通量特征的初步研究

郭小伟^{1,2} 杜岩功¹ 林丽¹ 李以康¹ 张法伟¹,
李茜¹ 刘淑丽^{1,2} 欧阳经政^{1,2} 曹广民¹

(1. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室 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: 高寒草地温室气体排放研究已成为高寒草地与气候变化关系的重要议题之一,但目前的研究多集中于单种类型草地的温室气体通量研究,缺乏多种草地类型间的比较。本研究于2009年以高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛为研究对象,利用静态箱法研究3种草地的CH₄、CO₂和N₂O通量特征。结果显示,天然高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛是大气CH₄的汇,大气CO₂和N₂O的源,其CH₄通量分别为-21.4、-28.1和-41.1 μg·m⁻²·h⁻¹;CO₂通量分别为360.6、447.9和475.1 mg·m⁻²·h⁻¹;N₂O通量分别为34.2、51.6和50.6 μg·m⁻²·h⁻¹。生长季的高寒草地CH₄吸收占全年的42.4%~45.6%,生长季的CO₂和N₂O排放量分别占全年的64.1%~67.8%和37.9%~66.7%。土壤5 cm温度与CH₄、CO₂、N₂O通量分别呈负相关、正相关和正相关关系,除高寒草甸CH₄通量外土壤5 cm与其他草地温室气体通量均达到显著水平($P<0.01$);土壤湿度与草地CH₄和CO₂通量呈正相关,与N₂O通量呈负相关,但仅与高寒草地CH₄和CO₂相关性达到显著水平($P<0.01$)。土壤呼吸温度敏感性大小(Q_{10})值显示,CO₂通量较CH₄和N₂O通量对温度更为敏感。将3种草地的CH₄、N₂O通量值换算为等量CO₂后发现草地温室气体通量造成的温室效应表现为高寒灌丛>栽培草地>高寒草甸。

关键词: 青藏高原; 高寒草地; 温室气体通量; 生长季; 非生长季

中图分类号: S812 文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2016)1-0027-11*

CH₄, CO₂ and N₂O flux among three types of alpine meadow in the north regions of Qinghai-Tibetan Plateau

Guo Xiao-wei^{1,2}, Du Yan-gong¹, Lin Li¹, Li Yi-kang¹, Zhang Fa-wei¹, Li Qian¹,
Liu Shu-li^{1,2}, Ouyang Jing-zheng^{1,2}, Cao Guang-min¹

(1. Key laboratory of Adaption and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of

Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Greenhouse gas flux from alpine grassland has been one of hotspots to study the relationship between climate change and alpine grassland. Most of these studies focused on gas flux of one type grassland and differences in gas flux among different alpine meadows receives little attention. A experiment was conducted in three types of grassland, ie. alpine meadow, artificial pasture and shrub meadow to investigate the Greenhouse gas fluxes in three types of grassland by

* 收稿日期: 2014-02-27 接受日期: 2015-07-24

基金项目: 国家自然科学基金重点(41030105); 国家自然科学基金(30970520); 青海省自然科学基金(31200379 2012-Z-921Q)

第一作者: 郭小伟(1985-) 男, 山东潍坊人, 助理, 博士, 主要从事植物生态学研究。E-mail: xwguo1206@163.com

通信作者: 曹广民(1962-) 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士, 主要从事草地生态学研究。E-mail: caogm@nwipb.cas.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

using static chambers and gas chromatography. This study indicated that three types of alpine grassland were the sink of atmospheric CH_4 , and were the source of atmospheric CO_2 and N_2O . CH_4 flux rates were -21.4 , -28.1 and $-41.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for FC, FCP and GG. CO_2 flux rates were 360.6 , 447.9 and $475.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for FC, FCP and GG. N_2O flux rates were 34.2 , 51.6 and $50.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for FC, FCP and GG. CH_4 , CO_2 and N_2O flux in growing season accounted for $42.4\% \sim 45.6\%$, $64.1\% \sim 67.8\%$ and $37.9\% \sim 66.7\%$ of the whole year, respectively. Soil temperature at 5 cm depth negatively correlated with CH_4 flux rate ($P < 0.01$) and positively correlated with CO_2 and N_2O flux rate ($P < 0.01$). Soil moisture positively correlated with CO_2 and CH_4 flux rate, negatively correlated with N_2O flux rate. Q_{10} revealed that CO_2 flux rate was more sensitive to increase in temperature than CH_4 and N_2O flux rate. The three grasslands for controlling greenhouse effect were in the following order: $\text{GG} > \text{FCP} > \text{FC}$. The CO_2 flux rate was much higher than CH_4 and N_2O flux rate, then contributing an important role to greenhouse effect of grassland.

Key words: Tibetan Plateau; alpine meadows; greenhouse gas flux; growing season; dormancy season

Corresponding author: Cao Guang-min E-mail: caogm@nwipb.cas.cn

地球正遭受气候变化的严重影响,从 1906 年到 2005 年地球表面的平均温度增加了 $(0.7 \pm 0.18)^\circ\text{C}$,近 50 年来地球表面温度的增加几乎是过去 100 年的 2 倍,大陆和多数海洋的观测证据表明,许多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^[1]。 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是 3 种重要的温室气体,自工业革命以来这 3 种气体在大气中的含量急剧上升。目前 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的浓度年增加量分别为 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 4 和 $0.8 \mu\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[2]。 CO_2 的温室作用占总温室效应的 50% 以上^[3], CH_4 贡献了 20% 的温室效应,并且 CH_4 和 N_2O 百年增温潜势是 CO_2 的 23 和 296 倍^[2],虽然这两种气体的排放量和空气中的含量小,但是其造成的增温效应不容小觑。

高海拔地区生态系统对于全球气候变化的响应敏感而又迅速^[4]。青藏高原海拔高,其平均海拔在 4 000 m 以上,高原基准温度低,草地土壤发育时间短,是气候变化的敏感区和生态脆弱带。关于青藏高原高寒草地生态系统温室气体排放的诸多研究已经有很多重要结论:高寒草地是大气温室气体 CO_2 汇的结论^[5-7],温度是控制土壤呼吸的主要因子,它能够解释草地温室气体通量 44% 的变异度^[8],高寒草甸植物群落是大气 CH_4 弱源,而高寒灌丛植物群落是大气 CH_4 弱汇,青藏高原高寒草地年 CH_4 年吸收量被估计为 $0.2 \text{ Tg}^{[9]}$,高寒草地是重要的大气 N_2O 源,年 N_2O 贡献量达 $0.3 \text{ Tg}^{[10]}$,而 CO_2 的年贡献量达 $46.5 \text{ Tg}^{[11-12]}$ 。但是这些研究大多着重于某一类型高寒草地的温室气体排放或几种草地的单一温室气体排放研究,缺乏多种类型草地 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 的同时研究。高寒草甸是青藏高原主要草地类型,约占青藏高原总面积的 35%,在高原草地畜牧业中占有十分重要的地位(青藏高原高寒草

甸生态系统碳增汇潜力)。金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛分布面积仅次于高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸,广布于海拔 3 200 ~ 4 500 m 的山地阴坡、半阴坡及洪积扇上(祁连山金露梅灌丛草甸群落结构及主要种群的点格局分析),而垂穗披碱草(*Elymus nutans*)栽培草地因其具有广泛的生长可塑性和极强的抗寒性及抗旱性,从滩地、沟谷、阴坡山麓地带到灌丛草甸和高山草甸均能生长,成为在青藏高原种植最为广泛的栽培草地。本研究以天然高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛为研究对象,并且根据 3 种温室气体的增温潜势,将 3 种温室气体排放量换算为 CO_2 排放量,旨在探讨:1) 不同类型高寒草地 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 释放规律;2) 环境因子对温室气体排放的影响;3) 高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛 3 种草地中哪种草地温室效应更强。

1 材料与方法

1.1 研究区地理位置

试验布置于中国科学院海北高寒草甸生态系统实验观测站附近,其坐落在青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷,位于 $101^\circ 19' \text{ E}$ 、 $37^\circ 37' \text{ N}$,站区平均海拔 3 280 m。年平均温度 -1.7°C ,最暖月为 7 月(9.8°C),最冷月为 1 月左右(-14.8°C)。年均降水量 618 mm,主要集中在生长季(数据来自中国科学院海北高寒草甸生态系统实验观测站)。

1.2 样地设置与样品采集

于 2009 年 1 月到 2010 年 8 月在青海省海北州进行了 3 种草地的原位观测试验。在植物分布比较均匀、地形平坦的地段,选取垂穗披碱草栽培草地、高寒草甸和高寒金露梅灌丛作为观测对象,每个草地类型设置 3 个重复。各样地具体特征如下:

高寒草甸在当地一般用作夏季牧场,其主要植物种有矮嵩草(*K. humilis*)、小嵩草(*K. parva*)、垂穗披碱草、苔草(*Carex* spp.)、鹅绒委陵菜(*Potentilla ansri-na*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等。

垂穗披碱草栽培草地一般用于种植垂穗披碱草,于秋季进行收割。栽培草地于试验前一年,按照当地栽培草地建植方法,将天然草地翻耕后,撒播垂穗披碱草种子,播种量为 800 粒·m⁻²,并且施加磷酸二铵 90 g·m⁻²。

高寒灌丛草地一般被用作冬季牧场,其优势种为金露梅,金露梅灌丛呈岛状分布于禾本科草甸中,金露梅下层分布有矮嵩草、小嵩草、垂穗披碱草、苔草、鹅绒委陵菜等植物。

本研究中高寒草甸、栽培草地位于中国科学院海北高寒草甸生态系统实验观测站内,高寒灌丛位于离站区 300 m 的干柴滩,3 个试验小区均为放牧处理。

静态箱法测定温室气体通量,高寒草地和栽培草地观测点采用 50 cm×50 cm×50 cm 的箱体,高寒灌丛采用 50 cm×50 cm×100 cm 的箱体,箱体外包有白色

塑料泡沫和白色纱布,不透明。气体采集的同时测量当时的地下 5 cm 温度(*t*₁)、地表温度(*t*₂)、箱内温度(*t*₃)和空气温度(*t*₄),土壤湿度。植物生长季 5—9 月,每月测定 4 次,每周进行一次,冬季每月测定两次,于月中和月末进行气体样品采集。

1.3 样品分析

CO₂、CH₄、N₂O 浓度测定采用气相色谱法(HP4890D, Agilent),色谱配置与分析条件见表 1。

1.4 计算公式

通量计算公式^[9]:

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

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, *ρ* 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。

*Q*₁₀ 值计算公式^[13]:

$$F=a \times e^{bt} \quad Q_{10}=e^{10b}$$

式中 *Q*₁₀ 表示土壤呼吸温度敏感性的大小, *F* 是温室气体排放通量, *a*、*b*、*e* 为常数, *t* 为土壤 5 cm 温度。

表 1 色谱配置与分析条件
Table 1 The system specification and analysis parameters

待分析化合物 Sample	甲烷 CH ₄	二氧化碳 CO ₂	氧化亚氮 N ₂ O
色谱柱 Chromatographic column	Col ₁ : SS-2 m×2 mm , packed with 13XMS (60/80) **	Col ₂ : SS-2 m×2 mm packed with porapak Q (60/80)	Col ₃ : SS-1 m×2 mm; packed with porapak Q (80/100) Col ₄ : SS-3 m×2 mm; packed with porapak Q (80/100)
载气/流速 Flow speed/cm ³ · min ⁻¹	N ₂ (99.999%) /30	N ₂ (99.999%) /25	N ₂ (99.999%) /25
柱温 Coloum temperature/℃	55	55	55
转化器温度 Catalyst temperature/℃	—	Nickel catalyst/375	—
检测器温度 Detector temperature/℃	FID/200	FID/200	ECD/330
Air 和 H ₂ 流速 Flow speed/cm ³ · min ⁻¹	Air: 400 , H ₂ : 30	Air: 400 , H ₂ : 30	—
分析时间 Analysis time/min	1.75	1.4	3.5
色谱响应范围 Response range(v/v)	9.5×10 ⁻⁷ ~ 6.06×10 ⁻⁵	1.95×10 ⁻⁴ ~ 4.02×10 ⁻⁴	1.63×10 ⁻⁷ ~ 9.412×10 ⁻⁶
精确度 Accuracy	±32 nmol · mol ⁻¹	±1.29 μmol · mol ⁻¹	±5.0 nmol · mol ⁻¹
色谱检测限 Detectability/mg · m ⁻² · h ⁻¹	0.062	6.890	0.027

注: ** 表示材料-长度×内径×填料商用名(目数): SS, 不锈钢。
Note: **, material-length×inner diameter×packing of commercial(mesh) . SS, Stainless steel.

1.5 影响因子的测定

在进行温室气体通量测定的同时,进行(t_1)、地表温度(t_2)、箱内温度(t_3)和空气温度(t_4)及土壤湿度的测定,其中,使用 JM 624 便携式数字温度计测量各处理的即时温度,使用 TDR 便携式水分测定仪测定土壤湿度(0-10 cm)。

1.6 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采用单因素方差分析使用 SPSS 20.0 统计软件。

2 结果

2.1 3 种草地的甲烷通量特征

天然高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛草地甲烷通量均表现为负值,是大气甲烷的汇,其通量分别为 -21.4 、 -28.1 和 $-41.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。高寒灌丛草地甲烷通量显著高于高寒草甸[天然草甸($n=54$, $P=0.002$)和垂穗披碱草栽培草地($n=54$, $P=0.001$)]栽培草地 CH_4 吸收量比高寒草甸多 31.3%,但二者差异

未达到显著水平($n=54$, $P=0.095$) (图 1)。3 种草地甲烷通量季节变化明显, CH_4 通量最高值均出现在生长旺季或冬季 12 月左右,但栽培草地在生长季的 6、7 月份出现 CH_4 吸收量的极低值。高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛生长季 CH_4 平均通量为 -21.8 、 -30.8 和 $-42.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,且三者差异显著($n=54$, $P=0.001$)。生长季(5-9 月)3 种草地 CH_4 释放量占全年的 42.4%、45.6% 和 45.5%。

2.2 3 种草地的二氧化碳通量特征

试验期间,高寒草甸、垂穗披碱草草地和高寒灌丛草地的 CO_2 通量均为正值,说明 3 种草地是大气 CO_2 的源。3 种草地的 CO_2 通量数值年分布图呈明显的正态分布, CO_2 释放最大值均出现在 7 月初,而最低值出现在休眠季节,相比休眠季的低 CO_2 通量,高寒草甸和栽培草地都有一定的释放小峰值在 2 月出现(图 2)。高寒草甸、垂穗披碱草栽培草地和高寒灌丛草地的 CO_2 年通量分别为 360.6、447.9 和 475.1 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其中高寒灌丛 CO_2 通量最高。单因素方差分析显示,高寒灌丛 CO_2 释放通量高于高寒

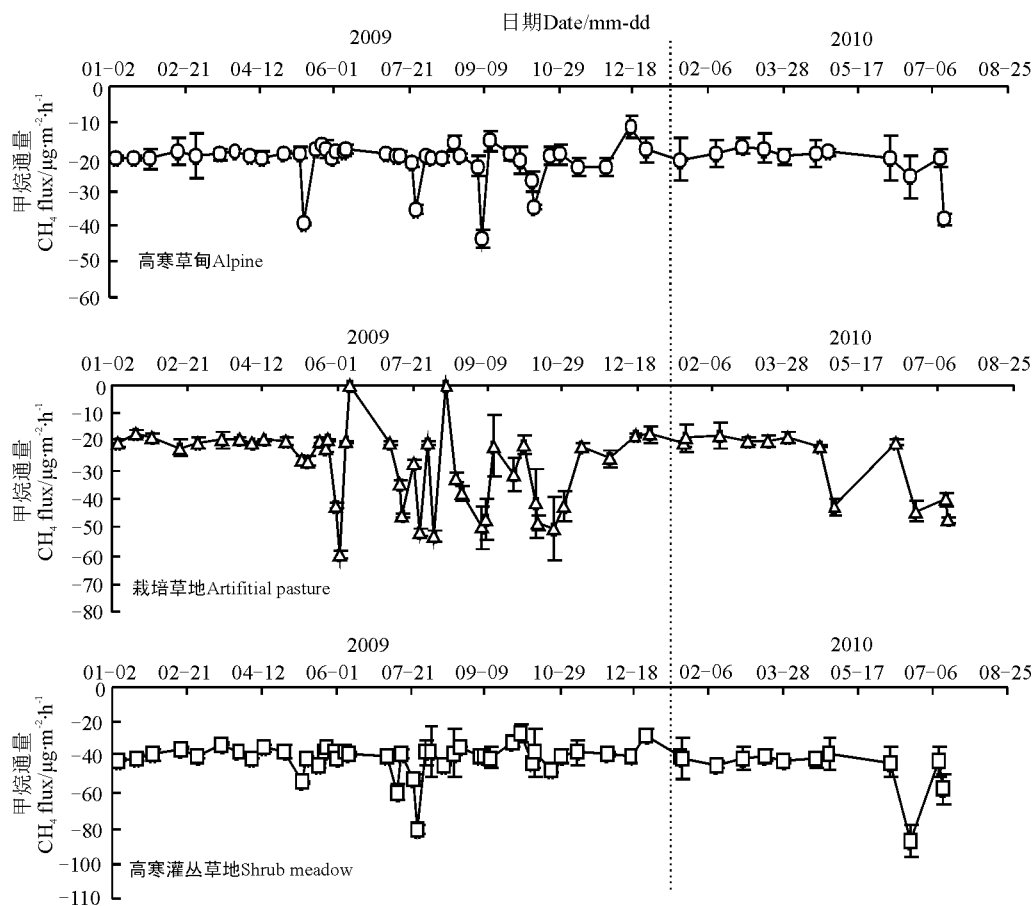


图 1 3 种草地的甲烷通量特征

Fig. 1 CH_4 flux of three types of grassland

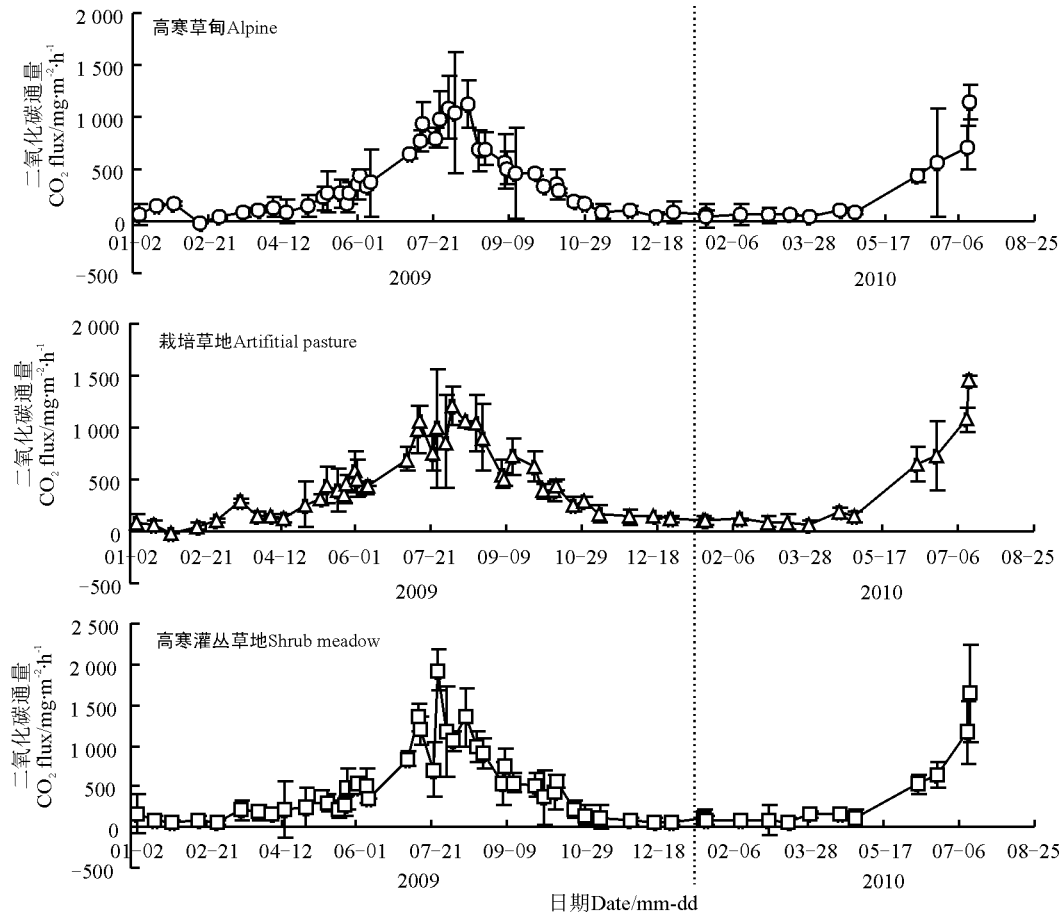


图2 3种高寒草地二氧化碳通量特征

Fig. 2 CO₂ flux of three types of grassland

草甸 ($n=54$, $P=0.125$) 和栽培草地 ($n=54$, $P=0.125$), 栽培草地 CO₂ 释放量比高寒草甸多 24.2% ($n=54$, $P=0.24$), 但差异均未达到显著水平。3 种草地生长季 CO₂ 平均通量为 587.0、688.7 和 754.2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 生长季 3 种草地间差异也未达到显著水平。生长季 3 种草地 CH₄ 释放量占全年的 67.8%、64.1% 和 66.1%。

2.3 3 种草地氧化亚氮通量特征

试验期间, 高寒草甸、垂穗披碱草草地和高寒灌丛草地的 N₂O 通量均为正值, 说明 3 种草地是大气 N₂O 的源。N₂O 通量曲线与 CH₄ 通量曲线类似, 释放通量最大值大多出现在生长旺季, 而最低值出现在休眠季节 (图 3)。高寒草甸、垂穗披碱草草地和高寒灌丛草地 N₂O 平均通量分别为 34.2、51.6 和 50.6 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。N₂O 释放通量最高的仍然为高寒灌丛。单因素方差分析显示, 高寒灌丛高于高寒草甸 ($n=46$, $P=0.163$) 和栽培草地 ($n=46$, $P=0.938$), 栽培草地高于高寒草甸 ($n=46$, $P=0.147$), 但 3 种草地间 N₂O 排放通量差异均未达到显著水平。3 种草地生长季 N₂O 平均排放速率为 51.8、47.0 和 81.0 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 但差异也未达到显著水

平, 生长季 3 种草地 CH₄ 释放量占全年的 63.1%、37.9% 和 66.7%。

2.4 3 种草地温室气体排放与环境因子之间的关系

在所有的温度环境条件 (t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4) 中, 土壤 5 cm 温度 t_2 与草地温室气体 CH₄、CO₂ 和 N₂O 排放通量关系最为密切 (表 2), 除高寒草甸 CH₄ 通量和栽培草地 CO₂ 通量相关不显著外 ($P>0.05$), 对于其余类型的温室气体排放都达到了显著 ($P<0.05$) 或极显著水平 ($P<0.01$), 总体来看温度与 CH₄、CO₂、N₂O 通量分别呈负相关、正相关和正相关关系, 也就是说, 土壤 5 cm 温度的升高能够促进草地 CH₄ 的吸收及 CO₂ 和 N₂O 的排放。Q₁₀ 值是反映温度上升, 温室气体响应升高速率的指标。本研究, 高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛 CH₄ 通量 Q₁₀ 值分别为 1.08、1.29 和 1.07, CO₂ 的 Q₁₀ 值分别为 3.21、2.82 和 2.93, N₂O 的 Q₁₀ 值分别为 1.85、1.23 和 1.65。CO₂ 通量 Q₁₀ 值最高, 对温度上升响应最为明显。

相比土壤 5 cm 温度, 土壤湿度与草地温室气体通量相关关系相对较弱, 土壤湿度仅与高寒草甸 CH₄ 通量和 CO₂ 通量分别呈极显著 ($P<0.01$) 和显著相关

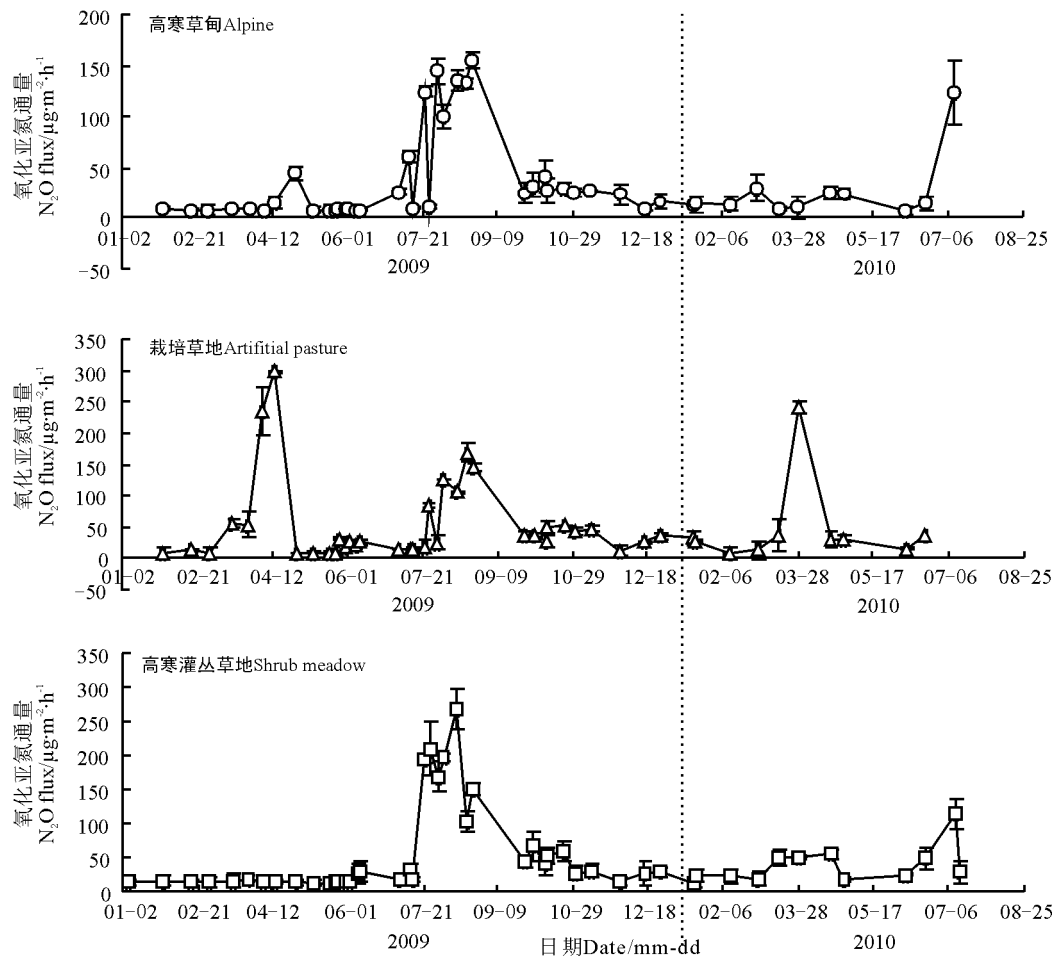


图 3 3 种高寒草地氧化亚氮通量特征
Fig.3 N₂O flux of three types of grassland

表 2 主要环境因子与 3 种温室气体通量的相关关系
Table 2 Correlation between main environmental factors and greenhouse gases

草地种类 Grassland type	温室气体类别 Greenhouse gas type	5 cm 温度 Soil temperature at 5 cm	土壤湿度 Soil moisture
高寒草甸 Alpine	CH ₄	-0.260	0.37**
	CO ₂	0.861**	0.20*
	N ₂ O	0.531**	-0.11
栽培草地 Artificial pasture	CH ₄	-0.512*	0.60
	CO ₂	0.875	0.07
	N ₂ O	0.042**	-0.14
高寒灌丛草地 Shrub meadow	CH ₄	-0.315**	0.20
	CO ₂	0.853**	0.78
	N ₂ O	0.487**	-0.12

注: 表中数值代表相关系数, * 表示 0.05 水平显著相关, ** 表示 0.01 水平显著相关。
Note: These values in this table is correlation coefficient, * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

($P<0.05$) ,其余草地温室气体通量与土壤湿度相关性均未达到显著水平(表 2) 。从土壤湿度与 3 种草地温室气体通量总体关系来看 ,土壤湿度与草地 CH₄ 和 CO₂ 通量呈正相关 ,与 N₂O 通量成负相关。

3 讨论与结论

3.1 3 种草地的温室气体排放

青藏高原高寒草地的生长季在每年的 5—9 月份 ,非生长季从 10 月到次年的 4 月份 ,非生长季环境温度低抑制了土壤生物代谢活动^[14] ,从而使得非生长季的温室气体排放速率仅为生长季的 79%~93% ,本研究所处区域年均温为 -2℃^[15] ,低温显著降低了高寒草地非生长季的 CH₄ 通量水平。高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛 CH₄ 年吸收量分别为 18.7、24.6 和 36.0 kg·hm⁻²·a⁻¹ ,此数值与同纬度内蒙草原 CH₄ 通量相差不大(表 4) ,说明高寒草地的 CH₄ 氧化能力尽管受到低温的抑制 ,但仍保持较高的氧化速率 ,这可能是由于青藏高原高寒草地土壤中丰富的有机碳含量^[16] ,

表 3 3 种高寒草地温室气体排放速率

Table 3 Greenhouse gas flux rate of three types of grassland

草地类型 Grassland type	甲烷通量 CH ₄ flux/ mg · m ⁻² · h ⁻¹	二氧化碳通量 CO ₂ flux/μg · m ⁻² · h ⁻¹	氧化亚氮通量 N ₂ O flux/ μg · m ⁻² · h ⁻¹	等 CO ₂ 量 CO ₂ -e/ mg · m ⁻² · h ⁻¹
FC	-21.4±5.9	360.6±150.7	34.2±22.5	370 256.6
FCP	-28.1±13.4	447.9±159.6	51.6±25.3	462 574.3
GG	-41.1±10.2	475.1±246.7	50.6±30.2	489 151.3

注: 二氧化碳当量由甲烷、二氧化碳和氧化亚氮通量换算而来。
Note: CO₂-equal is calculated from CH₄, CO₂ and N₂O flux rate.

表 4 3 种高寒草地与其他生态系统温室气体通量比较

Table 4 Comparison of greenhouse gas fluxes of Tibetan Plateau alpine grassland with other ecosystems

地点 Location	植被覆盖 Vegetation	甲烷通量 CH ₄ flux/ mg · m ⁻² · h ⁻¹	氧化亚氮通量 N ₂ O flux/ μg · m ⁻² · h ⁻¹	二氧化碳通量 CO ₂ flux/ mg · m ⁻² · h ⁻¹
海北州 Haibei	高寒草甸 Alpine meadow	-0.021±0.005	34.2±22.5	360.6±150.7
海北州 Haibei	栽培草地 Artificial pasture	-0.028±0.013	51.6±25.3	447.9±159.6
海北州 Haibei	高寒灌丛 Shrub	-0.041±0.010	50.6±30.2	475.1±246.7
若尔盖草原 Zoige Plateau	高寒湿地 Alpine wetland	-3.690±0.8 ^[4]	10.0 ^[5]	200.4 ^[6]
西藏纳木错 Nam Co, Tibet	高寒草原 Alpine grassland	-0.047 ^[1]	0.487 ^[1]	208.2 ^[1]
四川贡嘎山 Gongga mountain, Sichuan	针叶林 Coniferous forest	-0.079±0.07 ^[7]	51.2±41.6 ^[7]	1 000.0±599 ^[7]
内蒙锡林郭勒 Xilinguole, Inner mongolia	草甸草原 Meadow steppe	-0.055±0.051 ^[2]	5.6±2.8 ^[2]	361.2±308.8 ^[2]
内蒙锡林郭勒 Xilinguole, Inner mongolia	羊草草原 <i>Leymus chinensis</i> steppe	-0.050±0.031 ^[2]	5.6±3.2 ^[2]	248.2±213.2 ^[2]
内蒙锡林郭勒 Xilinguole, Inner mongolia	针茅草原 <i>Stipa</i> steppe	-0.057±0.053 ^[2]	4.9±2.4 ^[2]	316.3±204.5 ^[2]

以及甲烷菌含量^[17-18]。生长季草地 CH₄ 氧化量占全年的 42.4%、45.6% 和 45.5% ,虽然非生长季的草地 CH₄ 吸收速率受到低温的影响 ,但是高寒草地非生长季长达 7 个月 ,导致了绝大部分 CH₄ 累积吸收量发生在非生长季^[19]。高寒草甸开垦为栽培草地其 CH₄ 吸收能力有所增强 ,但是栽培草地的生态不稳定问题也值得深入思考 ,其在建植后的 3 ~ 5 年后完全退化^[20]。而高寒灌丛大气 CH₄ 吸收能力在 3 种草地中最强 ,但是高寒草甸在人类过度放牧下 ,目前正逐年退化^[21] ,保证高寒灌丛在青藏高原的生长面积也是减少大气中

CH₄ 含量的一种有效措施。
高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛年 CO₂ 年排放量分别为 315.9、392.3 和 416.2 t · hm⁻² · a⁻¹ ,与 2005 年本地区的研究结果基本一致^[22](表 3、表 4)。本研究中的高寒草甸和栽培草地 CO₂ 通量差异不显著 ,而灌丛草地 CO₂ 排放量要高于高寒草甸和栽培草地。以往关于高寒草地温室气体的研究和本研究都显示土壤 5 cm 温度和土壤湿度均与 CO₂ 排放量正相关 3 种草地间温度差异不显著 ,而高寒草甸土壤湿度显著高于栽培草地和高寒灌丛草地 ,但其 CO₂ 通量却表现为高寒灌丛草地和栽培草地高于高寒草甸 ,此结论相悖

于土壤湿度与 CO_2 通量正相关的结论^[8,14,19],其原因可能是植物群落的不同和由此引起的土壤微环境的差异^[23],栽培草地和高寒灌丛群落均拥有较高的单位面积生物量,因此植物群落能够排放更多 CO_2 ,不同植物群落对于土壤生物生存环境的温度和湿度也有影响^[23],进而促进或是抑制微生物呼吸。虽然青藏高原高寒草地生长季时间仅为 5 个月,但是生长季 3 种草地 CO_2 释放量占全年的 67.8%、64.1% 和 66.1%,生长季草地呼吸包括土壤呼吸和植物呼吸,而非生长季只有土壤呼吸,由此可见植物群落呼吸也占有相当比重,而非生长季的冻融交替作用^[24-25]和积雪覆盖作用也在一定程度上增加了草地的呼吸作用^[26-28]。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^[29],形成了一个大气 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^[30-31]。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。

高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛全年 N_2O 排放速率观测均为正值,说明高寒草地是大气 N_2O 的源,但也有研究表明非生长季湿地土壤是 N_2O “汇”^[32],本研究中年 N_2O 排放量分别为 29.8、45.2 和 44.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。草地的 N_2O 通量主要依赖于微生物的硝化和反硝化作用^[33],3 种草地间 N_2O 通量大小顺序不同于 CH_4 和 CO_2 通量的 3 种草地大小顺序, N_2O 平均通量最高的为栽培草地,这与栽培草地能够产生更多的凋落物和栽培草地的翻耕施肥有关^[34],在冬末和初春时节 3 种草地均发现有明显的 N_2O 排放峰值,这可能是由于草地在冬季完全封冻之后,冻结的土壤颗粒和土壤水分形成一层不透气的薄膜,使得土壤中产生的各种温室气体不能向外扩散^[35],当土壤解冻时,这部分累积的 N_2O 得以释放,出现 N_2O 排放峰值^[36]。

3.2 3 种草地温室气体排放与环境因子的关系

温度是影响高寒草地生态系统温室气体排放的主要因素之一^[14,37],其主要是通过影响微生物的新陈代谢速率来控制温室气体产生速率的,而土壤 5 cm 处温度能较好的反应一些与草地温室气体产生和消耗有关微生物的土壤分布层温度,因此土壤 5 cm 温度能够较为准确地反映温度对土壤微生物代谢活动的影响^[38]。本研究中 5 cm 温度与 CH_4 吸收通量呈负相关,与 N_2O 和 CO_2 排放通量均存在正相关关系,除高寒草甸的

CH_4 通量和栽培草地的 CO_2 通量与 5 cm 温度未达到显著水平,其余草地的温室气体通量与 5 cm 温度均达到显著水平。 Q_{10} 值是反映温度上升,温室气体响应升高速率的一个指标^[39],本研究中 3 种草地 CH_4 通量 Q_{10} 值范围为 1.07 ~ 1.29, CO_2 通量 Q_{10} 值分布在 2.82 ~ 3.21,而 N_2O 通量 Q_{10} 值分布于 1.23 ~ 1.85, CO_2 通量 Q_{10} 值最高说明草地的 3 种温室气体中 CO_2 通量对于温度上升响应最为激烈, CH_4 上升的最为缓和,此结果对于草地温室气体通量收气候变化影响也有一定的指导意义。

土壤温度通过微生物活动来影响温室气体的产生过程,而土壤湿度则是通过改变土壤通透性和土壤理化性质来控制温室气体离开草地的速率^[40],但是温室气体离开土壤的速率又受到土壤粒径、土壤类型等诸多因素影响。本研究中土壤湿度上升阻碍 CH_4 氧化和 N_2O 排放,而促进 CO_2 排放,但是土壤湿度仅与天然草甸的 CH_4 和 CO_2 通量相关性达到显著水平,与其他草甸的 3 种温室气体通量相关性均不显著。

3.3 不同草地的温室效应比较

青藏高原是一个巨大的天然有机碳库,其草地有机碳量达到 $3.351\,973 \times 10^{10} \text{ t C}$ ^[41],巨大的碳库也存在着各种温室气体的排放,其年 CO_2 排放量达 46.5 $\text{Tg CO}_2 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[11-12],年 CH_4 排放量达 0.2 $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[9],年 N_2O 排放量达 0.3 $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[10],但是这些报道多基于一种草地的一种温室气体排放研究。本研究以高寒草甸、栽培草地和高寒灌丛为研究对象,进行了为期一年的 3 种温室气体通量观测,结果显示 3 种草地中, CH_4 吸收速率和 CO_2 释放速率最高的均为高寒灌丛, N_2O 排放最多的为栽培草地,按照温室气体的红外吸收能力, CH_4 为 CO_2 的 25 倍, N_2O 为 CO_2 的 298 倍,计算出等红外吸收能力量的 CO_2 ,以此估计各种草地的总的温室气体效应(表 3)。等 CO_2 值高寒灌丛最高,因此其向大气排放的温室气体最多,高寒草甸最低,高寒草甸的温室气体通量造成的温室效应仅为高寒灌丛的 75.7%。因 CO_2 排放量远大于同种草地 CH_4 和 N_2O 通量,所以草地温室气体排放造成的温室效应主要来自草地 CO_2 通量。栽培草地是人们为了追求更高的产草量而对高寒草甸进行翻耕播种的草地,本研究中选取的垂穗披碱草是青藏高原最为常见的栽培草地种类,相比高寒草甸,栽培草地多排放温室气体 23%。目前,高寒灌丛因过度放牧而大面积退化,虽然高寒灌丛的温室气体排放量最高,但是其作为冬季牧场和改善

生态环境具有不可替代的作用^[42]。青藏高原基准温度地,土壤层浅薄,生态系统单一^[43],易受到气候变化和人类活动的影响。关于青藏高原在温室气体排放方面究竟是放大还是缓解气候变化的影响,尚无明确的回答。多数研究认为气候变化导致青藏高原温度升高,但是对于青藏高原的降水变化还有所争议。本研究

显示温度升高促进 CO₂ 和 N₂O 的排放以及 CH₄ 的吸收,而草地的温室气体排放导致的温室效应主要来自于 CO₂,因此若仅考虑气候变化的温度效应,本研究认为青藏高原高寒草地将扮演气候变化加速器的角色。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2007—The physical Science Basis: Working Group I contribution to The Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*, 1990, 248: 1217-1219.
- [4] 孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化与发展. 广州: 广东科技出版社, 1998.
Sun H L, Zheng D. Formation, Evolution and Development of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. Guangzhou: Guangdong Science Technology Press, 1998.
- [5] 曹广民, 李英年, 张金霞, 赵新全. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量. *环境科学*, 2001, 22(6): 14-19.
Cao G M, Li Y N, Zhang J X, Zhao X Q. Values of carbon dioxide emission from different land-use patterns of alpine meadow. *Environmental Science*, 2001, 22(6): 14-19. (in Chinese)
- [6] 曹广民, 李英年, 张金霞, 赵新全. 环境因子对暗沃寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放速率的影响. *草地学报*, 2001, 9(4): 23-26.
Cao G M, Li Y N, Zhang J X, Zhao X Q. Effect of soil circumstances biogeochemical factors on carbon dioxide emission from Mollic-Gryic cambisols. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, 9(4): 23-26. (in Chinese)
- [7] 曹广民, 张金霞, 赵新全, 李英年, 周兴民. 草毡寒冻锥形土土壤 CO₂ 释放量估测方法初探. *土壤学报*, 2002, 39(2): 261-267.
Cao G M, Zhang J X, Zhao X Q, Li Y N, Zhou X M. Methods of estimating CO₂ emission from Mat Cryo-Sod soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 261-267. (in Chinese)
- [8] 吴琴, 胡启武, 曹广民, 李东. 高寒矮嵩草草甸冬季二氧化碳释放特征. *生态学报*, 2011, 31(31): 5107-5112.
Wu Q, Hu Q W, Cao G M, Li D. CO₂ emission from an alpine *Kobresia humilis* meadow in winters. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(31): 5107-5112. (in Chinese)
- [9] Cao G, Xu X, Long R, Wang Q, Wang C, Du Y, Zhao X. Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai-Tibet Plateau. *Biology Letters*, 2008, 4(6): 681-684.
- [10] Du Y, Cui Y, Xu X, Liang D, Long R, Cao G. Nitrous oxide emissions from two alpine meadows in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2008, 311(1-2): 245-254.
- [11] Kato T, Tang Y, Gu S, Cui X, Hirota M, Du M, Li Y, Zhao X, Oikawa T. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 124(1): 121-134.
- [12] 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 544-554. (in Chinese)
- [13] Jiang C, Yu G, Fang H, Cao G, Li Y. Short-term effect of increasing nitrogen deposition on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(24): 2920-2926.
- [14] 徐世晓, 赵新全, 李英年, 赵亮, 曹广民, 唐艳鸿, 古松, 王勤学, 杜明远. 青藏高原高寒灌丛生长季和非生长季二氧化碳通量分析. *中国科学: D 辑*, 2005, 34(A02): 118-124.
Xu S X, Zhao X Q, Li Y N, Zhao L, Cao G M, Tang Y H, Gu S, Wang Q X, Du M Y. CO₂ fluxes of alpine shrub on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science China: D*, 2005, 34(A02): 118-124. (in Chinese)

- [15] 李英年,赵新全,曹广民,赵亮,王勤学. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析. 高原气象, 2004(4): 558-567.
- Li Y N, Zhao X Q, Cao G M, Zhao L, Wang Q X. Analysis on climates and vegetation productivity background at haibei alpine meadow ecosystem research station. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 558-567. (in Chinese)
- [16] Wang G X, Qian J, Cheng G D, Lai Y M. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication. Science of the Total Environment, 2002, 291(1): 207-217.
- [17] Zheng Y, Yang W, Sun X, Wang S, Rui Y, Luo C, Guo L. Methanotrophic community structure and activity under warming and grazing of alpine meadow on the Tibetan Plateau. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 93(5): 2193-2203.
- [18] Sullivan B W, Selman P C, Hart S C. Does dissolved organic carbon regulate biological methane oxidation in semiarid soils. Global Change Biology, 2013, 9(13): 1537-1545.
- [19] 王广帅,杨晓霞,任飞,张振华,贺金生. 青藏高原高寒草甸非生长季温室气体排放特征及其年度贡献. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1994-2001.
- Wang G S, Yang X X, Ren F, Zhang Z H, He J S. Non-growth season's greenhouse gases emission and its yearly contribution from alpine meadow on Tibetan Plateau of China. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 1994-2001. (in Chinese)
- [20] 张耀生,赵新全,黄德清. 青藏高寒牧区多年生人工草地持续利用的研究. 草业学报, 2003, 12(3): 22-27.
- Zhang Y S, Zhao X Q, Huang D Q. The study on sustainable using of perennial sowing grassland in the Qinghai-Tibet Plateau pasture. Acta Pedologica Sinica, 2003, 12(3): 22-27. (in Chinese)
- [21] 周华坤,周立,赵新全,周彦艳,刘伟,严作良. 围栏封育对轻牧与重牧金露梅灌丛的影响. 草地学报, 2004(2): 140-144.
- Zhou H K, Zhou L, Zhao X Q, Zhou Y Y, Liu W, Yan Z L. Effect of fencing on lightly and heavily grazing potentilla fruticosa shrublands. Acta Agrestia Sinica, 2004(2): 140-144. (in Chinese)
- [22] 李东,曹广民,胡启武,吴琴,李月梅,王迎红. 高寒灌丛草甸生态系统二氧化碳释放的初步研究. 草地学报, 2005(2): 144-148.
- Li D, Cao G M, Hu Q W, Wu Q, Li Y M, Wang Y H. A Primary Study on CO₂ emission from alpine *Potentilla fruticosa* scrub meadow ecosystem. Acta Agrestia Sinica, 2005(2): 144-148. (in Chinese)
- [23] 刘弘,马杰,刘振威,刘志远. 不同植物群落的生态效应研究. 山西农业科学, 2008, 36(7): 81-85.
- Liu H, Ma J, Liu Z W, Liu Z Y. Study on ecological effect of plant communities. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2008, 36(7): 81-85. (in Chinese)
- [24] Song C, Wang Y, Wang Y, Zhao Z. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China. Atmospheric Environment, 2006, 40(35): 6879-6885.
- [25] 伍瑶,星瑶,沈珍瑶. 冻融作用对土壤温室气体产生与排放的影响. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1432-1439.
- Wu Y, Xing Y, Shen Z Y. Effects of freezing-thawing cycle on greenhouse gas esproduction and emission from soil. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(7): 1432-1439. (in Chinese)
- [26] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, Henry K S, Welman A T, Demers J D, Fahey T J, Driscoll C T, Tierney G L, Nolan S. Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 151-174.
- [27] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P M, Hardy J P, Fitzhugh R D, Driscoll C T. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 175-190.
- [28] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, Hardy J P, Fitzhugh R D, Tierney G L. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 191-213.
- [29] 田玉强,高琼,张智才,张勇,朱锴. 青藏高原高寒草地植物光合与土壤呼吸研究进展. 生态环境学报, 2009, 18(2): 711-721.
- Tian Y Q, Gao Q, Zhang Z C, Zhang Y, Zhu K. The advances in study on plant photosynthesis and soil respiration of alpine grasslands on the Tibetan Plateau. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 711-721. (in Chinese)
- [30] 王艳芬,陈佑忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.
- Wang Y F, Chen Z Z, Tieszen L T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilingole, Inner Mongolia, China. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(6): 545-551. (in Chinese)

- [31] 王跃思 纪宝明. 内蒙古天然与放牧草原温室气体排放研究. 应用生态学报 2003 ,14(3) : 372-376.
Wang S Y Ji B M. Greenhouse gases emission or uptake in Inner Mongolia natural and free-grazing grasslands. Chinese Journal of Applied Ecology 2003 ,14(3) : 372-376. (in Chinese)
- [32] 孙志高 刘景双 王金达. 三江平原小叶章湿地开垦前后 N₂O 通量特征与影响因素分析. 山东农业大学学报(自然科学版) , 2007(03) : 443-449 456.
Sun Z G Liu J Q Wang J D. Emissions of CO₂ ,CH₄ and N₂O from broad-leaved forested swamp soils in Xiaoxingan Mountains. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition) 2007(03) : 443-449 456. (in Chinese)
- [33] 齐玉春 董云社. 土壤氧化亚氮产生 排放及其影响因素. 地理学报 ,1999 ,54(6) : 534-542.
Qi Y C Dong Y S. Nitrous oxide emissions from soil and some influence factors. Geographica Sinica ,1999 ,54(6) : 534-542.
- [34] 王长庭 曹广民 王启兰 施建军 杜岩功 龙瑞军. 三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系. 应用生态学报 2007 ,18(11) : 2426-2431.
Wang C T Cao G M Wang Q L Shi J J Du Y G Long R J. Characteristics of artificial grassland plant communities with different establishment duration and their relationships with soil properties in the source region of Three Rivers in China. Chinese Journal of Applied Ecology 2007 ,18(11) : 2426-2431 (in Chinese)
- [35] Koponen H T Flöjt L Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: A laboratory microcosm study. Soil Biology and Biochemistry 2004 ,36(5) : 757-766.
- [36] Priemé A Christensen S. Natural perturbations ,drying-wetting and freezing-thawing cycles ,and the emission of nitrous oxide ,carbon dioxide and methane from farmed organic soils. Soil Biology and Biochemistry 2001 ,33(15) : 2083-2091.
- [37] Liu X Wan S Su B. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem . Plant and Soil 2002 ,240(2) : 213-223.
- [38] 张宪洲 石培礼 刘允芬 欧阳华. 青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放及其碳平衡. 中国科学: D 辑 2005 ,34(A02) : 193-199.
Zhang X Z Shi P L Liu Y F Ouyang H. Alpine grassland ecosystem soil CO₂ emissions and carbon balance on the Qinghai-Tibetan Plateau. Science in China Ser. D 2005 ,34(A02) : 193-199. (in Chinese)
- [39] 盛浩 杨玉盛 陈光水 高人 曾宏达 杜紫贤 张静. 土壤异养呼吸温度敏感性(Q₁₀) 的影响因子. 亚热带资源与环境学报 , 2008(3) : 74-83.
Sheng H Yang Y S Chen G S Gao R Zeng H D Du Z X Zhang J. Controls on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: Q₁₀ variability and analysis. Journal of Subtropical Resources and Environment 2008(3) : 74-83. (in Chinese)
- [40] 陈全胜 李凌浩 韩兴国 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报 2003 ,23(5) : 972-978.
Chen Q S Li L H Han X G Yan Z D. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. Acta Ecologica Sinica 2003 , 23(5) : 972-978.
- [41] 王根绪 程国栋 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. 冰川冻土 2002(6) : 693-700.
Wang G X Cheng G D Shen Y P. Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication. Journal of Glaciology and Geocryology 2002(6) : 693-700. (in Chinese)
- [42] 周华坤 周立 赵新全 沈振西 李英年 周兴民 严作良 刘伟. 金露梅灌丛地下生物量形成规律的研究. 草业学报 2002(2) : 59-65.
Zhou H K Zhou L Zhao X Q Shen Z X Li Y N Zhou X M Yan Z L Liu W. Study of formation pattern of below-ground biomass in *Potentilla fruticosa* shrub. Acta Pratacultural Science 2002(2) : 59-65. (in Chinese)
- [43] 郭小伟 韩道瑞 张法伟 李以康 林丽 李婧 曹广民. 青藏高原高寒草原碳增贮潜力的初步研究. 草地学报 2011 ,19(5) : 740-745.
Guo X W Han D R Zhang F W Li Y K Lin L Li J Cao G M. The response of potential carbon sequestration capacity to different land use patterns in alpine rangeland. Acta Agrestia Sinica 2011 ,19(5) : 740-745. (in Chinese)

(责任编辑 王芳)