

灌溉对藏北高寒草甸生物量和温室气体排放的影响

梁艳^{1,2}, 干珠扎布^{1,2}, 张伟娜^{1,2}, 曹旭娟^{1,2}, 高清竹^{1,2*}, 万运帆^{1,2}, 李玉娥^{1,2},
旦久罗布³, 西饶卓玛³, 白马玉珍³

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081; 3. 西藏自治区那曲地区草原站, 西藏 那曲 852100)

摘要: 温室气体不仅是引起气候变化的主要因素, 并对气候具有重要的反馈作用, 鉴于近年来藏北地区温度明显升高, 降水逐步增加, 通过对藏北高寒草甸进行灌溉, 以模拟未来降水增加对该生态系统生长旺季温室气体排放的影响。结果表明: 土壤水分增加显著促进草地地上生物量积累; 灌溉促进高寒草甸 CO_2 和 N_2O 排放, 但降低 CH_4 吸收量; CO_2 和 CH_4 排放量日变化与土壤湿度呈显著的线性相关关系 ($P < 0.05$), N_2O 与土壤湿度呈显著的二次项相关关系 ($P < 0.05$), 三种温室气体排放均与土壤温度无显著相关关系 ($P > 0.05$)。综合上述研究结果认为, 未来随着降水增加, 藏北高寒草甸温室气体排放通量将明显增加, 并对该地区气候变化产生正反馈作用; 应结合高寒草地光合作用、土壤碳氮含量, 对未来藏北高寒草甸温室气体净通量进行深入研究, 以确定藏北高寒草甸温室气体排在气候变化中扮演的角色。

关键词: 灌溉; 温室气体; 生物量; 高寒草甸; 藏北地区

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)04-0801-08 doi:10.11654/jaes.2015.04.028

Effects of Irrigation on Biomass and Greenhouse Gas Emissions of Alpine Meadow in Northern Tibet

LIANG Yan^{1,2}, HASBAGAN Ganjurjav^{1,2}, ZHANG Wei-na^{1,2}, CAO Xu-juan^{1,2}, GAO Qing-zhu^{1,2*}, WAN Yun-fan^{1,2}, LI Yu-e^{1,2}, DANJIU Luo-bu³, XIRAO Zhuo-ma³, BAIMA Yu-zhen³

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Key Laboratory for Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3. Nagqu Grassland Station, Nagqu, Tibet Autonomous Region 852100, China)

Abstract: In recent years, northern Tibet has experienced significant warming and precipitation rises. Greenhouse gases (GHGs) are not only the main cause of climate change, but they also have an important feedback effect on climate. In this study, we conducted an in situ irrigation experiment in an alpine meadow (4500 m above the sea level) to simulate the effects of future rainfall increases on GHG emissions and biomass in northern Tibet. Three treatments: control (CK), low water (DS), and high water (GS) were set up. A static chamber and gas chromatography method were used to measure the GHG emissions. Results showed that a increase in soil moisture led to significant increases in grassland biomass, carbon dioxide (CO_2) emission, and nitrous dioxide (N_2O) emission, but decrease in methane (CH_4) uptake. A linear positive correlation between CO_2/CH_4 emissions and soil moisture was found ($P < 0.05$). Nitrous oxide emissions had a significant quadratic relationship with soil moisture ($P < 0.05$). However, there was no correlation between $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ emissions and soil temperature. Taken together, significantly increased GHG emissions will have a positive feedback effect on climate change in the alpine meadows of northern Tibet under future precipitation scenarios. A further research on the interaction between GHG fluxes and plant photosynthesis, soil carbon, and soil nitrogen is necessary to determine the contribution of alpine meadows to climate change.

Keywords: irrigation; greenhouse gases; biomass; alpine meadow; northern Tibet

收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170460); 西藏那曲地区与中国农业科学院合作项目

作者简介: 梁艳(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事草地生态学研究。E-mail: liangyan2074@163.com

* 通信作者: 高清竹 E-mail: gaoqzh@ami.ac.cn

全球气候变化已成为人类面临的最严峻的环境问题之一,温室气体排放持续增加导致全球气温进一步升高,给陆地生态系统带来了极大的冲击。二氧化碳(CO₂)、氧化亚氮(N₂O)和甲烷(CH₄)对全球增温的贡献率达80%,并保持着持续增加的趋势^[1]。土壤产生与排放CO₂、CH₄和N₂O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,也是土壤碳氮库的主要输出途径^[2]。

草地是分布最广的陆地生态系统类型之一,对气候变化极为敏感,不仅受到气候变化强烈的影响,并且通过光合作用和呼吸作用调节温室气体排放,从而对气候变化产生重要的反馈作用。CO₂是最主要的温室气体,对温室气体增温效应的贡献约为63%^[1,3-4]。草地生态系统CO₂交换过程包括植被通过光合和呼吸作用,以及土壤中的有机物通过微生物分解作用将CO₂释放到大气中的过程^[5]。在一定的水分含量范围内,土壤CO₂排放量与水分含量呈极显著相关关系^[6]。除CO₂外,CH₄和N₂O也是很重要的草地温室气体。CH₄有很强的红外吸收能力,其增温潜势是CO₂的15~30倍,在大气中浓度和辐射强度仅次于CO₂^[7],对温室气体增温效应的贡献约为18%^[1,3-4]。在陆地生态系统中,土壤水分含量通过影响CH₄的传输速度,进而影响其排放量^[8]。N₂O在大气中留存时间长,其辐射强度为CO₂的310倍,对温室气体增温效应的贡献约为6%^[1,3-4]。在陆地生态系统,土壤N₂O排放量占全球生物圈排放量的70%,是最主要的排放源^[9]。硝化和反硝化是影响土壤N₂O排放的主要过程,对水分条件均较为敏感,尤其是反硝化过程^[10]。

藏北高原又称“羌塘”,天然草地资源丰富,是西藏的主要牧区,是我国长江、怒江、澜沧江等主要江河的发源地,平均海拔在4500 m以上;该地区自然条件极为严酷,生态与环境非常脆弱和敏感^[11]。在藏北地区,草地是最重要、面积最大的生态系统,也是藏北地区生活生产的基础条件^[12]。近年来,藏北地区气候明显变暖,降水逐步增加^[13-14],这必将对草地生态系统产生一系列的影响^[15-16]。在降水增加条件下,合理的水分管理是影响藏北高寒草甸CO₂、CH₄和N₂O排放的一个关键因素,进而对气候产生重要的反馈作用^[17]。因此,本文探讨在不同灌溉量条件下藏北高寒草甸生态系统CO₂、CH₄和N₂O的排放量变化情况,模拟未来降水增加对藏北高寒草甸温室气体的排放的影响,为制定或评价温室气体减排措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

试验区位于藏北地区安多县帕那镇,北纬32°11' N,东经91°41' E,海拔4700 m,土壤类型为高寒草原土。该地区是典型的亚寒带气候区,1966—2010年,年平均气温为-2.6℃,年平均降水量为445 mm。2008年和2009年,年平均温度分别为-2.0℃和-1.0℃;年降水量分别为453 mm和501 mm。该地区雨热同季,月平均温度在5—9月高于0℃,90%以上的降水也集中在该时段。试验区内,以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)和青藏苔草(*Carex moorcroftii*)为建群种;早熟禾(*Poa albertii*)和紫花针茅(*Stipa purpurea*)为主要的禾本科植物;主要的杂草包括金露梅(*Potentilla fruticosa*)、星毛萎陵菜(*Potentilla acaulis*)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)等。

1.2 试验设计

本研究采用输水带喷头灌溉对高寒草地进行灌溉。样地大小为0.75 hm²,其中对照区(CK)、低水区(DS)和高水区(GS),各0.25 hm²,每条喷灌带安装两个喷头,共计4个喷头。每年6—9月,在输水带喷头灌溉区,对草地进行10次喷灌,灌溉时间间隔为10 d。参照相关模型模拟研究^[14],灌水量分别为6 m³/次(DS)、12 m³/次(GS),整个生长季灌水量分别为60 m³(DS)、120 m³(GS),相当于增加降水量24 mm(DS)、48 mm(GS),是年平均降水量的5%(DS)、10%(GS)。

1.3 观测因子测定

排放通量测定:测定采用常规静态箱法,于2008年和2009年生长旺季进行高寒草甸CO₂、CH₄和N₂O排放通量测定。测定时间为8:00至20:00,每隔2 h测定一次。静态箱为柱状暗箱,直径150 mm、高250 mm,在测定前24 h将无底座插入土壤中3 cm;测定时,将静态箱罩于底座上,同时在周围抽取空气,放入密封玻璃气瓶中,15 min后用密封气瓶收集箱内气体,并移开静态箱装置。把收集的气体样品带回室内,使用气相色谱仪(HP6890N, Agilent公司)测定其浓度。测定CO₂和CH₄浓度的检测器为氢火焰离子检测器(FID),测定温度为200℃,色谱柱为Porapak Q填充柱,柱温70℃;测定N₂O浓度的检测器为电子捕获检测器(ECD),测定温度为330℃,色谱柱同上,柱温70℃。根据罩箱后及开箱前箱内的气体浓度差来计算其排放通量^[18]。分别将2008年和2009年7月底至8月初每天不同时间测得的排放通量平均,得到每

天的平均排放通量。本试验采用不透明的静态箱测定CO₂通量,不包含植物的光合作用吸收,主要是植物及土壤的呼吸速率。

生物量测定:生长季8月,在面积为0.5 m×0.5 m的样方内,齐地面剪取地上部分进行生物量测定,每个处理区设置3~6个样方。将植物样置于105℃烘箱中杀青0.5 h,以70℃恒温烘干至恒重后称干重。

土壤温湿度测定:2009年,采用EM50 Data Collection System(Decagon Devices, Inc)进行数据测定,频率为15 min,测定深度均为10 cm。

1.4 计算公式

气体通量的计算公式为:

$$F = \frac{\Delta m}{A \times \Delta t} = \frac{m_2 - m_1}{A \times \Delta t}$$

$$= \frac{C_2 \times V \times M_0 \times \frac{273}{273 + T_2} - C_1 \times V \times M_0 \times \frac{273}{273 + T_1}}{A \times (T_2 - T_1) \times 22.4 \times 10^{-3}} \times 1000$$

式中: F 为 t 时刻温室气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (正值为排放,负值为吸收); A 为取样箱的底面积, m^2 ; V 为取样箱体积, m^3 ; m_1 、 m_2 分别为测定箱关闭前和开启前箱内某温室气体的质量,g; t_1 、 t_2 分别为测定箱关闭前和开启前的时间; C_1 、 C_2 分别为测定箱关闭前和开启前箱内温室气体的体积百分比浓度; T_1 、 T_2 分别为测定箱关闭前和开启前箱内温度,℃; M_0 表示某种气体的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

基于全球增温潜势(GWP,以100年计)的综合温室效应,将CH₄和N₂O转化为CO₂当量来估算^[19],温室气体增温潜势的计算公式为:

$$\text{CO}_2\text{-e} = 25R_{\text{CH}_4} + 298R_{\text{N}_2\text{O}}$$

式中:CO₂-e为高山嵩草草甸每公顷每天排放的综合温室效应CO₂当量, $\text{kgCO}_2\text{-e} \cdot \text{hm}^{-2}$; R_{CH_4} 、 $R_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别为生长季CH₄和N₂O每公顷每天排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.5 数据分析

采用Excel 2010软件以及IBM SPSS Statistics 19软件的单因素方差分析以及单样本 T 检验和独立样本 T 检验等方法对数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 温室气体排放日变化特征

不同灌溉强度对CO₂通量均具有显著的影响,但其变化规律并不一致。总的来看,在低水处理(DS)下其排放量高于对照,而在高水处理(GS)下,CO₂排放通量低于对照(图1a~图1b)。高寒草甸表现为CH₄

汇,但在灌溉条件下其CH₄吸收量降低,该现象在2009年高水处理中最为明显,其最高吸收量较对照降低了61.2%(图1c~图1d)。灌溉显著促进N₂O排放量,2009年尤为明显,各处理下N₂O排放量均大于对照(图1e~图1f)。

2.2 温室气体排放年变化特征

由表1可知,各处理温室气体排放总量均高于对照,2008年,低水处理下温室气体排放总量最高,为每天372.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较对照增加88.1%,高水处理下温室气体排放总量为每天199.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与对照相近。2009年,高水处理下温室气体排放总量最高,为每天417.1 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较对照增加了190.8%,低水处理下温室气体排放总量则与对照相近。

2.3 生物量变化

灌溉显著促进草地生物量积累,但不同处理和年际间存在较大差异(图2)。2008年,低水与高水处理下生物量较对照显著增加($P < 0.05$),增幅分别达40.8%和95.4%,但低水与高水之间差异不显著($P > 0.05$)。2009年,生物量变化趋势与2008年基本相同,低水与高水处理下生物量较对照有较小的增幅($P < 0.1$),分别为28.2%和25.9%。

2.4 土壤温湿度对温室气体排放量的影响

CO₂排放量与土壤温度无显著相关关系($P > 0.05$,图3a),但与湿度呈显著线性正相关关系($P < 0.05$,图3b)。CH₄排放量与土壤温度相关关系不显著($P > 0.05$,图3c),与土壤湿度显著线性相关($P < 0.05$,图3d)。N₂O排放量与土壤湿度呈现二次相关关系($P < 0.05$,图3f),即随着土壤湿度增加,N₂O排放量呈先降低后增加趋势;N₂O排放量与土壤温度无显著相关关系($P > 0.05$,图3e)。

3 讨论

3.1 土壤水分对温室气体排放通量的影响

土壤含水量对土壤理化性质和通透性均有重要的影响^[20],而上述指标是影响温室气体排放的重要因素,因此土壤含水量变化将对草原温室气体排放产生重大的影响^[21]。在一定阈值内,水分含量增加将促进CO₂释放^[22],但土壤含水量过高将导致CO₂排放降低^[23]。土壤水分通常会通过影响植物根系、微生物活动等,进而影响土壤呼吸过程^[18]。徐世晓等^[24]研究发现,土壤湿度增加导致高寒灌丛土壤微生物活动加强,土壤呼吸速率迅速增加。本研究表明灌溉导致CO₂排放增加,土壤呼吸增强(图3b)。

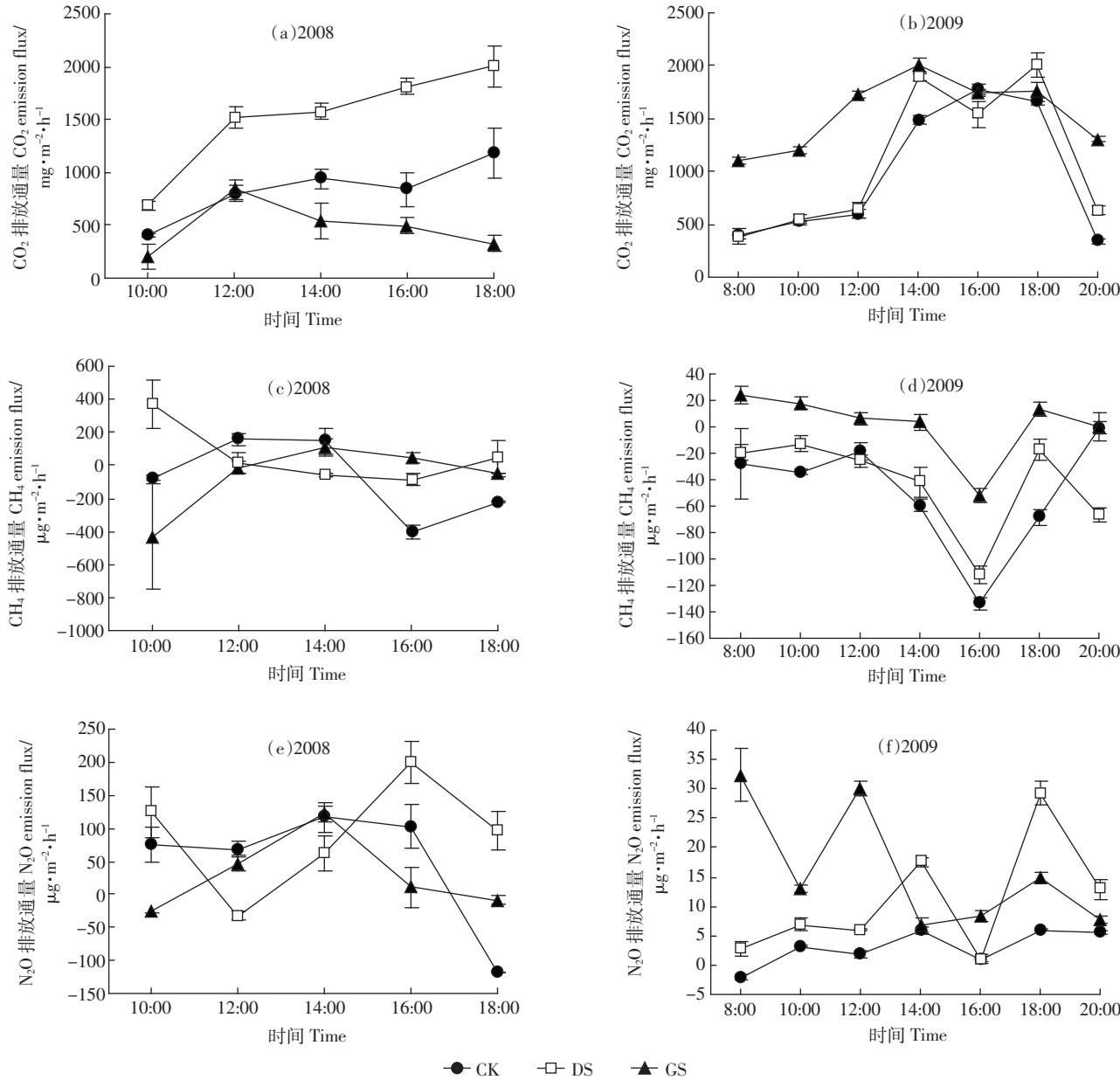


图 1 温室气体排放通量日变化动态
Figure 1 Dynamics of daily greenhouse gas fluxes

表 1 不同灌溉强度处理对温室气体排放总量的影响
Table 1 Impact of different irrigation strengths on greenhouse gas emissions

处理 Treatment	2008 年				2009 年			
	CO ₂ /kg·hm ⁻²	CH ₄ /g·hm ⁻²	N ₂ O/g·hm ⁻²	Total CO ₂ -e/kg·hm ⁻²	CO ₂ /kg·hm ⁻²	CH ₄ /g·hm ⁻²	N ₂ O/g·hm ⁻²	Total CO ₂ -e/kg·hm ⁻²
CK	191.9	38.1	17.9	198.1	143.3	-4.5	0.8	143.4
DS	363.8	2.7	23.0	372.8	152.1	-6.2	1.7	152.4
GS	201.4	-3.2	-6.1	199.5	416.1	1.5	3.1	417.1

土壤含水量是影响 CH₄ 排放的主要驱动因子之一^[25]。高寒草原表层土壤表现为 CH₄ 汇^[26]，其吸收率与土壤湿度呈负相关关系^[27]。有研究表明，强降水

过后，土壤通透性降低，限制甲烷氧化菌的氧化能力，并且提高甲烷产生菌活性，导致 CH₄ 的排放量剧增^[10,28]。本研究与以上研究的结论类似，土壤湿度

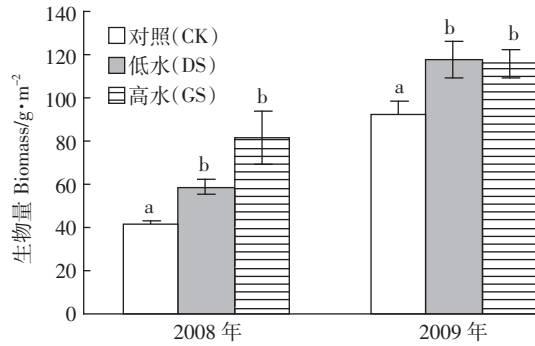


图 2 2008 年与 2009 年(8 月)地上生物量

Figure 2 Aboveground biomass under different irrigation strengths in August of 2008 and 2009

增加明显抑制 CH_4 吸收, 高寒草地在灌溉条件下从 CH_4 汇转变为 CH_4 源(图 3d)。

土壤是 N_2O 的主要排放源^[29], 土壤 N_2O 的排放率及温室气体源效应存在较大的时空变异。研究发现青藏高原高寒灌丛草甸 N_2O 排放的辐射强度约为 $0.125 \text{ TgCO}_2^{[30]}$, 高寒草原为 $5 \times 10^{-6} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[31], 高原泥炭沼泽、沼泽化草甸 N_2O 排放通量分别为 0.02 、 $0.037 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[32], 表现为明显的 N_2O 排放源。土壤湿度通过影响硝化和反硝化过程, 进而影响草地 N_2O 排放^[10,17]。土壤含水量较高时导致 O_2 供给减少, N_2 比例增加, 促进反硝化作用发生, 从而减弱 N_2O 排放^[33]。本研究结果表明, 藏北高寒草甸为 N_2O 排放源, 在高

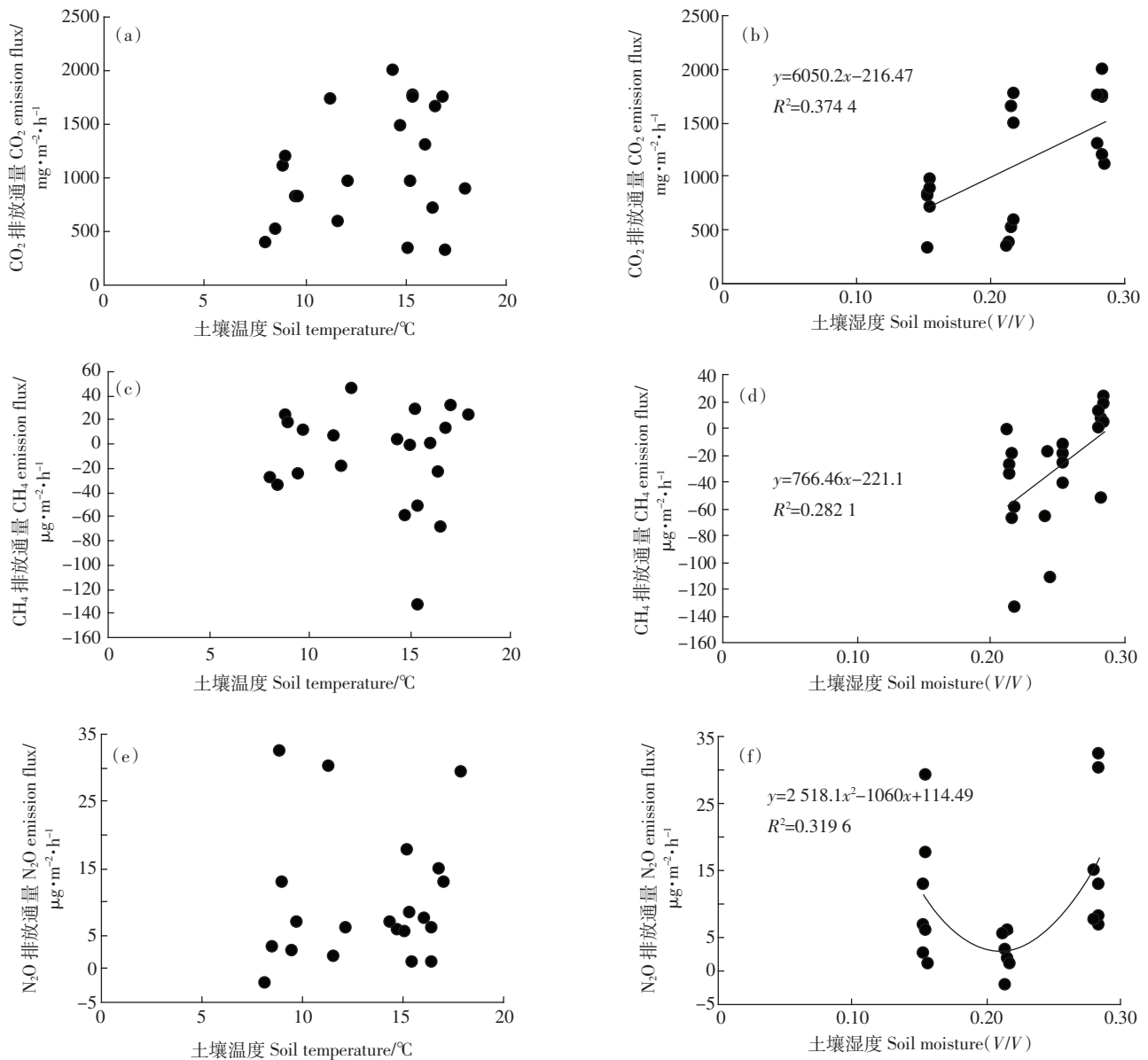


图 3 2009 年温室气体排放通量日变化与土壤温、湿度之间的相关关系

Figure 3 Correlation between daily greenhouse gas flux and soil temperature and moisture in 2009

水条件下其排放量明显增加,但低水条件下反而降低,即中等水分条件将抑制 N_2O 排放。

3.2 其他因子对温室气体排放通量的影响

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^[24]。有研究表明,由于低温限制,高寒草原土壤 CO_2 的排放量远小于同季节平原地区草原生态系统土壤 CO_2 的排放量^[34]。土壤 CO_2 排放强度主要取决于土壤中有机质的含量及矿化速率、土壤微生物类群的数量及其活性、土壤动物的呼吸作用等^[35]。除温度以及土壤水分外, CO_2 的排放还与光合有效辐射、昼夜温差、植被反射率^[36]以及施肥种类^[37]和放牧强度^[38]等环境因子有关。此外,灌溉条件下生物量增加也可能是导致 CO_2 排放量增加的主要因素^[39]。土壤温度作为生态系统驱动要素之一,对 CH_4 和 N_2O 通量的影响同样极为重要。高寒草甸^[40]、沼泽草甸^[40]、高寒湿地^[41]等长期观测均证明了土壤温度对 CH_4 的驱动作用。Du 等^[42]通过对海北高寒草甸的观测发现 N_2O 通量与土壤温度呈指数相关关系。土壤 N 含量及温度等因素均影响土壤 N_2O 的排放过程^[43]。杜睿等^[17]认为,化学脱氮作用可能会使土壤水分对 N_2O 的产生速率的调控出现一些特殊的变化,但在目前尚难以用微生物的硝化与反硝化作用对这种变化进行解释。本研究结果表明,在灌溉条件下土壤温度并未产生明显变化,其对温室气体排放影响机制可能比较复杂。近年来,青藏高原向暖湿化方向发展^[44-45],本研究结果发现,在灌溉条件下温室气体排放增加,从而将对温室效应产生正反馈作用^[46]。

4 结论

灌溉条件下,藏北高寒草甸地上生物量积累明显增加; CO_2 和 N_2O 排放增加,但 CH_4 吸收量降低,2009 年表现尤为明显; CO_2 和 CH_4 排放量日变化与土壤湿度呈显著的线性相关关系($P<0.05$), N_2O 与土壤湿度呈显著的二次项相关关系($P<0.05$),但三种温室气体与土壤温度均无显著相关关系($P>0.05$)。

参考文献:

- [1] IPCC 2007. Climate change 2007: The physical science basis[M]. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al. eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- [2] Koponen H T, Flojt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: A laboratory microcosm study[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(5): 757-766.
- [3] IPCC 2007. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability [M]. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [4] IPCC 2007. Climate change 2007: Synthesis report[M]. Contribution of working group I, II, III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A. eds. Geneva, Switzerland: IPCC.
- [5] 赵亮, 古松, 徐世晓, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统碳通量特征及其控制因子[J]. 西北植物学报, 2007, 27(5): 1054-1060. ZHAO Liang, GU Song, XU Shi-xiao, et al. Carbon flux and controlling process of alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(5): 1054-1060.
- [6] Chimner R A, Cooper D J. Influence of water table levels on CO_2 emissions in a Colorado subalpine fen: An in situ microcosm study[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(3): 345-351.
- [7] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Methane soil-vegetation-atmosphere fluxes in tropical ecosystems[J]. *Interciencia*, 2007, 32(1): 30-34.
- [8] 李玉娥, 林而达. 土壤甲烷吸收汇研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(6): 613-618. LI Yu-e, LIN Er-da. Progress in study on methane uptake by aerobic soil[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(6): 613-618.
- [9] Fluckiger J, Dallenbach A, Blunier T, et al. Variations in atmospheric N_2O concentration during abrupt climate changes[J]. *Science*, 1999, 285: 227-230.
- [10] Li C S, Mosier A, Wassmann R. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: 1-19.
- [11] 高清竹, 段敏杰, 万运帆, 等. 藏北地区生态与环境敏感性评价[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4129-4137. GAO Qing-zhu, DUAN Min-jie, WAN Yun-fan, et al. Comprehensive evaluation of eco-environmental sensitivity in Northern Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4129-4137.
- [12] Gao Q Z, Li Y, Wan Y F, et al. Grassland degradation in Northern Tibet: Based on remote sensing data[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16: 165-173.
- [13] 杨凯, 林而达, 高清竹, 等. 气候变化对藏北地区草地生产力的影响模拟[J]. 生态学报, 2010, 29(7): 1469-1476. YANG Kai, LIN Er-da, GAO Qing-zhu, et al. Simulation of climate change impacts on grassland productivity in Northern Tibet[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7): 1469-1476.
- [14] GAO Qing-zhu, LI Yu-e, XU Hong-mei, et al. Adaptation strategies of climate variability impacts on alpine grassland ecosystems in Tibetan Plateau[J]. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 2012, 19(2): 199-209.
- [15] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau[J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [16] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升及其环境效应[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 451-458.

- ZHENG Du, YAO Tan-dong. Uplifting of Tibetan plateau with its environmental effects[J]. *Advances in Science*, 2006, 21(5):451-458.
- [17] 杜睿. 温度和水分对草甸草原土壤氧化亚氮产生速率的调控[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11):2170-2174.
- DU Rui. Effects of soil moisture and temperature on N_2O production rate of meadow grassland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11):2170-2174.
- [18] 万运帆, 李玉娥, 林而达, 等. 静态箱法测定旱地农田温室气体时密闭时间的研究[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2):122-124.
- WAN Yun-fan, LI Yu-e, LIN Er-da, et al. Studies on closing time in measuring greenhouse gas emission from dry cropland by static chamber method[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(2):122-124.
- [19] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127:153-160.
- [20] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5):972-978.
- CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5):972-978.
- [21] Li Y Y, Dong S K, Liu S L, et al. Seasonal changes of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in different types of alpine grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014:1-9.
- [22] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North Queensland[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, 28(5):737-745.
- [23] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forest and cattle pastures of Eastern Amazonia[J]. *Biochemistry*, 2000, 48:53-69.
- [24] 徐世晓, 赵亮, 赵新全, 等. 青藏高原高寒灌丛非生长季节 CO_2 通量特征[J]. 西北植物学报, 2006, 26(12):2528-2532.
- XU Shi-xiao, ZHAO Liang, ZHAO Xin-quan, et al. Carbon dioxide flux characteristics of alpine shrubs in Qinghai-Tibet Plateau beyond the growing season[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(12):2528-2532.
- [25] Li C S, Frolking S, Frolking T D. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events; 1. Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97:9759-9776.
- [26] Kammann C, Grünhage L, Jäger H J. Methane flux from differentially managed grassland study plots: The important role of CH_4 oxidation in grassland with a high potential for CH_4 production[J]. *Environ Pollut*, 2001, 115:261-273.
- [27] Wei D, Xu R, Tenzin-Tarchen, et al. Considerable methane uptake by alpine grasslands despite the cold climate: In situ measurements on the central Tibetan Plateau, 2008-2013[J]. *Global Change Biology*, 2014:1-12.
- [28] 魏达, 旭日, 王迎红, 等. 青藏高原纳木错高寒草原温室气体通量及与环境因子关系研究[J]. 草地学报, 2011, 19(3):412-419.
- WEI Da, XU Ri, WANG Ying-hong, et al. CH_4 , N_2O and CO_2 fluxes and correlation with environmental factors of alpine steppe grassland in Nam Co Region of Tibetan Plateau[J]. *Acta Agretrix Sinica*, 2011, 19(3):412-419.
- [29] Intergovernmental panel on climate change 2001. Climate change 2001: The scientific basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 7-76.
- [30] 杜岩功, 曹广民, 邓永翠, 等. 金露梅灌丛草甸氧化亚氮排放特征及冻融交替的影响研究[J]. 山地学报, 2009, 27(6):688-697.
- DU Yan-gong, CAO Guang-min, DENG Yong-cui, et al. Characterization of and the effect of Freezing-throwing on N_2O emission in an alpine *Potentilla fruticosa* Shrub Meadow[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(6):688-697.
- [31] Pei Z Y, Ouyang H, Zhou C P, et al. N_2O exchange within a soil and atmosphere profile in alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(1):20-28.
- [32] 王德宣. 若尔盖高原泥炭沼泽二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放通量研究[J]. 湿地科学, 2010, 8(3):220-224.
- WANG De-xuan. Emission fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from peat marsh in Zoigê Plateau[J]. *Wetland Science*, 2010, 8(3):220-224.
- [33] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO_2 , CH_4 和 N_2O 排放动态[J]. 环境科学, 2005, 26(4):7-12.
- SONG Chang-chun, WANG Yi-yong, WANG Yue-si, et al. Dynamics of CO_2 , CH_4 and N_2O emission fluxes from mires during freezing and thawing season[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2005, 26(4):7-12.
- [34] Dong Y, Zhang S, Qi Y, et al. Fluxes of CO_2 , N_2O and CH_4 from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation[J]. *Chin Sci Bull*, 2000, 45(17):1590-1594.
- [35] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 等. 我国草地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4):342-352.
- QI Yu-chun, DONG Yun-she, GENG Yuan-bo, et al. The Progress in the carbon cycle researches in grassland ecosystem in China[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(4):342-352.
- [36] 赵亮, 徐世晓, 李英年, 等. 青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO_2 通量变化与环境因子的关系[J]. 西北植物学报, 2006, 26(1):133-142.
- ZHAO Liang, XU Shi-xiao, LI Ying-nian, et al. Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* Meadows and *Potentilla fruticosa* Meadows[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(1):133-142.
- [37] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 等. 青藏高原高寒草甸土壤 CO_2 排放对模拟氮沉降的早期响应[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2687-2696.
- ZHU Tian-hong, CHEN Shu-lan, FANG Hua-jun, et al. Early responses of soil CO_2 emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10):2687-2696.
- [38] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 夏季放牧强度对藏北草原温室气体排放的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(11):1-6.
- WAN Yun-fan, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Effect of summer grazing intensity on GHG emission in the North Tibet steppe[J]. *Pratacul-*

- tural Science, 2010, 27(11):1-6.
- [39] Ganjurjav H, Gao Q Z, Borjigidai A, et al. Alpine grassland ecosystem respiration variation under irrigation in Northern Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5):271-276.
- [40] 王俊峰, 王根绪, 吴青柏. 沼泽与高寒草甸退化对 CH_4 和 CO_2 通量的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(5):474-480.
- WANG Jun-feng, WANG Gen-xu, WU Qing-bo. Influence of degradation of the swamp and alpine meadows on CH_4 and CO_2 fluxes on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(5):474-480.
- [41] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等. 若尔盖高原沼泽湿地 CH_4 排放研究[J]. 地球科学进展, 2005, 17(6):877-880.
- WANG De-xuan, LÜ Xian-guo, DING Wei-xin, et al. Methane emission from marshes in Zoige Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 17(6):877-880.
- [42] Du Y G, Cui Y G, Xu X L, et al. Nitrous oxide emissions from two alpine meadows in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311:245-254.
- [43] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N_2O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1):1-8.
- XU Wen-bin, LIU Wei-ping, LIU Guang-shen. Effect of temperature on N_2O emission from sub-tropical upland soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1):1-8.
- [44] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1):3-8.
- DING Yi-hui, REN Guo-yu, SHI Guang-yu, et al. National assessment report of climate change(I): Climate change in China and its future trend[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1):3-8.
- [45] 徐影, 丁一汇, 李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化[J]. 高原气象, 2003, 22(5):451-457.
- XU Ying, DING Yi-hui, LI Dong-liang. Climatic change over Qinghai and Tibet in 21st century[J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 2(1):3-8.
- [46] Raich J, Schlesinger W. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44(2):81-99.

新书推荐



污水处理厂技术与工艺管理(第二版)

伊学农、宋桃莉、周伟博 编著

本书从技术与工艺管理角度出发, 较为详细地介绍了污水处理的技术与工艺管理等内容, 如污水的物理处理技术、化学处理技术、活性污泥处理技术、生物膜处理技术、厌氧生物处理技术、深度处理技术、污泥处理技术等。其中包括了技术工艺的原理和特点、运行方式、工艺参数以及注意事项、存在问题等。本书可为污水处理工艺运行和管理者提供技术指导和建议。

本书可作为污水厂操作人员的自学和培训教材, 也可作为给水排水工程和环境工程专业师生的参考书。

※书号: 9787122219688

※定价: 48.0 元

※开本: 16

※出版日期: 2015 年 1 月



城镇污水厂污泥厌氧消化工程设计与建设

张辰 主编 王国华、谭学军 副主编

本书共 8 章, 内容包括概论、污泥厌氧消化工艺、污泥厌氧消化预处理、沼气收集、贮存与利用、沼液污染控制与资源化利用、污泥厌氧消化系统设计、污泥厌氧消化工程建设与运行管理、污泥厌氧消化工程实例。本书可供环境工程、市政工程专业教学、设计和运行管理人员参考。

※书号: 9787122219688

※定价: 48.0 元

※开本: 16

※出版日期: 2015 年 1 月

如需更多图书信息, 请登录 www.cip.com.cn

服务电话: 010-64518888, 64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店: <http://hxgybs.tmall.com>

邮购地址: (100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著, 请与编辑联系, 联系电话: 010-64519525。