

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

杜岩功^{1,2}, 曹广民², 邓永翠¹, 崔晓勇^{1*}

(1. 中国科学院研究生院资源与环境学院, 北京 100049; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008)

摘要: 在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站地区, 利用密闭箱-气相色谱法对金露梅灌丛草甸群落中的丛间草地 (GC)、金露梅灌丛 (GG) 和裸地 (GL) 3种斑块的氧化亚氮 (N_2O) 排放季节特征和冻融过程、降水事件的影响进行了初步研究。结果显示: GG年平均排放速率显著高于 GC和 GL ($P < 0.05$), GC与 GL差异不显著 ($P > 0.05$)。3种斑块 N_2O 排放速率表现出明显的季节波动, 生长季高于休眠季, 其中 GC和 GG排放速率在 8月出现明显峰值, 2月最低; 而 GL的排放速率 2004年最大值出现在 3月, 2005年在 3月和 8月出现了两个峰值, 最低值均出现在 1月。冻融交替过程中各斑块 N_2O 平均排放速率白天高于夜间, 并且除了 2005年 GL斑块外, 均为封冻期土壤排放速率较低, 而冻融期提高。2004-07 GC和 GG斑块在降雨时排放速率降低, 降雨后迅速上升; 而 2005年时 3种斑块在降雨时以及积雪融化时排放速率均大幅升高。各斑块排放速率与土壤 5 cm 地温呈极显著 (GC和 GG; $P < 0.01$) 或显著正相关关系 (GL; $P < 0.05$)。金露梅灌丛草甸 2004年和 2005年平均排放速率分别为 0.043 和 $0.046 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 是大气 N_2O 的一个源, 粗略估算整个青藏高原高寒灌丛草甸 N_2O 排放的辐射强迫约为 0.125 Tg CO_2 , 其在整个青藏高原温室气体收支中的作用不应忽略。

关键词: 金露梅灌丛; 氧化亚氮; 冻融交替; 排放特征

中图分类号: Q142

文献标识码: A

全球气候变化已成为生态、环境等科研领域的重大问题之一^[1,2]。化石燃料燃烧、农业和畜牧业生产等都会向大气排放温室气体, 主要为二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 和氧化亚氮 (N_2O)。其中 N_2O 在大气中的寿命最长, 它参与了大气对流层和平流层的许多光化学反应, 由于等摩尔浓度的增温潜势是 CO_2 的 298倍^[2], 因此对全球变化具有潜在的深远影响^[2]。土壤是 N_2O 的主要排放源, 约占其排放总量的 70%。土壤中 N_2O 主要通过硝化和反硝化作用生成, 森林、耕地和草地生态系统因其排放 N_2O

数量居前而受到了广泛关注^[3]。

金露梅灌丛草甸是青藏高原的主要植被类型之一, 在青藏高原以及我国其他高大山系中约有 $116\,400 \text{ km}^2$, 分布面积居世界之最^[4,5]。其生产力高, 是优良的夏季牧场^[6]。青藏高原同时也是冻土的集中分布区, 冻融交替不仅使土温发生变化^[7], 而且对土壤的理化性质和生物过程都会产生直接的作用^[8], 导致土壤微生物呼吸释放 CO_2 , 硝化和反硝化作用排放 N_2O 能力增强。青藏高原独特的地理位置和气候环境, 使得高寒生态系统对全球变化十

收稿日期 (Received date): 2009-03-15; 改回日期 (Accepted): 2009-07-09.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点基金 (30730069), 林业科技支撑计划专题“天然次生林生态恢复与定向经营技术研究 (2006BAD03A0402)”, 中国科学院研究生科技创新与社会实践资助专项。[National Natural Science Key Foundation of China (30730069), the “Ecological Recovery and Directional Management Technology” in the program of forest science, the Technological Innovation Foundation for Graduate Students of the Chinese Academic of Science (2008).]

作者简介 (Biography): 杜岩功 (1981-), 男, 汉族, 山东威海人, 博士研究生, 主要从事植物生态学研究。[Du Yangong (1981-), male, the Han nationality, born in Weihai of Shandong province, doctor candidate, mainly engages in plant ecology.] E-mail: dyg1981@yahoo.cn

通讯作者 (Corresponding author): E-mail: cuixy@gucas.ac.cn; Tel: 010-88256497

分敏感。温度升高和降水变化可能使冻融交替过程更加频繁、作用的范围更大、影响的土层更深, 这使青藏高原具有较大的温室气体排放潜力^[9]。因此, 阐明金露梅灌丛草甸的温室气体排放特征及冻融等过程的影响, 是全面评价青藏高原对全球变化的响应的重要课题。

目前关于金露梅灌丛草甸温室气体的研究集中在碳循环方面。研究表明, 金露梅灌丛草甸呼吸 CO_2 释放过程具有明显的季节性变化^[10], 降水提高了其生态系统与大气间的 CO_2 交换量^[11], 而温度是碳通量的主要控制因子^[6, 12]; 涡度相关监测显示该生态系统是一个碳汇^[6, 12, 13]。高寒金露梅灌丛草甸是大气甲烷的汇, 并且随着木本灌丛植物的发育, 汇的强度被增加约 20%^[13]; 增温和放牧没有改变甲烷汇的功能, 粪斑短期内是甲烷源, 一段时间后成为净汇, 并且存在显著的年际变异^[14]。对比北美、北欧和内蒙古^[15-17]等地的研究发现, 不同地区草地生态系统 N_2O 排放的季节变化特征差异很大, 并受冻融、降水等过程的强烈影响。青藏高原高寒灌丛草甸生态系统 N_2O 排放的定量研究十分薄弱^[14, 18, 19], 从而限制了对这一重要生态系统 N_2O 排放总量的准确估算。本研究根据高寒灌丛草甸 N_2O 通量连续 2 a 的观测资料, 探讨其季节动态特征、影响排放速率的重要环境因子以及冻融过程和降水事件对排放速率的影响, 为科学估算青藏高原高寒草甸生态系统温室气体收支提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验区自然概况

试验设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站地区(海北站), 该站地处祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷, 位于 $37^\circ 29' \sim 37^\circ 45' \text{N}$, $101^\circ 12' \sim 101^\circ 23' \text{E}$, 海拔 3 280 m。该地区为典型的高原大陆性气候, 年均气温 -1.7°C , 最冷月(1月)平均气温为 -14.8°C , 最热月(7月)平均气温为 9.8°C , 绝对最低气温可降至 -37°C ; 年降水量 618 mm, 其中 5~9月的降水量占年降水总量的 80% 左右, 植物生长季内雨热同期; 土壤为暗沃寒冻锥形土, 土层发育年轻, 有机质含量高。

试验样地植被为金露梅(*Potentilla fruticosa*)高寒灌丛草甸, 其土壤基本性状见表 1。植被盖度为 60%~75%, 金露梅灌丛高 50~70 cm, 丛间草本优

势植物种为紫羊茅(*Festuca rubra*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)。其中金露梅灌丛约占群落总面积的 50%, 丛间禾草-矮嵩草面积约为 48%, 裸地为 2%^[21]。

1.2 试验设计

在海北站东北部约 15 km 处的干柴滩金露梅高寒灌丛草甸群落中, 选择能代表该地区地表植被特征且地势平坦的地点, 设立金露梅灌丛(GG)、丛间草地(GC)和裸地(GL, 试验开始前一个月即 2003-05 人工剔除植物根系, 并且用 10 cm 深的薄不锈钢板隔开阻止周围根系长入)。3种观测样地, 每样地设置 3 个重复。从 2004-01 到 2005-12 连续测定 N_2O 排放速率的季节变化, 生长季(5~9月)每月选择 3~4 个晴天, 休眠季每月 2 次, 在上午 9 时取样测定, 同时记录该天的气象参数, 包括降雨、降雪和积雪情况。

在发生冻融交替期间, 选择 2 个晴天(2004-04-10~11 和 05-18~19)做 N_2O 排放速率日变化测定, 第一天 9 点至次日 10 点每 3 h 取样一次。

1.3 试验方法

1.3.1 N_2O 气体采集方法

每样地取样采集 3 次样品, 采用带有三通阀的 100 m 注射器抽气, 立即带回实验室分析。气体测定采用气相色谱法(HP4890D, Agilent), 内装电子捕获检测器(ECD)。测定的色谱条件为: 柱温和检测温度分别为 70°C 和 300°C ; 标气浓度为 355 nL/L, 最小因子检测限为 $\pm 5 \text{ nL/L}$ ^[18, 22]。土壤 5 cm 地温用便携式铂电阻数字温度计(M 624)测定, 土壤湿度(10 cm)采用时域反射仪(TDR, North Logan, UT, USA)测定, 每小区重复测定 3 次^[23]。

1.3.2 N_2O 排放速率(通量)的计算方法

$F_{\text{N}_2\text{O}}$ 是 N_2O 排放通量 ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), V 是箱体体积 (m^3), A 是箱体底面积 (cm^2), C_t 是 t 时刻箱内 N_2O 的体积混合比浓度 ($10^{-9} \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{min})$), t 为时间 (min), ρ 是标准状态下 N_2O 的密度 (g/cm^3), T_0 和 P_0 分别为标准状况下的空气绝对温度(绝对温度, K)和气压 (Pa), T 为采样时的气温, P 为采样时的气压。

1.4 数据统计与分析

N_2O 通量用平均值和标准误差表示, 采用 SPSS 中 Means 计算, 2004 年和 2005 年草地各斑块 N_2O

排放速率的差异采用 One – way ANOVA 方法分析, 土壤湿度和 5 cm 地温与 N₂O 排放速率的相关性采用 Bivariate 方法分析 (SPSS11. 5)。

2 结果与分析

2. 1 N₂O 排放速率的季节变化

高寒金露梅灌丛草甸的各斑块 N₂O 排放速率在连续 2 a 观测中的都表现出明显的季节变化, 其中 GC 和 GG 斑块在 8 月出现峰值, 2 月最低。2004 和 2005 年 GC 的年平均排放速率分别为 0. 039 ± 0. 005 和 0. 041 ± 0. 012 mg/(m² · h), GG 为 0. 046 ± 0. 015 和 0. 050 ± 0. 006 mg/(m² · h)。GL 斑块在 2004 年的最大值出现在 3 月, 6 月和 7 月也出现较小峰值; 而 2005 年在 3 月和 8 月出现了两个明显峰值, 1 月最低, 其他时期则比较平缓; 2 a 的年平均排放速率分别为 0. 038 ± 0. 006 和 0. 039 ± 0. 010 mg/(m² · h) (表 2)。GG 年平均排放速率显著高于

GC 和 GL ($P < 0. 05$), GC 与 GL 差异不显著 ($P > 0. 05$)。GC、GG 和 GL 月平均排放速率最大值都出现在 2005 – 08 分别为 0. 155 ± 0. 007、0. 179 ± 0. 035 和 0. 118 ± 0. 008 mg/(m² · h), 表现为 GG > GC > GL (图 1)。

表 1 高寒灌丛草甸样地土壤基本性状

Table 1 Soil properties of the experimental site

土层深度 Soil depth (cm)	pH	有机碳 Total organic carbon (%)	土壤容重 Bulk density (g/m ³)
0~10	6. 4±0. 2	5. 7	0. 88±0. 07
10~20	6. 3±0. 3	3. 7	0. 96±0. 04
20~30	—	3. 1	1. 00±0. 08
30~40	—	2. 6	1. 07±0. 09

注: pH 值和土壤容重为平均值 ± 标准差 ($n = 3$), 部分数据来自曹广民^[20]和 Du⁽²⁰⁰⁸⁾。^[18]

Note: Values of pH and soil bulk density were expressed in average ±SD ($n = 3$). Part of the data were from Cao^[20] and Du⁽²⁰⁰⁸⁾ ^[18]

表 2 金露梅灌丛草甸年均和冻融期间的月均 N₂O 排放速率

Table 2 Average N₂O emission rate of *P. fruticosa* meadow in the two years and during freezing–thawing processes

样地 Plot	N ₂ O 排放速率 Emission Rate(mg/(m ² · h))					
	2004	2005	2004– 04	2004– 05	2005– 04	2005– 05
GC	0. 039±0. 005 b	0. 041±0. 012 b	0. 013±0. 006	0. 029±0. 003	0. 017±0. 005	0. 036±0. 004
GG	0. 046±0. 015 a	0. 050±0. 006 a	0. 014±0. 003	0. 041±0. 011	0. 014±0. 004	0. 015±0. 007
GL	0. 038±0. 006 b	0. 039±0. 010 b	0. 045±0. 004	0. 046±0. 005	0. 061±0. 044	0. 016±0. 004

注: 表中数据为平均值 ± 标准误差, 同列标有相同字母者为差异不显著 ($P > 0. 05$)。

Note: The data was average ± standard error. There was no significant difference between the values with the same letter ($P > 0. 05$)

有研究观测到草地硝化作用随着土壤湿度的提高而增强, 当土壤水分含量高于田间持水量的 70% 时, 硝化作用和反硝化作用都比较旺盛, 因此 N₂O 的排放速率明显增加^[16–18]。试验地区雨热同季, 8 月土壤温度和湿度较高可能是排放峰值出现在这一时期的主要原因。8 月也是植物生物量快速增长的生长旺期, 植物产生和排放 N₂O 可能也有一定的贡献^[18–24]。本研究的结果显示金露梅灌丛草甸 GC 和 GG 斑块 2 a 的季节动态相似, 而 GL 变异较大; 显示裸地对温度和水分变化的缓冲能力弱, 生态系统功能受环境变化影响更大。此外, 3 种斑块的年平均排放速率差异不大, 2005 年稍高于 2004 年, 而土壤植物条件更为均一的对三江平原春小麦的 N₂O 排放有明显的年际差异^[25]。这似乎暗示金露梅灌丛

草甸的年 N₂O 排放量较为稳定, 有可能用几年的观测资料粗略推算该生态系统的多年平均 N₂O 排放量。

GC 和 GG 的 N₂O 气体交换速率在 2004 – 02 均为负值, 分别为 – 0. 0307 ± 0. 048 和 – 0. 1683 ± 0. 216 mg/(m² · h), 表现为 N₂O 吸收。土壤对 N₂O 的吸收在土壤湿度高或者土壤干燥时都可能发生。当土壤湿润时, 厌氧反硝化作用进行得比较彻底, N₂O 转化为 N₂^[15]; 而当土壤局部干燥时, 土壤颗粒物理吸附少量的 N₂O^[26], 因此均表现为 N₂O 的吸收。2 月气温较低, 干旱表土的物理吸附作用可能是主要机制。GL 整个试验期间都没有观测到 N₂O 吸收现象, 这可能是由于该斑块缺乏根系及地表植被覆盖, 使得根系凋落物和分泌物消失, 根际微

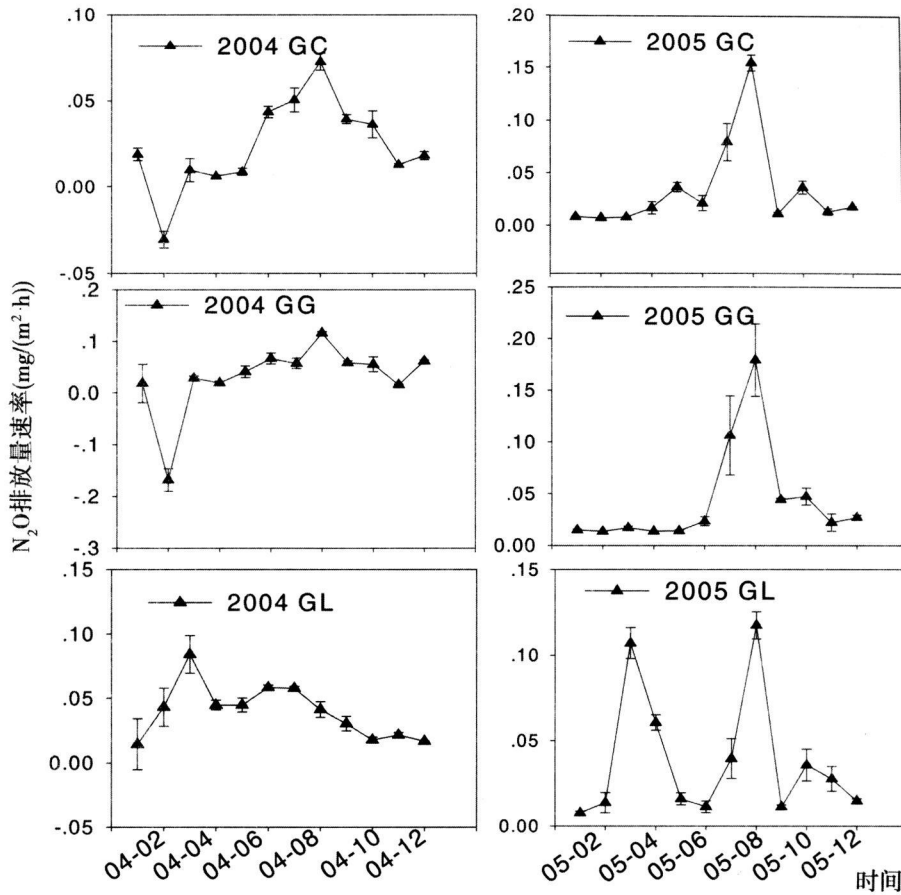


图 1 金露梅灌丛草甸 N_2O 排放速率季节变化特征

Fig1 Seasonal variation of N_2O emission rate in *P. fruticosa* alpine shrub meadow

生物数量和活性降低;同时也导致土壤通透性增强,厌氧反硝化过程进行得不彻底的结果^[27, 28]。

2.2 冻融交替过程中 N_2O 排放速率的影响及日变化特征

在海北站地区,冻融交替从 3 月开始,主要过程发生在 4~5 月。3~4 月白天温度高,土壤开始解冻;夜间平均温度低于 0℃,土壤重新冻结。而 5 月昼夜温度都高于 0℃,但夜间温度显著低于白天^[22]。在 2 a 的冻融交替过程中,GC 和 GG 的 N_2O 月平均释放速率均表现为 5 月高于 4 月,其中 2004 年分别上升了 123.08% 和 192.86%,2005 年的提高幅度为 117.76% 和 7.14%,但都低于年平均排放速率,其中 2004-04 月两斑块的平均排放速率只相当于年平均值的 1/3 左右。与 GC 和 GG 斑块不同,GL 斑块在两年冻融期间的变化很不一致。2004-04~05 的排放速率接近,分别为 0.045 ± 0.004 和 $0.046 \pm 0.005 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,均高于年平均排放速率,分别高出 18.42% 和 21.03%。而在 2005 年则是从 4 月到 5 月迅速降低,从 0.061 ± 0.044 下降到了

$0.016 \pm 0.004 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;4 月排放速率明显高于年平均值(见表 2),表明裸地受冻融过程影响更明显,并且年际间波动更大。

Holst^[16]发现冻融交替过程强烈刺激内蒙古草原 N_2O 的排放。Zhu^[29]在南极洲东部沼泽湿地的测定结果,也表明冻融交替过程促进了 N_2O 的排放;Prime^[30]在德国和瑞典农田的研究中也看到冻融交替过程中土壤 N_2O 的排放提高了。冻融交替促进 N_2O 排放的机理可能主要是使土壤团聚体破碎,释放大 量活性有机碳,促进反硝化作用^[30, 31]。在本研究中,GL 斑块 2005-05 的排放速率低于 4 月,冻融交替并没有促进土壤 N_2O 的释放(见表 2),这可能是局部土壤干旱造成的^[30]。硝化和反硝化过程对冻融过程和局部土壤干旱反应的不同可能是导致斑块间和年际间土壤 N_2O 排放速率变异的重要机制,这需要借助 ^{15}N 标记技术或者乙炔抑制方法做进一步区分研究^[32, 33, 34]。

研究地点的金露梅灌丛草甸 2004-04-11 白天土壤部分解冻,夜间重新冻结,而在 5 月 19 日则

是昼夜地温都大于 0℃ (图 2)。但是在这两个温度和土壤水分状况变化不同的日期, 土壤 N₂O 的日均排放速率均与当日 9 点测定的排放速率很接近 (表 3), 只有 GG 和 GL 斑块在 5 月的 9 点的测定值偏小, 表明用 9 点的瞬时排放速率可以较好地估测日均排放速率 (图 2), 而 GG 和 GL 斑块的异常则可能与局部土壤干旱有关。

2.3 高寒灌丛草甸生态系统 N₂O 排放速率对土壤温度、湿度的响应

海北站具有明显的高原大陆性气候, 季节间温

度变化大, 但是将所有观测数据集中分析看到, 高寒灌丛草甸各斑块的 N₂O 排放速率和土壤 5 cm 地温呈极显著 (GC 和 GG, $P < 0.01$) 或显著 (GL, $P < 0.05$ 表 4) 正相关关系, 随着温度的增加, N₂O 释放速率增加。陈卫卫^[25]和孙志高^[33]观测到春小麦农田和小叶草湿地草甸沼泽土的 N₂O 排放速率与 5 cm 土壤温度相关, 这与我们的研究结果一致。但是刘惠^[28]发现, 冬闲稻田 N₂O 排放与土温和地表温度均无明显相关关系。在 N₂O 放排速率与土壤湿度的关系上, 本研究 3 种草地斑块上都没有显示两

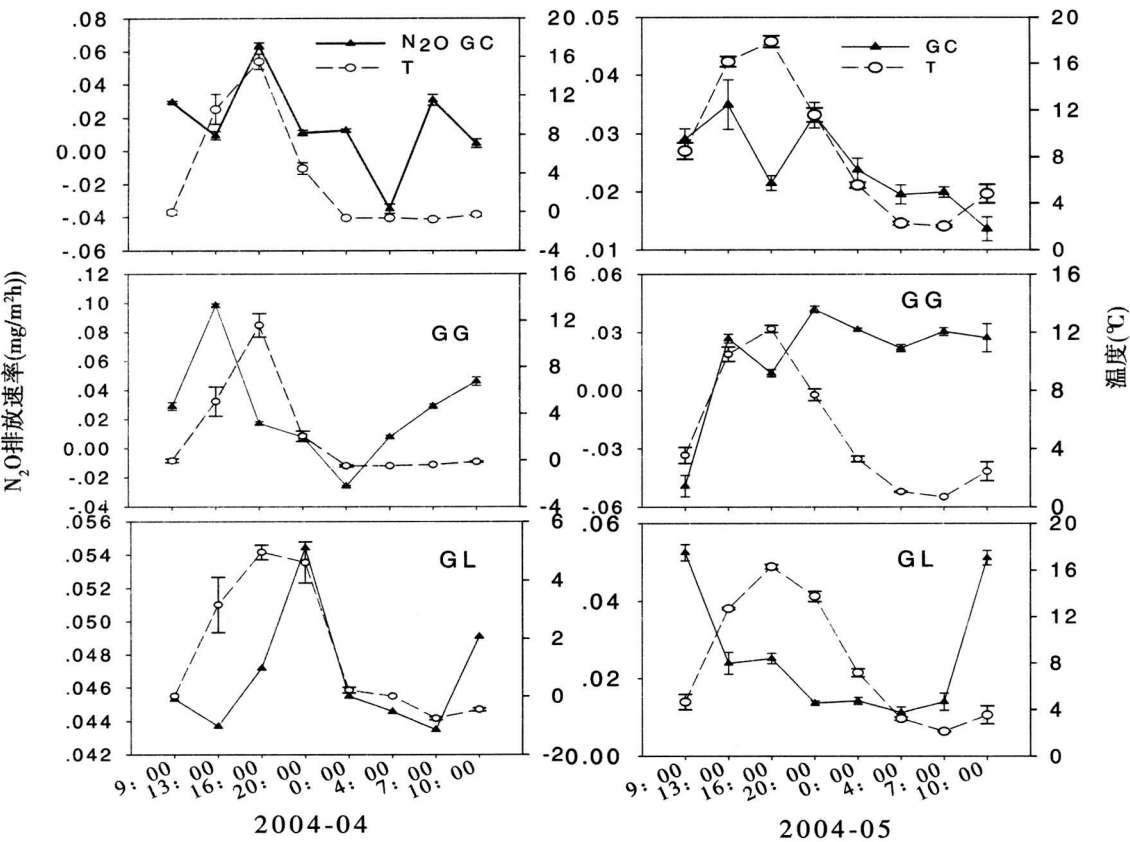


图 2 冻融交替过程中金露梅灌丛草甸 N₂O 排放速率和 5 cm 地温的日变化

Fig 2 Diurnal patterns of N₂O emission rate and soil temperature during freezing-thawing period in *P. fruticosus* shrub meadow

表 3 冻融过程金露梅灌丛草甸 N₂O 排放速率的 9 时测定值与日均值的比较 (mg/(m²·h))

Table 3 Comparison of N₂O emission rate at 9 00 with diurnal average value during freezing-thawing period in *P. fruticosus* meadow

样地 Plot	9 时测定的排放速率 Emission rate at 9 00		日平均排放速率 Diurnal average rate	
	4 月 11 日	5 月 19 日	4 月 11 日	5 月 19 日
GC	0.029 ± 0.002	0.029 ± 0.003	0.020 ± 0.005	0.024 ± 0.002
GG	0.029 ± 0.003	- 0.049 ± 0.007	0.026 ± 0.008	0.018 ± 0.003
GL	0.045 ± 0.001	0.052 ± 0.002	0.048 ± 0.004	0.028 ± 0.004

者间存在显著的相关性 ($P > 0.05$ 见表 4), 而裴志永^[19]等则认为高寒草原土壤 N_2O 排放速率的变异主要是由土壤湿度不同引起的, 土壤湿度影响到硝化和反硝化作用发生强度^[15-18]。这些结果表明, 虽然从微观机理上温度和湿度都与 N_2O 的产生及排放过程密切相关, 但是宏观时间尺度上控制不同生态系统 N_2O 交换速率的主导因子不尽相同; 不同研究结果间的差异可能还与观测样地的选择、观测时期、其他管理措施等有关。

2.4 降水事件对 N_2O 排放速率的影响

海北站地区降水分布呈现明显的季节差异, 降

雨日数较多, 并且集中在 N_2O 排放速率较高的生长季 (5~9月), 降雪则集中在非生长季, 积雪日数每年约 40~60 d^[4]。有研究发现草甸草原土壤 N_2O 的排放速率主要受水分影响^[26]; 另有观测发现冷季金露梅灌丛草甸降水后, 在短期内会显著增加 CO_2 通量^[11]。为探讨降水对土壤 N_2O 排放的影响, 我们选择在降水日及其前后有 N_2O 采样的几次测定结果 (图 3), 进行了对比分析。

结果显示, 2004-07-21(晴)、24(小雨)、29(阴)时 GC 斑块的土壤温度分别为 25.65、13.65 和 15.25℃, 降雨时 N_2O 排放速率降低, 雨后温度仅稍

表 4 金露梅灌丛草甸土壤湿度和温度与 N_2O 排放速率的相关关系

Table 4 Correlation between N_2O emission rate and soil moisture and temperature

样地 Plot	湿度 Moisture		温度 Temperature at 5 cm soil depth	
	相关系数 r	P 值	相关系数 r	P 值
	Correlation coefficient	P value	Correlation coefficient	P value
GC	-0.063	0.549	0.596	0.000
GG	0.026	0.129	0.345	0.000
GL	0.040	0.696	0.220	0.017

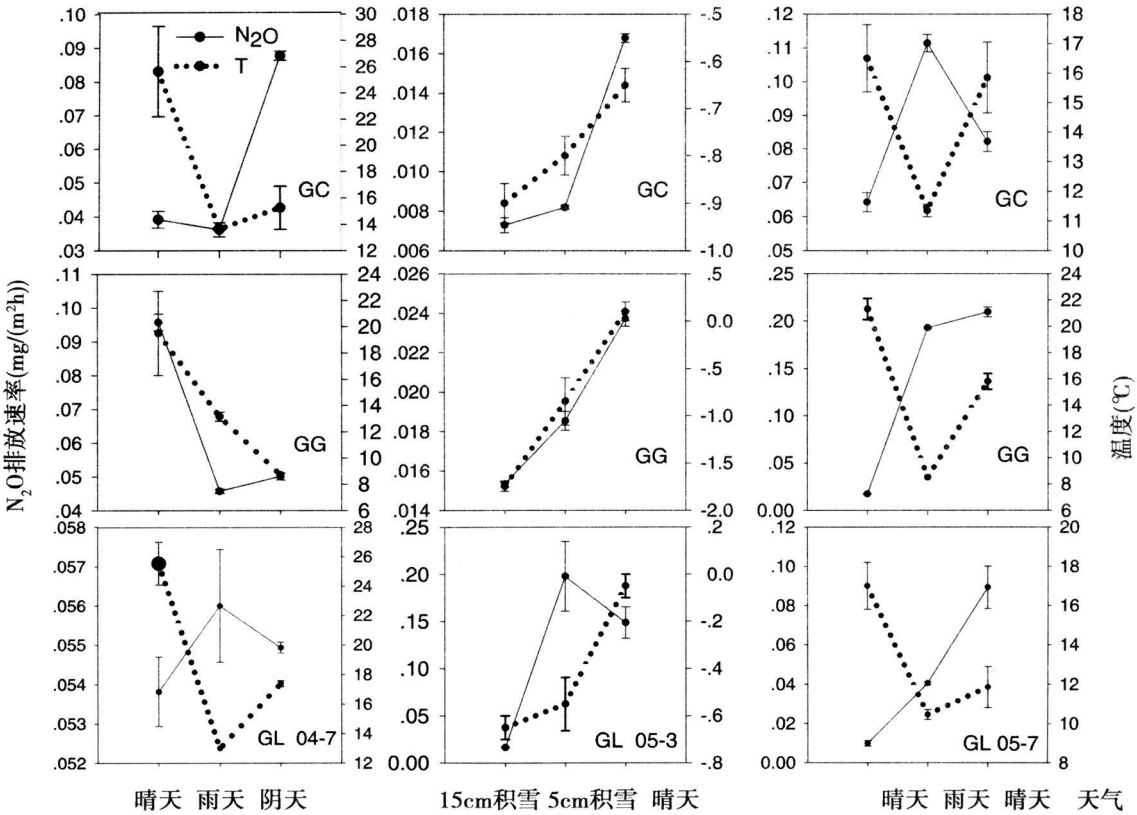


图 3 降水对金露梅灌丛草地 N_2O 排放速率的影响

Fig. 3 Effect of precipitation on N_2O emissions rate in *P. fruticosa* shrub meadow

微增加,但排放速率急剧增加;GG斑块土壤温度逐渐降低,但排放速率与GC变化一致,在雨后迅速增加;GL土壤温度与GC的变化一致,都为先增加后降低,但 N_2O 排放速率在降水时最高,达到 $0.056 \pm 0.001 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。2005-07-14(晴)、22(小雨)、25(晴)的几天里,各斑块土壤温度均为先降低后提高,GC排放速率在降雨时最高;GG则在雨时 N_2O 排放速率急剧增加,雨后又稍有提高;GL在降雨后排放速率大幅增加(见图3)。这表明明生长季内金露梅高寒灌丛草甸 N_2O 排放过程对降雨很敏感;同时,不同斑块以及同种斑块对不同次降雨的响应差异很大,也暗示降雨过程对 N_2O 排放的影响机制可能是相当复杂的。降水过程不仅直接改变了植物的光照、土壤水分和土壤温度,而且还可能引起土壤溶解有机碳及养分迁移、植物光合碳固定和根际碳沉积量减少、土壤微生物活性改变、土壤水分饱和度及通气性能变化等,这些都与 N_2O 的产生、转化和最终排放速率有关。例如,2004-07GC和GG在降雨时土壤 N_2O 排放速率降低,可能就是因为降水引起根际碳分泌下降、土温和气温迅速降低,从而抑制了土壤微生物活性;同时水分占据大量的土壤孔隙,也使气体不易产生^[14 18 37]。而GL处理在两次降雨时 N_2O 排放速率明显增加,可能是土壤水分含量增加导致形成局部厌氧环境,从而提高了土壤反硝化作用所致。该斑块2004-07是在降雨时 N_2O 排放速率达到最大,而在2005-07则是降雨后 N_2O 排放速率进一步增加,这种差异主要是降水强度和持续时间不同造成的。一次降水量较大时,土壤厌氧性增强,反硝化作用过程进行得更加彻底,即 N_2O 进一步生成NO或 N_2 ,使得排出土壤的 N_2O 减少^[15 26]。

地表积雪和融雪过程对土壤 N_2O 排放影响的研究非常缺乏, Brook等^[35]报道覆雪时间不同会引起 N_2O 通量的很大差异,陈卫卫等^[25]也指出三江平原小麦农田生态系统在冻融过程中 N_2O 排放速率较大,不能忽略。赵亮等对海北金露梅灌丛的观测则显示积雪深度和融雪过程对 CO_2 通量无显著影响^[36]。我们记录到2005-03-16地表积雪15 cm,27日地表积雪5 cm,至4月6日积雪融化,天气晴。在此期间GC的土壤温度逐渐增加,分别为 -0.9 、 -0.8 和 -0.65 °C,积雪逐渐融化,排放速率也逐渐提高,其中在5 cm积雪时的排放速率较前一次测定有大幅度上升;GG与GC变化规律一致;GL

是在5 cm积雪时排放速率最高。这说明青藏高原高寒金露梅灌丛草甸 N_2O 排放对积雪深度的变化和融雪过程有明显的响应,积雪融化会刺激 N_2O 的排放。由于融雪过程中不仅覆雪厚度有变化,而且地表土壤温度和湿度、活动层的厚度和生物活性以及 N_2O 的扩散阻力等也会发生改变,在不同斑块上这些因子组合的变化不尽一致,从而导致斑块间 N_2O 排放对积雪和融雪过程的响应出现分异。

3 讨论

土壤是 N_2O 的主要排放源^[3 38],实测结果显示,不同生态系统土壤 N_2O 的排放速率及温室气体源效应的大小存在很大的差异,如三江平原小麦农田生态系统 N_2O 平均排放速率达 $0.125 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[25];而三江平原湿地草甸沼泽土和腐殖质土 N_2O 平均排放速率分别为 $0.131 \sim 0.583 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $0.078 \sim 0.216 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[33]。根据本研究实测的2 a平均排放速率(见表2)和群落中3种斑块所占的面积比例,计算得出金露梅灌丛草甸2004年和2005年的平均排放速率分别为 $0.043 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $0.046 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,明显低于三江平原小麦农田土壤的排放速率,但高于内蒙大针茅草原的排放速率($0.0059 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,1995年^[15])以及黄土高原生长期施氮肥的玉米土壤排放速率 $0.022 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[39]。IPCC(2007)^[2]报告指出 N_2O 的增温潜能是 CO_2 的298倍,青藏高原面积广大,高寒灌丛草甸群落分布广泛,面积约 $1.06 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[36],如果我们2 a测定的结果作为平均排放强度做初步推算(这2 a研究地区的气候未见异常),得到整个青藏高原灌丛草甸 N_2O 排放相当于辐射强迫(radiation forcing) 0.125 Tg CO_2 ,其温室气体源效应不能忽略。

高寒灌丛草甸是当地的主要牧场,大多作为夏季牧场使用,利用强度大,在过度放牧的情况下出现了明显的退化趋势。退化过程为金露梅灌丛减少、丛间草地斑块乃至裸地面积扩大。本研究显示,高寒金露梅灌丛草甸群落中的各类斑块都是 N_2O 的排放源,并且灌丛斑块的排放速率显著高于丛间草地和裸地斑块($P < 0.05$),暗示放牧可能会降低群落的 N_2O 排放量,这与内蒙古草原冬季放牧的研究结果相似^[16]。但是本研究中裸地斑块的月平均排放速率波动很大,一年中出现两次排放峰值,冻融交

替过程中排放速率明显提高, 虽然以 9 点的观测数据作为日平均值时大大低估了裸地的日平均排放速率, 但是仍然显著高于其他斑块, 而且裸地斑块的年均排放速率也与丛间禾草斑块相当。因此虽然青藏高原在全球变化 (气候模型预测北半球温度、降水增加^[40]) 和人类活动干扰加剧双重影响下, 高寒灌丛草甸生态系统可能持续退化, 裸地面积会扩大, 但是由于裸地的 N_2O 排放过程受温度、降水影响强烈, 在降水和积雪融化时排放速率大幅度升高, 生态系统的 N_2O 排放可能并不会会有较大幅度的降低。当然, 群落放牧演替过程中的 N_2O 排放变化还需要考虑放牧强度、家畜种类以及家畜粪尿斑的短期和长期效应等^[12-14]。如何制定合理的放牧管理制度^[41], 达到既维持草地的较高生产力、又能保持较好的生态环境效应, 是今后的重要研究课题。

参考文献 (References)

- [1] GBP. The terrestrial carbon working group. The terrestrial carbon cycle implications for the Kyoto Protocol [J]. *Science*, 1998, 280: 1393~1394
- [2] IPCC. Solom S, Qin D, Manning M, Chen Z, *et al*. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on the Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom, 2007
- [3] Prather M., Denton R., Ehhalt D. Other Trace Gases and Atmospheric Chemistry in Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Increase, Ed by J. T. Houghton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 77~126
- [4] Xu Shixia, Zhao Liang, Zhao Xinquan, *et al*. Carbon dioxide flux characteristic of alpine shrubs in Qinghai-Tibetan plateau beyond the growing season [J]. *Acta Bot. Boreo-Occident Sinica*, 2006, 26 (12): 2528~2532 [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]
- [5] Yu Yingwen, Hu Zizhi, Xu Changlin, *et al*. Study on the vegetation types and distribution of alpine shrubs in eastern Qilian Mountain [J]. *Journal of Gansu Agriculture University*, 1999, 34(1): 12~17 [于应文, 胡自治, 徐长林, 等. 东祁连山高寒灌丛植被类型与分布特征 [J]. 甘肃农业大学学报, 1999, 34(1): 12~17]
- [6] Li Yingnian, Sun Xiaomin, Zhao Xinquan, *et al*. The variation of the ecosystem carbon dioxide change and the mechanism to the environment for alpine shrub meadow in Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Science in China Series D*, 2006, 36: 163~173 [李英年, 孙晓敏, 赵新全, 等. 青藏高原金露梅灌丛草甸净生态系统 CO_2 交换量的季节变异及其环境控制机制 [J]. 中国科学 D 辑, 2006, 36: 163~173]
- [7] Piao Hhechun, Liu Guanghong, Hong Yetao. Effects of alternative drying-wetting and freezing-thawing on soil fertility and ecological environment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1995, 14(6): 29~34 [朴河春, 刘广深, 洪业涛. 干湿交替和冻融作用对土壤肥力和生态环境的影响 [J]. 生态学杂志, 1995, 14(6): 29~34]
- [8] Wei Lihong. The effect of alternative freezing and thawing on soil organic matter and nitrogen potassium nutrition of black soil Changchun [R]. Changchun: Jilin Agriculture University, 2004 [魏丽红. 冻融交替对黑土土壤有机质和氮、钾营养的影响 [R]. 长春: 吉林农业大学, 2004]
- [9] Wang Genxu, Cheng Guodong, Chen Yongping. Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan plateau and its global implication [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 22(6): 693 [王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地有机碳库及全球意义 [J]. 冰川冻土, 2002, 22(6): 693]
- [10] Li Dong, Cao Guangn, W Qin, *et al*. The seasonal change rule of CO_2 release in alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow ecosystem [J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(5): 4~9 [李东, 曹广民, 吴琴, 等. 海拔高寒灌丛草甸生态系统 CO_2 释放速率的季节变化规律 [J]. 草业科学, 2005, 22(5): 4~9]
- [11] Xu Shixia, Zhao Liang, Li Yingnian, *et al*. Effect of precipitation on cold season CO_2 flux of alpine shrub on Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 193~200 [徐世晓, 赵亮, 李英年, 等. 降水对青藏高原高寒灌丛冷季 CO_2 通量的影响 [J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 193~200]
- [12] Cao Guangn, Tang Yanhong, Mo Wenhong, *et al*. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 237~243
- [13] Cao Guangn, Xu Xingliang, Long Ruijun, *et al*. Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Biology Letters*, 2008, 4: 681~684
- [14] Lin Xinvu. Studies of impact of warming and land-use changes on greenhouse gas fluxes on alpine meadow of the Qinghai-Tibetan plateau [R]. Beijing: Institute of botany, the Chinese Academic of science, 2007 [蔺兴武. 增温和土地利用对高寒草甸温室气体通量的影响 [R]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2007]
- [15] Du Rui, Wang Gengchen, L Daren. Effect of grazing on microbiological process of N_2O production in grassland soils [J]. *Environment Science*, 2001, 22(4): 11~15 [杜睿, 王庚辰, 吕达仁. 放牧对草原土壤 N_2O 及微生物的影响 [J]. 环境科学, 2001, 22(4): 11~15]
- [16] J Holst, C. Liu, Z Yaq, *et al*. Fluxes of nitrous oxide, methane and carbon dioxide during freezing-thawing cycles in an Inner Mongolian steppe [J]. *Plant and Soil*, 2008, 308: 105~117
- [17] Regina K, Syvasab E, Hamukkala A, *et al*. Fluxes of N_2O from farmed peat soils in Finland and European [J]. *Journal of Soil Science*, 2004, 55(4): 591~599
- [18] Du Yangong, Cui Yinguan, Xu Xingliang, *et al*. Nitrous oxide emissions from two alpine meadows in the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Plant and Soil*, 2008, 311: 245~254
- [19] Pei Zhiyong, Ou Yanghua, Zhou Caiping, *et al*. N_2O exchange within a soil and atmosphere profile in alpine grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(1):

20~ 28

- [20] Cao Guangmin, Li Yingnian, Bao Xinkui The feature of moisture retention for high mountain soil[J]. *Soil*, 1998, 130: 27~ 30 [曹广民, 李英年, 鲍新奎. 高山草甸土持水特征[J]. 土壤, 1998, 130: 27~ 30]
- [21] Zhou Xingmin, Wu Zhenlan. Vegetation and Plants Searchers List on the Habei Research Station of a Alpine Meadow Ecosystem the Chinese Academic of Science[M]. Xinjing Qinghai People Republic, 2006 [周兴民, 吴珍兰. 高寒草甸植被检索表[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2006]
- [22] Wang Yuesi, Zheng Xunhua, Wang Mingxing Analysis of atmosphere nitrous oxide with a modified GC system [J]. *Analysis and testing technology and instrument*, 1994, 2: 19~ 24 [王跃思, 郑循华, 王明星. 气相色谱法检测大气中 N_2O 浓度[J]. 分析测试技术与仪器, 1994, 2: 19~ 24]
- [23] Du Yangong, Cao Guangmin, Wang Qikan, et al Effect of grazing on surface character and soil physical property in alpine meadow [J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 18(3): 338~ 343 [杜岩功, 曹广民, 王启兰, 等. 放牧对土壤地表特征和物理性质的影响[J]. 山地学报, 2007, 18(3): 338~ 343]
- [24] Zou JW, Huang Y, Sun WJ, et al Contribution of plants to N_2O emissions in soil-winter wheat ecosystem: pot and field experiments [J]. *Plant and Soil*, 2005, 269: 205~ 211
- [25] Chen Weiwei, Wang Yiyong, Zhao Zhichun, et al Characteristics of nitrous oxide flux in spring wheat field ecosystem in Sanjiang plain of northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2777~ 2782 [陈卫卫, 王毅勇, 赵志春, 等. 三江平原春小麦农田生态系统氧化亚氮通量特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2777~ 2782]
- [26] Du Rui Effect of soil moisture and temperature on N_2O production rate of alpine grassland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2170~ 2174 [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]
- [27] Kuzakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(14): 1915~ 1925
- [28] Liu Hui, Zhao Ping, Sun Guoq, et al Characteristics of CO_2 , CH_4 , N_2O emissions from winter-fallowed paddy fields in hilly area of south China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 57~ 62 [刘慧, 赵平, 孙涛涛, 等. 中国南方冬季休闲地 CO_2 , CH_4 , N_2O 排放通量研究[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 57~ 62]
- [29] Zhu Rih, Liu Ys, Ma J, et al Nitrous oxide flux to the atmosphere from two coastal tundra wetlands in eastern Antarctica [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 2437~ 2447
- [30] Primé, S, Christensen Natural perturbations: drying-wetting and freezing-thawing cycles and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from fanned organic soils[J]. *Soil biology and Biochemistry*, 2001, 33: 2083~ 2091
- [31] Bochove E, Prevost, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil[J]. *Soil science society of America journal*, 2000, 64(5): 1638~ 1643
- [32] Conrad R. Microbiological and biochemical background of production of NO and N_2O in soil[A]. In Gasche et al Trace gas exchange in forest ecosystems [C]. Kluwer Academic publishers, Dordrecht Boston, London, 2002: 3~ 33.
- [33] Sun Zhigao, Liu Jingshuang, Yang Jisong, et al Nitrification-denitrification and N_2O emission of typical Calamagrostis angustifolia wetland soils in Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 185~ 192 [孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化-反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 185~ 192]
- [34] Khalil M, Baggs EM. CH_4 oxidation and N_2O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH_4 concentrations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1785~ 1794
- [35] Brooks PD, Schmidt SK, Williams MW. Winter production of CO_2 and N_2O from alpine tundra: environmental control and relationship to inter-system C and N fluxes[J]. *Oecologia*, 1997, 110: 403~ 413
- [36] Zhao Liang, Xu Shixiao, Fu Yuling, et al Effects of snow cover on CO_2 flux of northern alpine meadow on Qinghai-tibetan plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(3): 242~ 247 [赵亮, 徐世晓, 伏玉玲, 等. 积雪对藏北高寒草甸 CO_2 和水汽通量的影响[J]. 草地学报, 2005, 13(3): 242~ 247]
- [37] Zhang Jinxia, Cao Guangmin, Zhou Dangwei, et al Diel and seasonal changes of carbon dioxide emission from mollie-cryic cambisols on degraded grassland[J]. *Acta Palatologia Sinica*, 2001, 38(1): 32~ 40 [张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻维形土 CO_2 释放的日变化的季节动态[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 32~ 40]
- [38] Intergovernmental panel on climate change Climate Change 2001: the Scientific Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 7~ 76
- [39] Liang Dongli, Li Shengxiu, Wu Qingqiang The production and emission of N_2O and influential factors in the corn growing season of loess soil[J]. *Journal of Northwest A and F University*, 2007, 35(2): 131~ 137 [梁东丽, 李生秀, 吴庆强. 旱地反硝化作用和 N_2O 排放影响因子的研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 131~ 137]
- [40] Zhang JF, Han XG. N_2O emission from the semi-arid ecosystem under mineral fertilizer (urea and superphosphate) and increased precipitation in northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 291~ 302
- [41] Klein JA, Harte J, Zhao XQ, et al Experimental warming: not grazing decreases rangeland quality on the Tibetan plateau[J]. *Ecologia Application*, 2007, 17(2): 541~ 557

Characterization of and the Effect of Freezing-thawing on N_2O Emission in an Alpine *Potentilla fruticosa* Shrub Meadow

DU Yangong^{1,2}, CAO Guangmin², DENG Yongcui¹, CUI Xiaoyong¹

(1. College of Resource and Environment Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100039 China;

2 Northwest Institute of Plateau Biology, the Chinese Academy of Sciences Xining 810001, China)

Abstract Emission of N_2O , an important greenhouse gas, was poorly studied in alpine ecosystems. To clarify the seasonal patterns and whether precipitation or freezing-thawing had an impact on N_2O emission, continuous monitoring was conducted in a *Potentilla fruticosa* shrub meadow at the Haibei Alpine Meadow Research Station of the Chinese Academy of Sciences from 2004 to 2005. Three dominant types of vegetation patches, namely shrub patch (GG), inter-shrub herbaceous patch (GC), and bare soil patch (GL), were selected and N_2O emission rate was measured by sampling in static chambers and determining with gas chromatography method. It was showed that annual average emission rate in GG were higher than that in GC and in GL in both years ($P < 0.05$), while there was no significant difference between the latter two patches ($P > 0.05$). GC and GG had similar seasonal patterns in N_2O emission. In both patches, N_2O emission rate peaked in August and was the lowest in February. In GL, besides one peak in March and a valley value in January in both years, there was also a higher peak in August 2005. Daily average emission rate increased in GC and GG during freezing-thawing period from March to May. Emission rate was lower in GC and GG, while it was higher in GL than annual average value each in this time. During or immediately after precipitation, the emission rate was stimulated in all the patches. N_2O emission elevated gradually in snow thawing. Significantly positive correlation was found between N_2O emission rate and 5 cm soil temperature in GC and GG ($P < 0.01$), but not in GL. Moisture Considering the proportion of area occupied by the three patches, it was calculated that the *P. fruticosa* shrub meadow was atmospheric N_2O source, with annual average emission rate of 0.043 and 0.046 $mg/(m^2 \cdot h)$ in 2004 and 2005, respectively. It was estimated that N_2O emission corresponded to radiation forcing of 0.125 Tg carbon dioxide in the *P. fruticosa* shrub meadow, an un-negligible component of greenhouse gas budget of the whole Qinghai-Tibetan Plateau.

Key words *Potentilla fruticosa*; nitrous oxide; freezing-thawing; emission character