

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面 CO₂、N₂O 特征

李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英*, 张阿凤, 兰志龙, 范庭

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为了评估放牧对内蒙古典型草原季节性冻土区温室气体产生机制的影响, 通过气体原位采集系统对该区土壤剖面不同土层 N₂O、CO₂ 浓度动态变化进行了为期 1a 的田间原位监测。共设 3 个处理: 1979 年以来规划的禁牧 (UG79)、1999 年以来规划的禁牧 (UG99) 和持续放牧 (CG) 小区。结果表明: 土壤剖面 N₂O、CO₂ 浓度具有明显的时空分布特征: ① 3 个处理不同时期土壤剖面 CO₂ 平均浓度均表现为: 生长期 > 冻融期 > 冻结期, 且生长期 CO₂ 浓度要远大于冻融期和冻结期; UG79 土壤剖面 CO₂ 浓度最高, CG 最低; 不同土层间 CO₂ 浓度有所差异, 具体表现为 UG79、UG99: 20 cm ≥ 50 cm ≥ 35 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm; CG: 50 cm ≥ 35 cm ≥ 20 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm; ② 土壤剖面 N₂O 浓度时空变化特征则与 CO₂ 不同, UG79、UG99 呈现出“单峰型”变化规律, CG 为“双峰型”变化规律, 即虽然 CG 在生长期 N₂O 也有微弱的释放, 但 3 个处理土壤剖面 N₂O 浓度均在土壤冻融期内急剧增加, 其中 CG 处理土壤剖面 N₂O 平均浓度最高, 与 UG79、UG99 差异显著 ($P < 0.05$); 不同土层土壤剖面 N₂O 浓度表现为 UG79: 20 cm ≥ 50 cm ≥ 35 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm; CG: 50 cm ≥ 35 cm ≥ 20 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm; UG99: 35 cm ≥ 50 cm ≥ 20 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm。研究得出放牧可以使该区土壤剖面 CO₂ 浓度降低、N₂O 浓度升高, 这为我国草原季节性冻土区温室气体的准确评估提供了重要的理论支持。

关键词: 冻融作用; 典型草原; 土壤剖面; 温室气体; 放牧

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2018)05-2330-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201709189

Dynamics of CO₂ and N₂O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia

LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, ZHAO Ying*, ZHANG A-feng, LAN Zhi-long, FAN Ting

(Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of grazing on the mechanism for greenhouse gas emissions in the seasonal frozen soils for a typical steppe in Inner Mongolia, variations of N₂O and CO₂ concentrations in different soil layers were monitored by an in situ gas collection system. Three conditions were selected: ungrazed since 1979 (UG79), ungrazed since 1999 (UG99), and continuously grazed (CG). The results showed that the profile soil N₂O and CO₂ concentrations demonstrated a significant spatio-temporal distribution. ① The average concentrations of CO₂ in the soil profile of the three conditions were: CO₂ in the growth period > in the freezing-thawing period > in the freezing period. The CO₂ concentrations in the growing period were much higher than in the freezing-thawing period and freezing period. The CO₂ concentration was the highest in the UG79, and the lowest was in the CG. The concentration of CO₂ in different soil layers was ordered as 20 cm ≥ 50 cm ≥ 35 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm at the UG79 and UG99 sites, and 50 cm ≥ 35 cm ≥ 20 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm at the CG site. ② The spatial and temporal variation of N₂O concentration in the soil profile was different from that of CO₂. While the UG79 and UG99 sites showed a “single peak type” change, the CG site had a “bimodal” pattern. The N₂O concentration of the three conditions increased sharply during the soil freezing-thawing period, and the N₂O was also released weakly during the growing season at the CG site ($P < 0.05$). The average N₂O concentration of the CG was significantly higher than that of UG79 and UG99 ($P < 0.05$). The results show that the concentration of N₂O in different soil layers was ordered as follows: UG79: 20 cm ≥ 50 cm ≥ 35 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm; CG: 50 cm ≥ 35 cm ≥ 20 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm, and UG99: 35 cm ≥ 50 cm ≥ 20 cm ≥ 10 cm ≥ 5 cm. The results concluded that grazing decreased the profiled soil CO₂ concentration and increased N₂O concentration, which provides a basis for the accurate estimation of greenhouse gas emissions in the seasonal frozen soil in grasslands.

Key words: freeze-thawing; typical steppe; soil profile; greenhouse gas; grazing

土壤冻融交替是由于土壤季节或昼夜热量变化在表层及以下一定深度形成的反复冻结、融化的过程^[1], 主要包括水分、热量的传输、水分相变和盐分的积聚, 其经常发生在高纬度和高海拔地区低温生态系统的土壤中。多数研究结果表明冻融交替通过影响土壤中 C、N 循环会加剧温室气体的产生与

排放^[2,3], 进而对区域气候产生显著影响, 同时, 气候变化以及人类活动也能加剧土壤冻融过程的变

收稿日期: 2017-09-20; 修订日期: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371234)

作者简介: 李晋波 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为草地土壤水文和温室气体, E-mail: 453768869@qq.com

* 通信作者, E-mail: yzhaosoils@gmail.com

化^[4-6]. 已有研究表明, 冻融交替下, 温室气体的产生与排放往往是暴发式增长, 这给冻土区温室气体的研究与评估带来极大的困难^[7], 因此有关冻土温室气体排放的评价越来越得到重视^[8,9], 尤其是人类活动参与下的温室气体评估.

草地生态系统是最主要的陆地生态系统类型之一, 也是目前受人类活动影响最严重的地区^[10], 其功能的正常发挥对维持全球及区域生态系统平衡有极其重要的作用. 中国 78% 的草地分布在北纬 30° 以北, 而这些地区往往是季节性冻土区^[11], 冻融作用明显. 而对于存在冻融作用的草地生态系统, 冻融是否会促进温室气体的产生和排放, 以及放牧对土壤温室气体的影响尚无定论. 如 Wolf 等^[12] 的研究结果表明, 在锡林郭勒草原, 草地禁牧后高温高水, 在土壤融解期水热状况极适宜微生物的生长条件, 导致 N_2O 脉冲式释放, 同放牧区相比, 禁牧区在土壤融解期 N_2O 的排放不减反增, 这可能导致上世纪 IPCC 在中高纬度半干旱草原区高估了约 72% 的 N_2O 排放量. 而 Li 等^[13] 在新疆高寒草原并未观测到春季融化阶段 N_2O 的显著排放, 且在不同放牧小区间无显著性差异.

目前关于 CO_2 、 N_2O 等温室气体研究大多是利用静态箱法测定其在土壤与大气间的排放通量, 对其土壤剖面浓度分布规律研究很少. 土壤是陆地生态系统温室气体重要的源与汇, 土壤温室气体排放是其在土壤中产生、消耗和扩散等综合作用的结果^[14], 大气中每年有近 5% ~ 20% 的 CO_2 和 60% ~ 80% 的 N_2O 来源于土壤^[15], 明确各土层 CO_2 、 N_2O 浓度的时空变异规律, 既可以更好的了解土壤 CO_2 、 N_2O 库、源及产生机制, 并且对采取相应措施减少 CO_2 、 N_2O 排放具有重要的意义. 在前人已成功建立农田生态系统原位动态监测土壤剖面温室气体的装置系统和方法的基础上^[16], 本文拟通过气体原位采集系统, 研究不同放牧条件下内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面 CO_2 、 N_2O 浓度分布特征, 并进行野外冻融定位观测, 试图探讨该区典型草原土壤温室气体产生的物理学机制. 通过进一步认识放牧以及冻融环境中温室气体产生以及排放规律, 以期为我国草原季节性冻土区温室气体的准确评估提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站 ($43^\circ 37' 50'' \text{N}$, $116^\circ 42' 18'' \text{E}$, 海拔约

1 270 m), 属于中温带半干旱大陆性气候, 干燥多风, 年均风速 $3.5 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 年均气温 0.7°C , 1 月气温最低, 平均 -20°C , 7 月气温最高, 平均 21°C , 冬季平均气温为 -15.2°C . 年均降水量约 280 mm, 大部分集中在夏季 (6 ~ 8 月), 年降雪量为 30 ~ 40 mm, 主要集中在冬季 (11 月至翌年 2 月). 潜在最大年蒸发量为 1 750 mm, 由于每年降雨量波动较大以及强烈的蒸发作用, 植被生长易受水分亏缺的胁迫. 该区域土壤为淋溶黑钙土, 从沉积在更新世玄武岩高原的风沙沉积物发育而来. 植被是以多年生根状茎类羊草和丛生禾草大针茅为主, 另外还分布有贝加尔针茅、克氏针茅、冷蒿、糙隐子草等^[17].

1.2 样品采集与测定

本试验设 3 个处理, 3 次重复 (规划前各试验处理草场情况相同): 1979 年以来规划的禁牧 (UG79, 24 hm^2)、1999 年以来规划的禁牧 (UG99, 35 hm^2) 和持续放牧 (CG, 4 头羊 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 40 hm^2). 所选样区地势较为平坦 (有 $1^\circ \sim 2^\circ$ 小坡), 土壤和地形状况基本一致^[17], 无刈割情况. 每个样区分别埋设用于野外长期持续监测土壤水热、积雪和冻土深度等参数的设备, 土壤水分 (液态水) 和温度采用 5TE 传感器进行测定, 测定深度为 10、30、50 cm, 测定间隔时间为 0.5 h; 土壤冻结深度利用一个防冻的带有刻度的橡皮管, 放在 PVC 管中以保持竖直状态, 橡皮管里面装纯净水, 可以通过管的软硬来判断土壤冻结的深度, 雪深采用标尺进行测定. 监测时间为一年 (2015 年 11 月至 2016 年 10 月).

土壤剖面不同深度气体采用气体原位采集装置进行采集 (如图 1). 在每个处理内设置 3 个重复, 设置 5、10、20、35、50 cm 为采样深度, 每个深度的土壤层次实际涵盖其上 5 cm 范围的土壤剖面. 采集系统由 5 个高度 50 mm、内径 40 mm 的 PVC 管做成的基本采气单元上下连接而成. 每个采气单元底部管壁均匀分布 8 个小孔作为土壤气体交换界面, 每个采气单元之间用 PVC 板隔断, 采集气体的尼龙细管经隔板上小孔穿过, 统一从采集系统顶部穿出, 再用硅胶管连接到三通阀上^[16]. 该系统保持密闭状态, 观测时用针筒直接采集所需容积的气体. 测定前对采集系统气密性进行检测、安装、预平衡等关键环节. 原位动态监测从 2015 年 11 月至 2016 年 10 月, 采集期分为: 冻结期 (2015-11-01 ~ 2016-03-24), 生长期 (2016-05-06 ~ 2016-10-30), 采集频率为每月 1 次, 冻融期 (2016-03-25 ~ 2016-05-05) 为土壤发生冻融交替的主要时期, 为保证采样的代表

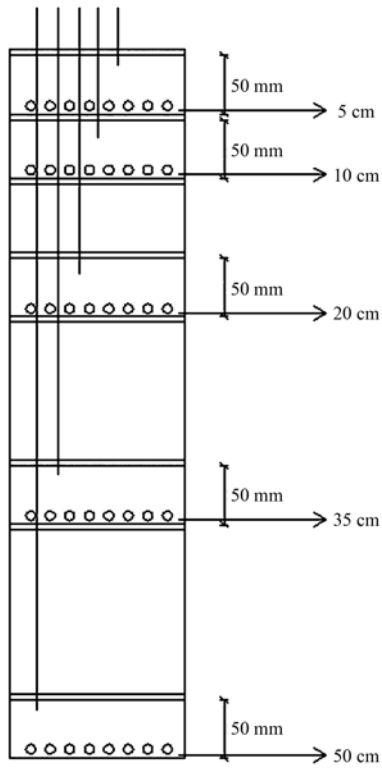


图 1 气体原位采集装置结构

Fig. 1 Schematic design of gas collection device

性,集中采集若干次,平均采集频率为2天1次.选择在晴朗天气的08:00~11:00采集气体样品,采集的气体48 h内用安捷伦气相色谱仪(Agilent

7890A)测定气体CO₂、N₂O浓度,检测器为电子捕获检测器(ECD),检测器温度为300℃,色谱柱为80/100目的SS-2 m×2 mm Porapak Q,用体积比为5%的氩甲烷作为载气,流速为40 cm³·min⁻¹.

1.3 数据分析

气相色谱仪测得样品中气体的峰面积A_s,用下式计算样品的气体浓度c_s(CO₂: mL·m⁻³; N₂O: μL·m⁻³)

$$c_s = \frac{A_s \times c_0}{A_0}$$

式中,c₀为标准气样浓度(CO₂: 470 mL·m⁻³; N₂O: 390 μL·m⁻³);A₀为标准气样所测峰面积.

采用Excel 2007 进行数据处理和Origin 9.0、Surfer 11.0 进行作图,数据插值方法为Kriging.采用SPSS 19.0 对各土层CO₂、N₂O浓度进行方差分析和多重比较(LSD法).

2 结果与分析

2.1 土壤剖面CO₂、N₂O浓度时间变化特征

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO₂浓度(体积分数,下同)具有明显的季节变化且各土层变化特征相近[图2(a)],UG79、UG99、CG这3个处理不同时期土壤剖面CO₂平均浓度均表现为:生长期>冻融期>冻结期,且生长期CO₂浓度要远

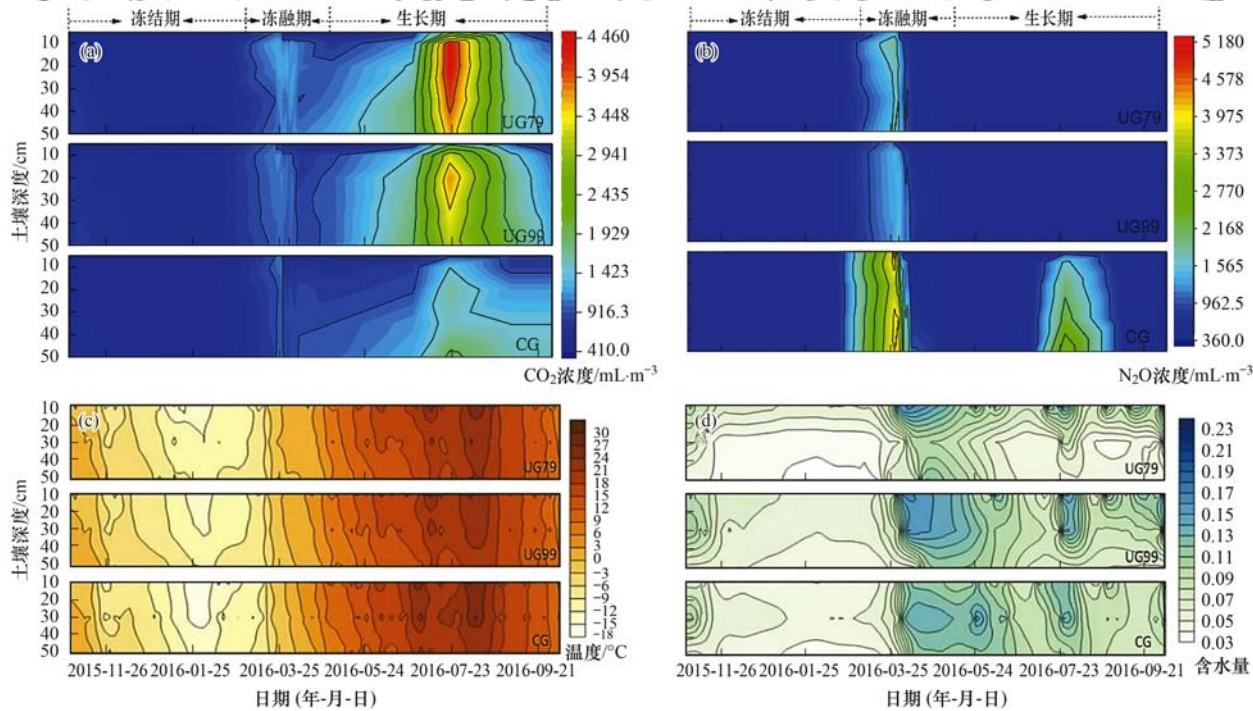


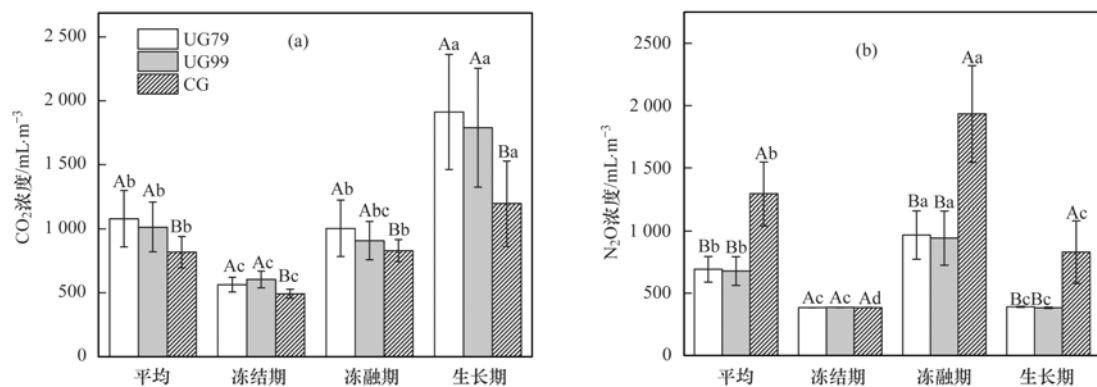
图 2 不同放牧条件下土壤剖面CO₂浓度、N₂O浓度、温度、含水量分布特征

Fig. 2 Characteristics of CO₂ concentration, N₂O concentration, water content, and temperature distribution in the soil profile under different grazing conditions

大于冻融期和冻结期[图 2(a)],UG79、UG99、CG 处理生长期土壤剖面 CO_2 平均浓度分别为冻融期的 1.9、2.0、1.4 倍,为冻结期的 3.4、3.0、2.4 倍. UG79、CG 土壤剖面 CO_2 浓度在不同时期均表现为差异显著($P < 0.05$),而 UG99 冻结期与冻融期 CO_2 浓度差异不显著($P > 0.05$),与生长期差异显著($P < 0.05$),冻融期与生长期 CO_2 浓度差异显著($P < 0.05$)(图 3). 可见该区土壤剖面 CO_2 的产生主要集中在生长期,且春季冻融作用对 CO_2 的促进作用不可忽视.

同土壤剖面 CO_2 平均浓度季节变化相异,冻融循环过程对土壤剖面 N_2O 浓度具有明显的影响[图 2

(b)],除了 CG 处理在生长期 N_2O 也有微弱的释放,各处理在土壤冻融期内 N_2O 浓度急剧增加,UG79、UG99 土壤剖面 N_2O 浓度呈现出“单峰型”变化规律,CG 土壤剖面 N_2O 为“双峰型”变化规律且各土层 N_2O 浓度时间变化规律相近. 冻融期 UG79、UG99、CG 处理 N_2O 平均浓度分别达到了 967.2、941.8、1933.0 $\mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$,分别是生长期的 2.5、2.5、2.3 倍,是冻结期的 2.5、2.4、5.0 倍,各处理冻结期与生长期土壤剖面 N_2O 浓度差异不显著($P > 0.05$),而冻结期、生长期与冻融期差异显著($P < 0.05$),可见在春季融雪和土壤解冻初期 N_2O 存在脉冲式集中释放,而对于 CG 生长期 N_2O 浓度也有微弱升高.



不同大写字母表示同一时期内 3 种样地间 CO_2 、 N_2O 浓度差异显著($P < 0.05$);
不同小写字母表示同一时期内 3 种样地内不同时期 CO_2 、 N_2O 浓度差异显著($P < 0.05$)

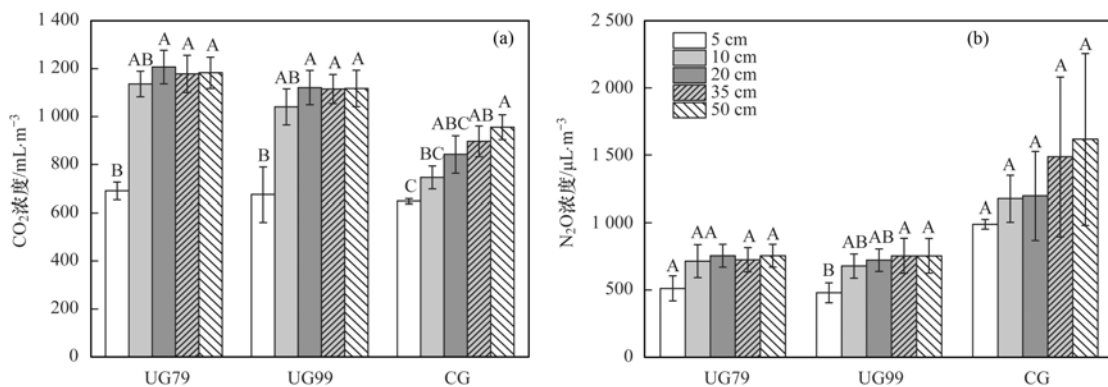
图 3 不同时期土壤剖面 CO_2 、 N_2O 浓度

Fig. 3 CO_2 and N_2O concentration in the soil profile during different periods

2.2 土壤剖面 CO_2 、 N_2O 空间变化特征

土壤剖面 CO_2 浓度具明显的空间差异,对于植被生长旺盛的 UG79、UG99,根系活跃区(20 cm) CO_2 浓度最高,具体表现为 20 cm $\geq$ 50 cm $\geq$ 35 cm $\geq$ 10 cm $\geq$ 5 cm(图 2、4),表层土壤(5 cm)产生的 CO_2 易与大气环境发生气体交换,浓度最低,与下层土壤

(20 cm 以下)差异显著($P < 0.05$),20 cm 以下各土层土壤 CO_2 浓度差异不显著($P > 0.05$)(图 4);放牧会改变土壤剖面 CO_2 浓度分布规律,CG 处理 CO_2 浓度随着土壤深度的增加而增加,具体表现为:50 cm $\geq$ 35 cm $\geq$ 20 cm $\geq$ 10 cm $\geq$ 5 cm,表层土壤(5 和 10 cm)与 50 cm 处 CO_2 浓度差异显著($P < 0.05$),5



不同大写字母表示同一处理内不同土层 CO_2 、 N_2O 浓度差异显著($P < 0.05$)

图 4 不同放牧条件下土壤剖面不同土层 CO_2 、 N_2O 浓度

Fig. 4 CO_2 and N_2O concentrations in different soil layers under different grazing conditions

cm 与 35cm 差异显著 ($P < 0.05$), 其余土层之间 CO_2 浓度差异不显著 ($P > 0.05$) (图 4). 同一时期土壤剖面 CO_2 平均浓度在不同样地间存在差异, CG 处理 CO_2 平均浓度最低. 具体表现为: 生长期、冻融期为 $\text{UG79} > \text{UG99} > \text{CG}$, 冻结期为 $\text{UG99} > \text{UG79} > \text{CG}$, 但 UG79 与 UG99 之间差异不显著 ($P > 0.05$), UG79、UG99 与 CG 之间差异显著 ($P < 0.05$) (图 3). 可见放牧会导致该区土壤剖面 CO_2 平均浓度降低.

各处理土壤剖面 N_2O 浓度存在着一定的空间差异 (图 4), 同土壤剖面 CO_2 浓度空间特征不同, 表层土壤 N_2O 浓度最低, 整体趋势为随着深度的增加而增加. 土壤剖面 N_2O 浓度特征具体表现为 UG79: $20\text{ cm} \geq 50\text{ cm} \geq 35\text{ cm} \geq 10\text{ cm} \geq 5\text{ cm}$; CG: $50\text{ cm} \geq 35\text{ cm} \geq 20\text{ cm} \geq 10\text{ cm} \geq 5\text{ cm}$, 各土层间 N_2O 浓度差异不显著 ($P > 0.05$); UG99: $35\text{ cm} \geq 50\text{ cm} \geq 20\text{ cm} \geq 10\text{ cm} \geq 5\text{ cm}$, 5 cm 处 N_2O 浓度与 35、50 cm 处差异显著 ($P < 0.05$), 其余各土层差异不显著 ($P > 0.05$). 同一时期土壤剖面 N_2O 平均浓度在不同样地间存在差异. 具体表现为: 冻融期和生长期, CG 处理土壤剖面 N_2O 浓度最高, 与 UG79、UG99 差异显著 ($P < 0.05$), UG79 N_2O 浓度高于 UG99, 但差异不显著 ($P > 0.05$); 冻结期, 土壤剖面 N_2O 浓度基本相同, 无显著差异 ($P > 0.05$) (图 3). 可见放牧会导致该地区土壤剖面 N_2O 浓度显著升高.

2.3 不同放牧条件下环境因子对土壤剖面 CO_2 和 N_2O 浓度的影响

锡林郭勒草原地处中国北部, 为季节性冻土区, 冬季酷寒、漫长 (图 5), 积雪覆盖时间长、厚度大 (图 6), 且在土壤冻结前期和积雪融化后表层土壤存在着冻融交替的现象, 这种特殊的条件会影响温室气体的产生与排放.

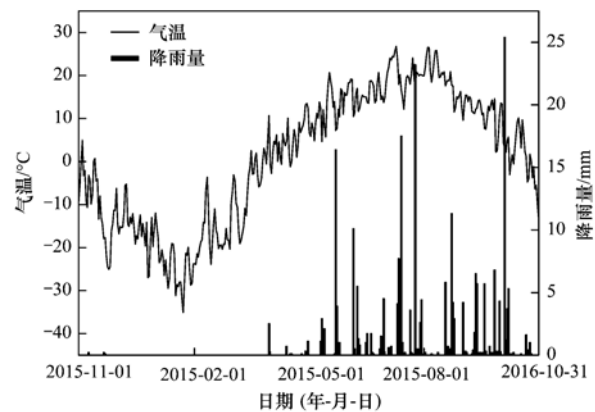


图 5 试验区气温与降雨量动态变化

Fig. 5 Variation of air temperature and precipitation in the experimental area

图 6 反映了锡林郭勒草原不同放牧条件下的土壤冻、融和积雪覆盖特征. 随着气温的降低 (图 5), 3 种处理均从 2015 年 11 月 6 日开始由地表向下冻结, 表层土壤开始冻结后, 土壤液态含水量迅速降低 [图 2(d)], 转化为固态冰, 冻结初期 (11 月 6 ~ 30

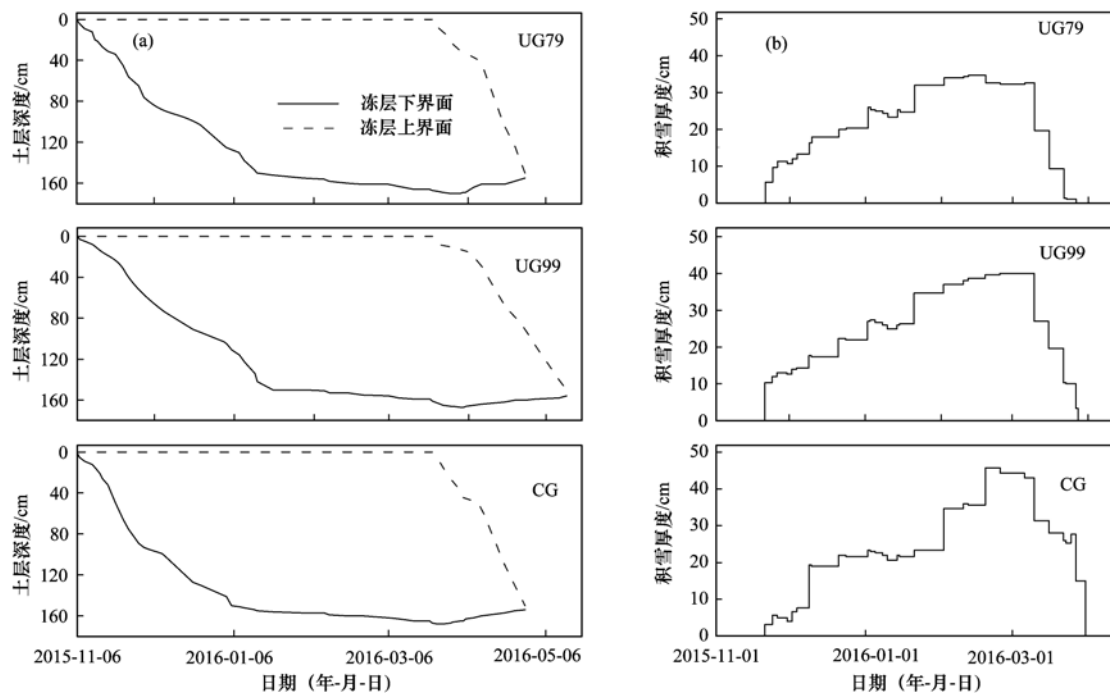


图 6 不同放牧条件下冻土层与积雪厚度动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of permafrost and snow depth under different grazing conditions

日), 土壤冻结速度较快, 近于线性变化, 平均冻结速度约为 $2.8 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$. 3 种处理冻结初期土壤积雪覆盖有明显差异, 积雪厚度依次为 $\text{UG99} > \text{UG79} > \text{CG}$, CG 积雪厚度远小于其他两个处理, 最高值仅有 56.7 mm , 而 UG99 处理则达到了 130.0 mm , 这种差异使得 CG 样地冻结深度变化最快, 冻结速度为 $3.8 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$. 随后, 积雪厚度逐渐增加, 由于积雪的弱导热性和大热容量等特性, 阻隔了土层热量的散失, 从而使土壤冻结速度变慢. 在整个冻结期, 土壤温度和液态含水量均保持着一个相对较低的水平(图 2), 3 种处理土壤剖面 CO_2 和 N_2O 浓度表现为相对稳定状态(图 2).

此后, 由于大气温度继续回升(图 5)及土壤温度的升高[图 2(c)], 土层中出现两个消融界面, 呈现出从地表和深层土壤同时向中间融化的现象, 此时土壤含水量增长幅度变大[图 2(d) 等高线变密集], 且达到一个较高水平, 土壤剖面平均温度以及气温在 0°C 左右移动[图 2(c), 图 5], 不同处理土壤剖面 N_2O 浓度均呈现暴发式增长[图 2(b)], CO_2 浓度也有微弱升高. 不同处理下, 土壤融化时间均从 2016 年 3 月 25 日开始, 但融化速率有所差异, 表现为 CG 融化最快, UG99 融化最慢. 到 2016 年 4 月 11 日, UG79 和 CG 分别融化 42 、 54 cm , 而 UG99 仅仅融化 29 cm (图 6). 虽然这种差异对土壤剖面 CO_2 浓度无显著影响, 整个冻融期土壤剖面 CO_2 浓度表现为: $\text{UG79} > \text{UG99} > \text{CG}$; 但冻融期土壤融化快慢对 N_2O 的影响却不容忽视, 较少植被覆盖的 CG 处理, 土壤融化最快, 土壤温度和水分变化也较 UG79 、 UG99 剧烈(图 2), 土壤剖面 N_2O 浓度最高, 由此围封处理(UG79 、 UG99)与放牧处理 CG 的 N_2O 浓度差异显著($P < 0.05$)(图 3).

夏季生长期, 不同土层土壤温度达到一年中最高值, 受降雨的影响(图 5), 土壤含水量也有一定的回升[图 2(d)], 不同处理间, CG 在夏季植被生长期土壤温度较其他两个处理高, 其土壤剖面 CO_2 浓度却低于 UG79 和 UG99 处理, N_2O 浓度却表现为最高(图 3).

3 讨论

3.1 季节性冻土区不同放牧条件对土壤 CO_2 产生与排放的影响

土壤 CO_2 的产生来源于土壤呼吸, 包括 3 个生物学过程(土壤微生物呼吸、植物活根呼吸、土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳物的化学氧

化)^[18]. 土壤水分和热量是土壤 CO_2 产生的重要环境因子, 温度的升高能显著增加土壤中有机碳的分解速率, 参与呼吸作用的土壤微生物也随之增加, 从而导致土壤 CO_2 显著增加. 土壤水分主要通过改变微生物生理活动、呼吸作用底物、土壤通透性等来影响土壤呼吸, 有研究表明土壤含水量与 CO_2 通量呈显著正相关^[19]. 生长季土壤温度逐渐升高, 水分充足, 植物根系呼吸加快, 土壤中微生物活性增强及有机质的分解速度加快, 土壤 CO_2 排放明显, 导致生长期土壤剖面 CO_2 平均浓度显著高于冻结期和冻融期. 且在生长季 UG79 土壤剖面 CO_2 浓度最高, CG 最低, 这主要是由于 CG 处理地表植被生长差, 土壤容重较大, 孔隙度减小, 持水和空气能力低, 不利于土壤和地下生物量的呼吸. 这与王跃思等的结果一致^[20]. 此外, CG 处理, 表层 CO_2 容易与大气发生气体交换, 下层 CO_2 又难以扩散迁移, 因此 CO_2 浓度随着土壤深度的增加而增加, 而 UG79 、 UG99 植被生长旺盛, 20 cm 附近为根系活跃区, 因此 CO_2 浓度最高.

非生长季, 植被根系呼吸作用产生的 CO_2 可忽略不计, 同时土壤冻结也限制了土壤动物的呼吸, 因而此时期土壤 CO_2 的产生主要来源于土壤微生物呼吸. 本研究非生长季土壤剖面 CO_2 浓度在土壤冻融期有所增加, 但与冻结期相比差异不显著. 这一现象与高山苔原^[21]、高纬度针阔叶林^[22]、泥炭沼泽^[23]等季节性冻融特征明显的生态系统不同, 在高山苔原、高纬度针阔叶林、泥炭沼泽等冻融期 CO_2 排放量要显著高于冻结期, 这可能与本研究区域特殊的土壤与气候条件有关. 除了冻融期土壤频繁冻融交替使得土壤微生物死亡, 为存活下来的微生物呼吸作用提供了有机质和养分导致 CO_2 增加^[24]; UG79 、 UG99 处理生长期植被生长旺盛, 地下生物量较多^[17], 与 CG 处理相比非生长季土壤中还残留着较多活体根系以及根系死亡后的腐烂残体, 加上土壤解冻期温度和含水量迅速回升, 土壤呼吸速度加快^[25], 因此 UG79 、 UG99 处理解冻期 CO_2 排放量要高于 CG 处理.

3.2 季节性冻土区不同放牧条件对土壤 N_2O 产生与排放的影响

当前多数研究结果为 N_2O 释放通量与温度呈显著正相关关系^[26,27]. 土壤是微生物栖息的场所, 土壤温度升高导致土壤微生物活性增强, 促进硝化作用和反硝化作用的进行, 硝化作用最适温度是 28°C ^[28], 反硝化作用最适温度是 35°C ^[29]. 而本试验

3 种处理土壤剖面 N_2O 浓度最大值并没有出现在夏季高温时期而在春季土壤冻融期,并在冻融期前期呈现脉冲式释放.这种现象在冻融现象频繁的生态系统中,十分普遍^[2,3].有研究表明,土壤温度在 $0^{\circ}C$ 左右对于土壤 N_2O 排放贡献最显著, $0^{\circ}C$ 是土壤冰水相变的转换点,土壤液态含水量直接影响着微生物硝化反硝化作用, N_2O 的产生主要集中在非生长季的冻融期.陈哲^[30]在对冻融环境下土壤氮素损失状况的论述中,得出在耕地、草地、森林以及湿地等不同生态系统的研究中,90%以上的冻融交替使得 N_2O 排放量增加.土壤 N_2O 的排放机制主要为微生物参与的土壤硝化以及反硝化作用,而冻融交替能够提高微生物进行反硝化作用的营养底物.解冻期,频繁的冻融交替能够杀死土壤中的某些微生物并释放出 NH_4^+ 、 NO_3^- 等营养物质,从而使得土壤中剩余的微生物活性增强, N_2O 排放增加;Campbell等^[31]认为冻融作用破坏土壤团聚体,导致不稳定有机碳暴露,为反硝化微生物提供了更多的接触比表面积;另外,冻融期植物根系损伤会释放细胞液中的有机物质,同时减少对土壤中无机氮的吸收,使得土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 增加,提高反硝化底物供给.还有研究表明,土壤冻结时期土壤氮矿化量增加,因此累积的 NO_3^- 使得解冻期反硝化微生物活动增强^[32].因此,温度是锡林郭勒草原 N_2O 排放的一个限制因素而不是主要促进因素.

冻融期3个处理 N_2O 均暴发式产生,但CG处理土壤剖面 N_2O 浓度显著高于UG79、UG99,同时在生长季,CG处理 N_2O 剖面浓度高于UG79、UG99,而生长季UG79、UG99处理 N_2O 仅有微弱产生.这种放牧的效应与Wolf等^[12]在该试验区的发现不一致.生长季CG处理土壤剖面 N_2O 浓度较高,可能是由于本区全年降水量的70%~80%集中于7、8月也就是生长季(图5),夏季降水充足,太阳辐射强,水分蒸发快,CG处理植被覆盖较差,土壤干湿交替频繁,干湿交替不仅对于土壤硝化和反硝化作用有利,同时也有助于 N_2O 的排放^[33],此外生长季UG79、UG99植被长势旺盛,吸收较多氮素,从而减少土壤中 NH_4^+ 等进行硝化作用的反应物,限制了 N_2O 的产生,而CG处理生长季动物尿液和粪便随着雨水的冲刷进入土壤,为土壤硝化与反硝化提供了充足的底物^[34].冻融期,随着气温的升高以及积雪的融化,改善了土壤的水热环境,土壤中硝化与反硝化作用强烈,但由于动物的踩踏,CG处理土壤较UG79、UG99土壤更易形成厌氧微区,土壤中反硝化细菌

的反硝化潜势较高,因此土壤剖面 N_2O 浓度更高.

不同处理中,土壤剖面 N_2O 浓度均为表层(5 cm)最低,这与以往的研究结果一致^[35],旱季作物也有类似的结果^[16,36].这种剖面分布特征与土壤剖面环境以及 N_2O 的扩散过程有关^[16],表层土壤与下层土壤相比易与大气发生气体交换,使得表层产生的 N_2O 较易扩散进入大气,此外,频繁的气体交换不利于表层土壤形成厌氧微区,不利于反硝化的进行;下层土壤 N_2O 扩散较慢,春季冻融期雪融水的入渗,使得土壤充气孔隙度减小,利于反硝化的进行.

研究区冻融期 N_2O 呈现脉冲式释放,冻融期,水分既不是最高(低于夏季降雨时),但也不低(高于冻结期),而温度正好又升到了零度以上(适合微生物活动),由此,这种适宜的条件促使了 N_2O 的剧烈排放,且由于过度放牧冻融交替更为快速,由此释放最大.本研究的不足之处在于缺乏土壤冻融过程中土壤硝化反硝化微生物指标的测定,难以对土壤冻融过程中土壤物理学机制之外的微生物学机制做出明确的解释,还需在将来的研究中得以加强.

4 结论

(1)内蒙典型草原生态系统土壤剖面 CO_2 具有明显的时空分布规律.生长期出现明显的浓度峰值,冻结期变化平缓,冻融期会有微弱升高,冻融期在年际尺度上对 CO_2 的排放起促进作用.3个处理中CG土壤剖面 CO_2 浓度最低,说明放牧能使该地区土壤剖面 CO_2 浓度降低,对于围封样地,围封时间越长,土壤剖面 CO_2 浓度越高,但差异不显著.此外,放牧能够通过影响地表植被状况,进而影响不同土层间 CO_2 分布情况,对于放牧处理土壤剖面 CO_2 浓度随着土层的增加而增加,而对于围封样地为根系活跃区 CO_2 浓度最高.

(2)内蒙古典型草原季节性冻土区冻融现象对土壤剖面 N_2O 浓度具有明显的影响.土壤冻融期 N_2O 存在脉冲式集中产生与释放.冻融期 N_2O 产生与排放在非生长季中持续的时间短,但却是温室气体产生的关键时期,在全年产生总量中有着举足轻重的作用,因而在此时期应重点监测.在 N_2O 年度排放总量的估算中,忽略了冻融交替时期对 N_2O 产生的影响,将会造成巨大的估算误差.各个时期放牧处理剖面 N_2O 浓度均显著高于禁牧处理.由于 N_2O 产生主要集中在冻融期,且发生迅速,所以对于不同土层,3个处理整体表现为表层与底层 N_2O 浓度差异显著,其余各土层间 N_2O 浓度差异不显著.

致谢: 本试验的现场采样工作由中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站工作人员协助完成, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展[J]. 土壤, 2008, **40**(4): 505-509.
Sun H, Qin J H, Wu Y. Freeze-thaw cycles and their impacts on ecological process: a review [J]. Soils, 2008, **40**(4): 505-509.
- [2] Nielsen C B, Groffman P M, Hamburg S P, *et al.* Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, **65**(6): 1723-1730.
- [3] Goldberg S D, Borken W, Gebauer G. N₂O emission in a Norway spruce forest due to soil frost: concentration and isotope profiles shed a new light on an old story[J]. Biogeochemistry, 2010, **97**(1): 21-30.
- [4] Decker K L M, Wang D, Waite C, *et al.* Snow removal and ambient air temperature effects on forest soil temperatures in northern Vermont[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, **67**(4): 1234-1242.
- [5] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(5): 977-986.
- [6] 阳勇, 陈仁升, 叶柏生, 等. 寒区典型下垫面冻土水热过程对比研究(Ⅱ): 水热传输[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(6): 1555-1563.
Yang Y, Chen R S, Ye B S, *et al.* Heat and water transfer processes on the typical underlying surfaces of frozen soil in cold regions (Ⅱ): water and heat transfer[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(6): 1555-1563.
- [7] Teepe R, Vor A, Beese F, *et al.* Emissions of N₂O from soils during cycles of freezing and thawing and the effects of soil water, texture and duration of freezing[J]. European Journal of Soil Science, 2004, **55**(2): 357-365.
- [8] Skogland T, Lomeland S, Goksøyr J. Respiratory burst after freezing and thawing of soil: experiments with soil bacteria[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1988, **20**(6): 851-856.
- [9] Müller C, Martin M, Stevens R J, *et al.* Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(9): 1325-1331.
- [10] 韩其飞, 罗格平, 李超凡, 等. 放牧对新疆草地生态系统碳源/汇的影响模拟研究[J]. 生态学报, 2017, **37**(13): 4392-4399.
Han Q F, Luo G P, Li C F, *et al.* Modeling the grazing effect of grassland on the carbon source/sink in Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(13): 4392-4399.
- [11] Wang L Q, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Effects and mechanism of freeze-thawing cycles on the soil N₂O fluxes in the temperate semi-arid steppe[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **56**: 192-201.
- [12] Wolf B, Zheng X H, Brüggemann N, *et al.* Grazing-induced reduction of natural nitrous oxide release from continental steppe [J]. Nature, 2010, **464**(7290): 881-884.
- [13] Li K H, Gong Y M, Song W, *et al.* No significant nitrous oxide emissions during spring thaw under grazing and nitrogen addition in an alpine grassland [J]. Global Change Biology, 2012, **18**(8): 2546-2554.
- [14] 梁东丽, 同延安, Emterdy O, 等. 土土壤剖面中N₂O浓度的时间和空间变异[J]. 生态学报, 2003, **23**(4): 731-737.
Liang D L, Tong Y A, Emterdy O, *et al.* Spatial and temporal variation of nitrous oxide concentrations in soil profiles of Manure Loessial Soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, **23**(4): 731-737.
- [15] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [16] 刘平丽, 张啸林, 熊正琴, 等. 不同水旱轮作体系稻田土壤剖面N₂O的分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(9): 2363-2369.
Liu P L, Zhang X L, Xiong Z Q, *et al.* Distribution characteristics of soil profile nitrous oxide concentration in paddy fields with different rice-upland crop rotation systems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, **22**(9): 2363-2369.
- [17] Zhao Y, Peth S, Horn R, *et al.* Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland [J]. Soil and Tillage Research, 2010, **109**(2): 75-86.
- [18] 翟胜, 高宝玉, 王巨媛, 等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2008, **17**(6): 2488-2493.
Zhai S, Gao B Y, Wang J Y, *et al.* Mechanism and impact factors of greenhouse gases generation from farmland [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(6): 2488-2493.
- [19] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(7): 1303-1307.
Dong Y H, Ouyang Z. Effects of organic manures on CO₂ and CH₄ fluxes of farmland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(7): 1303-1307.
- [20] 王跃思, 胡玉琼, 纪宝明, 等. 放牧对内蒙古草原温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(6): 490-494.
Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, *et al.* Research of grazing effects on greenhouse gas emission in Inner Mongolian grasslands [J]. China Environmental Science, 2002, **22**(6): 490-494.
- [21] 陈清清, 朱仁斌, 丁玮, 等. 海鸟活动对北极新奥尔松苔原-大气 CO₂ 交换的影响[J]. 极地研究, 2012, **24**(3): 254-265.
Chen Q Q, Zhu R B, Ding W, *et al.* Effects of seabird activity on carbon dioxide exchange between tundra and atmosphere in Ny-Ålesund, Arctic [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, **24**(3): 254-265.
- [22] 王颖. 东北典型森林生态系统温室气体释放规律研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
Wang Y. Research on fluxes of Greenhouse gas of temperate forest ecosystems in Northeastern China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.
- [23] 邓昭衡, 高居娟, 周雨露, 等. 氮沉降对冻融培养期泥炭土二氧化碳排放的影响[J]. 土壤通报, 2015, **46**(4): 962-966.
Deng Z H, Gao J J, Zhou Y L, *et al.* Effect of N deposition on CO₂ emission during freezing-thawing incubation period of peat soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, **46**(4): 962-966.

- [24] Sharma S, Szele Z, Schilling R, *et al.* Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(3): 2148-2154.
- [25] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能[J]. *生态学报*, 2000, **20**(5): 869-874.
Wang D L, Yin C Q. Functions of root channels in the soil system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 869-874.
- [26] 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 等. 不同土地利用方式下冬季 N_2O 排放及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2968-2974.
Wu Y Z, Zhang M M, Qin H L, *et al.* N_2O flux in winter and its affecting factors under different land use patterns [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2968-2974.
- [27] 牟长城, 刘霞, 孙晓新, 等. 小兴安岭阔叶林沼泽土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放规律及其影响因子[J]. *生态学报*, 2010, **30**(17): 4598-4608.
Mu C C, Liu X, Sun X X, *et al.* Emissions of CO_2 , CH_4 and N_2O from broad-leaved forested swamp soils in Xiaoxing Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(17): 4598-4608.
- [28] 辛亮. 长期施肥对黄土高原旱地土壤硝化过程及 N_2O 排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Xin L. Effects of long-term fertilization on soil nitrification and N_2O emission in the semiarid Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [29] 荆光军, 朱波, 李登煜. 成都平原水稻-油菜轮作系统油菜季 N_2O 排放通量的研究[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(3): 482-485.
Jing G J, Zhu B, Li D Y. N_2O emission flux in the rice-rape rotation system in the Chengdu Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(3): 482-485.
- [30] 陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(4): 1083-1094.
Chen Z, Yang S Q, Zhang Q W, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles on soil nitrogen loss and availability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(4): 1083-1094.
- [31] Campbell J L, Soggi A M, Templer P H. Increased nitrogen leaching following soil freezing is due to decreased root uptake in a northern hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(8): 2663-2673.
- [32] Groffman P M, Hardy J, Driscoll C, *et al.* Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(9): 1748-1760.
- [33] 殷睿, 徐振锋, 吴福忠, 等. 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(8): 2061-2067.
Yin R, Xu Z F, Wu F Z, *et al.* Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(8): 2061-2067.
- [34] 杜睿, 王庚辰, 吕达仁. 放牧对草原土壤 N_2O 产生及微生物的影响[J]. *环境科学*, 2001, **22**(4): 11-15.
Du R, Wang G C, Lv D R, *et al.* Effect of grazing on microbiological processes of N_2O production in grassland soils [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(4): 11-15.
- [35] 杜睿, 王庚辰. 内蒙古典型草原土壤 N_2O 产生的机理探讨[J]. *中国环境科学*, 2000, **20**(5): 387-391.
Du R, Wang G C. Study on the mechanism of N_2O production in typical grassland soils of Inner Mongolia [J]. *China Environmental Science*, 2000, **20**(5): 387-391.
- [36] 潘晓健, 刘平丽, 李露, 等. 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 N_2O 时空分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(2): 364-371.
Pan X J, Liu P L, Li L, *et al.* Spatial and temporal distributions of soil profile N_2O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(2): 364-371.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)