

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

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

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

短期放牧对半干旱草地生态系统 CO₂ 和 N₂O 排放的影响

申颜^{1,2}, 孙建平^{1,2}, 罗玉坤^{1,2}, 刁华杰^{1,2}, 闫卫东¹, 王常慧^{2*}, 董宽虎^{1*}

(1. 山西农业大学动物科技学院, 太谷 030801; 2. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 通过在北方农牧带半干旱草地生态系统(山西右玉)设置不放牧、轻度放牧、中度放牧和重度放牧 4 个不同强度的放牧实验, 运用静态-暗箱法测定放牧第一年生长季的温室气体通量, 研究不同放牧强度对该地区温室气体通量的影响. 结果表明: ① CO₂ 和 N₂O 在生长季表现出随着温度和水分变化的明显季节动态变化, 但是与不放牧相比, 第一年不同放牧强度对 CO₂ 和 N₂O 排放速率没有显著影响; ② 放牧显著降低了土壤含水量 ($P < 0.05$), 中度放牧降低了土壤微生物生物量碳 (MBC, $P < 0.05$), 中度和重度放牧降低了土壤微生物生物量氮 (MBN, $P < 0.05$); ③ CO₂ 排放速率和土壤温度、土壤水分之间呈显著正相关关系, 土壤温度、可溶性氮、微生物生物量氮以及 CO₂ 排放速率之间呈显著正相关关系. 放牧增加了温度与 CO₂ 排放的相关性, 但对 N₂O 排放相反. ④ 虽然放牧降低了土壤含水量, 但是没有发现不同放牧强度间 CO₂ 和 N₂O 排放的差异, 说明短期内不同的放牧强度尚未对土壤微生物结构与功能造成显著影响, 需要进行长期深入地研究, 揭示放牧强度对温室气体通量的影响机制.

关键词: 放牧; 温室气体; 微生物生物量; 半干旱草地生态系统; 农牧交错带

中图分类号: X14; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5237-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803213

Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland

SHEN Yan^{1,2}, SUN Jian-ping^{1,2}, LUO Yu-kun^{1,2}, DIAO Hua-jie^{1,2}, YAN Wei-dong¹, WANG Chang-hui^{2*}, DONG Kuan-hu^{1*}

(1. College of Animal Science and Veterinary Medicine, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: Grazing is one of the most important ways for managing grassland in northern China. Different studies have focused on the effects of grazing on the structure and function of ecosystems. Grazing affects the structure and function of soil via biological and physical processes, such as animal trampling, feeding, and excretion, which further affects N₂O emissions. However, there is less research on greenhouse gases (GHGs) emissions by grazing intensities in semi-arid grassland ecosystems in northern China. In this study, four different grazing intensities were considered in the semi-arid grassland ecosystem of the typical agro-pastoral ecotone in northern China (Youyu, Shanxi). The influence of different grazing intensities on GHG fluxes was studied by measuring GHGs fluxes in the growing season with an opaque static chamber. The results showed that ① Grazing had no effect on CO₂ and N₂O fluxes during the first year of grazing treatment. ② However, grazing decreased soil water content ($P < 0.05$), moderate grazing intensity decreased microbial biomass carbon ($P < 0.05$), and moderate and heavy grazing intensities reduced microbial biomass nitrogen ($P < 0.05$). ③ Significant positive correlations between CO₂ flux and soil temperature and soil moisture were observed. The correlation between temperature and CO₂ emissions was increased by grazing. ④ There was a significant positive correlation between soil temperature, soluble nitrogen, soil microbial biomass nitrogen, CO₂ flux, and N₂O flux. Our results indicated that GHG, regulated by soil microorganisms, was affected by soil temperature and moisture.

Key words: grazing; greenhouse gas; microbial biomass; semi-arid grassland ecosystem; agro-pastoral ecotone

20 世纪开始, 由于化石燃料的燃烧和土地利用的变化等导致全球大气二氧化碳 (CO₂) 浓度的升高^[1], CO₂ 浓度升高引起全球气温的普遍上升. 而氧化亚氮 (N₂O) 的增加主要来自农田生态系统, 其次草地生态系统放牧也会增加 N₂O 的排放^[2]. 由于全球气候变化和人类活动的共同作用, 全球草原生态系统正遭受着不同程度的破坏. 其中, 中国各类型的草地有 90% 左右正在不同程度退化^[3]. 其中,

过度放牧是引起草地退化的重要原因之一, 退化的草地, 不仅严重威胁着草原生态系统的生物多样性和稳定性, 同时对陆地生态系统的功能和过程也产

收稿日期: 2018-03-30; 修订日期: 2018-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500703); 国家自然科学基金项目(31572452, 41573063)

作者简介: 申颜(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为草地生态学, E-mail: 18234487746@163.com

* 通信作者, E-mail: wangch@ibcas.ac.cn; dongkuanhu@126.com

生着重要影响^[4]. 放牧通过物质循环和能量流动影响草地生态系统, 包括土壤微生物参与的养分循环过程、土壤-大气介导的温室气体通量变化等^[5]. 陆地生态系统是 CO_2 和 N_2O 的主要来源和重要汇^[6, 7], 而半干旱草地生态系统在陆地生态系统中占据重要的地位^[8]. 因此, 量化温室气体排放对环境变化的响应对于预测半干旱草地生态系统对气候系统的反馈至关重要^[9].

放牧通过草食动物对植物地上部的采食减少凋落物的形成和积累^[10], 降低了土壤有机碳氮的积累^[11], 进一步影响土壤微生物的活性与组成^[12], 从而影响 CO_2 ^[13] 和 N_2O ^[14] 的排放. 大多数研究关注土壤温度^[15]、土壤水分^[16]、地上生物量、地下生物量^[17] 以及管理利用方式^[18] 等生物和非生物因子对温室气体通量的影响, 关于不同强度放牧对温室气体通量影响的研究较少. 近年来, 分别在青藏高原^[19] 和内蒙古草原^[14, 20] 等天然牧区草地进行了有关施氮、割草、增温、放牧等因子对温室气体通量影响的研究, 而在农牧交错

带有关温室气体通量的研究较少. 我国农牧交错带草地面积 $72.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[21], 具有一定的代表性. 因此, 本研究在晋北农牧交错带设置了不同的放牧梯度实验, 分析不同放牧强度对温室气体通量的影响.

1 材料与方法

1.1 区域描述

本实验样地位于山西农业大学右玉草地生态系统野外观测研究站 ($\text{E}112^\circ 19' 39.6''$, $\text{N}39^\circ 59' 48.5''$), 该区域年均温 4.7°C , 最高温 22.4°C , 最低温在 -17.8°C , 年降雨量 435 mm, 海拔 1348 m, 无霜期 100 ~ 120 d, 年均日照率为 30%, 气候类型属于典型的大陆季风性气候; 植被以羊草 (*Leymus chinensis*) 和赖草 (*Leymus secalinus*) 为主, 生长季从 5 月至 10 月. 土壤 pH 值为 8.8, 全氮、全磷、有机质和地上、地下生物量分别为 $0.84 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $8.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $353.81 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $2838.62 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (表 1).

表 1 土壤和植被特征表

放牧强度	pH	全碳 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上生物量 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	地下生物量 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
不放牧 (UG)	$8.87 \pm 0.08\text{a}$	$0.76 \pm 0.03\text{a}$	$9.53 \pm 0.44\text{a}$	$0.49 \pm 0.02\text{a}$	$234.92 \pm 47.55\text{a}$	$2898.74 \pm 142.81\text{a}$
轻度放牧 (LG)	$8.74 \pm 0.13\text{a}$	$0.89 \pm 0.12\text{a}$	$8.63 \pm 0.23\text{a}$	$0.48 \pm 0.01\text{a}$	$250.99 \pm 32.92\text{a}$	$2944.24 \pm 215.06\text{a}$
中度放牧 (MG)	$8.86 \pm 0.16\text{a}$	$0.88 \pm 0.08\text{a}$	$8.41 \pm 0.98\text{a}$	$0.48 \pm 0.01\text{a}$	$294.83 \pm 44.63\text{a}$	$2874.91 \pm 185.61\text{a}$
重度放牧 (HG)	$8.71 \pm 0.09\text{a}$	$0.95 \pm 0.12\text{a}$	$9.16 \pm 0.90\text{a}$	$0.51 \pm 0.05\text{a}$	$226.16 \pm 1.24\text{a}$	$2636.60 \pm 194.95\text{a}$

1.2 研究方法

本实验区于 2016 年 5 月围封, 采用完全随机区组设计, 实验共设 4 个不同放牧强度, 分别为对照 (每个生长季每公顷有 0 只羊; UG)、轻度放牧 (每个生长季每公顷有 2.35 只羊; LG)、中度放牧 (每个生长季每公顷有 4.8 只羊; MG)、重度放牧 (每个生长季每公顷有 7.85 只羊; HG), 每个处理 4 个重复, 每个处理小区 2000 m^2 , 用网状围栏隔开. 于 2016 年 8 月测定了土壤全碳、全氮、全磷以及 pH、地上生物量和地下生物量. 放牧从 2017 年开始, 集中在生长季的 6 ~ 9 月进行.

1.2.1 观测指标

温室气体排放通量测定: 采用静态暗箱气相色谱法, 采样箱由不锈钢暗箱和底座组成, 为防止采样期间温度升高过快, 用保温材料密封箱体外部, 上部焊接把手. 底座 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) 于实验前两周随机布置于小区, 上部留出

水槽 ($h = 2 \text{ cm}$, $d = 1 \text{ cm}$), 暗箱 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$) 的一侧有接取气体的三通阀, 其旁有温度探测口, 箱内顶部安装 2 个小型风扇用以混合箱内气体. 取样前清理底座平台上的附着物, 每次取样在上午 09:00 ~ 12:00 进行, 安装顶箱时注意不损伤底座内的植被, 使得箱体内植物保持正常生长, 水槽注水封好, 使两箱间气路密闭, 平均每两周采样一次. 用 100 mL 的一次性塑料注射器连通静态暗箱的气管, 在 40 min 内每隔 10 min 分别用注射器抽取 100 mL 气体, 注入 100 mL 铝箔采气袋保存, 带回实验室一周内测定, 每次采集的同时记录箱内温度、土壤温度. 利用气相色谱仪 (Agilent 7890B) 分析 N_2O 和 CO_2 浓度, 采用火焰离子检测器 (FID) 测定 CO_2 , 温度 250°C , 电子捕获检测器 (ECD) 测定 N_2O 浓度, 温度为 350°C , 柱温为 55°C , N_2 作为载气, 计算其通量. 其中正值表示排放, 负值表示吸收.

气体通量计算公式:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{v_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T}{T_0} \times \frac{V}{A}$$

式中, F 为排放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; M 为被测气体的摩尔质量, V 为箱内空气体积; A 为静态箱底面积 (0.25 m^2); dc/dt 代表被测气体浓度随时间变化的直线斜率; v_0 、 T_0 和 P_0 分别为标准状态下被测气体的摩尔体积 ($22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$)、空气绝对温度 (273.15 K) 和气压 (101.325 kPa); P 为采样地点的气压; T 为采样时箱内的绝对温度。

地上、地下生物量和微生物生物量测定: 2016 年 8 月, 每个小区随机布置 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方, 在样方中分种获取地上生物量, 65°C 烘至恒重称量。在收获完生物量的样方内, 用内径为 7.5 cm 的土壤根钻, 按照 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 和 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 将土样取出。取三钻土样分别混合, 过 1 mm 筛并收集根系, 洗净后 65°C 烘至恒重称量, 计算 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 的地下生物量; 2017 年 8 月中旬, 各小区随机选取 5 个点, 利用土钻 ($d=3 \text{ cm}$) 取样后用 2 mm 土壤筛挑出杂质, 冰盒运回实验室 4°C 保存, 采用熏蒸-浸提法提取土壤微生物生物量^[22], 利用总有碳分析仪 (TOC) 测定 (Multi N/C 3100, 德国 Analytikjena) 土壤可溶性碳、可溶性氮以及微生物生物量碳、氮 (MBC, MBN)。2017 年 5~9 月中旬以相同方式采取土壤样品分析微生物生物量氮 (MBN)。

土壤温度、水分测定: 每周测定一次 (上午 $09:00 \sim 12:00$ 进行), 使用数显温度计和 TDR (time domain reflectometry) 分别测定 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 和 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤温度和土壤含水量。

土壤理化性状测定: 采用 GB 7859-87 方法、重铬酸钾氧化法、凯氏定氮法和钼锑抗比色法分别测定 pH 值、全碳、全氮和全磷。

1.2.2 数据分析

采用单因素方差分析 (ANOVA) 比较不同放牧强度之间的土壤温度、含水量、温室气体通量等因素的差异显著性; 利用双因素方差分析 (two-way ANOVA) 比较土壤温度、含水量和温室气体排放通

量的季节性变化的差异性; 采用 Pearson 相关性系数评价气体排放通量与土壤温度、含水量以及可溶性碳、氮、微生物生物量碳、氮和地上植被生物量、地下生物量之间的相关性分析。数据分析采用 SPSS 23.0 软件, 显著性水平 $P = 0.05$; 利用 Sigmaplot 12.5 做图。

2 结果与分析

2.1 放牧对环境因子的影响

2.1.1 放牧对土壤温度和含水量的影响

土壤温度 ($0 \sim 5 \text{ cm}$) 随着季节存在明显变化 [$P < 0.0001$, 图 1(a)], 分别在 6 月 3 日 MG ($29.80^\circ\text{C} \pm 1.00^\circ\text{C}$) 和 7 月 15 日 HG ($29.83^\circ\text{C} \pm 0.83^\circ\text{C}$) 达到最高, 生长季的最低土壤温度在 9 月 30 日的 UG ($6.13^\circ\text{C} \pm 0.22^\circ\text{C}$)。在放牧处理的第 1a, 土壤月和年均温在不同放牧强度间没有显著差异 [$P > 0.05$, 图 1(b)]。

土壤含水量表现出明显的季节变化, 且季节间有极显著差异 [$P < 0.0001$, 图 1(c)]。从生长季均值看, 3 个放牧强度显著降低了土壤含水量 [$P < 0.01$, 图 1(d)], 但不同放牧强度间差异不显著 [$P > 0.05$, 图 1(d)]。

2.1.2 短期放牧对微生物生物量的影响

与对照相比, 中度放牧显著降低 MBC ($P = 0.04$), 降低了 26.54% (表 2); 而中度和重度放牧显著降低了 MBN ($P = 0.04$), 分别下降 26.53%、10.27%。放牧对土壤可溶性碳, 可溶性氮含量没有显著影响 ($P > 0.05$)。

2.2 放牧强度对 CO₂、N₂O 排放速率的影响

CO₂ 通量随季节变化表现出明显的季节动态变化趋势 [图 2(a)]。各处理间 CO₂ 通量均值没有显著差异 [$P > 0.05$, 图 2(b)]。7 月 17 日达到最大值 UG [$(583.75 \pm 53.33) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 最小值在 12 月 21 日 UG [$(31.30 \pm 4.67) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]。

N₂O 通量随季节变化表现为双峰模式 [图 2(c)]。不同放牧强度对 N₂O 通量的生长季均值无显著影响 [$P > 0.05$, 图 2(d)]。N₂O 通量的峰值分别出现在 6 月 26 日 [$\text{MG} = (40.61 \pm 3.03)$

表 2 放牧对可溶性有机碳氮和微生物生物量的影响/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 2 Effect of grazing intensity on dissolved organic carbon, soluble organic nitrogen, and microbial biomass/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

放牧强度	可溶性碳	可溶性氮	微生物生物量碳 (MBC)	微生物生物量氮 (MBN)
不放牧 (UG)	55.66 ± 9.15a	10.51 ± 0.83a	312.98 ± 18.64a	38.28 ± 2.69a
轻度放牧 (LG)	45.12 ± 2.83a	12.42 ± 2.31a	308.20 ± 22.24a	32.05 ± 2.60ab
中度放牧 (MG)	61.68 ± 5.25a	10.86 ± 0.84a	229.92 ± 23.77b	28.12 ± 2.86b
重度放牧 (HG)	59.28 ± 11.37a	13.67 ± 1.71a	253.06 ± 17.49ab	29.47 ± 2.20b

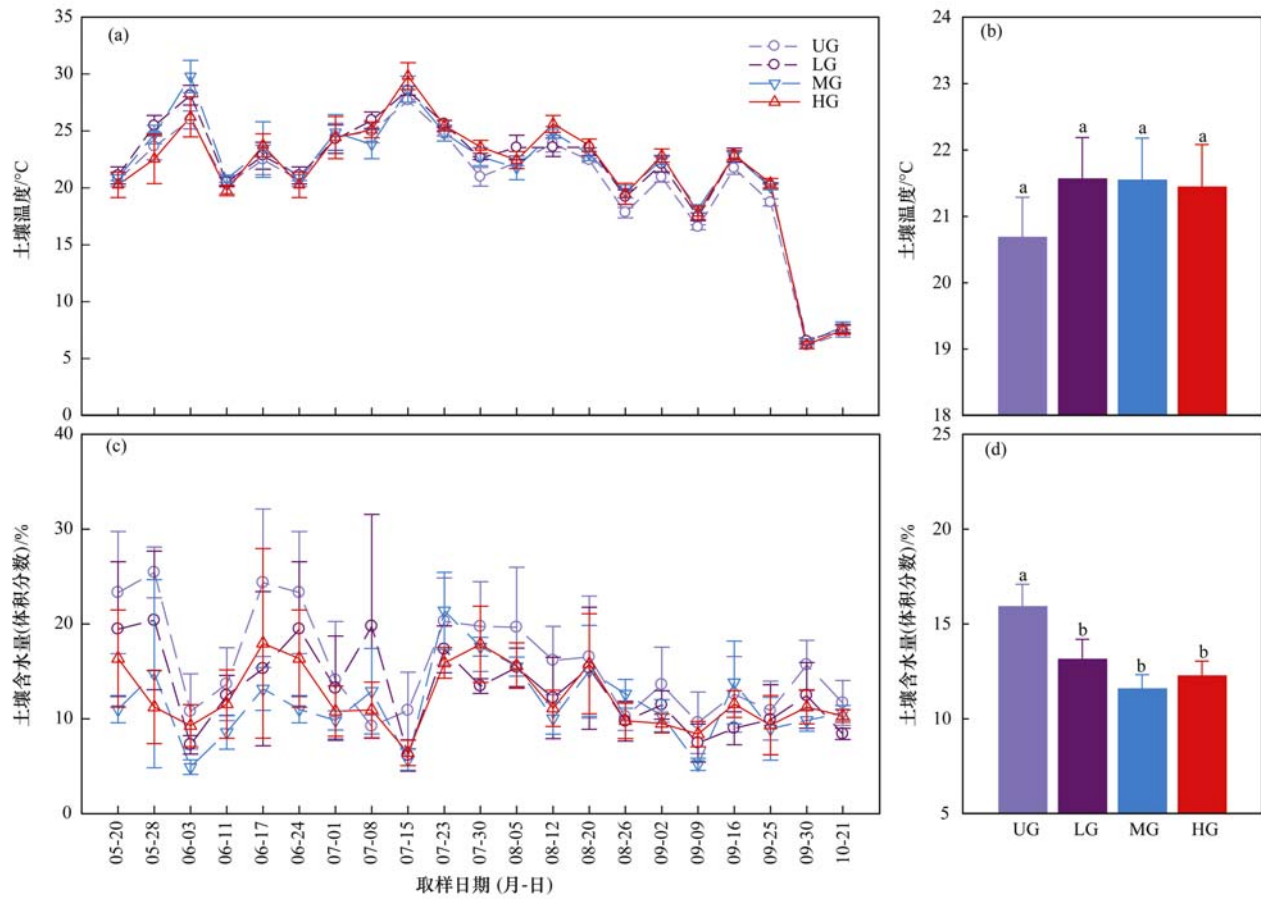


图1 放牧对土壤温度和土壤含水量影响的季节动态

Fig. 1 Seasonal variations in soil temperature and soil moisture in grazed semi-arid grassland

$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和8月24日[LG = (43.17 ± 6.62) $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], 6月3日, 轻度和重度放牧显著减少 N_2O 通量($P < 0.05$); 6月26日、7月17日和8月09日, 中度放牧显著增加了 N_2O 通量($P < 0.05$).

2.3 CO_2 、 N_2O 排放速率与土壤温度水分以及微生物的关系

土壤温度和 CO_2 通量之间呈现显著正相关关系[图3(a)]. 重度放牧强度下的土壤水分和 CO_2 通量之间具有显著正相关关系[图3(b)]. 轻度放牧条件下, 土壤温度和 N_2O 通量之间呈现显著正相关关系[图4(a)]. N_2O 通量和土壤可溶性氮之间有正相关关系[$P < 0.05$, 图4(b)]. 不放牧和中度放牧处理的 N_2O 通量和微生物生物量氮有显著正相关关系[图4(c)]. 中度放牧时 CO_2 通量和 N_2O 通量之间呈显著正相关关系[图3(c)].

3 讨论

3.1 放牧对环境因子的影响

3.1.1 放牧对土壤温度和含水量的影响

通过1 a的放牧实验发现, 不同放牧强度对土

壤温度无显著影响[图1(b)]. Shi等^[23]在草甸草原和荒漠草原的研究也发现放牧对土壤温度也没有显著影响, 但是他们的实验已经进行了3 a. 究其原因: 短期放牧对土壤温度的累积效应不明显. 草甸草原的研究表明适度放牧刺激土壤微生物活性, 增强土壤可溶性有机碳分解和周转, 引起土壤增温^[19, 24].

本研究结果表明, 无论轻度、中度还是重度放牧均降低了土壤含水量[图1(d)], 这个结果与呼伦贝尔草原的放牧实验研究结果一致^[16], 水分减少的原因是放牧降低了植被盖度^[25], 增加了地表的蒸发^[26], 另外由于动物的踩踏造成土壤板结降低等的综合影响^[27]. 在内蒙古半干旱草原的研究发现, 放牧增加了土壤含水量是因为放牧通过减少植物覆盖率和使土壤受风侵蚀^[28], 导致土壤物理、化学和生物特性退化^[29], 土壤含水量增加. 而Luo等人在青藏高原的放牧实验也发现短期放牧对土壤含水量没有显著影响^[30], 因为青藏高原草甸草原土壤本身持水能力强, 温度低也不会引起水分的大量蒸发.

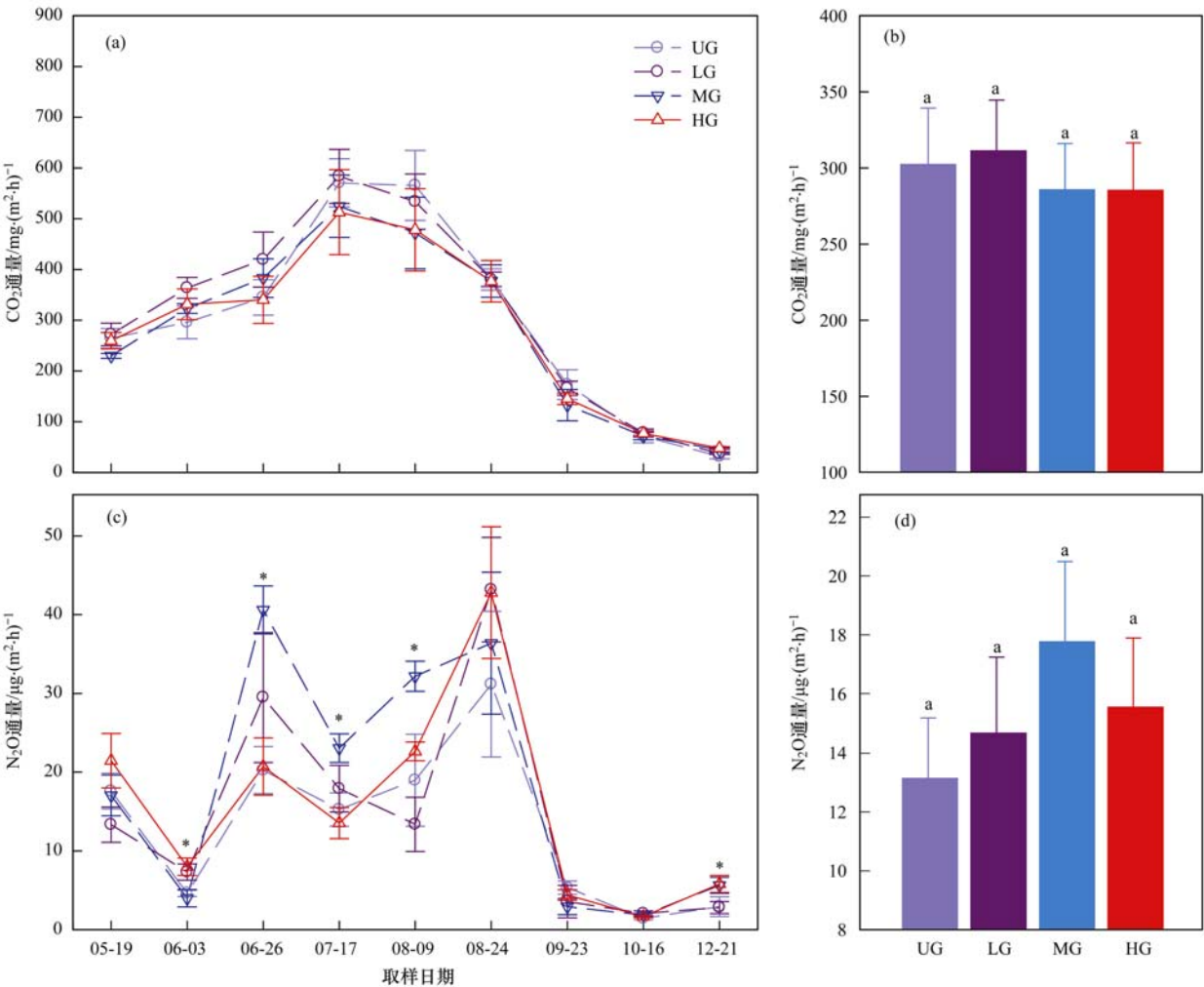


图2 放牧对 CO₂ 和 N₂O 通量影响的季节动态

Fig. 2 Seasonal variations in CO₂ and N₂O fluxes in grazed semi-arid grassland

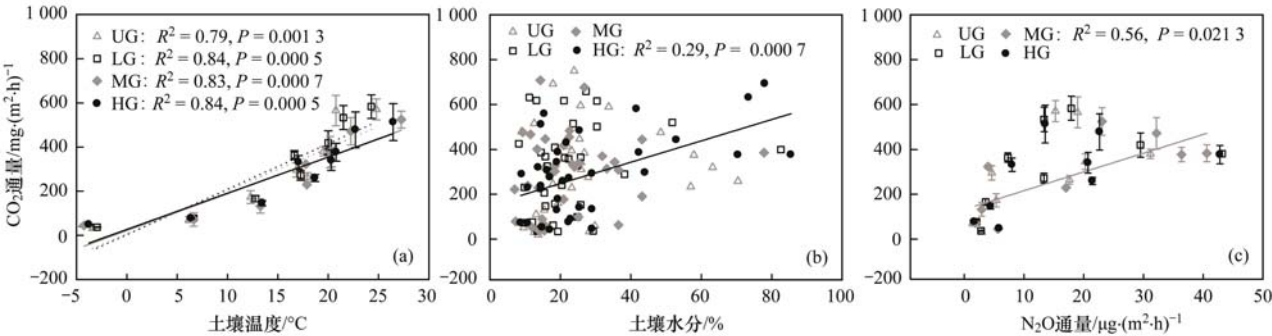


图3 CO₂ 通量与土壤温度、土壤水分以及 N₂O 通量的相关关系

Fig. 3 Relationship between CO₂ fluxes and soil temperature, soil moisture, and N₂O fluxes

3.1.2 放牧对微生物生物量的影响

通过 1 a 的放牧实验研究发现,中度放牧显著降低土壤微生物生物量碳,中度和重度放牧显著降低了土壤微生物生物量氮(表 2),这与草甸草原的研究结果一致^[31, 32]. 由于放牧引起植物凋落物^[33]、有机碳^[34]、总氮的输入^[35]减少以及土壤矿化作用

增强^[36],影响土壤微生物生物量. 重度放牧没有显著改变土壤微生物生物量碳,可能是超载过牧破坏土壤结构,土壤养分降低,导致土壤微生物活性降低^[16],但是土壤微生物中细菌类群组成的多样性和对不同时期植物残体分解利用过程中细菌各类群之间的接力更替^[31],导致无差异显著. 在高寒草甸

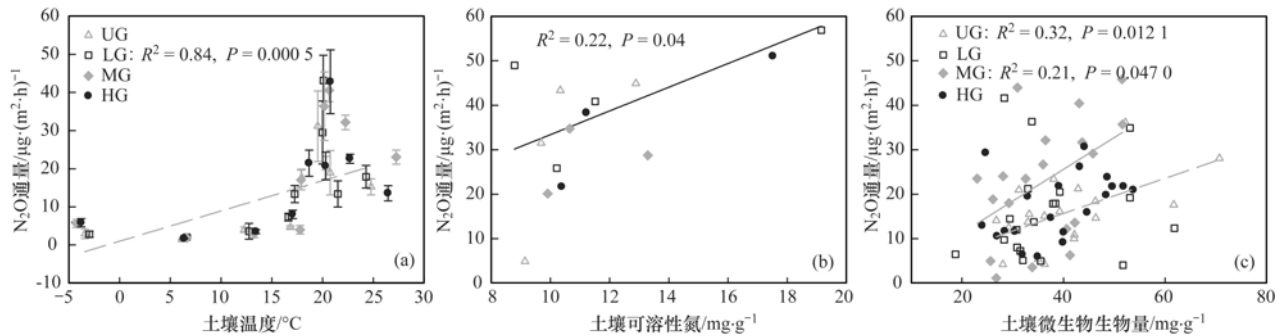


图4 N_2O 通量与土壤温度、可溶性氮、微生物生物量氮的相关关系

Fig. 4 Relationship between N_2O fluxes and soil temperature, soluble organic nitrogen, and microbial biomass nitrogen

草原和湿地草原均发现^[31, 37], 放牧增加了微生物生物量碳和氮, 由于采食活动及动物对营养物质的转化和排泄物归还等影响草地营养物质的循环, 导致草地土壤化学成分发生改变, 而草地土壤在放牧条件下, 物理变化和化学变化之间也相互作用、相互影响^[38]造成了土壤微生物生物量在不同放牧处理下的差异。

3.2 短期不同放牧强度对 CO_2 、 N_2O 排放速率的影响

3.2.1 短期不同放牧强度对 CO_2 排放速率的影响

二氧化碳是从土壤到大气的排放(即土壤呼吸)包括微生物呼吸、根呼吸和土壤呼吸的总和^[39]。本实验结果表明 CO_2 排放具有明显的季节变化 $[31.30 \sim 583.75 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$, 与 Dong 等^[40]在内蒙古草原及 Hörtnagl 等^[41]在欧洲草原的研究结果相似。本研究发现, 经过 1 a 短期放牧处理, 无论在哪个放牧强度下 CO_2 年排放量在各放牧强度间没有显著差异[图 2(b)], 这与内蒙古草甸草原的结果一致^[23]。分析放牧对 CO_2 排放没有显著影响的原因: 首先, 本实验只进行了 1 a, 短期的放牧处理尚未对生态系统结构和功能产生影响。其次, CO_2 排放通量主要受土壤温度影响^[42], 但放牧强度并未造成土壤温度的变化[图 1(b)]。第三, 放牧减少地上凋落物^[32], 凋落物的负累积效应减弱^[9, 14], 导致土壤水分含量显著降低, 在一定程度上引起温度升高^[24], 升高的土壤温度抵消了水分对 CO_2 通量的影响^[43]。

3.2.2 短期不同放牧强度对 N_2O 排放速率的影响

氧化亚氮是硝化和反硝化过程中释放的^[27]。本研究结果表明在生长季 N_2O 排放 $[1.42 \sim 43.17 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ 范围, 与锡林河流域的研究结果相似^[44]。另外中等强度的放牧分别在 6 月 26 日、7 月 17 日和 8 月 9 日显著增加了 N_2O 排放[图 2(c)]。由于生长季降雨增加, 放牧动物对土壤的踩踏作用

引起土壤孔隙度降低, 土壤密度增加, 导致水传导能力降低, 阻碍根系穿透, 使土壤由有氧条件转变为厌氧状态^[45], 增加了反硝化发生的可能性, 因此提高了 N_2O 的排放^[46]。

放牧没有引起 N_2O 通量年均差异变化, 可能是放牧时间较短。另微生物群落结构和功能仍处于适应过程^[15], 作用于 N_2O 排放贡献较少。植物和微生物在代谢过程中对氮素吸收有竞争抑制作用, 限制了 N_2O 排放^[47]。在 N_2O 排放中, 有效氮、温度和土壤含水量等因素十分重要^[48]。虽然中度和重度放牧引起了微生物生物量的减少(表 2), 但是像土壤温度(图 1)、可溶性有机碳氮等(表 2)没发生变化。故而, 虽然中等强度放牧在 6 月 26 日、7 月 17 日和 8 月 9 日增加了 N_2O 排放, 但其他因子对 N_2O 排放的作用不一致, 以及放牧造成的生态系统紊乱导致均值无差异。

3.3 CO_2 、 N_2O 排放速率与土壤温度、水分以及微生物的关系

结果显示 CO_2 排放通量与土壤温度、土壤水分之间呈正相关关系[图 3(a)、3(b)], 影响 CO_2 排放的主要有土壤温度^[15]、土壤水分^[16]、微生物呼吸^[49]、土壤可溶性物质^[50]等。

N_2O 排放和土壤温度、土壤可溶性有机氮以及土壤微生物生物量氮之间有正相关关系(图 4), 同时 Horváth 等^[51]指出土壤温度在 $5 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围对 N_2O 排放有重要影响。中度放牧下, CO_2 通量和 N_2O 通量之间呈显著正相关关系[图 3(c)]。 CO_2 和 N_2O 部分是由土壤中有机质分解产生^[27], 基础生物学上的 CO_2 和 N_2O 形成过程之间的关系是由植物残体、土壤有机质、微生物生物量调节^[39]。 CO_2 通量相对 N_2O 排放大是由于草原土壤干旱造成土壤微环境的 O_2 增加, 有利于土壤有机质分解相对增加, 因而 CO_2 排放率较高^[52], 但低的反硝化过程导致

了 N₂O 排放减少^[53]。在生态系统水平的基础上, 碳氮的相互作用是碳氮耦合, 在生态系统尺度上 CO₂ 与 N₂O 的相关性可以通过几种机理达到: 如基质共享^[54], 依赖可利用性氮和可溶性氮; 同时受微生物过程常见的控制因子, 包括土壤温度、水分等^[13, 14]。生物地球化学循环过程中碳氮呈一定比例^[55]; 以及相同的环境条件对产生和消耗 CO₂ 和 N₂O 的微生物活性产生相似的影响, 导致土壤 CO₂ 排放和 N₂O 排放密切相关^[56]。较高的 CO₂ 排放速率表明较快的分解, 氧气消耗增加, 产生厌氧环境, 有利于反硝化作用产生 N₂O^[53]。

4 结论

生长季短期(1 a)放牧对 CO₂ 和 N₂O 排放速率的均值没有显著影响, 但是观察到了明显的季节动态。放牧降低了土壤含水量, 中度放牧降低土壤微生物生物量碳, 中度和重度放牧降低微生物生物量氮。CO₂ 和 N₂O 通量具有明显的季节变化, 放牧通过土壤温度、土壤水分影响 CO₂ 通量。N₂O 通量主要受土壤温度、可溶性氮以及微生物生物量的影响。由于本放牧处理是第 1 a, 放牧处理尚未对生态系统的结构和功能产生质的影响。但是, 这部分结果可以为放牧草地的管理提供参考, 短期放牧与休牧结合对于维持草地生产力与稳定性具有一定的借鉴作用。

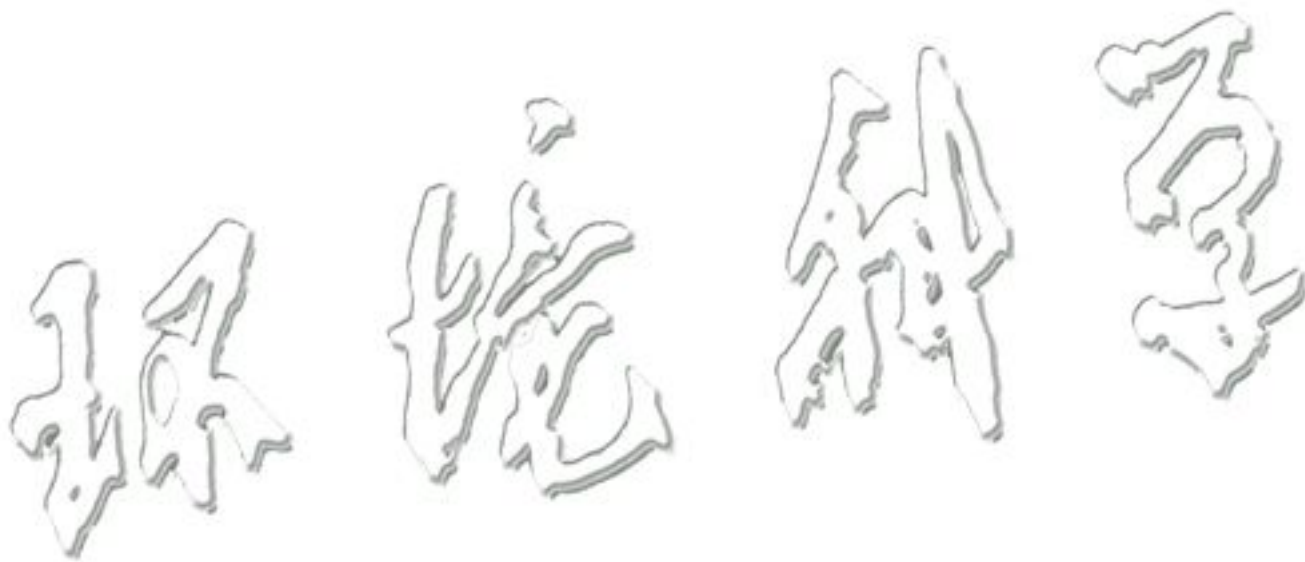
致谢: 感谢山西省右玉县宏宇牧业有限公司工作人员在项目执行过程中给予的大力支持和帮助。

参考文献:

- [1] Flato G, Marotzke J, Abiodun B, *et al.* Evaluation of climate models [A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* (Eds.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 741-866.
- [2] Saggar S, Bolan N S, Bhandral R, *et al.* A review of emissions of methane, ammonia, and nitrous oxide from animal excreta deposition and farm effluent application in grazed pastures [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2004, **47** (4): 513-544.
- [3] 闫玉春, 王旭, 杨桂霞, 等. 退化草地封育后土壤细颗粒增加机理探讨及研究展望 [J]. 中国沙漠, 2011, **31** (5): 1162-1166.
Yan Y C, Wang X, Yang G X, *et al.* Review on mechanism of fine soil particles increase in enclosed grassland [J]. Journal of Desert Research, 2011, **31** (5): 1162-1166.
- [4] Stavi I, Ungar E D, Lavee H, *et al.* Grazing-induced spatial variability of soil bulk density and content of moisture, organic carbon and calcium carbonate in a semi-arid rangeland [J]. CATENA, 2008, **75** (3): 288-296.
- [5] Zhang L H, Hou L Y, Laanbroek H J, *et al.* Effects of mowing heights on N₂O emission from temperate grasslands in inner mongolia, Northern China [J]. American Journal of Climate Change, 2015, **4** (5): 397-407.
- [6] Chapuis-Lardy L, Wragge N, Metay A, *et al.* Soils, a sink for N₂O? A review [J]. Global Change Biology, 2007, **13** (1): 1-17.
- [7] Philippe C, Christopher S, Govindasamy B, *et al.* Carbon and other biogeochemical cycles [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [8] 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉. 生物地球化学概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
Han X G, Li L H, Huang J H. An introduction to biogeochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [9] Poulter B, Frank D, Ciais P, *et al.* Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle [J]. Nature, 2014, **509** (7502): 600-603.
- [10] Larreguy C, Carrera A L, Bertiller M B. Reductions of plant cover induced by sheep grazing change the above-belowground partition and chemistry of organic C stocks in arid rangelands of Patagonian Monte, Argentina [J]. Journal of Environmental Management, 2017, **199**: 139-147.
- [11] Zhou G Y, Zhou X H, He Y H, *et al.* Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, **23** (3): 1167-1179.
- [12] Kotzé E, Sandhage-Hofmann A, Amelung W, *et al.* Soil microbial communities in different rangeland management systems of a sandy savanna and clayey grassland ecosystem, South Africa [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, **107** (2): 227-245.
- [13] Guo N, Wang A D, Degen A A, *et al.* Grazing exclusion increases soil CO₂ emission during the growing season in alpine meadows on the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Environment, 2018, **174**: 92-98.
- [14] Zhang H, Yao Z S, Wang K, *et al.* Annual N₂O emissions from conventionally grazed typical alpine grass meadows in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2018, **625**: 885-899.
- [15] Zhu X X, Luo C Y, Wang S P, *et al.* Effects of warming, grazing/cutting and nitrogen fertilization on greenhouse gas fluxes during growing seasons in an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, **214-215**: 506-514.
- [16] Yan R R, Tang H J, Xin X P, *et al.* Grazing intensity and driving factors affect soil nitrous oxide fluxes during the growing seasons in the Hulunber meadow steppe of China [J]. Environmental Research Letters, 2016, **11** (5): 054004.
- [17] Cai Y J, Chang S X, Cheng Y. Greenhouse gas emissions from excreta patches of grazing animals and their mitigation strategies [J]. Earth-Science Reviews, 2017, **171**: 44-57.
- [18] Merbold L, Eugster W, Stieger J, *et al.* Greenhouse gas budget (CO₂, CH₄ and N₂O) of intensively managed grassland following restoration [J]. Global Change Biology, 2014, **20** (6): 1913-1928.

- [19] Jiang L L, Wang S P, Luo C Y, *et al.* Effects of warming and grazing on dissolved organic nitrogen in a Tibetan alpine meadow ecosystem[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **158**: 156-164.
- [20] Zhong L, Zhou X Q, Wang Y F, *et al.* Mixed grazing and clipping is beneficial to ecosystem recovery but may increase potential N₂O emissions in a semi-arid grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **114**: 42-51.
- [21] 赵威, 韦志刚, 郑志远, 等. 1964-2013 年中国北方农牧交错带温度和降水时空演变特征[J]. *高原气象*, 2016, **35**(4): 979-988.
- Zhao W, Wei Z G, Zheng Z Y, *et al.* Surface temperature and precipitation variation of pastoral transitional zone in Northern China during 1964-2013 [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, **35**(4): 979-988.
- [22] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**(6): 703-707.
- [23] Shi H Q, Hou L Y, Yang L Y, *et al.* Effects of grazing on CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in three temperate steppe ecosystems[J]. *Ecosphere*, 2017, **8**(4): e01760.
- [24] Li X L, He H, Yuan W P, *et al.* Response of soil methane uptake to simulated nitrogen deposition and grazing management across three types of steppe in Inner Mongolia, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 799-808.
- [25] 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.
- [26] Zhao Y, Peth S, Reszkowska A, *et al.* Response of soil moisture and temperature to grazing intensity in a *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia[J]. *Plant and Soil*, 2011, **340**(1-2): 89-102.
- [27] Zhong L, Du R, Ding K, *et al.* Effects of grazing on N₂O production potential and abundance of nitrifying and denitrifying microbial communities in meadow-steppe grassland in northern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **69**: 1-10.
- [28] Gan L, Peng X, Peth S, *et al.* Effects of grazing intensity on soil thermal properties and heat flux under *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* vegetation in Inner Mongolia, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **118**: 147-158.
- [29] Zhao H L, Yi X Y, Zhou R L, *et al.* Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy FarmLand, Inner Mongolia[J]. *CATENA*, 2006, **65**(1): 71-79.
- [30] Luo C Y, Xu G P, Wang Y F, *et al.* Effects of grazing and experimental warming on DOC concentrations in the soil solution on the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(12): 2493-2500.
- [31] Lin B, Zhao X R, Zheng Y, *et al.* Effect of grazing intensity on protozoan community, microbial biomass, and enzyme activity in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(12): 2752-2762.
- [32] Zhou X, Yamaguchi Y, Arjasakusuma S. Distinguishing the vegetation dynamics induced by anthropogenic factors using vegetation optical depth and AVHRR NDVI: a cross-border study on the Mongolian Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 730-743.
- [33] Wang K H, McSorley R, Bohlen P, *et al.* Cattle grazing increases microbial biomass and alters soil nematode communities in subtropical pastures [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(7): 1956-1965.
- [34] Holt J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi-arid northeastern Australia [J]. *Applied Soil Ecology*, 1997, **5**(2): 143-149.
- [35] Jiang L L, Wang S P, Zhe P, *et al.* Effects of grazing on the acquisition of nitrogen by plants and microorganisms in an alpine grassland on the Tibetan plateau[J]. *Plant and Soil*, 2017, **416**(1-2): 297-308.
- [36] Rui Y C, Wang S P, Xu Z H, *et al.* Warming and grazing affect soil labile carbon and nitrogen pools differently in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(6): 903-914.
- [37] Cai Y J, Du Z Y, Yan Y, *et al.* Greater stimulation of greenhouse gas emissions by stored yak urine than urea in an alpine steppe soil from the Qinghai-Tibetan Plateau: a laboratory study[J]. *Grassland Science*, 2017, **63**(3): 196-207.
- [38] 高雪峰, 武春燕, 韩国栋. 放牧对典型草原土壤中几种生态因子影响的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, **24**(4): 130-133.
- Gao X F, Wu C Y, Han G D. Effect of grazing on several ecological factors of the soil in typical Steppe [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, **24**(4): 130-133.
- [39] Xu X F, Tian H Q, Hui D F. Convergence in the relationship of CO₂ and N₂O exchanges between soil and atmosphere within terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(7): 1651-1660.
- [40] Dong Y S, Qi Y C, Liu J Y, *et al.* Variation characteristics of soil respiration fluxes in four types of grassland communities under different precipitation intensity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(6): 583-591.
- [41] Hörtnagl L, Barthel M, Buchmann N, *et al.* Greenhouse gas fluxes over managed grasslands in Central Europe [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(5): 1843-1872.
- [42] Zhong L, Bowatte S, Newton P C, *et al.* An increased ratio of fungi to bacteria indicates greater potential for N₂O production in a grazed grassland exposed to elevated CO₂ [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **254**: 111-116.
- [43] Shan Y M, Chen D M, Guan X X, *et al.* Seasonally dependent impacts of grazing on soil nitrogen mineralization and linkages to ecosystem functioning in Inner Mongolia grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(9): 1943-1954.
- [44] Yao Z S, Wolf B, Chen W W, *et al.* Spatial variability of N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes within the Xilin River catchment of Inner Mongolia, China: a soil core study [J]. *Plant and Soil*, 2010, **331**(1-2): 341-359.
- [45] Li Y Y, Dong S K, Liu S L, *et al.* Seasonal changes of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in different types of alpine grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau of China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **80**: 306-314.
- [46] Hu Y G, Chang X F, Lin X W, *et al.* Effects of warming and grazing on N₂O fluxes in an alpine meadow ecosystem on the Tibetan plateau [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(6): 944-952.
- [47] Baligar V C, Fageria N K, Eswaran H, *et al.* Nature and properties of red soils of the world [A]. In: Wilson M J, He Z L, Yang X E (Eds.). *The Red Soils of China: Their Nature,*

- Management and Utilization[M]. Dordrecht: Springer, 2004. 7-27.
- [48] Zhang L H, Hou L Y, Guo D F, *et al.* Interactive impacts of nitrogen input and water amendment on growing season fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O in a semiarid grassland, Northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 523-534.
- [49] Martikainen P J, Nykänen H, Crill P, *et al.* Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands[J]. *Nature*, 1993, **366**(6450): 51-53.
- [50] Boon A, Robinson J S, Chadwick D R, *et al.* Effect of cattle urine addition on the surface emissions and subsurface concentrations of greenhouse gases in a UK peat grassland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **186**: 23-32.
- [51] Horváth L, Grosz B, Machon A, *et al.* Estimation of nitrous oxide emission from Hungarian semi-arid sandy and loess grasslands; effect of soil parameters, grazing, irrigation and use of fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(1-2): 255-263.
- [52] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, **44B**(2): 81-99.
- [53] Firestone M K, Davidson E A. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil[A]. In: Andreae M O, Schimel D S (Eds.). *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* [M]. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1989. 7-21.
- [54] Paz-Ferreiro J, Medina-Roldán E, Ostle N J, *et al.* Grazing increases the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in a temperate grassland [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, **7**(1): 014027.
- [55] Williams E J, Hutchinson G L, Fehsenfeld F C. NO_x and N₂O emissions from soil[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, **6**(4): 351-388.
- [56] Brooks P D, Schmidt S K, Williams M W. Winter production of CO₂ and N₂O from alpine tundra: environmental controls and relationship to inter-system C and N fluxes [J]. *Oecologia*, 1997, **110**(3): 403-413.



CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)