

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响

贺云龙^{1,2}, 齐玉春¹, 彭琴¹, 董云社^{1*}, 郭树芳^{1,2}, 闫钟清^{1,2}, 李兆林^{1,2}, 王丽芹^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用野外原位小区控制试验, 模拟研究了降水变化下草地生态系统土壤呼吸对外源碳和氮输入的响应. 在 2014 年, 以内蒙古锡林河流域温带典型草原为研究对象, 测定了增加降水处理 (CK)、增加降水配施氮肥处理 [CN, $2.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]、增加降水配施碳源处理 [CG, $24 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 和增加降水配施氮肥和碳源处理 [CNG, $2.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1} + 24 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 下土壤呼吸的变化, 并分析了土壤呼吸与土壤温度、土壤水分、土壤可溶性有机碳 (DOC)、土壤微生物量碳 (MBC) 之间的关系. 结果表明, 在自然降水较多的第一次增加降水 (FWE) 阶段, CG 处理和 CNG 处理 168 h 土壤 CO_2 累积通量显著增加, 而 CN 处理 168 h 土壤 CO_2 累积通量无显著变化, 并且 CG 处理和 CNG 处理土壤 MBC 含量显著高于 CK 处理和 CN 处理, 同时, 该阶段平均 CO_2 释放速率与土壤 MBC 含量正相关 ($P < 0.05$). 与 FWE 阶段相比, 无自然降水的第二次增加降水 (SWE) 阶段各处理 168 h 土壤 CO_2 累积释放量显著降低, 并且各处理 MBC 含量也显著降低 ($P < 0.05$), 仅有土壤 DOC 含量显著增加 ($P < 0.05$), CG 处理和 CN 处理 168 h 土壤 CO_2 累积通量显著降低 ($P < 0.05$). 两个降水阶段土壤呼吸速率与土壤温度或土壤体积含水量均有显著的正相关性 ($P < 0.05$). 因此, 自然降水的分布对土壤水分的影响调控着外源氮和碳对半干旱草地生态系统土壤呼吸的作用效应.

关键词: 氮沉降; 外源碳; 增加降水; 土壤碳排放; 微生物

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1934-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707245

Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern

HE Yun-long^{1,2}, QI Yu-chun¹, PENG Qin¹, DONG Yun-she^{1*}, GUO Shu-fang^{1,2}, YAN Zhong-qing^{1,2}, LI Zhao-lin^{1,2}, WANG Li-qin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The responses of soil respiration to exogenous carbon (C) and nitrogen (N) inputs under changing precipitation patterns were explored via in-situ field experiments. In 2014, a typical temperate grassland on the Xilin River of Inner Mongolia was taken as the research site, and soil respiration was measured in the following treatments: addition of water alone (CK), addition of water + N fertilizer [CN, $2.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], addition of water + labile C [CG, $24 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], and addition of water + N fertilizer + labile C [CNG, $2.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1} + 24 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], and the correlations of soil respiration with soil temperature, soil moisture, soil dissolved organic C (DOC), and soil microbial biomass C (MBC) were analyzed. During the first water application event (FWE) with the frequency of natural precipitation, cumulative CO_2 efflux over 168 hours significantly increased in the CG and CNG treatments, whereas there was no such change in the CN treatment. In addition, soil MBC contents in the CG and CNG treatments were significantly higher than that in the CK and CN treatments, and the correlation of average soil respiration rate with soil MBC content among these treatments was positively significant ($P < 0.05$). In contrast with during the FWE, cumulative CO_2 efflux over 168 hours and soil MBC content significantly decreased during the second water application event (SWE) with no natural precipitation ($P < 0.05$), whereas soil DOC content significantly increased ($P < 0.05$). The cumulative CO_2 efflux over 168 hours significantly decreases in the CN and CG treatments ($P < 0.05$). During both the water application events, soil respiration rate had a positive relationship with soil temperature and soil volume water content ($P < 0.05$). Therefore, it is proposed that the distribution of natural precipitation influences soil water content, which controls the effects of exogenous C and N on soil respiration in semiarid grassland ecosystems.

Key words: nitrogen deposition; exogenous carbon; increased precipitation; soil CO_2 emission; soil microbes

土壤呼吸作为土壤和大气之间第二大碳通量, 其对大气 CO_2 浓度的变化具有着重要的影响^[1]. 全球变暖引起的大气水循环的加速, 将导致全球大部分地区面临着降雨模式的变化^[2]. 然而在干旱和半干旱生态系统, 偶然的降水常会导致干旱土壤 CO_2

收稿日期: 2017-07-28; 修订日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41330528, 41673086, 41573131, 41203054)

作者简介: 贺云龙 (1988 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为草地生态系统碳循环过程, E-mail: heyl.13b@igsnrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: dongys@igsnrr.ac.cn

释放量迅速地增加^[3]。降水引起土壤 CO₂ 释放量高低不仅取决于土壤水分因子的调控,而且也主要取决于土壤碳和氮可利用能力的调控^[4,5]。在美国干旱和半干旱地区的研究中发现,增加降水会促进植物的光合作用和植物地上净初级生产力的增加^[6,7],这些碳循环关键过程的变化紧密关系着土壤碳可利用性。同时,由人类活动所导致的大气氮沉降速率的增加,不但直接影响着土壤氮的可利用性,而且间接地通过对植物生长^[8]、凋落物^[9]的影响调控着土壤碳和氮的可利用性。因此,土壤碳和氮可利用性变化对降水变化下土壤呼吸的影响,将极大地关系着未来调控和减缓大气 CO₂ 浓度增加的应对策略。

氮元素是干旱和半干旱生态系统中植物和微生物生长的重要限制因素^[6,10]。然而自工业化石燃料和农业化肥的大量使用以来,已经导致大气中大量的活性氮素进入生物圈^[11],而且预计至本世纪末,大气氮沉降速率将增加 2.5 倍左右^[12]。活性氮素大量的输入生态系统,虽然促进了植物地上部净初级生产力的增加^[10],但由于生物固氮能力的限制,也可能导致土壤活性氮素的累积^[13]。已报道的研究表明,大量氮肥的添加会导致微生物受到土壤碳可利用性的限制,并且还会引起土壤酸化,进而造成土壤微生物生物量和微生物活性的降低^[14,15]。其次,相关研究还发现,由于氮肥的添加,土壤微生物量的降低抵消了根系呼吸的增加,进而导致氮肥对土壤呼吸作用效应的不显著^[16,17]。同样地,在有关氮沉降和增加降水的模拟试验报道中也有研究发现,相比单因素增加降水处理,氮肥和降水共同增加的处理对土壤呼吸速率的影响也不显著^[16,18,19]。虽然有研究认为这种现象可能主要归因于增加降水促进了土壤有机质的矿化^[5,18],弥补了微生物对活性氮和易利用碳源的需求,但当前该影响机制缺乏进一步的深入探索。

土壤作为微生物获得自身生长所需碳源的最重要和最直接的来源,土壤碳可利用性直接影响着微生物的活性和生长^[20,21]。有关降水引起土壤呼吸激发效应的研究发现,土壤 CO₂ 的释放幅度大小与降水量的大小无关,而主要取决于土壤碳可利用性对微生物活性的限制^[19,22]。Jenerette 等^[23]的研究认为,土壤碳可利用性对微生物活性的限制影响着降水引起的土壤呼吸脉冲效应,因为添加葡萄糖的降水处理产生的土壤呼吸脉冲效应显著高于单因素添加降水处理。另外,部分室内培养试验研究还发

现,碳源可利用性调控着土壤呼吸对氮肥响应,因为葡萄糖和氮肥共施处理的土壤呼吸速率显著高于单因素施氮肥处理^[24,25]。然而降水模式和持续增加的氮沉降都潜在地影响着土壤碳源可利用性,那么,土壤碳源可利用性变化是否调控着土壤呼吸对氮肥和降水共同影响下土壤呼吸的响应?目前,相关研究则鲜见报道。

草地在我国的北部有着广泛的分布,并且大部分处于干旱和半干旱气候区^[26]。在全球变化的背景下,我国学者已经开展了大量的有关模拟降水变化和氮沉降对草地生态系统土壤呼吸影响的研究,但有关碳源可利用性变化对降水变化和氮沉降作用下土壤呼吸影响的相关研究则相对较少。基于此,本研究以内蒙古温带草原为研究对象,自 2014 年利用野外小区控制试验,探讨了短期增加降水的背景下,土壤呼吸对定量的外源氮和碳输入的响应,并对其可能的影响机制进行了初步的分析与探讨,以为全球变化背景下科学合理的管理我国草地生态系统和减缓草地温室效应提供一定的理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域的概况

研究区位于内蒙古高原东部的锡林河流域。该流域地处国际地圈-生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)全球变化研究典型中国东北陆地样带(Northeast China Transect, NECT)之内,也是中国温带草原以及欧亚大陆草原典型性代表区域之一^[27,28]。本试验选取了该区域典型草原中羊草草原作为研究对象。本研究小区位于北纬 43°33′51.3″,东经 116°40′44.1″,海拔大约 1 225 m,建群种为根茎禾草羊草(*Leymus chinensis*),优势种为大针茅(*Stipa grandis*)和冰草(*Agropyron michnoi*)等密丛禾草。土壤类型为暗栗钙土或典型栗钙土,气候属于大陆性半干旱气候,年降水量 350 ~ 450 mm,年平均气温 -0.3 ~ 1℃,≥10℃积温 1 800 ~ 2 000℃,土层深度为 100 ~ 150 m,土壤有机层厚达 20 ~ 30 cm。草原植被约 4 月底返青,10 月初枯黄,生长期约 150 d 左右。该样地于 2014 年围封,围封之前一直作为打草场,无任何人为施氮和增加降水的影响^[28]。

1.2 试验设计

2014 年生长季初,在已选定的羊草草原区域中地势较平坦和植物群落、盖度均匀的地块进行控制小区的试验布置。该控制小区以监测外源碳、氮沉

降和降水作用下土壤呼吸的长期和短期的变化为主要目的。试验样地面积为 $125\text{ m} \times 94\text{ m}$, 中心区域面积为 $116\text{ m} \times 71\text{ m}$, 中心小区边缘与围栏网四周均预留有 4.5 m 的缓冲区域。每个处理小区面积为 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$, 两个相邻小区间设有 1 m 宽的缓冲隔离带。本研究中共包括仅增加降水处理(CK)、增加降水配施氮肥处理(CN)、增加降水配施碳源处理(CG)以及增加降水配施氮肥和碳源处理(CNG), 每个处理3个重复。基于对近50年来中国降水变化的趋势分析, 未来30年中国北部地区年内降水将呈增加的趋势^[29]。本研究模拟的增加降水量为年内自然降水+多年年内平均降水量的15% (51.7 mm), 增加的降水量主要分布在6~9月期间, 并以人工模拟自然降水方式进行的喷洒; 每次增加降水量以模拟5~10 mm 常见降水进行添加, 该范围的降水量的增加可以明显地激发土壤呼吸的激发效应^[30]。根据当前中国北方地区氮沉降速率平均为 $2.3\text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 水平^[31], 模拟的氮沉降速率为 $2.5\text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 添加氮肥是以 NH_4^+ 和 NO_3^- 为主要成分的复合肥, 分别在6月末和7月末各添加一次, 同时施氮与增加降水在同一天进行。本研究中外源碳源的输入量以当地土壤微生物量碳含量均值为参考, 即 $48\text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 以便添加的碳源量足以引起土壤呼吸的变化^[32], 以葡萄糖作为外源输入的碳源, 开始施氮和增加降水后2~4 d左右开始添加葡萄糖, 如果遇到自然降雨, 延后1~2 d再进行添加以避免降水引起土壤呼吸的峰值期, 每次葡萄糖的施入量为总添加量的四分之一。添加的氮肥和葡萄糖均为极细小粉末, 通过人工施撒的方式, 均匀地撒到相应的处理样地, 并且施肥时避开大风天气, 以避免影响氮肥和葡萄糖的效应和对相邻处理小区的干扰。本文主要研究了6月末首次添加氮肥后, 6月末360 L(6 mm)和7月中旬620 L(10 mm)两次增加降水事件后, 葡萄糖和氮肥输入对土壤呼吸的影响, 两次增加降水事件分别命名为 FWE 和 SWE 阶段。

1.3 气体样品测定方法

气体采集时间为每次添加葡萄糖后的第3、6、24、72、120和168 h, 以添加葡萄糖之前当天09:00~11:00时取样为0 h。本次试验采用静态暗箱法采集。静态暗箱的长×宽×高尺寸为 $50\text{ cm} \times 42\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, 采用不锈钢板材制作, 并在箱体的外表面粘贴白色隔热保温板, 以避免太阳直接照射导致箱内温度的迅速增加。同时, 静态暗箱内安装风扇, 进

行箱内空气的扰动; 并且顶部安装PVC材质塑料管并连接三通阀, 以联通注射器进行取气。每次气体采样在上午09:00~11:00之间进行。每个处理小区放置不锈钢板材制作的凹槽($50\text{ cm} \times 42\text{ cm} \times 10\text{ cm}$), 取气前1 d在气体开始采集时, 将采样箱放置于凹槽内, 并用去离子水进行密封。其中, 凹槽嵌入土壤5 cm。采气时间持续21 min, 每隔7 min采样一次, 将所采气体用气袋储存, 并带回实验室利用LI-COR6252型 CO_2 红外线分析仪直接测定。气体通量的计算公式:

$$F = \frac{V}{A} \times \frac{P}{RT} \times \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

式中, F 代表 t 时刻气体通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; V 为观测箱的容积, m^3 ; A 为观测时包围的土壤面积, m^2 ; P 为箱内气压, Pa; T 为箱内气温, K; R 为气体常数, $8.314\text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; $\Delta m/\Delta t$ 是气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率, 计算公式推导过程详见文献[16]。

同时, 同步采集大气温度, 0、5、10 cm 地温、箱内温度和土壤0~10 cm 含水的体积分数。地温利用SN2022型便携式数字温度计测定; 土壤含水的体积分数量采用TDR300结合7.6 cm 探针进行测定。观测期间自然降水和气温数据均来源于控制小区附近中国科学院植物所内蒙古草原生态系统定位站实时监测。

1.4 土壤样品采集和分析方法

在添加葡萄糖后168 h, 利用土钻进行采集土壤样品, 并与气体采集同时进行, 采集深度为0~10 cm, 每个小区采集3个重复。然后同一个处理小区所采集的土壤样品混合成一个土壤样品, 人工去除较大的植物根系, 并通过直径 $<2\text{ mm}$ 筛子, 将土壤样品分成两部分。一部分新鲜土样采用4℃冰箱保存, 测定土壤可溶性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC); 另一部分直接进行土壤含水量的测定。土壤含水量测定采用烘干法, 在105℃烘箱中烘干24 h至恒重后, 进行称重; 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取法结合TOC分析仪测定; DOC采用去离子水浸提, 并通过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜, 然后利用TOC分析仪测定(Vario TOC Cube, Elementar, Germany)。

1.5 数据统计与分析

利用线性内插法计算168 h土壤 CO_2 累积通量, 其随时间变化的斜率作为168 h土壤 CO_2 平均释放速率(线性回归系数 $R^2 > 0.99$)。所有数据在

方差分析之前, 分别进行正态分布 (Kolmogorov-Smirnov test) 和方差齐性 (Levene's test) 检验. 采用线性混合模型检验氮肥和葡萄糖对土壤 CO_2 释放速率的固定效应. 相同阶段不同处理和相同处理不同阶段的所有测定指标采用最小显著性差异法 (least significant difference, LSD) 进行多重比较, 并且土壤呼吸与其它指标之间相关性利用 Pearson's 进行分析. 所有的数据统计采用 Spss19.0 进行分析. 图和表分别采用 Origin 2017 和 Excel 2007 进行编辑.

2 结果与分析

2.1 土壤环境因素

两次增加降水期间气温、降雨、土壤 10 cm 层地温和土壤 0 ~ 10 cm 层含水量如图 1 所示. 第一次增加降水阶段 (FWE) 自然降水相对丰富, 降水累积总量为 24.4 mm, 而第二次增加降水阶段 (SWE) 无自然降水. 两个阶段气温、土壤 10 cm 层地温和

土壤 0 ~ 10 cm 层含水量平均值分别为 $(16.88 \pm 2.60)^\circ\text{C}$ 、 $(22.44 \pm 4.43)^\circ\text{C}$ 、 $(37.43 \pm 2.82)\%$ 和 $(22.49 \pm 2.48)^\circ\text{C}$ 、 $(23.85 \pm 3.02)^\circ\text{C}$ 和 $(28.50 \pm 5.99)\%$, 其中由于仪器故障 FWE 阶段仅有第 168 h 土壤含水量观测数据.

从两次降水阶段土壤 DOC 含量变化上分析, 施氮处理 (CN) 土壤 DOC 含量显著降低 ($P < 0.05$), 施葡萄糖处理 (CG) 不同阶段土壤 DOC 含量的变化是不同的 (图 2). 相比对照 (CK) 处理, CG 处理土壤含量在 FWE 阶段显著降低了 21.23% ($P < 0.05$), 而在 SWE 阶段则显著增加 15.87% ($P < 0.05$). SWE 阶段所有处理土壤 DOC 含量显著高于 FWE 阶段 ($P < 0.05$). 相比土壤 DOC 含量变化, FWE 阶段土壤 MBC 含量则显著高于 SWE 阶段 (图 3). 在 FWE 阶段, CN 和 CG 处理相比 CK 处理土壤 MBC 含量分别增加了 17.60% 和 58.78% ($P < 0.05$). 同时, 在两个增加降水阶段, CNG 处理土壤 MBC 含量显著高于 CN 处理 ($P < 0.05$).

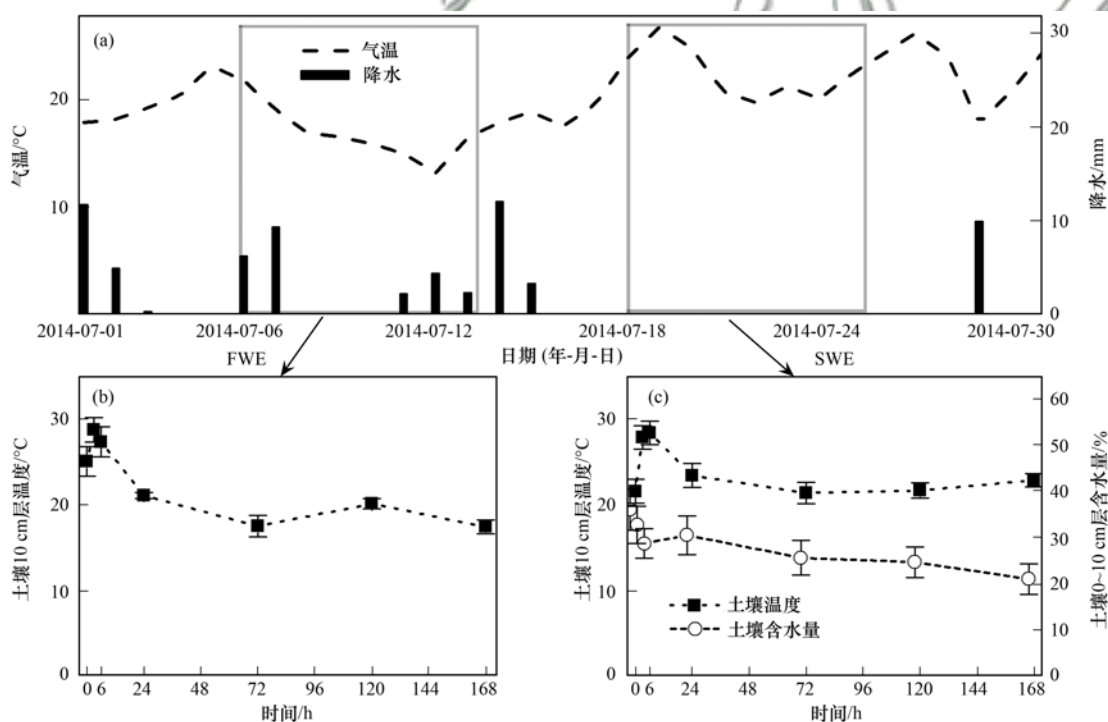


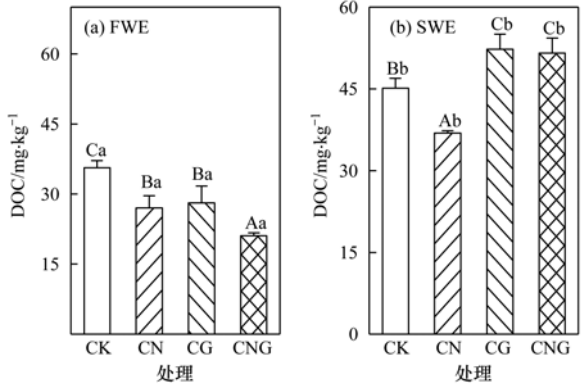
图 1 两次增雨事件期间 (FWE 和 SWE) 气温、降水、土壤 10 cm 温度和土壤 0 ~ 10 cm 层含水量变化

Fig. 1 Variations in air temperature, precipitation, soil temperature, and soil moisture with time during the two increased precipitation events (FWE and SWE)

2.2 土壤呼吸变化

图 4 所示为两个增加降水阶段土壤 CO_2 累积释放量的变化. FWE 阶段 168 h 土壤 CO_2 累积释放量显著高于 SWE 阶段 ($P < 0.05$). 在 FWE 阶段, CG 处理 168 h 土壤 CO_2 累积释放量分别为 $(19.21$

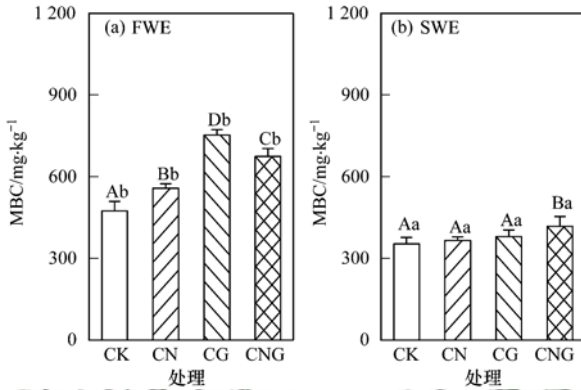
$\pm 0.36) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 相比 CK 处理 $[(18.14 \pm 0.63) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}]$ 显著增加 5.93% [$P < 0.05$, 图 4(a)], CN 处理 168 h 土壤 CO_2 累积释放量较 CK 处理无显著变化 ($P < 0.05$); 在 SWE 阶段, CN、CG 和 CNG 处理 168 h 土壤 CO_2 累积释放量相比 CK 处理差异性



大写字母代表相同增加降水事件不同处理之间的差异；
小写字母代表相同处理不同降水事件之间的差异

图2 两次增雨事件期间(FWE和SWE)168 h土壤可溶性有机碳(DOC)含量变化

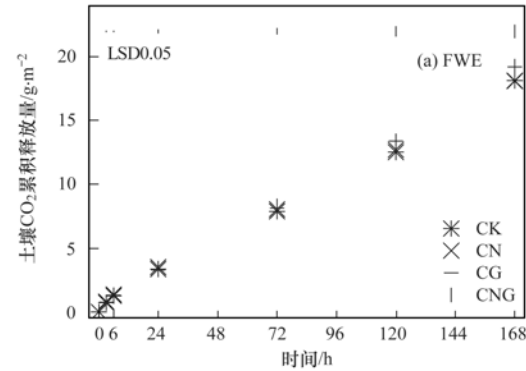
Fig. 2 Soil dissolved organic carbon (DOC) contents at 168 hours during the two increased precipitation events (FWE and SWE)



大写字母代表相同增加降水事件不同处理之间的差异；
小写字母代表相同处理不同降水事件之间的差异

图3 两次增雨事件期间(FWE和SWE)168 h土壤微生物量碳(MBC)含量变化

Fig. 3 Soil microbial biomass carbon (MBC) contents at 168 hours during the two increased precipitation events (FWE and SWE)



显著[$P < 0.05$, 图 4(b)], 分别降低了 11.46%、11.63% 和 16.12%。两次增雨阶段各处理对土壤 CO_2 平均释放速率的影响与其对 168 h 土壤 CO_2 累积释放量的影响一致(表 1), 然而 CN、CG 和 CNG 处理对土壤 CO_2 释放速率均没有显著的影响($P < 0.05$, 表 2)。

表1 两次增雨事件期间(FWE和SWE)土壤 CO_2 平均释放速率¹⁾

Table 1 Average rate of CO_2 release during the two increased precipitation events (FWE and SWE)		
处理	FWE	SWE
CK	$104.00 \pm 3.72\text{Ab}$	$84.65 \pm 1.73\text{Ba}$
CN	$103.85 \pm 1.70\text{Ab}$	$74.69 \pm 2.48\text{Aa}$
CG	$110.78 \pm 2.46\text{Bb}$	$74.50 \pm 2.00\text{Aa}$
CNG	$110.87 \pm 4.27\text{Bb}$	$70.55 \pm 3.92\text{Aa}$

1) 大写字母代表相同增加降水阶段不同处理之间的差异；小写字母代表相同处理不同降水阶段之间的差异

表2 两次增雨事件期间(FWE和SWE)土壤呼吸释放速率方差分析结果

Table 2 Repeated measures of the analysis of variance of soil respiration rates during the two increased precipitation events (FWE and SWE)			
项目	土壤呼吸速率		
	自由度(df)	F 检验	P
取样时间	12	104.032	0.000
氮肥	1	0.771	0.396
葡萄糖	1	1.375	0.262
取样时间 × 氮肥	12	1.244	0.350
取样时间 × 葡萄糖	12	2.040	0.106
氮肥 × 葡萄糖	1	0.008	0.929
取样时间 × 氮肥 × 葡萄糖	24	3.407	0.000

2.3 土壤呼吸与土壤环境因素的关系

土壤温度和土壤水分与土壤 CO_2 释放速率具有显著的正相关性($P < 0.05$), 见表 3. 在 FWE 阶段, 土壤温度变化可解释 FWE 阶段和 SWE 阶段土

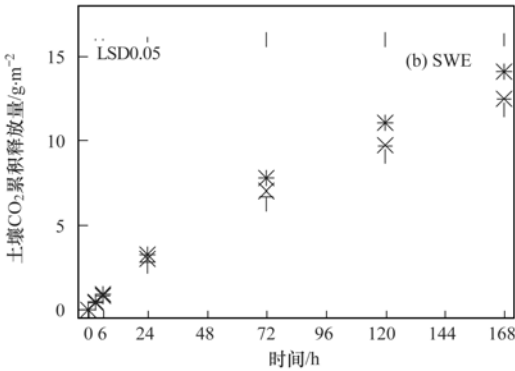


图4 两次增雨事件期间(FWE和SWE)土壤 CO_2 累积释放量随时间的变化

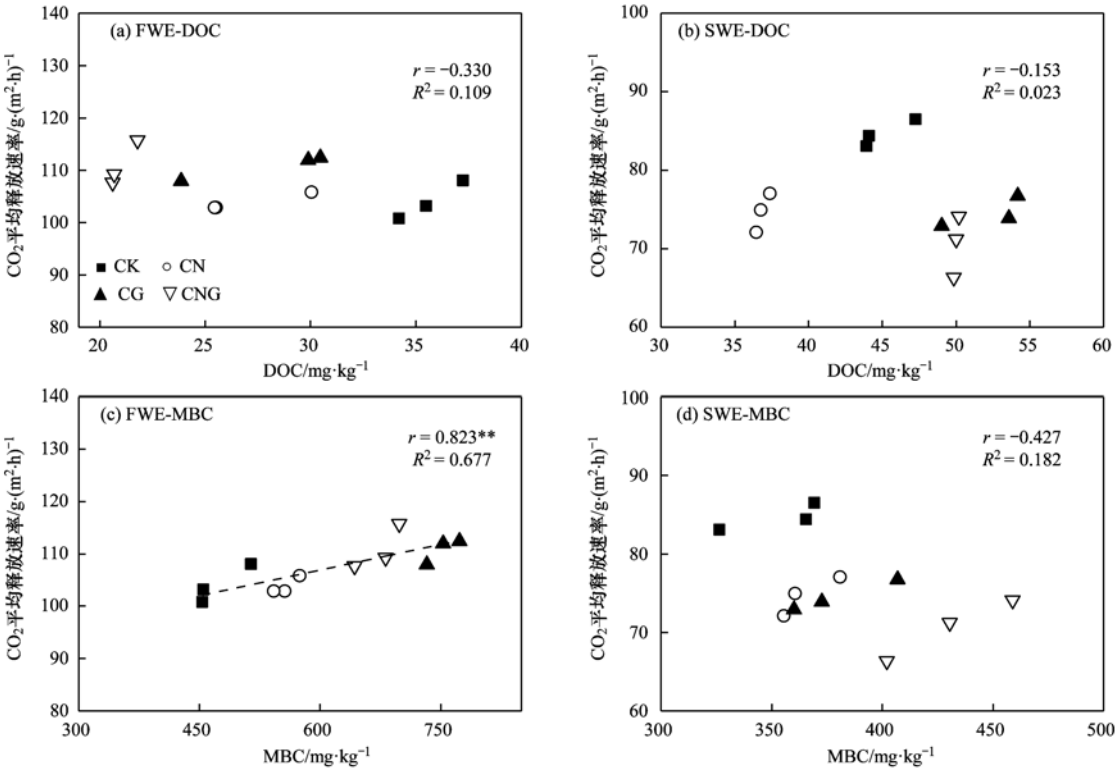
Fig. 4 Variations in cumulative CO_2 with time during the two increased precipitation events (FWE and SWE)

壤 CO₂ 释放速率动态变化 26.0% ~ 37.2% 和 27.1% ~ 52.9%，而土壤水分变化可解释 SWE 阶段土壤 CO₂ 释放速率动态变化 35.7% ~ 57.7%。在 FWE 和 SWE 两个阶段，各处理土壤 DOC 含量与 168 h 土壤 CO₂ 累积释放量变化不具有显著的相关关系[图 5(a) 和 5(b)] ($P < 0.05$)；各处理土壤 MBC 含量仅在 FWE 阶段可解释所有处理 168 h 土壤 CO₂ 累积释放量变化 67.7% [图 5(c)]。

表 3 两次增雨事件期间(FWE 和 SWE) 土壤 CO₂ 释放速率与土壤地温 ($T_{-10\text{ cm}}$) 和土壤水分 ($V_{0-10\text{ cm}}$) 的相关关系¹⁾
Table 3 Correlations between the rate of soil CO₂ release and soil temperature ($T_{-10\text{ cm}}$) and soil moisture ($V_{0-10\text{ cm}}$) during the two increased precipitation events (FWE and SWE)

处理	FWE				SWE			
	$T_{-10\text{ cm}}$		$V_{0-10\text{ cm}}$		$T_{-10\text{ cm}}$		$V_{0-10\text{ cm}}$	
	r	R^2	r	R^2	r	R^2	r	R^2
CK	0.594 **	0.353	—	—	0.636 **	0.405	0.668 ***	0.446
CN	0.595 **	0.354	—	—	0.608 **	0.370	0.718 ***	0.515
CG	0.610 **	0.372	—	—	0.728 ***	0.529	0.597 **	0.357
CNG	0.510 *	0.260	—	—	0.521 *	0.271	0.760 ***	0.577

1) r 表示 Pearsons 相关系数; R^2 表示线性回归拟合优度; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$; “—”表示文章中没有相关数据



r 表示 Pearson's 相关系数; R^2 表示线性回归拟合优度; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$

图 5 两次增雨事件期间(FWE 和 SWE) 土壤 CO₂ 平均释放速率与土壤 DOC 含量和土壤 MBC 含量相关关系

Fig. 5 Correlations between the average rates of CO₂ release and soil DOC or MBC contents during the two increased precipitation events (FWE and SWE)

3 讨论

3.1 外源碳和氮输入对降水变化下土壤 DOC 含量的影响

微生物转化和分解土壤有机质的过程是产生土壤 DOC 主要来源之一。降水会引起干旱土壤经历干湿交替过程，会促进土壤团聚体包裹有机质和微

生物细胞溶质的释放，进而提高微生物的活性^[33~35]。Sun 等^[36]对我国温带草地研究和 Su 等^[18]对我国温带沙漠研究均表明，相比单因素增加降水，降水和氮素共施处理对土壤 DOC 含量没有显著的影响。Su 等认为^[18]，主要归因于施氮对微生物活性的抑制。本研究表明，施氮肥显著降低了土壤 DOC 含量。这种结果有两种可能的解释：一

是本研究施氮量几乎等同于当前大气的氮沉降量,并且施氮年限低于上述具有 2~3 a 施氮历史的两个研究,所以土壤 DOC 作为微生物易于利用的有机碳^[37],低水平氮肥的输入可能促进了微生物转化易利用碳源作为自身生长所需的基质;二是在 FWE 阶段自然降水较多导致表层土壤 DOC 的淋溶,加之,氮肥添加会促进土壤 DOC 的解吸^[37],加剧 DOC 淋溶,以致于 SWE 阶段施氮肥下土壤 DOC 含量也显著低于对照.微生物对土壤 DOC 的转化和利用以及土壤 DOC 淋溶可能也导致了施葡萄糖下 FWE 阶段土壤 DOC 含量显著降低.本研究表明,无自然降水的 SWE 阶段各处理 DOC 含量显著高于自然降水较多的 FWE 阶段.主要原因是土壤水分的限制造成土壤 DOC 通量降低^[21,33].另外,本研究还发现,SWE 阶段施葡萄糖处理显著增加了土壤 DOC 含量.该结果与路文涛等^[38]对旱区农田生态系统秸秆还田对土壤 DOC 含量影响的研究结果一致.由此可见,在自然降水分布不均匀条件下,土壤水分的限制会降低微生物对土壤碳源利用能力.

3.2 外源碳和氮输入对降水变化下土壤 MBC 含量的影响

在土壤 DOC 讨论部分中已经提到降水会促进土壤微生物活性的增加.本研究表明,自然降水较多的 FWE 阶段 MBC 含量显著高于无自然降水 SWE 阶段.主要因为相对较低的土壤水分含量会导致抗性不强的微生物的大量死亡^[39].一般来说,大量氮肥的施入导致土壤中活性氮过量的累积,会降低微生物量和抑制微生物的活性^[15].Sun 等^[36]研究了 5、10 和 20 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 这 3 个施氮肥梯度和降水作用下草地微生物量变化表明,施氮对降水作用下土壤微生物总 PLFA 量无影响.Huang 等^[40]对降水和氮素作用下温带沙漠的研究也表明,相比单因素降水处理,降水和氮 $[5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 共施处理对土壤 MBC 含量变化无影响.本研究表明,添加氮肥促进了 FWE 阶段土壤 MBC 含量增加.该结果源于如下原因:①本研究的施氮量较低,因而施氮对微生物的抑制效应不明显;②FWE 阶段较频繁的自然降水增加了土壤干湿交替次数,促进了可利用有机碳的释放,可能缓解了微生物对碳的需求^[18].本研究还表明,葡萄糖的添加促进了微生物量的显著增加,这与先前室内培养试验^[23,41]和农田生态系统中秸秆还田^[42]的研究结果一致.

3.3 外源碳和氮输入对土壤碳排放的影响

在干旱和半干旱的生态系统,土壤经历降水一

般会产生土壤呼吸的激发效应^[43,44].本研究中,自然降水较多的 FWE 阶段土壤 CO_2 累积释放量显著高于无自然降水的 SWE 阶段,而且所有处理土壤 MBC 含量表现为相似的变化.说明了微生物对外界环境有着敏感的变化,并且微生物呼吸的变化对土壤呼吸有着重要的贡献.同时,在 FWE 阶段,添加葡萄糖的处理促进了土壤 CO_2 累积释放量的显著增加,这与已报道的有关碳源添加试验中的土壤碳排放变化趋势一致^[23,45,46].然而添加氮肥对土壤 CO_2 累积释放量的影响效应不显著,但添加氮肥配施葡萄糖对土壤 CO_2 累积释放量有着显著的促进作用,同样地,添加葡萄糖以及添加氮肥配施葡萄糖处理下土壤 MBC 含量也显著高于添加氮肥处理,并且土壤 MBC 含量可以解释 67.7% 土壤 CO_2 平均速率的变化.本研究结果反映了施氮会扩大微生物对碳的需求,可能会限制微生物的活性.然而在两个增加降水阶段,施氮肥、施葡萄糖以及两者交互作用对土壤 CO_2 释放速率均没有显著的作用,但土壤水分和土壤温度与土壤 CO_2 释放速率具有显著的正相关性,而且在 SWE 的阶段,增加氮肥和葡萄糖的输入显著地降低了土壤 CO_2 累积释放量.由此可以推断,干旱和半干旱生态系统水分因子是土壤呼吸的主要调控因素^[5],并且土壤水分含量的高低调控着外源氮和碳对土壤呼吸的作用效应.

4 结论

(1)施氮肥对土壤 DOC 含量有着显著的抑制作用;施葡萄糖对土壤 DOC 含量作用效应则因降水分布的变化而不同.

(2)施葡萄糖和施氮仅在自然降水较丰富的情况下对土壤 MBC 含量具有显著的促进作用,但是施氮下土壤 MBC 含量显著低于施氮配施葡萄糖下土壤 MBC 含量.

(3)在自然降水相对丰富的阶段,施氮对土壤 CO_2 释放无影响,而添加葡萄糖以及葡萄糖配施氮肥对土壤 CO_2 释放有促进作用;在无自然降水的阶段,施氮或葡萄糖对土壤 CO_2 释放均有抑制作用.

参考文献:

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81-99.
- [2] Dore M H I. Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? [J]. Environment International, 2005, 31(8): 1167-1181.
- [3] Kim D G, Vargas R, Bond-Lamberty B, et al. Effects of soil

- rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research[J]. *Biogeosciences*, 2012, **9**(7): 2459-2483.
- [4] Nielsen U N, Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**(4): 1407-1421.
- [5] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004, **141**(2): 221-235.
- [6] Harpole W S, Potts D L, Suding K N. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(11): 2341-2348.
- [7] Thomey M L, Collins S L, Vargas R, *et al.* Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(4): 1505-1515.
- [8] Guo Q, Hu Z M, Li S G, *et al.* Exogenous N addition enhances the responses of gross primary productivity to individual precipitation events in a temperate grassland [J]. *Scientific Report*, 2016, **6**: 26901.
- [9] Maaroufi N I, Nordin A, Palmqvist K, *et al.* Chronic nitrogen deposition has a minor effect on the quantity and quality of aboveground litter in a Boreal Forest[J]. *PLoS One*, 2016, **11**(8): e0162086.
- [10] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. *Ecology*, 2008, **89**(2): 371-379.
- [11] Schlesinger W H. On the fate of anthropogenic nitrogen[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(1): 203-208.
- [12] Lamarque J F, Kiehl J T, Brasseur G P, *et al.* Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: analysis of nitrogen deposition [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110** (D19): D19303.
- [13] Emmett B. Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems: some recent findings and their implications for our conceptual framework[J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2007, **7** (1-3): 99-109.
- [14] Riggs C E, Hobbie S E. Mechanisms driving the soil organic matter decomposition response to nitrogen enrichment in grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **99**: 54-65.
- [15] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies [J]. *Ecology Letters*, 2008, **11** (10): 1111-1120.
- [16] Qi Y C, Liu X C, Dong Y S, *et al.* Differential responses of short-term soil respiration dynamics to the experimental addition of nitrogen and water in the temperate semi-arid steppe of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(4): 834-845.
- [17] Luo Q P, Gong J R, Zhai Z W, *et al.* The responses of soil respiration to nitrogen addition in a temperate grassland in northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569-570**: 1466-1477.
- [18] Su Y G, Huang G, Lin Y J, *et al.* No synergistic effects of water and nitrogen addition on soil microbial communities and soil respiration in a temperate desert [J]. *CATENA*, 2016, **142**: 126-133.
- [19] Austin A T. Has water limited our imagination for aridland biogeochemistry? [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, **26**(5): 229-235.
- [20] Iovieno P, Bååth E. Effect of drying and rewetting on bacterial growth rates in soil[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2008, **65** (3): 400-407.
- [21] Manzoni S, Taylor P, Richter A, *et al.* Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils [J]. *New Phytologist*, 2012, **196**(1): 79-91.
- [22] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, **13** (2): 426-436.
- [23] Jenerette G D, Chatterjee A. Soil metabolic pulses: water, substrate, and biological regulation[J]. *Ecology*, 2012, **93**(5): 959-966.
- [24] Eberwein J R, Oikawa P Y, Allsman L A, *et al.* Carbon availability regulates soil respiration response to nitrogen and temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 158-164.
- [25] Vourlitis G L, Fernandez J S. Carbon and nitrogen mineralization of semi-arid shrubland soils exposed to chronic nitrogen inputs and pulses of labile carbon and nitrogen [J]. *Journal of Arid Environments*, 2015, **122**: 37-45.
- [26] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [27] 张新时. 草地的生态经济功能及其范式[J]. *科技导报*, 2000, (8): 37-65.
- Zhang X S. Eco-economic functions of the grassland and its patterns [J]. *Science and Technology Review*, 2000, (8): 37-65.
- [28] 齐玉春, 彭琴, 董云社, 等. 不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 625-635.
- Qi Y C, Peng Q, Dong Y S, *et al.* Responses of ecosystem carbon budget to increasing nitrogen deposition in differently degraded *Leymus chinensis* steppes in Inner Mongolia, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 625-635.
- [29] Liu Y X, Li X, Zhang Q, *et al.* Simulation of regional temperature and precipitation in the past 50 years and the next 30 years over China[J]. *Quaternary International*, 2010, **212**(1): 57-63.
- [30] Yan L M, Chen S P, Xia J Y, *et al.* Precipitation regime shift enhanced the rain pulse effect on soil respiration in a semi-arid steppe[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(8): e104217.
- [31] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494** (7438): 459-462.
- [32] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, **45**(2): 115-131.
- [33] Guo X B, Drury C F, Yang X M, *et al.* Water-soluble carbon and the carbon dioxide pulse are regulated by the extent of soil drying and rewetting [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, **78**(4): 1267-1278.
- [34] 贺云龙, 齐玉春, 董云社, 等. 干湿交替下草地生态系统土

- 壤呼吸变化的微生物响应机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(11): 3373-3380.
- He Y L, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Microbial response mechanism for drying and rewetting effect on soil respiration in grassland ecosystem: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(11): 3373-3380.
- [35] Huang G, Li Y, Su Y G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, northwestern China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **83**: 52-56.
- [36] Sun L J, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Interactions of water and nitrogen addition on soil microbial community composition and functional diversity depending on the inter-annual precipitation in a Chinese steppe[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, **14**(4): 788-799.
- [37] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science, 2000, **165**(4): 277-304.
- [38] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(3): 522-528.
- Lu W T, Jia Z K, Zhang P, *et al.* Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(3): 522-528.
- [39] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, *et al.* Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(9): 2281-2289.
- [40] Huang G, Li Y, Su Y G. Divergent responses of soil microbial communities to water and nitrogen addition in a temperate desert [J]. Geoderma, 2015, **251-252**: 55-64.
- [41] Blagodatskaya E V, Blagodatsky S A, Anderson T H, *et al.* Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies[J]. Applied Soil Ecology, 2007, **37**(1-2): 95-105.
- [42] 庞荔丹, 孟婷婷, 张宇飞, 等. 玉米秸秆配氮还田对土壤酶活性、微生物量碳含量及土壤呼吸量的影响[J]. 作物杂志, 2017, (1): 107-112.
- Pang L D, Meng T T, Zhang Y F, *et al.* Effects of maize straw returning with nitrogen fertilizer on soil enzyme activity, microbial biomass carbon content and respiration[J]. Crops, 2017, (1): 107-112.
- [43] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, *et al.* Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation [J]. Global Change Biology, 2011, **17**(2): 927-942.
- [44] Shen Z X, Li Y L, Fu G. Response of soil respiration to short-term experimental warming and precipitation pulses over the growing season in an alpine meadow on the Northern Tibet[J]. Applied Soil Ecology, 2015, **90**: 35-40.
- [45] Qiao N, Schaefer D, Blagodatskaya E, *et al.* Labile carbon retention compensates for CO₂ released by priming in forest soils [J]. Global Change Biology, 2014, **20**(6): 1943-1954.
- [46] 吴浩浩, 徐星凯, 段存涛, 等. 植被类型、湿度和氮素供给对外源碳刺激森林土壤异养呼吸和微生物碳量的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, **45**(6): 820-830.
- Wu H H, Xu X K, Duan C T, *et al.* Effect of vegetation type, wetting intensity, and nitrogen supply on external carbon stimulated heterotrophic respiration and microbial biomass carbon in forest soils[J]. Science China Earth Sciences, 2015, **58**(8): 1446-1456.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinge'er-Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajihu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)