

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, 郑淑容, 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, 朱耕, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (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)	

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^{1,2}, 陈书涛^{1,2*}, 孙鹭^{1,2}, 胡正华²

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 为研究降水量减少对旱作农田土壤呼吸的影响, 设置大豆-冬小麦轮作田间试验. 采用随机区组试验, 在田间设置对照(CK)、降水量减少 20% (P20%)、降水量减少 40% (P40%) 处理, 观测了 3 个处理土壤呼吸、土壤温度、土壤湿度的季节动态变化, 并观测土壤 CO₂ 产生速率、硝化速率、反硝化速率、收获时的作物生物量. 结果表明, 在大豆生长季, CK、P20%、P40% 这 3 个处理的季节平均土壤呼吸速率分别为 (4.91 ± 0.67)、(4.19 ± 0.39)、(4.35 ± 0.32) μmol·(m²·s)⁻¹, 处理间差异未达到显著水平 ($P > 0.05$); 在冬小麦生长季, 这 3 个处理的季节平均土壤呼吸速率分别为 (2.39 ± 0.17)、(2.03 ± 0.02)、(1.94 ± 0.05) μmol·(m²·s)⁻¹, 表现为 CK > P20% > P40%, 处理间差异达到显著水平 ($P > 0.05$). 降水量减少降低了土壤 CO₂ 产生速率, 但对土壤硝化速率和反硝化速率的影响不明显. 降水量减少对大豆根、茎叶、籽粒生物量无显著 ($P > 0.05$) 影响, 但显著 ($P < 0.05$) 降低了冬小麦的根、茎叶、籽粒生物量. 土壤温度是影响土壤呼吸季节变异的主要因素, 两者间呈指数回归关系, 不同处理间的温度敏感系数 (Q_{10}) 无显著 ($P > 0.05$) 差异.

关键词: 降水量减少; 农田; 土壤呼吸; 作物生物量; 温度

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1943-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709009

Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland

WANG Zhao-hui^{1,2}, CHEN Shu-tao^{1,2*}, SUN Lu^{1,2}, HU Zheng-hua²

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To investigate the effects of precipitation reduction on soil respiration in rainfed croplands, a field experiment was performed in a soybean-winter wheat cropland. A randomized block design including three treatments, viz. control (CK), 20% precipitation reduction (P20%), and 40% precipitation reduction (P40%), was used. Seasonal variabilities in soil respiration, soil temperature, and soil moisture were measured. Rates of soil CO₂ production, nitrification and denitrification, and harvested crop biomass were also measured. Results indicated that the seasonal mean soil respiration rates for CK, P20%, and P40% treatments in the soybean growing season were (4.91 ± 0.67), (4.19 ± 0.39), and (4.35 ± 0.32) μmol·(m²·s)⁻¹, respectively. There was no significant difference ($P > 0.05$) in the mean soil respiration rates between treatments during the soybean growing season. The seasonal mean soil respiration rates for CK, P20%, and P40% treatments during the winter wheat growing season were (2.39 ± 0.17), (2.03 ± 0.02), and (1.94 ± 0.05) μmol·(m²·s)⁻¹, respectively. There was a significant ($P < 0.05$) difference in the mean soil respiration rates between treatments during the winter wheat growing season. Precipitation reduction decreased the soil CO₂ production rates, but had no obvious impacts on soil nitrification and denitrification rates. Precipitation reduction had no significant ($P > 0.05$) effects on the root, shoot, and seed biomass of soybean, but significantly ($P < 0.05$) decreased the root, shoot, and seed biomass of winter wheat. Soil temperature was the main driver of the seasonal variation in soil respiration. Soil respiration increased exponentially with the increase in soil temperature. There was no significant ($P > 0.05$) difference in the coefficient of temperature sensitivity (Q_{10}) between different treatments. Based on the precipitation reduction experiments of duration longer than one year in previous studies and in our present study, a significant linear regression relationship between the amount of reduced soil respiration and the amount of precipitation reduction was found, indicating that substantial precipitation reduction showed more obvious inhibition effects on soil respiration. This study also suggested that the effects of precipitation reduction on soil respiration varied between crop growing seasons, which may be attributed to the different precipitation intensities in different growing seasons.

Key words: precipitation reduction; cropland; soil respiration; crop biomass; temperature

收稿日期: 2017-09-01; 修订日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775151, 41775152); 江苏省“六大人才高峰”项目(2015-NY-012)

作者简介: 王朝辉(1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳氮循环与气候变化, E-mail: 18751312807@163.com

* 通信作者, E-mail: chenstyf@aliyun.com

在全球气候变化背景下,未来区域降水模式会发生变化,其表现形式可能为降水量减少^[1,2],这对生态系统具有潜在的影响^[3,4].全球变化的另一个主要表现是温室气体排放造成的气候变暖,CO₂是最主要的温室气体,CO₂的排放与全球碳循环有密切联系.

土壤呼吸是生态系统碳排放的重要过程^[5,6].农田土壤呼吸与土壤微生物活性及数量、土壤养分、植物生长状况有密切关系^[7,8],由于降水量减少会导致土壤微生物活性及数量、土壤养分、植物生长状况发生改变^[9,10],因而这种改变很可能会对农田土壤呼吸产生直接和间接影响.

虽然以往已有关于降水量减少影响土壤呼吸的研究,但这些研究主要集中在森林和草地生态系统,例如:周世兴等^[11]研究了华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸对降水量减少的响应,表明不同降水量减少水平对土壤呼吸的影响程度不同;Miao 等^[12]在内蒙古温带草地进行的试验表明,降水量减少降低了土壤呼吸作用,其降低程度随降水量的减少水平而异.关于农田土壤呼吸在降水量减少条件下如何变化仍缺乏实证研究,特别是缺乏类似于在森林、草地设计的降水量减少野外控制试验^[4].即使在进行该类研究的森林、草地中现有结果也存在争议^[13,14].

本研究在华东地区典型的大豆-冬小麦轮作农田生态系统设置降水量减少控制试验,观测土壤呼吸作用及相关环境因子,以期研究未来降水量减少条件下农田土壤呼吸的大小、季节变异规律及其内在变异机制提供预估数据.

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

于2016-06~2017-05在南京信息工程大学农业气象试验站进行田间试验,试验地点的地理坐标为:32.16°N, 118.86°E.田间作物种植方式为大豆和冬小麦轮作.试验地多年平均气温和多年平均降水量分别为15.6℃和1100 mm.供试土壤为黄棕壤,耕层(0~20 cm)土壤质地为壤质黏土,pH(H₂O)值6.3,黏粒含量26.1%,有机碳含量19.4 g·kg⁻¹、全氮含量1.15 g·kg⁻¹,碳氮比16.9,容重1.54 g·cm⁻³,田间持水量25.6%.

1.2 试验设计

供试大豆和冬小麦品种分别为八月白和扬麦12号,两种作物分别于2016-06-15和2016-11-06

播种,各生育期见表1.大豆间距约25 cm,冬小麦行间距约20 cm.2016-06-15在大豆田施复合肥67.6 g·m⁻²,2016-11-12在冬小麦田施复合肥67.6 g·m⁻²,2016-12-25施尿素22.5 g·m⁻²,其中复合肥N、P、K比例为9:23:18.设置模拟降水量减少的随机区组试验,试验地划分为3个区组(即3重复水平),每个区组设对照、降水量减少20%、降水量减少40%处理,对应的标号分别为:CK、P20%、P40%.降水量减少强度的设置依据为:当地多年降水量的变异幅度一般不超过50%,同时参考以往降水量减少试验的设置强度在18%~54%范围内^[15],因而本研究中设置降水量减少20%和40%两个梯度.每个小区面积为2.5 m×2.5 m,在小区与小区之间设置30 cm宽,25 cm深的防水隔离沟.按当地常规农业管理措施对每个试验小区进行田间管理.由于当地降水量充沛,作物生长期间未进行灌溉.

表1 大豆和冬小麦的生育期

Table 1 Growth stages of soybean and winter wheat			
大豆生育期	日期(年-月-日)	冬小麦生育期	日期(年-月-日)
播种	2016-06-15	播种	2016-11-06
出苗	2016-06-22	出苗	2016-11-26
三叶	2016-07-17	返青	2017-02-11
分枝	2016-07-22	拔节	2017-03-18
开花	2016-08-16	孕穗	2017-03-29
鼓粒	2016-09-17	抽穗	2017-04-01
成熟	2016-10-09	开花	2017-04-10
		灌浆	2017-04-18
		成熟	2017-05-23

在降水量减少小区设置镀锌管支架,在支架上安装透明挡雨板.挡雨板横截面为圆弧形,挡雨板为倾斜设置,以保证水流能沿着挡雨板流出到小区外.按照挡雨板覆盖小区上方面积20%和40%的标准设置降水量减少20%和40%的处理.在挡雨板流水口下方设置接雨水槽,人工定期清除出水槽中的水以防止水满溢出.

1.3 土壤呼吸测定

于作物播种后在各个处理小区埋入高10 cm、直径20 cm的PVC材质底座,用于测定土壤呼吸,底座埋入土壤中3 cm.埋入底座之后,将底座外周边一圈土壤压紧,以防止漏气.每个小区埋入1个土壤呼吸底座.根据大豆和冬小麦的行间距,土壤呼吸底座基本位于作物行间,能保证土壤呼吸中包含了一部分根呼吸作用,具有较好的样地代表性.定期人工去除底座内生长出的植物,以保证测定的

呼吸作用不包含植物呼吸. 每周观测 1 次土壤呼吸, 遇有雨天则延后观测. 在每个观测日的 08:00~09:00 采用 Li-8100A 土壤呼吸自动测量系统(Li-COR 公司, 美国)测定各小区的土壤呼吸速率. 在每轮气体观测时, 在每个小区采集 1 次土壤呼吸速率. 观测土壤呼吸时, 在各小区进行随机观测.

1.4 土壤温度、土壤湿度及作物生物量测定

在每次测定土壤呼吸速率的同时, 采用 Li-8100A 附带的土壤温度和湿度探头测定 5 cm 深土壤温度、土壤湿度(体积分数).

于作物收获后将每个小区单位面积内的作物生物量分成根、茎叶、籽粒这 3 部分, 于 105℃ 杀青, 70℃ 烘干, 在天平上测定干重.

1.5 土壤 CO₂ 产生速率、硝化速率及反硝化速率测定

以直径 6.0 cm、高 4.3 cm 的不锈钢环刀在 2016-08-21、2016-09-19、2017-04-07、2017-05-14 取土壤样品测定土壤 CO₂ 产生速率、硝化速率和反硝化速率. 在大豆生长季的 8、9 月份和冬小麦生长季的 4、5 月, 作物根系的发育已比较成熟, 测定的结果中能涵盖了根的作用, 比如此时的土壤 CO₂ 产生速率中就包含了根呼吸的速率, 相对于作物生长前期的月份而言, 更能代表作物成型时土壤和根系状况. 在测定土壤 CO₂ 产生速率的同时测定硝化速率和反硝化速率是为了探讨土壤碳的转化过程和氮的转化过程的内在联系, 分析其可能存在的共同变异规律. 每个小区采集 3 个土壤样品, 之后立即用塑料盖将其密封, 以防止水分散失, 并迅速送到实验室, 在土壤碳氮循环测定系统(BaPS 系统, 德国)中分析土壤 CO₂ 产生速率、硝化速率和反硝化速率, 测定结果为 3 个土壤样品的平均值, 其含义为每 kg 土壤每 h 产生的以 CO₂ 形式释放的碳量和

每 kg 土壤每 h 通过硝化或反硝化作用转化的氮量, 其单位均为 $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ [16].

1.6 统计分析

采用 Excel 2010 软件绘制土壤呼吸的季节变化和季节平均值、土壤 CO₂ 产生速率、土壤硝化及反硝化速率、土壤呼吸与温湿度的关系图等. 在 SPSS 中采用重复测量的方差分析比较不同处理的土壤呼吸季节平均值的差异, 采用单因素方差分析及多重比较分析不同处理的土壤 CO₂ 产生速率差异、土壤硝化及反硝化速率差异、生物量差异, 方差分析的显著性水平为 0.05. 采用一元回归来分析土壤呼吸与温度的关系、土壤反硝化速率与总氮转化速率的关系、土壤呼吸减少量与降水减少量的关系.

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸动态变化

土壤呼吸作用表现为明显的季节变化规律(图 1). 在夏季, 作物生长旺盛, 根呼吸、土壤微生物呼吸均较强, 因而土壤呼吸相对较高; 在冬季, 由于作物较小, 根呼吸的量值相对较低, 同时较低的温度不利于土壤微生物活动, 从而微生物呼吸也较低, 因而导致土壤呼吸作用在冬季相对较低; 进入春季后, 土壤呼吸表现出逐渐升高的趋势.

大豆-冬小麦轮作农田 CK、P20%、P40% 这 3 个处理的土壤呼吸速率的季节变异范围分别为 0.85 ~ 6.01、0.50 ~ 6.52、0.85 ~ 7.38 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 在大豆生长季, CK、P20%、P40% 这 3 个处理的季节平均土壤呼吸速率分别为 (4.91 ± 0.67) 、 (4.19 ± 0.39) 、 (4.35 ± 0.32) $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, CK 处理平均土壤呼吸速率高于 P20% 和 P40% 处理, 重复测量的方差分析表明 3 处

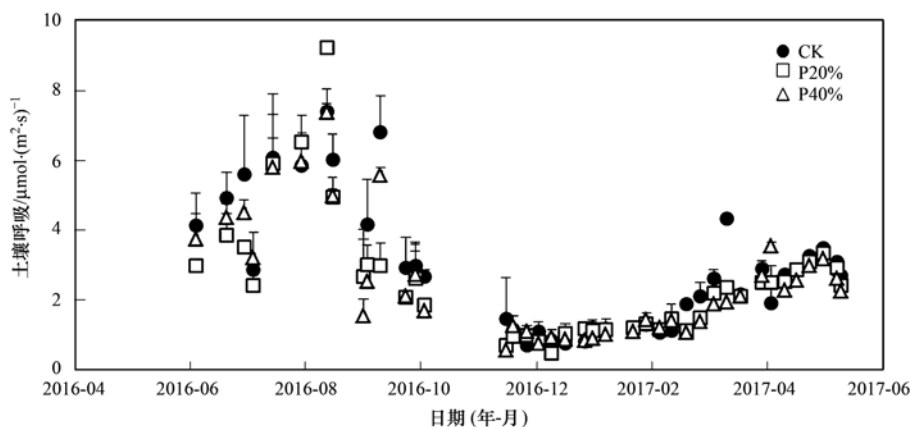
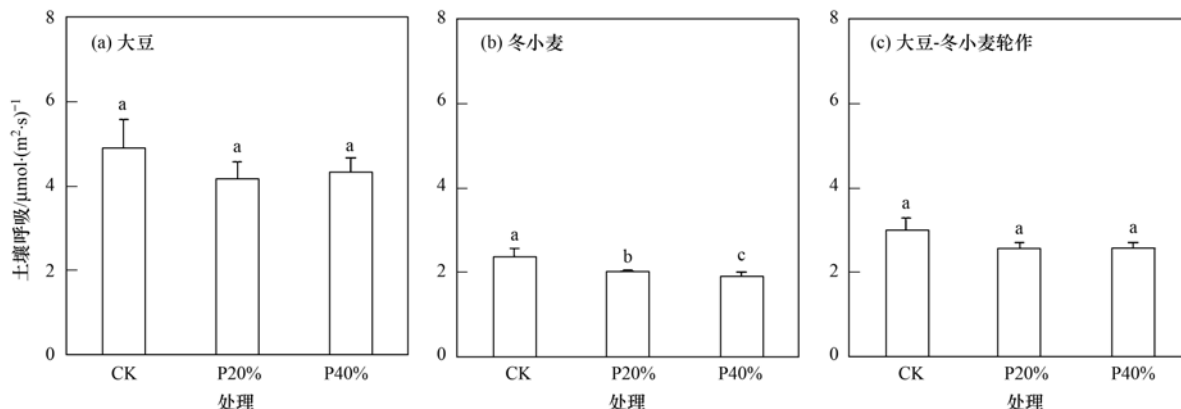


图 1 土壤呼吸的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes in soil respiration

理间差异未达到显著水平[图 2(a)]; 在冬小麦生长季, 这 3 个处理的季节平均土壤呼吸速率分别为 (2.39 ± 0.17) 、 (2.03 ± 0.02) 、 (1.94 ± 0.05) $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 表现为 $\text{CK} > \text{P20\%} > \text{P40\%}$, 重复

测量的方差分析表明 3 处理间差异达到显著水平[图 2(b)]; 就整个大豆-冬小麦轮作阶段而言, CK 处理平均土壤呼吸速率高于 P20% 和 P40% 处理, 但未达到显著水平[图 2(c)].



图中相同字母表示处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 不同字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)

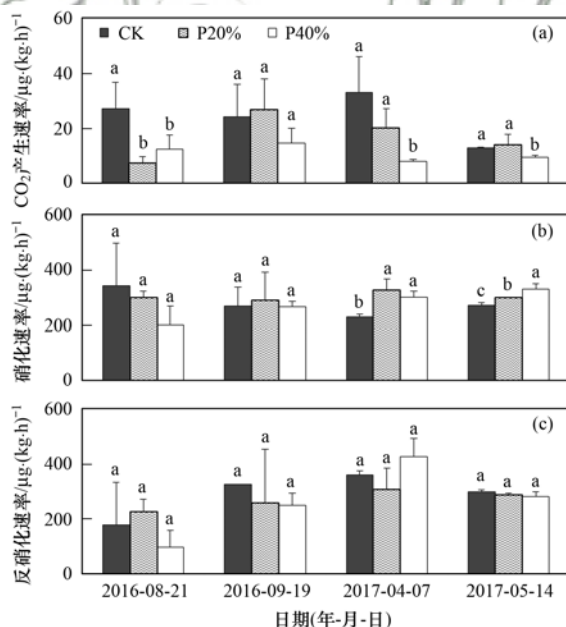
图 2 不同处理的土壤呼吸季节平均值

Fig. 2 Seasonal mean soil respiration in different treatments

2.2 土壤 CO_2 产生速率、硝化及反硝化速率

方差分析表明, 在 2016-08-21、2017-04-07、2017-05-14 这 3 次观测中, 降水量减少显著降低了土壤 CO_2 产生速率, 特别是 P40% 处理的减少量更大, 但在 2016-09-19 的观测中, 虽然 P40% 处理的土壤 CO_2 产生速率最低, 但处理间未达到显著差异水平[图 3(a)]. 2017-04-07 和 2017-05-14 这 2 次

测定的 P20% 和 P40% 处理的土壤硝化速率显著高于 CK, 这可能是由于土壤变干促进了土壤硝化作用[图 3(b)]. 总体而言, 在 4 次测定中降水量减少处理的反硝化速率偏低, 但 3 个处理间的土壤反硝化速率均无显著差异[图 3(c)]. 若将硝化速率和反硝化速率之和视为总氮转化速率, 则可见反硝化速率与总氮转化速率之间存在极显著的线性回归关系(图 4).



图中相同字母表示处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 不同字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)

图 3 土壤 CO_2 产生速率、硝化速率及反硝化速率的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes in the rates of soil CO_2 production, nitrification and denitrification

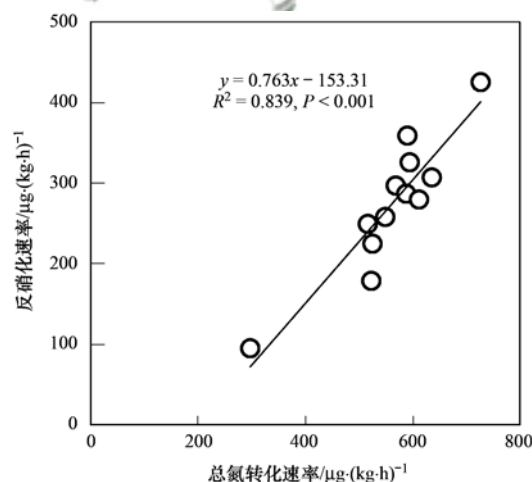


图 4 土壤反硝化速率与总氮转化速率的关系

Fig. 4 Relationship between soil denitrification rate and total nitrogen transformation rate

2.3 作物生物量

对大豆和冬小麦收获时测定的生物量结果表明, 大豆田不同处理的根生物量不存在显著差异, 茎叶的生物量也不存在显著差异, 但籽粒的生物量

存在显著差异(表 2)。冬小麦田 CK、P20%、P40% 处理的根生物量分别为(206.7 ± 18.4)、(188.1 ± 0.4)、(133.5 ± 25.4) g, 随降水量减少冬小麦根生

物量逐渐降低, 同时, 随降水量减少冬小麦茎叶生物量和籽粒生物量也表现为逐渐降低的趋势(表 2)。

表 2 收获的不同处理的作物生物量¹⁾

Table 2 Harvested crop biomass for different treatments

生长季	处理	根/g·m ⁻²	茎叶/g·m ⁻²	籽粒/g·m ⁻²
大豆	CK	351.0 ± 15.1 (a)	1 441.1 ± 150.1 (a)	581.9 ± 22.8 (b)
	P20%	393.6 ± 30.7 (a)	1 322.3 ± 73.3 (a)	656.8 ± 31.5 (b)
	P40%	419.9 ± 36.4 (a)	1 429.9 ± 217.9 (a)	847.0 ± 5.2 (a)
冬小麦	CK	206.7 ± 18.4 (a)	1 374.2 ± 110.5 (a)	994.2 ± 134.0 (a)
	P20%	188.1 ± 0.4 (ab)	1 172.1 ± 200.8 (a)	871.3 ± 76.1 (a)
	P40%	133.5 ± 25.4 (b)	1 043.3 ± 157.5 (a)	826.3 ± 113.5 (a)

1) 表中每个生长季中相同字母表示处理间无显著差异($P>0.05$), 不同字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)

2.4 土壤温湿度对土壤呼吸的影响

CK、P20% 和 P40% 这 3 个处理的土壤温度的变异范围分别为 3.8 ~ 36.9、4.0 ~ 36.3 和 4.0 ~ 36.8℃ [图 5(a)], 3 处理的土壤温度的季节变异趋势与当地气温的变异趋势一致。大豆生长季 CK、P20% 和 P40% 这 3 个处理的季节平均土壤温度分别为 28.3、28.3 和 28.3℃, 而冬小麦生长季这 3 个处理的季节平均土壤温度分别为 17.7、17.8 和 17.8℃, 大豆生长季的平均土壤温度明显高于冬小麦生长季。对所有观测日不同降水量处理下土壤温度进行重复测量的方差分析, 结果表明 3 处理间土壤温度无显著差异($P>0.05$)。2016-06 ~ 2017-05, CK、P20% 和 P40% 这 3 个处理土壤湿度的变异范围分别为 30.8% ~ 7.9%、30.6% ~ 7.3% 和 29.9% ~ 5.0% [图 5(b)], 最高的土壤湿度出现在 2017 年 4 月中旬, 重复测定的方差分析表明 3 个处理间土壤湿度存在极显著差异($P<0.01$), 表现为 CK > P20% > P40%。相对于大豆生长季而言, 3 处理在冬小麦生长季土壤湿度的

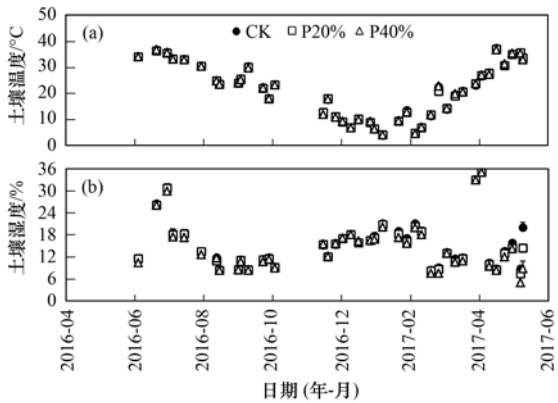


图 5 土壤温度及土壤湿度的季节变化

Fig. 5 Seasonal changes in soil temperature and soil moisture

差异更大。

在大豆-冬小麦轮作阶段, 3 个处理的土壤呼吸与土壤温度之间都表现为极显著的指数回归关系(图 6), 土壤呼吸随土壤温度的升高而呈指数形式增加。CK、P20%、P40% 处理的温度敏感系数(温度增加 10℃, 土壤呼吸增加为原来的倍数)分别为 1.65、1.59、1.65, 3 处理的温度敏感系数无显著性

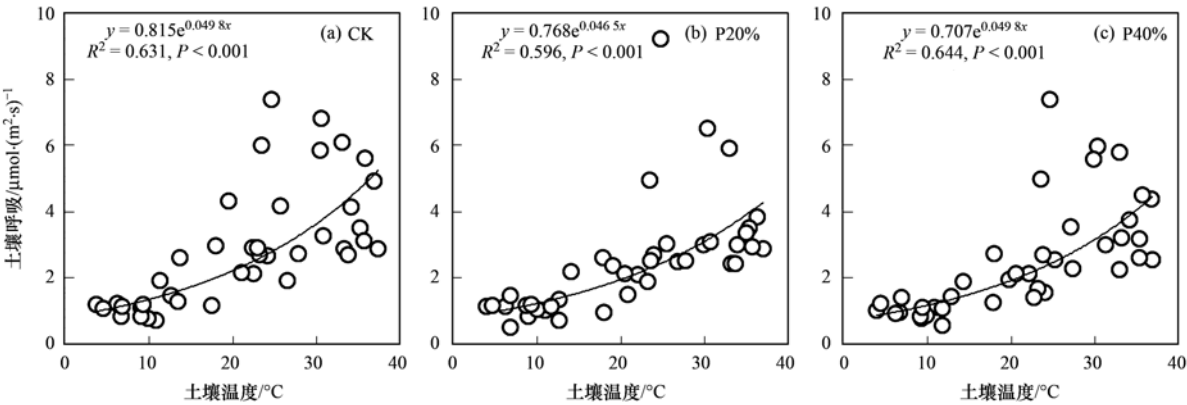


图 6 土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig. 6 Relationship between soil respiration and soil temperature

差异 ($P>0.05$). 土壤呼吸的实测值与利用指数回归方程计算得到的土壤呼吸的模拟值之间的差值为土壤呼吸的残差, 土壤呼吸的残差与土壤湿度之间无显著的回归关系(图7).

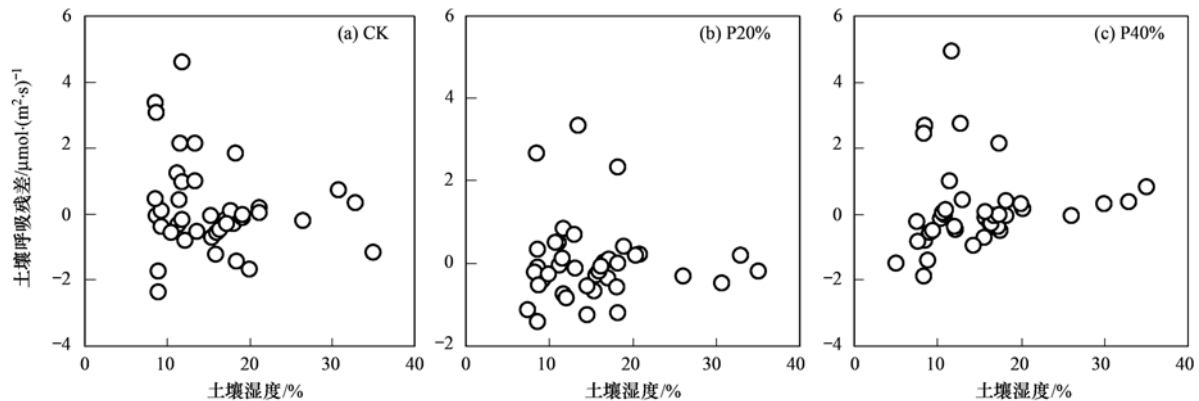


图7 土壤呼吸残差与土壤湿度的关系

Fig. 7 Relationship between residual soil respiration and soil moisture

3 讨论

3.1 降水量减少影响土壤呼吸的比较分析

以往大多数研究均表明, 降水量减少会降低土壤呼吸作用(表3). Van Straaten 等^[17]发现, 在印尼热带雨林降水量减少60%的试验中, 平均土壤呼吸量减少了 $0.16\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; 在巴西热带雨林中, 降水量减少100%则会使平均土壤呼吸量减少 $1.1\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ^[13]; 而在哥斯达黎加热带雨林中, 降水量减少25%和50%则分别使平均土壤呼吸量减少了 $0.39\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $0.75\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ^[19]. 由此可见, 对于同一生态系统类型(热带雨林)而言, 降水量减少程度的不同所引起的土壤呼吸减少量也不同. 在我国鼎湖山进行的试验观测表明, 在同样减少100%的降水量的

条件下, 亚热带阔叶林、针阔混交林、针叶林平均土壤呼吸量分别减少 0.75 、 0.78 、 $1.14\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ^[23], 这表明不同植被类型下的土壤呼吸对降水量减少的响应程度存在差异. 虽然以往大部分研究表明降水量减少会降低土壤呼吸, 但在以色列地中海灌丛生态系统中的研究表明, 降水量减少30%反而使平均土壤呼吸量增加了 $0.11\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ^[20], 这也表明了土壤呼吸对降水量减少的响应的复杂性. 本研究表明, 在降水量减少20%和40%条件下, 大豆-冬小麦轮作农田平均土壤呼吸量分别减少了 $0.45\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $0.43\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 这一研究结果与以往大多数研究一致, 这表明农田生态系统土壤呼吸对降水量减少的响应程度与其他生态系统类似.

表3 基于文献调研的降水量减少对土壤呼吸的影响(观测时段大于1年)

Table 3 Results of existing studies on the effects of precipitation reduction on soil respiration (time period longer than 1 year)

日期(年-月)	地点	生态系统类型	降水减少量 /%	平均土壤呼吸 / $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	差异显著性	文献
2007-03~2008-04	Sulawesi, 印尼	热带雨林	60	减0.16	不显著	[17]
2008-01~2009-12	Tolfa-Allumiere, 意大利	地中海常绿林	20	减0.49	显著	[18]
2002-11~2003-10	Para, 巴西	热带雨林	100	减1.10	显著	[13]
2007-11~2008-10	Osa peninsula, 哥斯达黎加	热带雨林	25	减0.39	显著	[19]
2007-11~2008-10	Osa peninsula, 哥斯达黎加	热带雨林	50	减0.75	显著	[19]
2006-03~2007-10	以色列	地中海灌丛	30	减0.09	不显著	[20]
2006-03~2007-10	以色列	地中海灌丛	30	增0.11	不显著	[20]
2004-01~2005-12	Montpellier, 法国	地中海常绿林	19	减0.23	显著	[21]
2010-08~2012-03	Victoria, 澳大利亚	温带灌丛	40	减0.89	显著	[22]
2007-01~2007-12	鼎湖山, 中国	亚热带阔叶林	100	减0.75	显著	[23]
2007-01~2007-12	鼎湖山, 中国	亚热带针阔混交林	100	减0.78	显著	[23]
2007-01~2007-12	鼎湖山, 中国	亚热带针叶林	100	减1.14	显著	[23]
2005-01~2006-12	Tennessee, 美国	温带草地	100	减0.60	不显著	[24]
2016-06~2017-05	南京, 中国	亚热带农田	20	减0.45	不显著	本研究
2016-06~2017-05	南京, 中国	亚热带农田	40	减0.43	不显著	本研究

若将以往文献中所有观测尺度超过 1 a 的降水量减少试验进行整合分析,可见土壤呼吸的减少量与降水量的减少量之间存在极显著 ($P = 0.007$) 的一元线性回归关系(图 8、表 3),随降水量减少程度的增加,土壤呼吸的减少量呈线性增加趋势.这说明降水量的大幅度减少对生态系统中土壤呼吸的抑制作用更为明显.

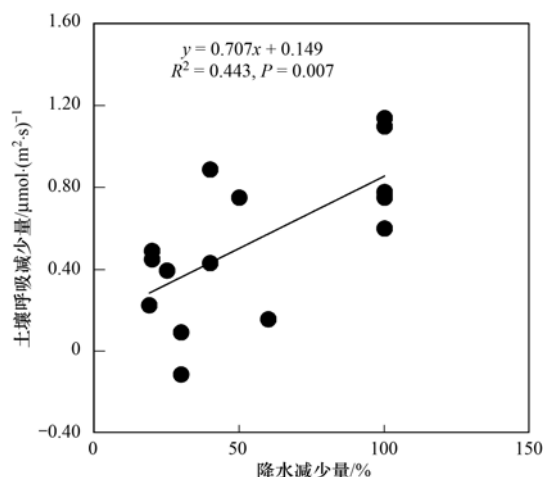


图 8 土壤呼吸减少量与降水减少量的关系

Fig. 8 Relationship between decrease in soil respiration and reduction in precipitation

3.2 降水量减少影响土壤呼吸的机制

土壤呼吸是一个生物学过程,土壤呼吸的大小与植物生长状况和土壤微生物状况有关^[7].降雨减少改变了土壤水分条件,从而对土壤性质和生物学过程产生影响^[15].在草地系统中的降水量减少控制试验表明,降水量减少造成的土壤干旱会降低微生物多样性^[25],降水量减少处理会显著提高真菌在微生物群落中的优势度^[26],而土壤细菌丰度与水分条件显著正相关^[27].除土壤微生物外,其他生物和非生物因子的变异也对土壤呼吸产生重要影响.在地中海常绿阔叶林进行的 3 年试验表明,降水量减少处理导致的总初级生产力的降低是造成土壤呼吸减少的主要原因^[21],在巴西热带雨林进行的降水量减少试验表明,根系分布的变异是造成土壤呼吸减少的重要原因^[13],在温带挪威云杉林的降水量减少试验表明,降水量减少导致土壤有机碳含量改变,进而影响了土壤呼吸作用^[28].与这些研究类似,本研究也表明冬小麦田不同降水量处理的土壤呼吸与作物生产量之间存在正相关关系(图 9),降水量减少导致冬小麦田土壤呼吸和根、茎叶、籽粒生物量均降低[图 2(b)、表 2],降水量减少导致的作物生产力的降低可能是土壤呼吸减少的

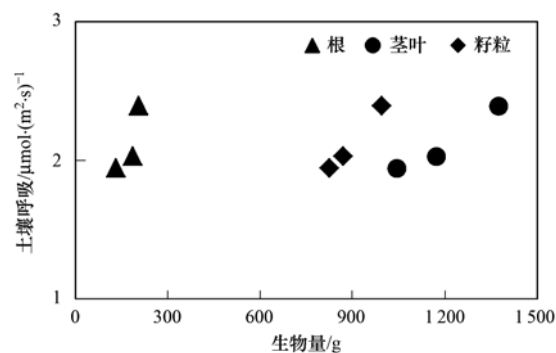


图 9 冬小麦田不同处理的土壤呼吸与根生物量、茎叶生物量、籽粒生物量的关系

Fig. 9 Relationships between soil respiration and root biomass, soil respiration and shoot biomass, and soil respiration and seed biomass, in the winter wheat cropland

重要原因.

3.3 影响处理间土壤呼吸变异的因素分析

农田有作物行及行间之分,在起垄的情况下,行上与行间在土壤养分与水分的量和分布上都会具有较大的差异^[29],而在本研究中不缺水的情况下并未起垄,试验小区地势较为平坦,养分和水分条件相对均匀.土壤呼吸底座的直径与作物行间距基本一致,保证了测定的土壤呼吸中包含了根呼吸作用^[30].

本研究表明,降水量减少对农田土壤呼吸的影响随生长季和种植作物的不同而存在差异,在冬小麦生长季,降水量减少对土壤呼吸的负面效应更为明显.由于试验地未进行人工灌溉,因而水分条件的变化仅与降水量有关.当地 2016-06 ~ 2017-10 (大豆生长季)降水量约 1 230 mm, 2016-11 ~ 2017-05 (冬小麦生长季)降水量约 410 mm,其中大豆生长季降水量比常年偏多,当地多年平均降水量仅 1 100 mm,因此在大豆生长季即使降水量减少 20% 或 40% 水分条件仍比较充足,水分未成为土壤呼吸的限制因素,因而大豆生长季不同降水量处理间的土壤呼吸未出现显著差异[图 2(a)].而当地冬小麦生长季降水量与多年平均差别不大,特别是冬季降水量很少,对土壤墒情造成一定影响,这可能导致水分条件成为土壤呼吸的限制因素,从而造成不同降水量处理间土壤呼吸的差异[图 2(b)].

4 结论

(1)降水量减少未显著降低大豆田土壤呼吸速率,但显著降低了冬小麦田土壤呼吸速率,且随降水量减少程度的增大土壤呼吸减少的程度更为明显.

(2)降水量减少降低了土壤 CO₂ 产生速率,但对土壤硝化速率和反硝化速率的影响不明显。

(3)降水量减少对大豆根、茎叶、籽粒生物量无显著影响,但显著降低了冬小麦的根、茎叶、籽粒生物量。

(4)冬小麦田不同降水量处理的土壤呼吸与作物生产量之间存在正相关关系。

(5)土壤温度是影响土壤呼吸季节变异的主要因素,两者间呈指数回归关系。

参考文献:

- [1] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, *et al.* Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections[J]. *Climatic Change*, 2007, **81**(S1): 71-95.
- [2] Kundzewicz Z W, Mata L J, Arnell N, *et al.* The implications of projected climate change for freshwater resources and their management[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, **53**(1): 3-10.
- [3] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, *et al.* Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland [J]. *Science*, 2002, **298**(5601): 2202-2205.
- [4] Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, *et al.* Precipitation manipulation experiments-challenges and recommendations for the future[J]. *Ecology Letters*, 2012, **15**(8): 899-911.
- [5] 方精云, 王妮. 作为地下过程的土壤呼吸: 我们理解了多少? [J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 345-347.
Fang J Y, Wang W. Soil respiration as a key belowground process: issues and perspectives[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(3): 345-347.
- [6] Chen S T, Zou J W, Hu Z H, *et al.* Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: summary of available data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **198-199**: 335-346.
- [7] 江国福, 刘畅, 李金全, 等. 中国农田土壤呼吸速率及驱动因子[J]. *中国科学: 生命科学*, 2014, **44**(7): 725-735.
Jiang G F, Liu C, Li J Q, *et al.* Soil respiration and driving factors of farmland ecosystems in China[J]. *Science China (Vita)*, 2014, **44**(7): 725-735.
- [8] Kuzyakov Y, Gavrichkova O. Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(12): 3386-3406.
- [9] Flanagan L B, Sharp E J, Letts M G. Response of plant biomass and soil respiration to experimental warming and precipitation manipulation in a northern Great Plains grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **173**: 40-52.
- [10] 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.
- [11] 周世兴, 黄从德, 向元彬, 等. 华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤呼吸对降雨减少的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22**(3): 499-504.
- [12] Miao Y, Han H Y, Du Y, *et al.* Nonlinear responses of soil respiration to precipitation changes in a semiarid temperate steppe [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 45782, doi: 10.1038/srep45782.
- [13] Sotta E D, Veldkamp E, Schwendenmann L, *et al.* Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil[J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(10): 2218-2229.
- [14] Deng Q, Hui D F, Zhang D Q, *et al.* Effects of precipitation increase on soil respiration: a three-year field experiment in subtropical forests in China [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(7): e41493, doi: 10.1371/journal.pone.0041493.
- [15] Liu L L, Wang X, Lajeunesse M J, *et al.* A cross-biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(4): 1394-1405.
- [16] 刘艳, 陈书涛, 刘燕, 等. 增温对农田土壤碳氮循环关键过程的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 674-679.
Liu Y, Chen S T, Liu Y, *et al.* Effects of simulated warming on the key processes of soil carbon and nitrogen cycling in a cropland [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(4): 674-679.
- [17] Van Straaten O, Veldkamp E, Köhler M, *et al.* Spatial and temporal effects of drought on soil CO₂ efflux in a cacao agroforestry system in Sulawesi, Indonesia[J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(4): 1223-1235.
- [18] Cotrufo M F, Alberti G, Inglema I, *et al.* Decreased summer drought affects plant productivity and soil carbon dynamics in a Mediterranean woodland [J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(9): 2729-2739.
- [19] Cleveland C C, Wieder W R, Reed S C, *et al.* Experimental drought in a tropical rain forest increases soil carbon dioxide losses to the atmosphere[J]. *Ecology*, 2010, **91**(8): 2313-2323.
- [20] Talmon Y, Sternberg M, Grünzweig J M. Impact of rainfall manipulations and biotic controls on soil respiration in Mediterranean and desert ecosystems along an aridity gradient [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(2): 1108-1118.
- [21] Misson L, Rocheteau A, Rambal S, *et al.* Functional changes in the control of carbon fluxes after 3 years of increased drought in a Mediterranean evergreen forest? [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(9): 2461-2475.
- [22] Hinko-Najera N, Fest B, Livesley S J, *et al.* Reduced throughfall decreases autotrophic respiration, but not heterotrophic respiration in a dry temperate broadleaved evergreen forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **200**: 66-77.
- [23] Jiang H, Deng Q, Zhou G, *et al.* Responses of soil respiration and its temperature/moisture sensitivity to precipitation in three subtropical forests in southern China[J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(6): 3963-3982.
- [24] Garten C T Jr, Classen A T, Norby R J. Soil moisture surpasses elevated CO₂ and temperature as a control on soil carbon

- dynamics in a multi-factor climate change experiment[J]. *Plant and Soil*, 2009, **319**(1-2): 85-94.
- [25] Cruz-Martínez K, Rosling A, Zhang Y, *et al.* Effect of rainfall-induced soil geochemistry dynamics on grassland soil microbial communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(21): 7587-7595.
- [26] Jensen K D, Beier C, Michelsen A, *et al.* Effects of experimental drought on microbial processes in two temperate heathlands at contrasting water conditions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **24**(2): 165-176.
- [27] Bell C, McIntyre N, Cox S, *et al.* Soil microbial responses to temporal variations of moisture and temperature in a Chihuahuan Desert grassland[J]. *Microbial Ecology*, 2008, **56**(1): 153-167.
- [28] Schindlbacher A, Wunderlich S, Borken W, *et al.* Soil respiration under climate change: prolonged summer drought offsets soil warming effects[J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(7): 2270-2279.
- [29] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2284-2290.
- Han X F, Gao M, Xie D T, *et al.* Variation characteristics of inorganic phosphorus in purple soil profile under different conservation tillage treatments [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2284-2290.
- [30] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.



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, Ayinigeer·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-Dajiu 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)