

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析
..... 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价
..... 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析
..... 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应
..... 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析
..... 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化
..... 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响
..... 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响
..... 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响
..... 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力
..... 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价
..... 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响

王晓云^{1,2,3}, 蔡焕杰^{1,2,3*}, 李亮^{1,2,3}, 徐家屯^{1,2,3}, 陈慧^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为研究不同时期亏水量对冬小麦农田土壤温室气体排放的影响, 优化灌溉管理措施, 试验采用静态箱-气相色谱法对关中平原冬小麦(2016年10月~2017年6月)农田温室气体(CO₂、N₂O和CH₄)排放通量进行了监测研究. 试验在冬小麦3个生育期(越冬期、拔节至抽穗期、抽穗至灌浆期)各设置3个灌水水平(充分灌溉, 100%; 轻度水分亏缺, 80%; 重度水分亏缺, 60%), 共6个处理(CK、T1、T2、T3、T4、T5, 其中CK处理为充分灌溉处理, 其它处理均为不同程度的水分亏缺处理). 阐述了3种气体(CO₂、N₂O和CH₄)在全生育期的动态变化特征, 并用作物产量、长远增温效应(net GWP_L)和当季增温效应(net GWP_S)这3个指标综合评估不同生育期亏水水平对关中平原小麦经济效应和生态效应的影响. 结果表明, 生育期灌溉后CO₂、N₂O排放通量基本上呈增加趋势, 以CK处理最高, 而灌溉后土壤CH₄吸收通量迅速减小, 高水分处理甚至出现排放特征. 与CK处理相比, T1、T2、T3、T4和T5处理下小麦季CO₂排放总量分别显著降低了13.32%、25.98%、5.55%、15.47%和17.52% ($P < 0.05$), N₂O排放总量分别显著降低了12.20%、18.00%、5.63%、11.54%和13.53% ($P < 0.05$), CH₄吸收总量分别显著增加了46.47%、75.78%、19.47%、53.40%和62.33% ($P < 0.05$); T1、T2、T3、T4和T5处理net GWP_L较CK处理分别显著降低了10.07%、12.77%、6.50%、6.81%和11.53% ($P < 0.05$); 除T3处理外, 其他处理较CK处理net GWP_S分别显著降低了13.21%、37.65%、24.60%和19.86% ($P < 0.05$); T1、T2、T3、T4和T5处理小麦产量较CK处理分别显著减少了12.56%、32.53%、2.25%、20.93%和18.14% ($P < 0.05$), T3处理较CK处理减产2.25%, 但无显著性差异($P > 0.05$). 亏缺灌溉显著降低了小麦地温室气体的排放, 但会造成不同程度的减产, 综合考虑不同生育期亏水水平处理下小麦地的经济效应和生态效应, T3处理更有利于关中平原冬小麦的保产节水减排.

关键词: 亏缺灌溉; 冬小麦农田; 温室气体 (GHG); 净增温潜势 (NGWP); 产量

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2413-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808075

Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods

WANG Xiao-yun^{1,2,3}, CAI Huan-jie^{1,2,3*}, LI Liang^{1,2,3}, XU Jia-tun^{1,2,3}, CHEN Hui^{1,2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas in Northwest China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Field experiments and static chamber-gas chromatography analysis were conducted in 2016-2017 to study the effects of deficit irrigation on CO₂, N₂O, and CH₄ emissions from soils of winter wheat fields and to optimize irrigation management measures in the Guanzhong Plain of China. Three irrigation levels (full irrigation, 100%; medium water deficit, 80%; and severe water deficit, 60%) were set during the three important growth periods of winter wheat (overwintering, jointing to heading, and heading to filling periods), with 6 distinct treatments (CK, T1, T2, T3, T4, T5, in which CK treatment is full irrigation, and others are water deficit treatments). The dynamic characteristics of the emission fluxes of the three greenhouse gases were described. Crop yield, long-term net global warming potential (net GWP_L), and seasonal net global warming potential (net GWP_S) were used to comprehensively evaluate the influence of water deficit levels during different growth periods of wheat on economic and ecological issues in the Guanzhong Plain. The results showed that the CO₂ and N₂O emission fluxes increased, with the highest values for CK treatment. The CH₄ absorption fluxes decreased rapidly with increased irrigation, there was even indication of CH₄ emissions during high irrigation treatment. Compared to CK treatment, T1, T2, T3, T4, and T5 CO₂ emissions decreased significantly by 13.32%, 25.98%, 5.55%, 15.47%, and 17.52% ($P < 0.05$); and N₂O emissions decreased by 12.20%, 18.00%, 5.63%, 11.54%, and 13.53% ($P < 0.05$), respectively. The total CH₄ absorption significantly increased by 46.47%, 75.78%, 19.47%, 53.40%, and 62.33% ($P < 0.05$), respectively. Net GWP_L for T1, T2, T3, T4, and T5 treatments were significantly reduced by 10.07%, 12.77%, 6.50%, 6.81%, and 11.53% ($P < 0.05$), respectively, in comparison with CK treatment. In addition to T3 treatment, net GWP_S of T1, T2, T4, and T5 treatments decreased significantly by 13.21%, 37.65%, 24.60%, and 19.86% ($P < 0.05$), respectively, compared with CK. Wheat yield at T1, T2, T3, T4, and T5 treatments reduced significantly by 12.56%, 32.53%, 2.25%, 20.93%, and 18.14% compared with CK treatment ($P < 0.05$). Even though wheat yield under T3 treatment was reduced by 2.25% compared with

收稿日期: 2018-08-08; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400201); 国家自然科学基金项目(51879223)

作者简介: 王晓云(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为节水灌溉理论与技术, E-mail: 775638278@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者, E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

CK treatment, there was no significant difference ($P > 0.05$). In addition, there were highly significant ($P < 0.01$) positive partial correlations between CO_2 , N_2O , and CH_4 emission fluxes and soil WFPS. Therefore, deficient irrigation can significantly reduce greenhouse gas emissions in wheat fields, but there are varying degrees of reduction. Considering both economic and ecological effects of water deficit in different growth periods, T3 treatment is the most conducive to keep the balance between production yield, water conservation, and emission reduction of winter wheat crops in the Guanzhong Plain.

Key words: deficit irrigation; winter wheat field; greenhouse gas (GHG); net global warming potential (NGWP); winter wheat yield

近年来,全球气候变暖日益显著,大气中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 等温室气体的浓度已上升到 80 万年来的最高水平^[1],人类活动导致的“温室效应”加速了这种变化。IPCC 第四次评估报告表明,农业是温室气体的第二大来源,农业源温室气体排放约占全球人为排放的 13.5%。中国是重要的农业大国,农业温室气体排放约占全国排放总量的 17%,农业活动产生的 CH_4 和 N_2O 分别占全国 CH_4 和 N_2O 排放量的 50.15% 和 92.47%^[2]。因此,在当前全球应对气候变暖的大背景下,中国开展农田温室气体减排研究已是当务之急。

以往有关农田温室气体排放的研究,多侧重于耕作方式^[3-5]、施肥和秸秆还田等方面^[6-8],而灌溉作为一项重要的农田管理措施能够改变土壤水分状况、通气性和土壤电导率等物理性质,会改变土壤微生物的活性,进而影响土壤温室气体排放^[9,10]。Liu 等^[11]的研究发现,灌溉后土壤 CO_2 排放量急剧增加;梁东丽等^[12]认为土壤 N_2O 通量和浓度的变化趋势与同时期灌水量变化趋势吻合。郑欠等^[13]研究土壤含水量对硝化和反硝化过程 N_2O 排放的影响时发现, N_2O 的排放量随着土壤含水量的增大而增加;对于 CH_4 气体,有研究表明土壤对甲烷吸收率随土壤湿度增大而减小^[14-16]。在我国水资源紧缺和灌溉方式粗放的背景下,亏缺灌溉作为一种可有效提高作物水分利用效率的节水灌溉制度,在我国北方地区受到广泛应用。亏缺灌溉下农田效应的研究国内主要集中于棉田和菜地^[17-19],对于小麦作物较少涉及。基于此背景,本文以关中平原冬小麦农田土壤为研究对象,通过设置不同亏水水平,探讨不同时期亏水量对麦地温室气体排放的影响,结合作物产量和净增温潜势等指标综合评价不同处理的经济效应和环境效应,通过优化灌溉管理措施,以期农业减排提供科学依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2016 年 10 月~2017 年 6 月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院试验场 (108°04'E, 34°18'N, 海拔 521 m) 进行,属温带大

陆性季风气候。试验区年均温度 12.5℃,年均降水量 609 mm,年均蒸发量 1500 mm,全年无霜期 212 d,降水多集中在 6~9 月。土壤质地为中壤土,1 m 土层田间持水量为 23%~24% (重量含水率),凋萎含水量为 11%~12% (重量含水率),平均干容重为 1.4 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

供试作物为冬小麦,品种为“小偃 22 号”,于 2016 年 10 月 23 日播种,2017 年 6 月 7 日收获,全生育期共 217 d。行距为 25 cm,密度为 165 kg·hm⁻²。冬小麦的主要物候期为:苗期(8~57 d)、越冬期(58~119 d)、返青至拔节期(120~142 d)、拔节至抽穗期(143~173 d)、抽穗至灌浆期(174~198 d)、灌浆至成熟期(199~217 d)。冬小麦全生育期各处理施肥一致,均只施基肥,于 2016 年 10 月 22 日混施尿素和磷酸二铵 (N:246 kg·hm⁻²、P₂O₅:270 kg·hm⁻²)。试验设计为小区试验,在遮雨棚下的混凝土测坑内进行,测坑面积为 6.67 m² (2.13 m×3.13 m),共 20 个,其中 2 个测坑内安装有大型称重式蒸渗仪。

本试验分别在越冬期、拔节至抽穗期和抽穗期至灌浆期这 3 个重要生育阶段进行灌水水平处理,灌水量以称重式蒸渗仪实测蒸散量 (evapotranspiration, ET) 为标准,按 100% (充分灌水),80% (中度水分亏缺) 和 60% (重度水分亏缺) 共 3 个水平实施灌水。本试验采用 3 因素 (生育期) 3 水平 (灌水水平) 的正交试验设计,按照多因素不完全实施方案设计规则 (减少试验处理且能分析各生育期不同亏水水平的效应) 在 L₉ (3³) 正交表内选取 6 个处理组合 (表 1),每个处理 3 个重复,一个测坑作为一个重复,共计 18 个测坑,按随机区组排列,另外 2 个安装称重式蒸渗仪的试验小区均为充分灌溉水平。冬小麦整个生长季分别于 69、138 和 176 d 进行 3 次灌溉,充分灌水水平的灌水量分别为 74.96、67.47 和 85.46 mm,灌溉方法为漫灌方式。为保证冬小麦顺利出苗,试验各小区在播种前 (2016 年 10 月 20 号) 均灌水 44.98 mm。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤温室气体采集

采用静态箱-气相色谱法对土壤 CO_2 、 N_2O 和

表 1 2016~2017 年冬小麦不同水分处理¹⁾

处理	灌水量(以 ET 计)/%		
	越冬期	拔节至抽穗	抽穗至灌浆
CK	100	100	100
T1	80	80	80
T2	60	60	60
T3	80	100	80
T4	80	80	60
T5	60	80	100

1) ET 为全生育期充分灌水小区内的蒸渗仪实测 2 次灌水之间的蒸散量

CH₄ 气体进行原位监测. 静态箱由箱体和底座组成, 箱体规格是 45 cm × 45 cm × 45 cm, 由厚 6 mm 的不透光的聚氯乙烯材料制成, 箱体外表面用海绵与锡箔纸包裹, 防止取样时因太阳光照射导致箱体温度发生剧变, 箱体顶部安装小风扇用于搅拌空气, 从而保证箱体内的气体均匀. 静态箱底座 (50 cm × 50 cm × 50 cm) 在播种时埋设于小区中央, 直到冬小麦收获, 底座不罩作物, 每次取样前去除底座内的杂草. 底座附有凹槽, 采集气体样品时, 将静态箱箱体放置在凹槽内, 并用水密封. 气体采样从播种 1 d 后开始, 除越冬期外, 冬小麦整个生育期每 7~10 d 采集一次气体, 如遇施肥或灌水, 采样频率增加为 2~3 d 一次. 气体取样时间分别在 10:00、10:10、10:20 和 10:30 利用带有三通阀的 50 mL 注射器进行 4 次气体采集, 每次取气 40 mL; 气体采集时记下安插在箱体顶部水银温度计的温度, 用以计算气体排放通量. 气体采集后立即带回实验室用安捷伦气相色谱仪分析仪测定 (Agilent Technologies 7890A GC System, America) 气体浓度, 气体排放通量计算公式为^[20]:

$$F = \rho \cdot h \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为 CO₂、N₂O 或 CH₄ 气体排放通量, mg·(m²·h)⁻¹、μg·(m²·h)⁻¹ 或 mg·(m²·h)⁻¹; ρ 是标准状态下气体密度, g·cm⁻³; h 为采样箱高度, m; dc/dt 为箱内气体浓度变化率, mg·(m³·h)⁻¹、μg·(m³·h)⁻¹ 和 mg·(m³·h)⁻¹; T 为采样时箱内温度, °C.

冬小麦全生育期内土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄ 排放总量通过下式计算:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i + X_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中, Y 为土壤 CO₂、N₂O 或 CH₄ 的累积排放量, kg·hm⁻²; X 为 CO₂、N₂O 或 CH₄ 排放通量, mg·(m²·h)⁻¹、μg·(m²·h)⁻¹ 或 mg·(m²·h)⁻¹; i 为

第 i 次测定; $(t_{i+1} - t_i)$ 为相邻两次测定间隔天数; n 为测定次数.

1.3.2 土壤温度和水分测定

采集气样时, 利用安插在静态箱底座旁边的地温计同步监测土壤 5 cm 和 10 cm 深处地温, 取二者平均值作为 0~10 土层的平均温度. 取土样采用对角线取样法, 用土钻在小区首、中、末端采集 0~10 cm 土壤样品充分混合后作为该小区的土样, 用烘干法 (105°C 下烘 12 h) 测定土壤水分, 并转化为土壤孔隙度含水率 (water filled pore space, WFPS, %) ^[21].

1.3.3 小麦生物量及小麦产量

小麦成熟期采集各小区长势均一、能够代表小区整体生长水平的小麦 30 株^[22], 擦拭表面的尘污后, 放入档案袋中, 先在烘箱 105°C 下杀青 15~30 min, 再在 75°C 恒温烘干至恒重, 用 1/100 电子天平称重, 得小麦地上部分生物量. 小麦地下生物量的获取采用的是根冠比法, 通过已建立的地上与地下生物量的比例关系来估测地下生物量如公式 (3) 所示^[23].

$$B_R = (B_G + B_S) \times R \quad (3)$$

式中, B_G 和 B_S 为作物籽粒重和残余生物量, kg·hm⁻²; $(B_G + B_S)$ 为地上部分生物量, 由田间取样计算得到, kg·hm⁻²; R 是小麦根与地上部分生物量的比率, 取 $R = 0.14$ ^[24].

小麦收获后, 在每个小区取长势均匀 1 m² 的样点进行单独收割, 风干脱粒后称取籽粒质量并计算产量, 以每公顷小麦产量 (kg·hm⁻²) 表示.

1.3.4 作物水分利用效率 (WUE)

土壤贮水量计算公式为:

$$W = 10\gamma h\theta \quad (4)$$

式中, W 为土壤贮水量, mm; γ 为土壤容重, g·cm⁻³; h 为土壤厚度, 100 cm; θ 为土壤含水率, %.

作物耗水量计算公式为:

$$ET_a = I - \Delta W \quad (5)$$

式中, ET_a 为作物耗水量, mm; I 为灌水量, mm; ΔW 为播种前和收获后土壤贮水量的变化.

作物水分利用效率计算式为:

$$WUE = \frac{Y}{10ET} \quad (6)$$

式中, Y 为作物产量, kg·hm⁻².

1.3.5 综合增温潜势 (net GWP)

增温潜势是用来衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响, 农田综合增温潜势采用公式 (7) 计算:

$$\text{net GWP} = \text{GWP}_{\text{NPP}} - \text{GWP}_{\text{CH}_4\text{G}_s} - \text{GWP}_{\text{input}} + \text{GWP}_{\Delta\text{SOC}} \quad (7)$$

式中, net GWP 为综合增温潜势, 以 CO_2 当量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 来表示, 当 net GWP > 0 时, 表现为温室气体的汇, 反之为源. GWP_{NPP} 、 $\text{GWP}_{\text{GHG}_S}$ 和 $\text{GWP}_{\text{input}}$ 分别见公式 (8) ~ (10), $\text{GWP}_{\Delta\text{SOC}}$ 是试验前后有机碳变化的增温潜势 (此项短期试验可忽略).

$$\text{GWP}_{\text{NPP}} = (\text{B}_G + \text{B}_S + \text{B}_R) \times 0.45 \times 44/12 \quad (8)$$

式中, GWP_{NPP} 为作物碳截存的增温潜势, 以 CO_2 排放量计, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 0.45 是生物量转化为碳含量时的转化系数^[25]; 44/12 是 C 转化为 CO_2 时的系数.

$$\text{GWP}_{\text{GHG}_S} = F_{\text{CO}_2} + F_{\text{CH}_4} \times 25 + F_{\text{N}_2\text{O}} \times 298 \quad (9)$$

式中, $\text{GWP}_{\text{GHG}_S}$ 为农田土壤直接排放 CO_2 、 N_2O 或 CH_4 温室气体的增温潜势, 以 CO_2 排放量计, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在 100 年的时间尺度上, 单位质量 CH_4 和 N_2O 的增温潜势分别为 CO_2 的 25 和 298 倍^[26]. 其中, F_{CO_2} 为土壤中异养呼吸累积排放量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; F_{CH_4} 为土壤 CH_4 累积排放量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $F_{\text{N}_2\text{O}}$ 为土壤 N_2O 累积排放量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

$$\text{GWP}_{\text{input}} = \sum I_n \times C_n \quad (10)$$

式中, $\text{GWP}_{\text{input}}$ 为农事活动投入引起的间接增温潜势, 包括各种农事活动 (机械、肥料、农药、灌溉设备) 等过程中所排出的温室气体等^[27]. 其中, I_n 和 C_n 分别为第 n 种物资的用量和 CO_2 等当量排放系数. 本试验由于翻地、播种、收获等农业措施都采用人工方式, 故机械燃油用量为 0, 农业物资的 CO_2 排放系数分别为: 灌水 $1.29 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[28]、氮肥 (N) $3.59 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[27]、磷肥 (P) $0.61 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[27,29].

温室气体强度 (greenhouse gas intensity, GHGI) 表示生产单位产量的粮食对气候的影响, 计算公式如下:

$$\text{GHGI} = \frac{\text{net GWP}}{\text{yield}} \quad (11)$$

式中, GHGI 为温室气体强度, 以 CO_2 排放量计, ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$); net GWP 为全球增温潜势, ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); yield 为小麦产量, ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

1.3.6 数据分析

应用 SPSS 16.0 中的方差分析 (ANOVA) 和偏相关分析对数据进行处理, 单因素方差分析先进行“方差同质性检验”, 方差相等时的多重比较采用 Least-significant difference (LSD) 法完成. 采用 OriginPro 8.5 绘图.

2 结果与分析

2.1 亏缺灌溉处理下冬小麦土壤温室气体排放特征

2.1.1 土壤 CO_2 排放特征

不同处理土壤 CO_2 排放通量在小麦全生长季

中具有相似的变化趋势 (图 1), 大致呈“U”形, 与土壤温度变化趋势大体一致 (图 2), 在全生育期出现双峰值. 土壤 CO_2 排放通量的主峰值出现在 200 d (灌浆期), 以 CK 处理最高 [$188.66 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], T1、T2 和 T4 处理较 CK 处理分别

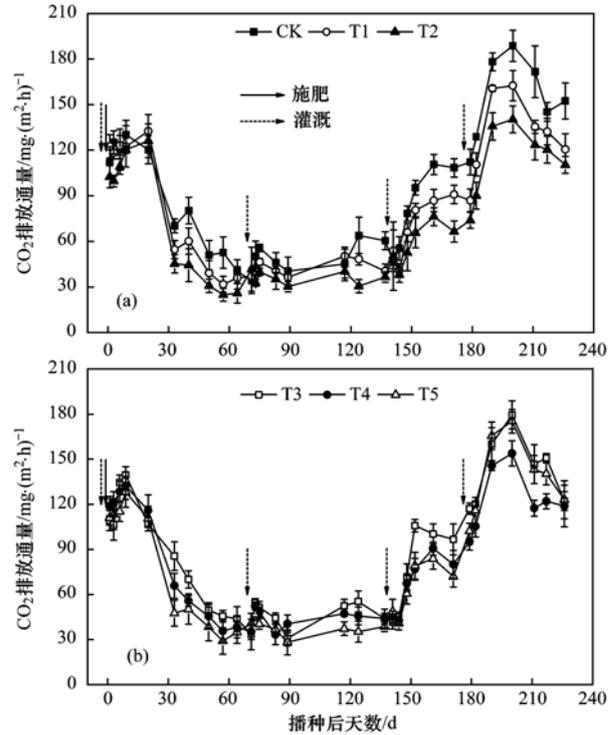


图 1 小麦生长季不同处理土壤 CO_2 排放通量

Fig. 1 Soil CO_2 flux under different treatments during the whole wheat growing season

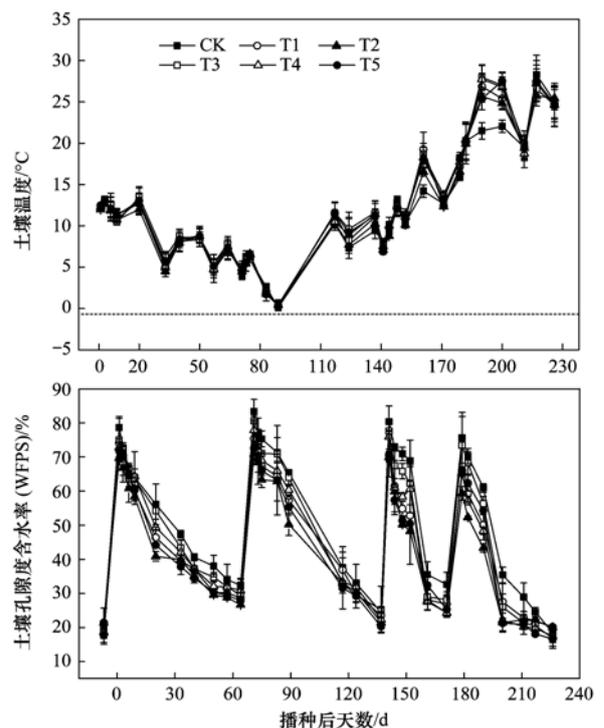


图 2 小麦生长季土壤温度和 WFPS 变化

Fig. 2 Soil temperature and WFPS changes in wheat growing season

显著减小 13.89%、25.67%、18.45% ($P < 0.05$), T3 和 T5 处理较 CK 处理分别减少 4.88%、7.05%, 差异性不显著 ($P > 0.05$). 不同处理次峰值出现的时间稍有差异, CK、T3、T4 和 T5 均出现在 9 d, T1 和 T2 处理均出现在 20 d, 次峰值范围为 $126.24 \sim 139.57 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 处理间无显著性差异 ($P > 0.05$). 在 58~119 d(越冬期), 麦地土壤 CO_2 排放处于全生育期低谷, 维持在 $25.86 \sim 52.32 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 范围内.

在冬小麦灌溉后, 各处理土壤 CO_2 排放通量大致呈增加趋势, 有些处理出现排放小峰值. 69 d(越冬期)灌水后, CK、T1 和 T2 处理土壤 CO_2 排放通量小峰值出现在 75 d, T3、T4 和 T5 出现在 73 d, 以 CK 处理最高 [$55.71 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], T1、T2 和 T5 处理较 CK 处理显著减小了 16.61%、28.33% 和 16.06% ($P < 0.05$), T3、T4 处理与 CK 处理减小了 2.19%、6.14%, 无显著性差异 ($P > 0.05$). 在 138 d(拔节至抽穗期)灌水后, T1、T2、T4 和 T5 均在 141 d 出现排放小峰值, CO_2 排放通量分别达到 53.94、50.41、45.28 和 $48.77 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 且处理间无显著性差异 ($P > 0.05$), 而未监测到 CK 和 T3 处理的排放小峰值. 在 176 d(抽穗至灌浆期)灌溉后, 全部处理均未监测到 CO_2 排放小峰值.

冬小麦各生育阶段 CO_2 平均排放通量如表 2 所示. 越冬期(58~119 d)是冬小麦季土壤 CO_2 平均排放量最低的时期, 以 CK 处理最高 [$44.69 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 轻度水分亏缺处理 T1、T3 和 T4

较 CK 分别减少了 7.41%、2.73% 和 6.71%, 但无显著性差异 ($P > 0.05$), 重度水分亏缺处理 T2 和 T5 土壤 CO_2 平均排放量分别较 CK 处理显著减少了 25.22%、23.41% ($P < 0.05$), 且 T2 与 T5 处理间无显著性差异 ($P > 0.05$). 返青至拔节期(120~142 d), 各处理土壤 CO_2 平均排放通量开始增大, CK 处理显著高于其他处理 [$60.21 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], T1、T2、T3、T4、T5 较 CK 处理分别显著降低了 25.63%、41.89%、17.97%、23.92%、38.50% ($P < 0.05$); 拔节至抽穗期(143~173 d), 土壤 CO_2 排放通量较大, 以 CK 处理最高 [$97.39 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 处理 T3 比 CK 处理减少了 5.68%, 但差异性不显著 ($P > 0.05$). 此阶段轻度亏水处理 T1、T4 和 T5 比 CK 处理分别显著减少 18.52%、20.26% 和 24.91% ($P < 0.05$), 重度亏水处理 T2 比充分供水处理 CK 显著减少 33.39% ($P < 0.05$), 且轻度亏水处理与重度亏水处理间也存在显著性差异 ($P < 0.05$). 抽穗至灌浆期(174~198 d), 土壤 CO_2 平均排放量达到最大, 充分供水 CK 处理最高 [$174.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], T1、T2、T3、T4 和 T5 处理比 CK 处理分别显著降低 13.66%、27.31%、6.20%、18.30% 和 8.87% ($P < 0.05$); 灌浆至成熟期(199~217 d), 土壤 CO_2 平均排放量略有下降, T1、T2 和 T4 比 CK 分别显著降低了 15.59%、23.77% 和 22.45% ($P < 0.05$). 不同处理下, 冬小麦土壤 CO_2 排放通量均值在各生育阶段表现为: 抽穗至灌浆期 > 灌浆至成熟期 > 拔节至抽穗期、苗期 > 越冬期、返青至拔节期.

表 2 冬小麦各生育阶段土壤温室气体 (CO_2 、 N_2O 和 CH_4) 平均排放通量

Table 2 Mean values of greenhouse gas fluxes (CO_2 , N_2O , and CH_4) during winter wheat season

温室气体	处理	苗期	越冬期	返青至拔节	拔节至抽穗	抽穗至灌浆	灌浆至成熟
$\text{CO}_2/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	CK	91.13a	44.69a	60.21a	97.39a	174.06a	160.81a
	T1	83.63a	41.38a	44.78b	79.35b	150.29c	135.74cd
	T2	74.40b	33.42b	34.99c	64.87c	126.52e	122.58e
	T3	89.73a	43.47a	49.39b	91.86a	163.27b	148.39ab
	T4	84.25a	41.69a	45.81b	77.66b	142.21d	124.71de
	T5	75.90b	34.23b	37.03c	73.13b	158.62b	143.42ab
$\text{N}_2\text{O}/\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	CK	102.84a	33.02a	38.06a	53.15a	65.55a	51.27a
	T1	94.41a	28.10ab	33.48ab	43.23b	55.92b	42.88bc
	T2	95.83a	24.23c	28.96b	38.84c	47.18c	38.88c
	T3	101.03a	30.24a	34.34ab	51.11a	59.55b	45.94ab
	T4	98.74a	29.99a	34.09ab	43.82b	49.24c	39.56c
	T5	94.35a	24.94bc	31.27b	44.15b	56.22b	46.96ab
$\text{CH}_4/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	CK	-20.89a	-18.24a	-24.12a	-19.99a	-18.97a	-40.69a
	T1	-26.25a	-27.59b	-33.21b	-34.79b	-35.62c	-53.82bc
	T2	-33.61b	-32.76c	-38.75c	-43.28c	-40.56d	-62.56d
	T3	-21.05a	-25.61b	-25.25a	-22.52a	-27.39b	-48.26b
	T4	-32.01b	-25.83b	-30.72b	-35.43b	-41.02d	-55.45c
	T5	-33.60b	-33.03c	-37.50c	-37.12b	-31.22bc	-53.04bc

2.1.2 土壤 N_2O 排放特征

图3为冬小麦全生育期土壤 N_2O 的排放动态. 土壤 N_2O 的排放通量表现为生育前期较高, 之后急速下降. 在9 d(苗期), 各处理土壤 N_2O 排放通量达到全生育期排放通量的主峰值, 以T3处理排放通量最大[$148.15 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], CK、T1、T2、T4和T5较T3处理分别降低了8.44%、11.81%、7.20%、11.83%和6.63%, 处理间无显著性差异($P>0.05$); 随后土壤 N_2O 排放通量下降至64 d的排放低谷, 此时CK、T1、T2、T3、T4和T5处理土壤 N_2O 排放通量分别达到31.06、20.69、10.36、16.39、18.97和23.28 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 在64~117 d, 土壤 N_2O 排放通量一直在较小范围内波动[$10.36\sim 38.95 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]. 在124~200 d(返青至灌浆期), 土壤 N_2O 排放通量缓慢增加并逐渐趋于稳定. 自211 d后, 土壤 N_2O 吸收通量呈下降趋势.

各处理土壤 N_2O 排放通量在冬小麦灌溉后大致呈增加趋势, 并会出现短暂小峰值, 排放峰值大体以充分灌水的CK处理最高. 在69 d(越冬期)灌水后, 充分灌溉处理CK、T1、T2、T3、T4和T5处理分别在75、71、73、75、73和73 d达到排放小峰值, 且CK处理最高[$38.95 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], 其他处理比CK处理分别下降了5.34%、6.03%、6.73%、11.41%和21.72%, 且无显著性差异($P>$

0.05). 在138 d(拔节至抽穗期)灌水后, 处理T2在144 d和处理T3、T4、T5在141 d出现排放小峰值, T2、T3、T4和T5处理 N_2O 排放通量分别为: 38.37 、 43.54 、 45.17 和 $40.44 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 且处理间无显著性差异($P>0.05$), 而未监测到CK和T1处理的排放小峰值. 在176 d(抽穗至灌浆期)灌溉后, 全部处理均在179 d监测到小峰值, 以CK处理最高[$65.52 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], T1、T2和T4处理分别较CK处理显著减小了19.99%、30.32%和22.48% ($P<0.05$), T3和T5处理比CK处理减少了7.61%、13.73%, 但差异性不显著($P>0.05$).

苗期(8~57 d), 各处理土壤 N_2O 平均排放通量均值无显著性差异($P>0.05$); 越冬期(58~119 d), 以充分灌溉CK处理土壤 N_2O 平均排放通量最高[$33.02 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], 轻度水分亏缺处理T1、T3和T4比处理CK分别减小了14.90%、8.42%和9.18%, 但无显著性差异($P>0.05$), 重度水分亏缺处理T2和T5比CK处理显著减小26.62%和24.47% ($P<0.05$). 返青至拔节期(120~142 d), CK处理土壤 N_2O 平均排放通量为 $38.06 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, T1、T3和T4处理比CK处理降低了12.03%、9.77%和10.43%, 但差异性不显著($P>0.05$), T2和T5处理比CK处理显著降低了23.91%和17.84% ($P<0.05$); 拔节至抽穗期(143~173 d), T3处理比CK处理减小了3.84%, 但无显著差异($P>0.05$), 轻度亏水处理T1、T4和T5比CK处理分别显著减少18.66%、17.55%和16.93% ($P<0.05$), 重度亏水处理T2比处理CK显著减少26.92% ($P<0.05$), 轻度亏水和重度亏水处理间亦有显著性差异($P<0.05$); 抽穗至灌浆期(174~198 d), T2、T4处理为重度缺水处理, 土壤 N_2O 平均排放量显著低于其他处理($P<0.05$), 比CK处理显著减少30.16%、27.11% ($P<0.05$); 灌浆至成熟期(199~217 d), 处理CK土壤 N_2O 平均排放量最高, 但与T3、T5处理无显著性差异($P>0.05$), T1、T2和T4处理分别比CK处理土壤 N_2O 平均排放量显著降低16.36%、24.17%和22.84% ($P<0.05$). 不同处理下, 冬小麦土壤 N_2O 排放通量均值在各生育阶段表现为: 苗期>抽穗至灌浆期>拔节至抽穗期、灌浆至成熟期>越冬期、返青至拔节期.

2.1.3 土壤 CH_4 排放特征

如图4所示, 不同处理土壤 CH_4 排放通量在整个冬小麦生长季呈相似的变化规律, 秋冬季较小, 春夏季吸收通量较大. 多数情况下 CH_4 吸收通量以CK处理最低, T2处理最高.

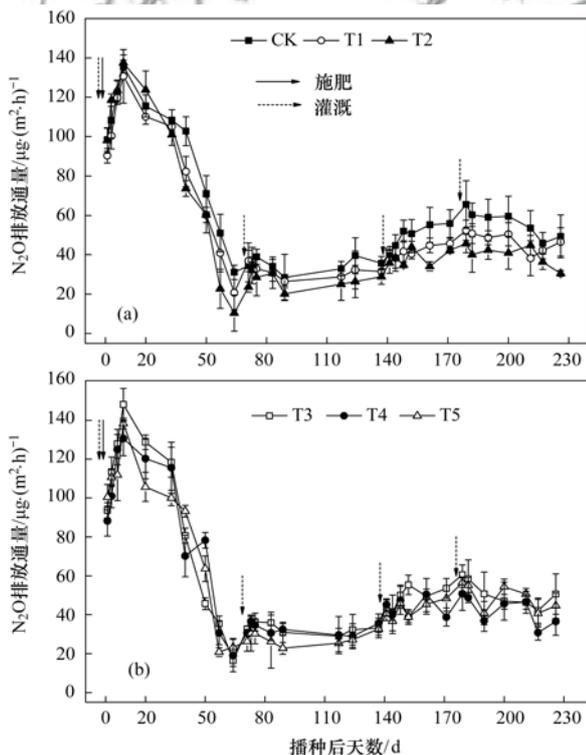
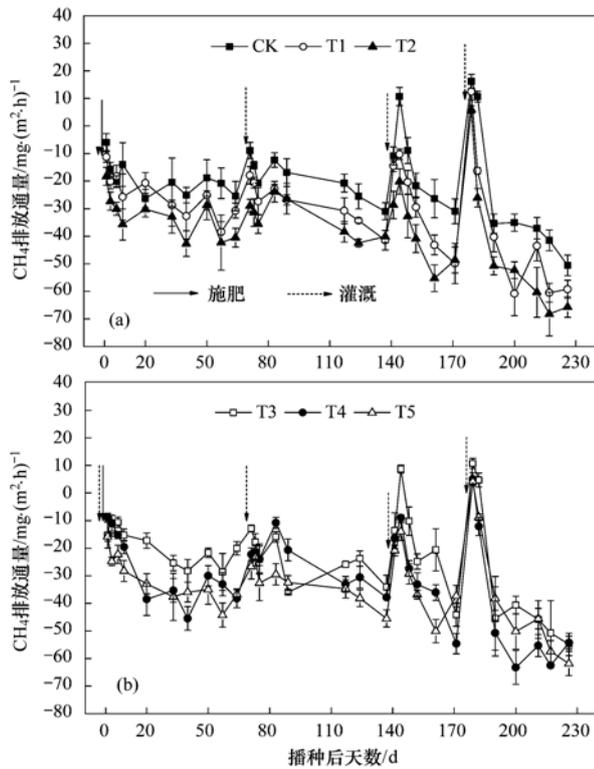


图3 小麦生长季不同处理 N_2O 季节性排放通量

Fig. 3 Soil N_2O fluxes under different treatments during the whole wheat growing season

图4 小麦生长期不同处理 CH_4 排放通量Fig. 4 Soil CH_4 fluxes under different treatments during the whole wheat growing season

在冬小麦灌溉后, 土壤 CH_4 吸收通量迅速减小, 以充分供水 CK 处理减小的最为明显, 高水分处理甚至出现排放特征. 在 69 d (越冬期) 灌水后, 各处理土壤 CH_4 吸收速率迅速降低, 以 CK 处理最低 [$8.92 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], T1、T2、T4 和 T5 比 CK 处理显著增加了 100.34%、224.96%、141.71% 和 162.94% ($P < 0.05$), T3 处理较 CK 处理增加 44.42%, 无显著性差异 ($P > 0.05$). 在 138 d (拔节至抽穗期) 灌水后, CK 和 T3 处理在 114 d 时出现了土壤 CH_4 排放现象, 排放量分别为 $10.68 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $8.68 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 之后土壤 CH_4 吸收通量呈上升趋势, 且变化较剧烈. 在 176 d (抽穗至灌浆期) 灌溉后, 全部处理均在 179 d 时监测到 CH_4 排放特征, 以 CK 处理排放量最高 [16.19

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], T1 比 CK 处理减小了 22.72% ($P > 0.05$), T2、T3、T4 和 T5 处理较 CK 处理显著减小了 63.19%、33.81%、69.07% 和 74.23% ($P < 0.05$). 从 200 d 至冬小麦收获, 各处理土壤 CH_4 吸收通量大体呈增加趋势.

苗期、越冬期 (8 ~ 119 d), 土壤 CH_4 平均吸收通量均较小; 返青至拔节期 (120 ~ 142 d), 与处理 CK 相比, 处理 T1、T2、T4 和 T5 土壤 CH_4 平均吸收通量分别增加 37.69%、60.66%、27.36% 和 55.47% ($P > 0.05$), 处理 T3 较 CK 处理增加 4.68%, 但无显著性差异 ($P > 0.05$); 拔节至抽穗期 (143 ~ 173 d), 充分供水、轻度缺水、重度缺水的处理间土壤 CH_4 平均吸收量均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 与充分供水 CK 处理相比, 轻度亏水处理 T1、T4 和 T5 显著增加 74.04%、77.24% 和 85.69% ($P < 0.05$), 重度亏水处理 T2 显著增加 116.51% ($P < 0.05$); 抽穗至灌浆期 (174 ~ 198 d), 其他处理土壤 CH_4 平均吸收量均比 CK 处理显著增加, 以 T2 和 T4 增加最大, 分别增加 113.81% 和 116.24% ($P < 0.05$). 灌浆至成熟阶段 (199 ~ 217 d), 土壤 CH_4 平均吸收量最大, T1、T2、T3、T4 和 T5 比 CK 处理显著增加 32.27%、53.75%、18.60%、36.27% 和 30.25% ($P < 0.05$). 不同处理下, 冬小麦土壤 CH_4 排放通量均值在各生育阶段表现为: 灌浆至成熟期 > 返青至拔节期、拔节至抽穗期、抽穗至灌浆期 > 苗期、越冬期.

2.2 亏缺灌溉处理下土壤温室气体排放量

不同亏缺灌溉处理土壤 CO_2 和 N_2O 排放总量分别在 $3\ 655.96 \sim 4\ 939.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2\ 627.36 \sim 3\ 204.27 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内变化, CH_4 吸收总量在 $1\ 187.22 \sim 2\ 086.92 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 间变化 (表 3), 表现为小麦地是土壤 CO_2 和 N_2O 的排放源, 是 CH_4 的汇. 处理 CK、T1 和 T2 间土壤温室气体排放 (吸收) 总量有显著性差异 ($P < 0.05$), 表明亏缺灌溉能显著降低小麦季土壤 CO_2 和 N_2O 排放量, 增加 CH_4 吸收量.

表3 不同处理温室气体排放总量及增温潜势

Table 3 Amount of GHGs emissions and net GWP under different irrigation treatment

处理	温室气体排放总量			未计入籽粒和秸秆		计入籽粒和秸秆	
	CO_2 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	N_2O / $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	CH_4 / $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	net GWP _L / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	GHGI / $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-2}$	net GWP _S / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	GHGI / $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-2}$
CK	4 939.14a	3 204.27a	-1 187.22a	-4 268.63c	-0.688ab	16 462.66a	2.650ab
T1	4 281.05c	2 813.43c	-1 738.87c	-3 838.95ab	-0.709ab	14 288.41b	2.630ab
T2	3 655.96e	2 627.36d	-2 086.92e	-3 723.38a	-0.892c	10 264.40c	2.446c
T3	4 664.78b	3 023.82b	-1 418.43b	-3 991.33b	-0.660a	16 305.97a	2.685a
T4	4 175.19cd	2 834.66c	-1 821.18cd	-3 977.74b	-0.812bc	12 413.67b	2.526bc
T5	4 073.92d	2 770.68c	-1 927.19d	-3 776.66ab	-0.747ab	13 193.40b	2.592ab

不同亏缺灌溉处理 CO_2 排放量表现为: $\text{CK} > \text{T3} > \text{T1} > \text{T4} > \text{T5} > \text{T2}$. 其中, CK 和 T3 处理排放量显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 且二者之间存在显著性差异 ($P < 0.05$). 与 CK 相比, T1 、 T2 、 T4 和 T5 处理下排放总量分别减少了 13.32%、25.98%、15.47% 和 17.52%. 全季 N_2O 排放总量表现为 $\text{CK} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T1} > \text{T5} > \text{T2}$, 除 T1 、 T4 、 T5 这 3 个处理间无显著性差异 ($P > 0.05$) 外, 其他处理间均达到显著性差异 ($P < 0.05$). 对于农田土壤对大气 CH_4 的吸收, 表现为随着灌溉量增大, 土壤对 CH_4 的吸收通量减少, 不同亏缺灌溉处理 CH_4 的吸收量表现为 $\text{T2} > \text{T4} > \text{T1} > \text{T5} > \text{T3} > \text{CK}$.

2.3 亏缺灌溉处理下 net GWP 及 GHGI

本文把温室气体的净增温潜势分为当季效应 (net GWP_s) 和长远效应 (net GWP_L), 当季效应认为 GWP_{NPP} 是作物全生物量转化为 NPP 的碳量, 长远效应就是考虑到籽粒、秸秆迟早都将分解成 CO_2 回归大气而只计算本季小麦根固碳量, 旨在从不同角度评价不同亏水处理的优劣.

如表 3 所示, 计算小麦农田长远增温效应, 各处理 $\text{net GWP}_L < 0$, 说明在只考虑作物根系碳截获量时, 小麦地是温室气体的排放源. 其中, CK 处理排放温室气体的净增温潜势最大, T1 、 T2 、 T3 、 T4 和 T5 处理较 CK 处理净增温潜势分别下降了 10.07%、12.77%、6.50%、6.81% 和 11.53%, 差异性显著 ($P < 0.05$). T2 、 T4 处理 GHGI 最大, 表明其生产单位产量的粮食对气候的影响最大, CK 处理与 T1 、 T3 、 T5 处理温室气体强度 GHGI 无显著性差异 ($P > 0.05$); 计算小麦农田短期增温效应, 得到各处理的 $\text{net GWP}_s > 0$, 说明在当季效应指标评价下, 小麦地是温室气体的汇. 较 CK 处理, 其他处理净增温潜势均有减少, 以 T2 减少最为显著, 降低了 37.65%, T3 处理与 CK 处理无显著性差异 ($P > 0.05$). T3 处理 GHGI 最高, 但与 CK 、 T1 、 T5 处理无显著性差异 ($P > 0.05$), T2 、 T4 处理 GHGI 最低, 较 CK 处理, 分别降低了 7.70%、4.68%.

2.4 亏缺灌溉处理下冬小麦产量及作物水分利用效率 (WUE)

冬小麦产量及水分利用效率见图 5. 小麦产量以处理 CK 最高, 为 $6210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 处理 T1 、 T2 、 T4 和 T5 冬小麦产量分别比处理 CK 显著降低了 12.56%、32.53%、20.93% 和 18.15% ($P < 0.05$), 在越冬期轻度水分胁迫、拔节至抽穗期和抽穗至灌浆期分别实施充分灌水及轻度水分亏缺的处理 T3 与 CK 处理小麦产量无显著性差异 ($P > 0.05$). 试验表明, 亏缺灌溉会不同程度地影响作物产量, 拔节至抽穗期的灌

水对作物籽粒产量影响最大, 其次为抽穗至灌浆期, 越冬期、播前期灌水对产量影响较小, 在保证小麦需水临界期的水分供应下, 其他对水分亏缺不甚敏感的阶段轻度水分亏缺, 不会对小麦产量产生显著性影响. 本试验中, 处理 T3 获得最大 WUE, 且比 CK 处理显著提高了 10.92% ($P < 0.05$).

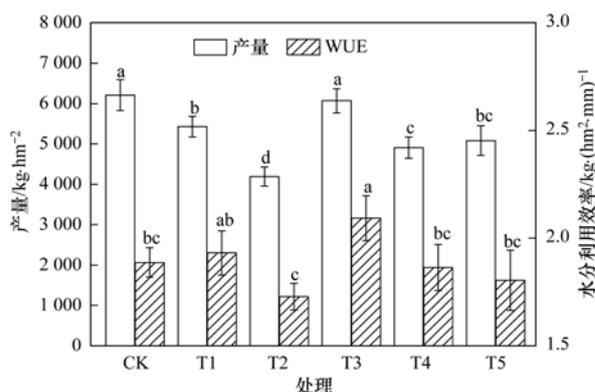


图 5 不同处理下冬小麦产量及水分利用效率

Fig. 5 Crop yield and water use efficiency of winter wheat under different treatments

2.5 冬小麦地温室气体排放与土壤水分和温度间关系

3 种气体 (CO_2 、 N_2O 和 CH_4) 的排放通量与土壤 0~10 cm 的温度和 WFPS 的偏相关关系如表 4 所示. 土壤 CO_2 的排放通量与土壤温度 T 和 WFPS 均呈明显的正相关关系, 且达到极显著水平 ($P < 0.01$); 施肥后土壤 N_2O 的排放通量迅速上升到全生育期最高水平 (图 3), 为精确模拟出土壤 N_2O 排放通量与土壤温度、WFPS 的相关关系, 选择 50~226 d 范围内土壤 N_2O 排放通量波动较小时进行偏相关分析, 土壤 N_2O 的排放通量与土壤温度和 WFPS 均呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$); 土壤 CH_4 的排放通量与土壤温度表现出显著负相关关系 ($P < 0.05$), 而与 WFPS 呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$).

表 4 土壤温室气体 (CO_2 、 N_2O 和 CH_4) 排放通量与土壤温度 T 和 WFPS 的偏相关关系¹⁾

Table 4 Regression correlation between greenhouse gas (CO_2 , N_2O , and CH_4) emission and soil factors (soil temperature and WFPS)

温室气体	$T/^\circ\text{C}$	WFPS/%
$\text{CO}_2/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	0.846**	0.386**
$\text{N}_2\text{O}/\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	0.520**	0.266**
$\text{CH}_4/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	-0.161*	0.710**

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, $n(\text{CO}_2) = 186$, $n(\text{N}_2\text{O}) = 144$, $n(\text{CH}_4) = 186$

3 讨论

3.1 亏缺灌溉对农田土壤 CO_2 排放的影响

农田土壤 CO_2 排放主要源自土壤微生物的呼

吸、土壤有机质的分解、土壤动物的呼吸、植物根系及根际微生物的呼吸^[30]。土壤温度和湿度是影响土壤呼吸排放 CO₂ 的两大主要因素^[31]。土壤温度几乎可以影响呼吸过程的各个方面, 温度较低时, 土壤呼吸速率随温度的升高呈增加趋势, 在 45~50℃ 时达到最大值^[32]。冬小麦生育期的土壤温度大致在 0~28℃, 土壤 CO₂ 排放通量与地温呈正相关关系(表 4), 这与前人研究结果基本符合。土壤水分可促进或抑制根系生长来影响根系呼吸、改变土壤透气性来影响 CO₂ 气体扩散和微生物呼吸, 进而影响土壤 CO₂ 的产生和排放^[32]。灌水量的增加显著促进小麦全生育期土壤 CO₂ 排放量, 充分灌水处理 CK、轻度水分亏缺 T1 和重度水分亏缺 T2 均差异显著($P < 0.05$)(表 3), 这与不少学者的结论一致。例如, Liu 等^[11]的研究发现灌溉处理的土壤 CO₂ 排放强度较不灌水处理有所增加, 宋利娜等^[14]认为充分灌溉强化了土壤 CO₂ 的排放。有研究表明, 在 WFPS 低于某一阈值范围内, 土壤 CO₂ 排放通量与土壤 WFPS 呈正相关关系, 当超过这个阈值后, 由于土壤孔隙减小, 氧气的进入以及生成产物 CO₂ 向大气中扩散都受到严重阻碍, 直接造成 CO₂ 排放通量的减少^[11, 33, 34]。在本研究中, 灌溉后土壤由干变湿, 各处理土壤 CO₂ 排放通量大致呈增加趋势, 偏相关分析得出 CO₂ 排放通量与 WFPS 呈极显著正相关关系($P < 0.05$)(表 4), 但在生育期灌水后频繁监测气体排放时发现, 土壤 CO₂ 排放小峰值出现时间同当次灌溉时间有滞后性, 峰值并未在灌水后立即出现, 灌溉 2~3 d 后监测到高水分处理 CO₂ 排放通量并非全高于中、低水分处理, 这可能是土壤高水分对气体排放产生抑制作用。

本试验中, 冬小麦土壤 CO₂ 排放通量在播种后 20 d 内出现次峰值(图 1), 这与此时土壤温度较高(10℃ 左右)、土壤水分较充足(60% 左右)有关。之后 CO₂ 排放通量出现骤减的现象, 直到越冬期土壤 CO₂ 排放量处于全生育期最低水平, 可能是土壤温度迅速降低(图 2), 微生物活性下降, 导致农田 CO₂ 排放通量减少。2 月下旬小麦开始进入返青期, 土壤温度开始回升, 土壤微生物代谢增强, 土壤 CO₂ 排放通量开始增大。3 月中旬小麦进入生长最旺盛的拔节期, 植物光合作用积累的同化物越来越多地从成熟叶片运输到根端^[35], 根系生物量增大^[36], 代谢加强, 根系分泌物增多, 刺激了微生物的活性, 加快有机质分解速率, 增强了土壤的呼吸作用。抽穗至灌浆期, 随着土壤温度的升高, 土壤水分适宜, 小麦地 CO₂ 排放通量急速增加, 直到灌浆期达到冬小麦排放主峰值。5 月中下旬, 由于土

壤含水量的降低, 根系分泌物减少^[37], 土壤 CO₂ 排放速率减弱。

3.2 亏缺灌溉对农田土壤 N₂O 排放的影响

土壤 N₂O 排放主要来自于土壤微生物进行硝化作用和反硝化作用^[38]。硝化作用是指在好气条件下, NH₃ 或 NH₄⁺ 盐通过硝化微生物的作用被氧化为亚硝酸盐和硝酸盐的过程^[39]。反硝化作用是指在嫌气条件下, 反硝化细菌还原硝酸盐, 释放出 N₂O 或 N₂ 的过程^[39]。影响农田土壤 N₂O 排放的主要因素有施肥措施、土壤湿度(WFPS)和土壤温度等^[19]。

以尿素为主的化学氮肥给作物提供养分的同时不可避免地增加了 N₂O 气体产生的基质, 明显促进了农田土壤 N₂O 的排放^[40]。土壤湿度不仅能够影响硝化、反硝化微生物的活性, 还会影响着 N₂O 在土壤中的运输以及向大气中的扩散^[41]。有研究发现当 WFPS 在 45%~75% 时, 由土壤硝化作用和反硝化作用所产生的 N₂O 含量所占比例相同, N₂O 排放速率最大^[42]。本试验中, 土壤 N₂O 排放通量主峰值出现在施肥并灌溉后 10 d 左右, 分析原因可能有: ①与试验只施基肥密切相关, 施肥后产生 N₂O 气体的底物充足, 土壤微生物活性被提高, 促进了硝化和反硝化作用, 引起 N₂O 排放峰值。②此时 WFPS 维持在 60% 左右, 土壤微生物硝化作用和反硝化作用同时进行, 产生较多的 N₂O, 并且能顺利排入大气中。土壤的干湿变化对 N₂O 排放量的变化具有十分显著的影响, 土壤水分含量较低时的快速湿润作用会极大地促进 N₂O 的排放^[43]。这与本试验结果一致, 冬小麦生育期灌水后, 土壤快速湿润, 营造的相对厌氧环境导致反硝化速率加快, 激发了土壤 N₂O 的排放。土壤温度会影响微生物活性进而影响硝化速率和反硝化速率, 大量研究表明, 土壤温度升高会促进 N₂O 排放^[44, 45], 本研究中土壤 N₂O 排放通量与土壤温度呈极显著正相关($P < 0.05$)。同时, 许多学者监测到 N₂O 交换通量负值的现象, 而关于此现象出现的条件有分歧。Bremner^[46]和 Barton 等^[47]认为在较低矿物氮及较高的土壤含水量条件下有时会出现 N₂O 的吸收, 而王玉英等^[48]却认为土壤处于氮素含量较低的干燥环境中会出现对 N₂O 的吸收现象。而在本研究并未监测到 N₂O 负排放的现象, 在后续的试验中, 会增加采样频率, 观察是否有此现象出现。

有研究表明, 灌溉对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响不仅与灌水总量有关, 还与灌水时间和亏水程度有关, 灌水量对土壤 CO₂、N₂O 排放通量

的影响在小麦旺盛生长期和水热条件较好时期更为明显. 这与杨硕欢等^[49]的研究结果一致.

3.3 亏缺灌溉对农田土壤 CH₄ 排放的影响

微生物的活动决定了土壤 CH₄ 的排放和吸收, 在厌氧环境下, 产 CH₄ 把土壤中含碳有机物分解为 CH₄, 在好氧环境下, CH₄ 又会被 CH₄ 氧化菌氧化^[14]. 有研究证实, 土壤既可以是 CH₄ 的“源”又可能成为“汇”, 这主要决定于甲烷产生菌产生的 CH₄ 和甲烷氧化菌吸收的 CH₄ 间的平衡^[50]. CH₄ 在土壤中的排放和吸收受到施肥、灌溉和土壤理化性质等的影响^[14, 51].

有研究表明, 土壤 CH₄ 排放量随氮肥的施用量增加呈增大趋势^[52], 这是由于尿素在短时间水解后可在土壤中积累大量 NH₄⁺-N, 其作为 CH₄ 产生菌的主要氮源, 增强了 CH₄ 产生菌的丰度和活性^[53], 这解释了 10 月底灌溉施肥后各处理土壤 CH₄ 吸收通量较低的现象. 土壤湿度是影响 CH₄ 排放的关键因子, 本研究中, 亏缺灌溉处理土壤 CH₄ 吸收量显著高于充分灌溉处理 ($P < 0.05$) (表 3), 土壤 CH₄ 的排放通量与土壤 WFPS 呈极显著正相关关系 (表 4), 这与王丙文等^[54]认为土壤水分对麦田甲烷吸收通量呈不显著的负相关关系的观点不一致, 而与赵建波等^[55]和 Adamsen 等^[56]研究结果一致. 在冬小麦全生育期, 各处理土壤大致呈 CH₄ 吸收状态, 而灌溉后, CH₄ 吸收值迅速降低, 高水分处理甚至出现排放现象 (图 4). 前人研究表明, 在 WFPS 较低时, 土壤具有良好的通透性, 抑制了 CH₄ 菌活性, 强化了 CH₄ 氧化菌的活性, 此时土壤是 CH₄ “汇”^[57], 土壤 CH₄ 在 WFPS 高于某一阈值时会从吸收过程转变为排放过程^[58], 是由于高水分营造的厌氧环境强化了产甲烷菌对有机物的分解作用, 削弱了 CH₄ 的氧化过程^[59]. 温度能够直接影响微生物活性, 从而影响土壤 CH₄ 的排放通量^[60], 本研究中, 土壤 CH₄ 排放通量与地温呈显著负相关关系 ($P < 0.05$) (表 4), 与王旭燕等^[44]的研究结果相反, 结论不一致的原因还需要进一步探究.

3.4 亏缺灌溉对净增温潜势 (net GWP) 的影响

在前人研究中, 对计算净初级生产力 (NPP) 有分歧. 有研究认为如果作物秸秆不还田, 那么 GWP_{NPP} 就只包含生产地下部根系时转化为 NPP 的碳量^[14]. 但也有学者认为一年生的作物在生长期内的净固碳作用不可否认, 即使作物秸秆不还田, GWP_{NPP} 也应包含作物全生物量 (籽粒、秸秆、根系) 转化为 NPP 的碳量^[61]. 本文综合两种理论分别估算 net GWP, 若考虑秸秆、籽粒的固碳, 则 net

GWP_s > 0, 表明小麦田是温室气体的汇, 灌溉会增加土壤对汇效应, 原因是灌水可以提高生物量, 增加了作物的固碳量; 若认为秸秆、籽粒中的碳最终均以 CO₂ 形式排向大气, 则 net GWP_L < 0, 表明麦地是农田温室气体的源, 而充分灌溉处理显著增强了麦田源效应. 两种计算评价方法得到的结果截然相反, 这表明麦田籽粒和秸秆的截碳量较大程度地影响了农田温室效应, 这与闫翠萍等^[27]和刘巽浩等^[61]的研究结果一致. 所以, 从环境效应考虑, 农田轮作中可以采用秸秆还田的方式, 把秸秆中的碳固定到土壤和作物中, 减少农田生态系统温室气体对大气的排放. 综合考虑亏缺灌溉对冬小麦各生育期温室气体平均排放通量和 net GWP 的影响对合理制定冬小麦灌溉、耕作制度, 在保证小麦一定产量下做到农田生态系统节能减排具有指导意义.

4 结论

(1) 不同灌水量对冬小麦全生育期土壤温室气体排放量有较明显影响, 亏缺灌溉可显著降低土壤 CO₂、N₂O 排放量 ($P < 0.05$), 而显著增大 CH₄ 吸收量 ($P < 0.05$).

(2) 拔节至抽穗期、抽穗至灌浆期的灌水对小麦地 CO₂、N₂O 排放影响最为强烈, 也对冬小麦产量产生较大影响. 小麦旺盛生长时期的亏缺灌溉会降低全生育期温室气体的排放量但同时会带来不同程度地减产. 本研究结果表明, 从环境效应和经济效应综合考虑, T3 处理 net GWP_L 较低、固碳量较高, 而且无明显减产, 故 T3 处理更有利于关中平原冬小麦的保产节水减排.

参考文献:

- [1] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). Climate change 2013: the physical science basis. final draft underlying scientific-technical assessment [R/OL]. <https://www.hanspub.org/reference/ReferencePapers.aspx?ReferenceID=123610>, 2013-10-30.
- [2] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273. Dong H M, Li Y E, Tao X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 269-273.
- [3] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 203-209. Zhang M Y, Wei Y H, Kong F L, et al. Effects of tillage practices on soil carbon storage and greenhouse gas emission of farmland in North China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 203-209.
- [4] 黄坚雄, 陈源泉, 刘武仁, 等. 不同保护性耕作模式对农田的温室气体净排放的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(14): 2935-2942. Huang J X, Chen Y Q, Liu W R, et al. Effect on net greenhouse

- gases emission under different conservation Tillages in Jilin province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(14): 2935-2942.
- [5] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(11): 216-224.
- Qin X B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Effect of tillage and rice residue return on CH₄ and N₂O emission from double rice field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(11): 216-224.
- [6] 黄睿, 高明, 黎嘉成, 等. 秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4694-4704.
- Huang R, Gao M, Li J C, *et al.* Effect of straw residues in combination with reduced fertilization rate on greenhouse gas emissions from a vegetable field [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4694-4704.
- [7] Zhang J, Hang X N, Lamine S M, *et al.* Interactive effects of straw incorporation and tillage on crop yield and greenhouse gas emissions in double rice cropping system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **250**: 37-43.
- [8] Wang Z B, Chen J, Mao S C, *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions of chemical fertilizer types in China's crop production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **141**: 1267-1274.
- [9] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. *中国农业气象*, 2002, **23**(4): 47-52.
- Xie J F, Li Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2002, **23**(4): 47-52.
- [10] 张西超, 叶旭红, 韩冰, 等. 灌溉方式对设施土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(10): 1487-1496.
- Zhang X C, Ye X H, Han B, *et al.* Effects of irrigation methods on emissions of greenhouse gases from facilities soil [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(10): 1487-1496.
- [11] Liu X Z, Wan S Q, Su B, *et al.* Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2002, **240**(2): 213-223.
- [12] 梁东丽, 同延安, Emteryd O, 等. 灌溉和降水对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, **8**(3): 298-302.
- Liang D L, Tong Y A, Emteryd O, *et al.* Effect of irrigation and rainfall on the N₂O losses in dryland [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, **8**(3): 298-302.
- [13] 郑欠, 丁军军, 李玉中, 等. 土壤含水量对硝化和反硝化过程 N₂O 排放及同位素特征值的影响 [J]. *中国农业科学*, 2017, **50**(24): 4747-4758.
- Zheng Q, Ding J J, Li Y Z, *et al.* The effects of soil water content on N₂O emissions and isotopic signature of nitrification and denitrification [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(24): 4747-4758.
- [14] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(3): 297-307.
- Song L N, Zhang Y M, Hu C S, *et al.* Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(3): 297-307.
- [15] 刘全全, 王俊, 陈荣荣, 等. 黄土高原冬小麦田土壤 CH₄ 通量对人工降水的短期响应 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 140-146.
- Liu Q Q, Wang J, Chen R R, *et al.* Short-term response of soil CH₄ flux to simulated precipitation in a winter wheat field on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 140-146.
- [16] Minamikawa K, Sakai N. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **107**(4): 397-407.
- [17] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 控制灌溉对稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放及温室效应的影响 [J]. *水科学进展*, 2010, **21**(2): 235-240.
- Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, Influence of controlled irrigation on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect [J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(2): 235-240.
- [18] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征 [J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(3): 111-117.
- Chen H, Hou H J, Cai H J, *et al.* Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(3): 111-117.
- [19] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N₂O 排放的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(16): 127-134.
- Du Y D, Zhang Q, Cui B J, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling on soil N₂O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(16): 127-134.
- [20] Adviento-Borbe M A A, Haddix M L, Binder D L, *et al.* Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems [J]. *Global Change Biology*, 2010, **13**(9): 1972-1988.
- [21] Bateman E J, Baggs E M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **41**(6): 379-388.
- [22] 南京农学院. 土壤农化分析 [M]. 北京: 农业出版社, 1980. 242-244.
- [23] Zhang X Q, Pu C, Zhao X, *et al.* Tillage effects on carbon footprint and ecosystem services of climate regulation in a winter wheat-summer maize cropping system of the North China Plain [J]. *Ecological Indicators*, 2016, **67**: 821-829.
- [24] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA [J]. *Journal of Crop Improvement*, 2009, **23**(4): 332-350.
- [25] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, *et al.* Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000 [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(9): 1341-1350.
- [26] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [27] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, **24**(6): 704-715.
- Yan C P, Zhang Y M, Hu C S, *et al.* Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, **24**(6): 704-715.

- [28] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, *et al.* Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1584-1598.
- [29] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **91**(1-3): 217-232.
- [30] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. *Botanical Review*, 1977, **43**(4): 449-528.
- [31] 张俊丽, Tanveer S K, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(18): 192-199.
Zhang J L, Tanveer S K, Wen X X, *et al.* Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(18): 192-199.
- [32] 骆亦其, 周旭辉, 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等译. 土壤呼吸与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 67-88.
Luo Y Q, Zhou X H, Jiang L F, Qu L Y, Zhou Y M, *et al.*, trans. *Soil Respiration and the environment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. 67-88.
- [33] 王建林, 赵风华, 欧阳竹. 灌溉量对灌浆期麦田土壤呼吸的影响[J]. *华北农学报*, 2010, **25**(3): 186-189.
Wang J L, Zhao F H, Ouyang Z. Effects of the irrigation quantity on soil respiration in wheat field in filling stage [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, **25**(3): 186-189.
- [34] Wang X, Jiang Y L, Jia B R, *et al.* Comparison of soil respiration among three temperate forests in Changbai Mountains, China[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, **40**(4): 788-795.
- [35] 潘瑞焯, 王小菁, 李娘辉. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 155-157.
- [36] 湘、鄂、赣、桂、琼、粤农业中专教材编审委员会. 作物栽培[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 127-128.
- [37] 郭树芳, 齐玉春, 尹飞虎, 等. 不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1880-1890.
Guo S F, Qi Y C, Yin F H, *et al.* Effect of irrigation patterns on soil CO₂ and N₂O emissions from winter wheat field in North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1880-1890.
- [38] Malla G, Bhatia A, Pathak H, *et al.* Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and urease inhibitors [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(2): 141-147.
- [39] 陈慧, 李亮, 蔡焕杰, 等. 加气条件下土壤 N₂O 排放对硝化/反硝化细菌数量的响应[J]. *农业机械学报*, 2018, **49**(4): 303-311.
Chen H, Li L, Cai H J, *et al.* Response of soil N₂O fluxes to soil nitrifying and denitrifying bacteria under aerated irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(4): 303-311.
- [40] 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 等. 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 321-330.
Hou M M, Lü F L, Zhang H T, *et al.* Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N₂O emission in the winter wheat-summer maize rotation system [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 321-330.
- [41] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N₂O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(6): 1524-1530.
Sun Z Q, Hao Q J, Jiang C S, *et al.* Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, **41**(6): 1524-1530.
- [42] Shelton D R, Sadeghi A M, Mccarty G W. Effect of soil water content on denitrification during cover crop decomposition [J]. *Soil Science*, 2000, **165**(4): 365-371.
- [43] Sanchez-Martín L, Meijide A, Garcia-Torres L, *et al.* Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **137**(1-2): 99-107.
- [44] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH₄、N₂O 气体排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3655-3661.
Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, *et al.* Emission characteristics of CH₄ and N₂O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3655-3661.
- [45] Wang J Y, Xiong Z Q, Yan X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N₂O from vegetable fields in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(38): 6923-6929.
- [46] Bremner J M. Sources of nitrous oxide in soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **49**(1-3): 7-16.
- [47] Barton L, Kiese R, Gatter D, *et al.* Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate [J]. *Global Change Biology*, 2010, **14**(1): 177-192.
- [48] 王玉英, 胡春胜. 施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(5): 1122-1128.
Wang Y Y, Hu C S. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the piedmont plain of Mount Taihang, China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(5): 1122-1128.
- [49] 杨硕欢, 张保成, 王丽, 等. 水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4780-4788.
Yang S H, Zhang B C, Wang Li, *et al.* Comprehensive effects of the application of water and fertilizer amount on CO₂ emission from soils of summer-maize field [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4780-4788.
- [50] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **47**(3): 265-277.
- [51] 徐星凯, 周礼恺. 土壤源 CH₄ 氧化的主要影响因素与减排措施[J]. *生态农业研究*, 1999, **7**(2): 18-22.
Xu X K, Zhou L K. Main factors affecting soil-borne methane oxidation and measurements for reducing CH₄ flux [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1999, **7**(2): 18-22.
- [52] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(8): 1432-1437.
Yi Q, Pang Y W, Yang S H, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, **22**(8): 1432-1437.
- [53] 胡敏杰, 邹芳芳, 任鹏, 等. 闽江河口湿地土壤 CH₄ 产生与氧化速率对外源氮、硫添加的响应[J]. *生态学报*, 2017, **37**(1): 167-176.
Hu M J, Zhou F F, Ren P, *et al.* Effects of nitrogen and sulfate

- additions on methane production and oxidation in the Min River estuarine marsh[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(1): 167-176.
- [54] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同留茬高度秸秆还田冬小麦田甲烷吸收及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(5): 170-178.
Wang B W, Chi S Y, Tian S Z, *et al.* CH₄ uptake and its affecting factors in winter wheat field under different stubble height of straw returning[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(5): 170-178.
- [55] 赵建波, 李增嘉, 迟淑筠, 等. 保护性耕作条件下小麦田甲烷吸收及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(11): 2490-2496.
Zhao J B, Li Z J, Chi S Y, *et al.* CH₄ absorption and its affecting factors in a wheat field with conservation tillage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(11): 2490-2496.
- [56] Adamsen A P S, King G M. Methane consumption in temperate and subarctic forest soils: rates, vertical zonation, and responses to water and nitrogen [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(2): 485-490.
- [57] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, *et al.* An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(1): 119-127.
- [58] 刘晶晶, 张阿凤, 冯浩, 等. 不同灌溉量对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(1): 169-179.
Liu J J, Zhang A F, Feng H, *et al.* Influences of different irrigation amounts on carbon sequestration in wheat-maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(1): 169-179.
- [59] Mer J L, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [C]. *Proceedings of the Vacuum Nanoelectronics Conference*, 2010. 137-138.
- [60] Schimel J P, Gullledge J. Microbial community structure and global trace gases [J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(7): 745-758.
- [61] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率[J]. *中国农业资源与区划*, 2013, **34**(6): 1-11.
Liu X H, Xu W X, Li Z J, *et al.* The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's intensive farming[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, **34**(6): 1-11.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)