

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 $PM_{2.5}$ 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用 $\delta^{15}N-NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O-NO_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

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

郭树芳¹, 齐玉春¹, 尹飞虎², 彭琴¹, 董云社^{1*}, 贺云龙¹, 闫钟清¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 新疆农垦科学院, 石河子 832000)

摘要: 节水灌溉是现代农业的发展趋势, 为研究节水灌溉措施对农田土壤温室气体排放的影响, 采用静态箱暗箱法研究了微喷水肥一体化(微喷)与传统漫灌方式下华北平原西部 2013~2014 年冬小麦田土壤 CO₂ 及 N₂O 排放通量的变化特征及微喷方式下垂直微喷管不同距离的 3 个空间位置土壤 CO₂、N₂O 排放通量的空间变化。利用根排除法分析土壤呼吸组分, 并估算不同灌溉方式下农田碳收支状况。结果表明: ①微喷与漫灌方式下小麦田土壤 CO₂ 排放通量平均值分别为 418.19 mg·(m²·h)⁻¹ 和 372.14 mg·(m²·h)⁻¹, 两种灌溉方式间 CO₂ 排放通量无显著差异, 累积排放量分别为 2 150.6 g·m⁻² 及 1 904.6 g·m⁻²。②返青期-成熟期微喷方式下距离微喷管不同距离的 3 个位置土壤 CO₂ 累积排放量表现为距离微喷管近的土壤 CO₂ 排放量最大, 但无明显差异。③微喷和漫灌方式下, 小麦生长季土壤异养呼吸排放量(以 C 计)分别为 468.49 g·m⁻² 和 427.31 g·m⁻², 净初级生产力(以 C 计)分别为 1 988.21 g·m⁻² 和 1 770.54 g·m⁻², 生长生育期小麦田碳汇(以 C 计)分别为 1 519.72 g·m⁻² 和 1 343.24 g·m⁻²。④微喷与漫灌处理小麦生长季土壤 N₂O 排放通量的平均值分别为 50.77 μg·(m²·h)⁻¹ 和 28.81 μg·(m²·h)⁻¹, 两种灌溉方式间 N₂O 排放通量无显著差异, 累积排放量分别为 272.67 mg·m⁻² 及 154.08 mg·m⁻²。⑤小麦返青期-成熟期微喷方式下 3 个空间位置土壤 N₂O 排放通量表现为距离微喷管越远, N₂O 累积排放量越小, 但处理间无显著性差异。可见, 小麦田由传统漫灌转变为微喷节水灌溉后, 农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量均有增加, 但农田碳汇强度也增加了。

关键词: 微喷水肥一体化; 碳汇; 温室气体; 季节变化; 空间分布; 累积排放量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1880-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.036

Effect of Irrigation Patterns on Soil CO₂ and N₂O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain

GUO Shu-fang¹, QI Yu-chun¹, YIN Fei-hu², PENG Qin¹, DONG Yun-she^{1*}, HE Yun-long¹, YAN Zhong-qing¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract: The water-saving irrigation is the trend of modernized agriculture. This paper aimed to study the effect of water-saving irrigation on soil CO₂ and N₂O emissions. The field experiments were conducted under micro sprinkler irrigation of integrated water and fertilizer (MSI) and conventional flooding irrigation (FI) in winter wheat growth season in the west of North China Plain during 2013-2014 using the static chamber method. This paper analyzed the seasonal variation of soil CO₂ and N₂O emissions under MSI and FI, and then compared the soil CO₂ and N₂O emissions from treatments located in different vertical distance away from micro sprinkler pipe. Root exclusion was used to estimate the components of soil respiration and agricultural carbon sequestration intensity under MSI and FI in winter wheat field. The results indicated that: ① The average soil CO₂ emissions under MSI and FI were 418.19 mg·(m²·h)⁻¹ and 372.14 mg·(m²·h)⁻¹ respectively with no significant difference, and cumulative CO₂ emissions under MSI and FI were 2 150.6 g·m⁻² and 1 904.6 g·m⁻², respectively. ② During returning green stage to harvest stage of winter wheat, the highest soil CO₂ cumulative emissions were found at the closest site to the micro sprinkler irrigated pipes under MSI. However, there were no significant differences among spatial treatments. ③ Under MSI and FI, soil heterotrophic respiration (C) was 468.49 g·m⁻² and 427.31 g·m⁻², and the net primary productivity (C) was 1 988.21 g·m⁻² and 1 770.54 g·m⁻²; the carbon sink (C) during winter wheat growing season was 1 519.72 g·m⁻² and 1 343.24 g·m⁻², respectively. ④ The average N₂O emissions under MSI and FI were 50.77 μg·(m²·h)⁻¹ and 28.81 μg·(m²·h)⁻¹ respectively with no significant difference. Cumulative N₂O emission under MSI and FI was 272.67 mg·m⁻² and 154.08 mg·m⁻², respectively. ⑤ During returning green stage to harvest stage of winter wheat, the farther the distance away from the micro sprinkler irrigated pipes, the smaller the soil N₂O emissions. Moreover, there were no

收稿日期: 2015-10-27; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203012-6); 国家自然科学基金项目(41373084, 41330528, 41203054, 41573131)

作者简介: 郭树芳(1986~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为陆地生态系统碳氮循环, E-mail: guosf.12b@igsnrr.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: dongys@igsnrr.ac.cn

significant differences among spital treatments under MSI. Therefore, despite of the increase of soil CO₂ and N₂O emissions, the intensity of carbon sink increased during the transformation from traditional flood irrigation to micro sprinkler irrigation in winter wheat fields.

Key words: micro sprinkler irrigation of integrated water and fertilizer; carbon sink; greenhouse gases; temporal variation; spatial distribution; cumulative emission

农田是重要的温室气体排放源^[1],农田管理措施是影响土壤温室气体源汇强度的关键环境因子^[2]. 据估计,人类活动造成的温室气体排放中,1/3 来自于不合理的农田管理措施和土壤利用(如深流灌溉,过量施用氮肥)^[3~6]. 关于农田管理措施对温室气体排放的影响,国内已有的研究多集中在耕作方式^[7,8]、施肥和秸秆还田等方面^[9~12],对灌溉措施的影响效应研究还少见. 尽管漫灌仍然是华北平原主要的灌溉方式,但最近几年因水资源日益匮乏,为维持粮食水平的高产,节水灌溉技术(如微喷灌溉和滴灌)正在迅速发展,节水灌溉方式下的农田面积也逐渐增加^[13]. 目前关于节水灌溉条件下农田温室气体的研究,国内主要是节水灌溉方式下的稻田^[14]和干旱区滴灌或覆膜滴灌方式下的棉田研究^[15,16],对滴灌措施下冬小麦的研究^[17]也刚起步. 国外多针对滴灌瓜果田,结合施肥及作物覆盖等进行研究^[18~21]. 华北平原是我国粮食的主产区,未来粮食产量的进一步提高需要灌溉和施肥的高效性,而灌溉和施肥等措施的改变势必会带来温室气体排放强度和影响机制等方面的变化^[22]. 目前对华北平原冬小麦田的研究报道还很鲜见,凸显开展相关研究的重要性和必要性.

微喷水肥一体化(微喷)是目前华北平原大力推广的一种农田节水灌溉措施,根据作物生长发育不同时期的水肥要求,把可溶性喷滴灌专用肥倒入施肥装置进行溶解,通过压力使肥料随微喷水一起施入田间. 受小麦茎秆高度和微喷管喷水口等影响,微喷灌溉常常会导致水分分布不均,距

离微喷带较远的小麦行间土壤水分相对亏缺^[23,24]. 由于土壤水分、温度和肥料是影响温室气体排放的重要因素,在节水灌溉条件下进入土壤的水分和肥料的不均匀性必然会带来温室气体排放在空间上的异质性. 加强土壤温室气体的空间变化特征的研究对于准确估算农田温室气体年排放总量,尤其是修订通常将单点温室气体通量观测结果外推至生态系统的结论,科学意义更加显著^[25,26]. 本研究以河北省微喷水肥一体化和漫灌条件下的小麦田为例,探讨比较了不同灌溉方式下冬小麦田土壤温室气体排放的时间变化规律及微喷方式下距离微喷管不同距离的空间分布特征,并结合小麦田生物量进行了农田碳平衡计算,以期节水灌溉条件下农田温室气体排放贡献变化的准确评价奠定试验基础.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点设在国家半干旱农业工程技术研究中心的小麦水肥一体化研究基地(38°04′23.0″N, 114°21′12.1″E),海拔为 104 m. 该基地位于河北省鹿泉市,属暖温带半湿润季风型大陆性气候,年平均温度为 13.9℃,1 月平均温度为 -1.7℃,7 月平均气温为 27.2℃,年平均降水量为 542.2 mm(1991 ~ 2005 年),种植制度为一年两熟的夏玉米冬小麦. 2013 ~ 2014 年冬小麦生育期内月平均温度和月平均降雨量见表 1. 试验地 0 ~ 20 cm 层土壤容重为 1.39 g·cm⁻³,土壤基本理化性质见表 2.

表 1 2013 ~ 2014 年冬小麦生育期月平均温度和降雨量

Table 1 Monthly mean temperature and mean precipitation during the growth period of winter wheat in 2013-2014

年份	2013				2014				
月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6
降雨量/mm	7.9	3.5	0	0	7.0	0.9	24.9	28.7	38.7
平均气温/℃	14.7	8.1	1.7	0.4	0.5	11.3	16.8	23.9	26.2

表 2 试验地土壤基本理化特征

Table 2 Soil physical and chemical properties in the tested field

土层 /cm	pH	电导率 /μS·cm ⁻¹	有机碳 /g·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹
0 ~ 10	7.34	165.72	16.2	130.87	32.03	16.32	2.43
10 ~ 20	7.85	123.54	12.5	71.85	15.70	10.33	1.06

1.2 试验设计

试验于 2013-10-15 至 2014-06-09 在小麦水肥一体化研究基地进行,在大田中设置微喷水肥一体化(MSI)与漫灌(FI)两种灌溉方式,试验区面积均为 $30\text{ m} \times 50\text{ m}$. 微喷带上有 5 个孔一组呈单列斜布置的喷水口,组间距为 30 cm ,喷出的水滴受小麦茎秆高度及微喷装置本身的影响落到土壤表面的水分分布不均匀,因此基于垂直距离微喷管的距离(设微喷管间距为 L ,一般为 $1.8 \sim 2.2\text{ m}$),设置 $1/12L$ 、 $1/4L$ 及 $5/12L$ 3 个空间位置处理, $1/12L$ 、 $1/4L$ 及 $5/12L$ 均为垂直距离微喷管的间距(图 1);漫灌条件下,设置 1 个处理. 为进行根系呼吸和碳汇估算,在微喷和漫灌方式下均设置裸地处理,小麦出苗后拔除幼苗,设置多个 $45\text{ cm} \times 45\text{ cm}$ 的小区域,裸地中不存在作物根系,但对裸地进行相应的灌溉与施肥. 每个处理 3 个重复.

本试验冬小麦于 2013-10-08 播种,2014-06-10 收割. 试验地前茬作物为玉米,玉米地的灌溉方式与小麦一致. 小麦品种为鲁 502,种植密度为 $22.5\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,行距为 15 cm . 玉米收割时实施秸秆还田,农田进行翻耕. 小麦生长期间共灌溉 3 次,日期分别为 2014-03-27、2014-04-20 和 2014-05-23,分别在前两次灌溉时施肥 $225\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $75\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 微喷和漫灌每次灌溉水量分别为 $450\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $900\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,整个生长季灌溉总量分别为微喷 $1\,350\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,漫灌 $2\,700\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. 微喷和漫灌所用肥料均为可溶性喷滴灌专用肥,含氮、磷、钾(33:6:11)和微量元素. 微喷方式下,肥料溶解于灌溉水中,随水进入土壤.

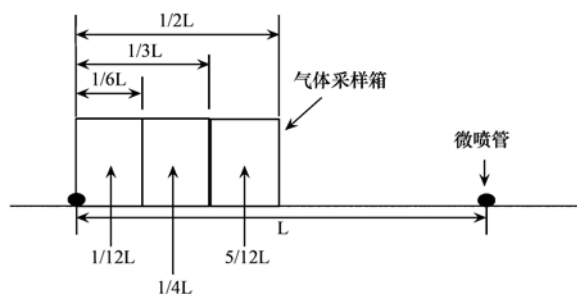


图 1 微喷灌溉区气体采样位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of gas sampling locations under MSI irrigation

1.3 观测指标和方法

1.3.1 土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量

CO_2 和 N_2O 排放通量测定采用静态暗箱法. 在微喷小麦田中,分别于垂直距离微喷带 $1/12L$ 处、 $1/4L$ 处及 $5/12L$ 处(图 1)与裸地采集气体,共 4 个处理. 在漫灌小麦田中,于包含作物根系(随机选择位置)及裸地进行气体采集,共 2 个处理. 每个处理均设置 3 个重复. 试验共 18 个采样点(6 个处理 $\times$ 3 个重复),微喷方式下农田 12 个采样点同时进行气体样品采集,漫灌方式下 6 个采样点同时进行样品采集,两种灌溉方式下采样时间相差约 30 min . 每次测定时间均选择在同天上午的 $09:00 \sim 11:00$ 之间^[25]. 整个生育期内每 10 d 测定一次,如遇下雨天气则适当调整,越冬期每月采集一次. 因为作物生长及气体采集完毕后原位采集土壤的原因,测定期间采样点位置不是固定在原地,移动距离为 $1.5 \sim 2\text{ m}$.

采样箱利用 8 mm 厚黑色不透明有机玻璃制成,目的在于避免观测过程中光合作用消耗 CO_2 以及扣箱后短期内箱内温度上升过快等影响,箱体底面积为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,高度为 40 cm ;底座内径为 $28\text{ cm} \times 28\text{ cm}$,外径为 $31\text{ cm} \times 31\text{ cm}$,槽宽和高均为 3 cm . 选择采样点后,各处理采样点均需齐地面剪去地面植物,并小心去除地面凋落物. 将不锈钢底框埋入地下 $3 \sim 5\text{ cm}$ 并将外侧夯实,在底框槽内放置一定量的水,使得采样箱放置后,可以利用水密封箱体. 采气时将采样箱放置于底框内(箱内顶部装有空气搅拌小风扇,温度计及采气三通阀),将采样各部件连接好,调节三通气阀,利用医用针管抽取箱内气体存入采气袋中. 气体采集持续时间为 30 min ,每间隔 10 min 采集一次,取样时间分别为盖箱后 0、10、20 及 30 min ,并同时记录取气时的采样箱箱内温度,观测前后的大气温度(T_{air})、气压以及地表温度($T_{0\text{ cm}}$)、 5 cm ($T_{5\text{ cm}}$)及 10 cm 地温($T_{10\text{ cm}}$). 地温采用 TH-212 便携式温度测量仪进行测定.

气体采集后,带回实验室进行分析. 其中, CO_2 浓度利用 LI-COR6252 型 CO_2 红外线分析仪(LICOR Inc., Lincoln, NE, USA)直接测定, N_2O 浓度在实验室内利用惠普 5890 II 型气相色谱仪(Hewlett-Packard 7890, Germany)进行分析. N_2O 与 CO_2 气体通量的计算公式均为^[27]:

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot D \frac{V}{A} = hD \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

式中, F [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]代表气体通量, V (m^3)为观测箱的容积, A (m^2)为观测时包围的土壤面积, D ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)为箱内气体的密度($D = n/v = p/RT$, n ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)为 CO_2 的摩尔质量, v (m^3)为气体体积,

p (Pa) 为箱内气压, T (K) 为箱内气温, R [$\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$] 为气体常数, $\Delta m / \Delta t$ 是气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率, h (m) 为观测箱高度.

1.3.2 土壤相关指标测定

气体采集完成后, 用土钻采集底框中的土壤样品, 分 0 ~ 10 cm 及 10 ~ 20 cm 分别采集. 在每个采样框内按对角线法采集 3 钻土壤, 相同层次土壤样品混合. 主要测定项目包括土壤水分 (SW)、土壤有机碳 (TOC)、土壤微生物量碳 (MBC)、土壤水溶性碳 (DOC)、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$. 其中, 土壤含水量利用烘干法测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量为新鲜土样经 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提后利用连续式流动分析仪测定 (Braun and Lübbe, Norderstedt, Germany); 土壤有机碳采用 TOC 分析法测定 (vario TOC Cube, Elementar, Germany), DOC 含量采用超纯水浸提-TOC 分析法测定, MBC 含量采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提-TOC 分析法测定.

1.4 生物量测定和碳平衡计算

自 2014-03-24 小麦返青期后, 每 10 d 在微喷和漫灌试验区分别选择有代表性的 3 个 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 样方, 测定小麦植株的地上和地下生物量, 分部位清洗烘干至恒重, 计算单位面积生物量. 利用 TOC 分析法测定小麦不同器官的有机碳含量, 结合不同器官的单位面积生物量, 计算某一时段内的小麦植株单位面积上的有机碳含量, 相邻两次采样间的差值为该时段内农田的 NPP. 采用净生态系统生产力 (NEP) 来表示生态系统碳平衡^[28]. 整个小麦生长季 NEP 则为多个时段 NEP 的总和. 计算公式为:

$$\text{NEP} = \text{NPP} - R_h$$

式中, NPP ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 为两次采样的作物含碳量的差值, R_h (以 C 计, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 为两次采样间土壤异养呼吸累积量.

采用根系排除法^[29], 将小麦田中面积较小的多个无根裸地的土壤呼吸作为土壤异养呼吸. 通过计算农田有根土壤呼吸和无根裸地土壤呼吸的差值估算根际呼吸.

1.5 数据分析处理方法

将微喷区不同处理气体排放通量的平均值作为微喷田的日均通量值. 以观测值作为日均值, 采用线性内插法, 通过 Matlab 7 计算生长季累积排放量. 利用 SPSS 17 软件中的 One-way ANOVA 比较不同处理间气体通量的差异显著性, Pearson 相关系数进

行气体排放通量与影响因素间的相关性分析等. 文中图表均采用 Origin 8.5 和 Excel 2007 绘制.

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式下农田土壤 CO₂ 排放通量的时间变化特征

不同灌溉方式下土壤 CO₂ 通量在拔节期前具有相似的变化趋势, 即先下降至越冬期结束, 然后开始上升, 见图 2(a). 3 月下旬小麦进入起身返青期后, 随着土壤温度的逐渐回升, 土壤 CO₂ 排放通量逐渐升高. 在小麦返青后, 微喷方式下土壤 CO₂ 通量出现明显的峰值, 达 $795.95 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 而漫灌方式下土壤 CO₂ 通量变化则较为稳定. 5 月初, 受土壤温度下降与土壤水分含量的降低的影响, 微喷与漫灌方式下土壤 CO₂ 通量均出现小幅度降低, 之后随着温度的升高, 灌浆期土壤 CO₂ 通量有所升高. 小麦灌浆后, 地上部分生长达到高峰, 营养向地下部分转移量减少, 根系生长缓慢, 故土壤呼吸开始下降.

微喷与漫灌方式下, 整个冬小麦生长季 CO₂ 排放通量分别介于 $113.28 \sim 795.95 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间以及 $98.29 \sim 579.36 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间. 土壤 CO₂ 排放通量在小麦越冬期处于低谷, 微喷和漫灌方式下最低值分别达 $113.28 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $98.29 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 微喷与漫灌方式下整个小麦生长季土壤 CO₂ 排放通量均值分别为 $418.19 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $372.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 表现为微喷 > 漫灌, 两种灌溉方式间 CO₂ 排放通量无显著差异, 累积排放量分别为 $2150.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 及 $1904.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 微喷方式下 CO₂ 累积排放量比漫灌高 12.9%.

2.2 不同灌溉方式下农田土壤 N₂O 排放通量的时间变化特征

与漫灌方式下土壤 N₂O 通量相比, 除微喷方式下土壤 N₂O 通量在返青后峰值延后外, 两种灌溉方式土壤 N₂O 通量排放规律基本一致, 峰谷变化明显, 见图 2(b). 越冬前 N₂O 通量呈持续降低趋势, 越冬期地温较低, 雨雪少见, 土壤水分含量低, 土壤微生物代谢缓慢, 土壤 N₂O 排放通量持续维持在一个较低水平, 两种灌溉方式间土壤 N₂O 排放通量差异不明显. 小麦返青后, 温度回升, 经过灌溉和施肥以及受土壤冻融作用的影响, 土壤 N₂O 通量明显升高, 并在 4 月小麦抽穗时出现生长季内最大的排放峰值.

其中,漫灌方式下峰值出现早于微喷,微喷及漫灌方式下土壤 N_2O 峰值分别为 $231.04 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $171.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 后土壤 N_2O 排放通量迅速下降,后期变化较为平缓.

微喷及漫灌方式下冬小麦生长季土壤 N_2O 排放通量分别介于 $7.73 \sim 231.04 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 之间和 $4.19 \sim 165.66 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 之间,表现为 N_2O 的排

放源. 微喷与漫灌方式下小麦生长季土壤 N_2O 排放通量的平均值分别为 $50.77 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $28.81 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,微喷方式下小麦生长季土壤 N_2O 排放通量高于漫灌,两种灌溉方式间土壤 N_2O 排放通量无显著差异,累积排放量分别为 $272.67 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $154.08 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,微喷方式下土壤 N_2O 累积排放量比漫灌高 77.0%.

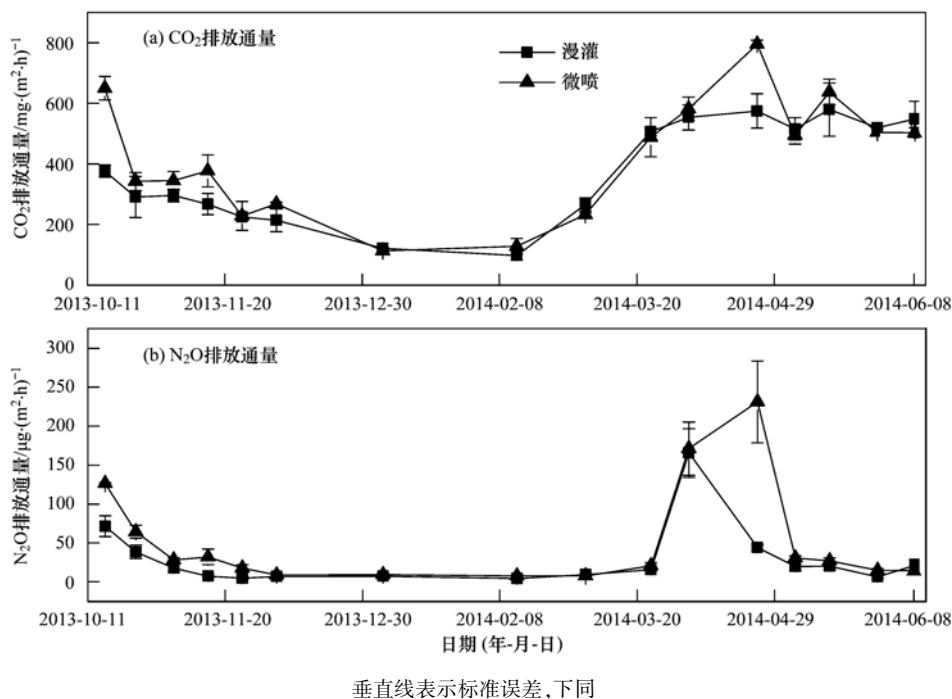


图2 微喷与漫灌条件下冬小麦田土壤 CO_2 排放通量与 N_2O 排放通量季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of soil CO_2 and N_2O emissions under MSI and FI in winter wheat fields

2.3 微喷条件下农田土壤 CO_2 及 N_2O 排放通量的空间变化特征

2.3.1 CO_2 排放通量

由于玉米收获后进行土壤翻耕需收起微喷管,而小麦起身前均无灌溉,故小麦起身前未铺设微喷管. 小麦返青期开始铺设微喷管带并进行灌溉,返青期-成熟期微喷小麦田生育期内距离微喷管不同距离的3个位置土壤 CO_2 排放通量变化趋势相似,见图3(a). 不同空间位置土壤呼吸均在2014-04-24出现第一个峰值,1/12L、1/4L及5/12L处理的峰值分别为774.46、817.5与795.85 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,该阶段 CO_2 排放通量平均值分别为587.50、579.30和591.87 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,不同空间位置 CO_2 通量无明显差异. 1/12L、1/4L及5/12L处理在该段生长期土壤 CO_2 累积排放量分别为966.07、955.04与963.93 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,表现为1/12L > 5/12L > 1/4L,即距离微喷管近的土壤 CO_2 累积排

放量最大,但不同处理间无显著性差异.

2.3.2 N_2O 排放通量

在微喷条件下小麦返青期-成熟期,1/12L及5/12L处理土壤 N_2O 排放通量均表现为先升高后降低的趋势,在抽穗时达到峰值,而1/4L处理在整个生长季则呈现逐渐下降的变化趋势,见图3(b). 返青期-开花授粉期,土壤 N_2O 通量表现为1/12L > 5/12L,距离微喷管近的土壤 N_2O 通量大于距离微喷管远的土壤 N_2O 通量. 而1/4L处土壤 N_2O 先是高于其他处理,而灌溉后则低于其他处理. 授粉后至小麦成熟阶段3个位置土壤 N_2O 通量始终保持较低的水平. 小麦返青期-成熟期1/12L、1/4L及5/12L处理土壤 N_2O 排放通量平均值分别为92.71、81.51和70.35 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,各处理间无显著性差异,累计排放量分别为178.59、139.92与128.16 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$,均表现为1/12L > 1/4L > 5/12L,即距离微喷管越远, N_2O 累积排放量越小.

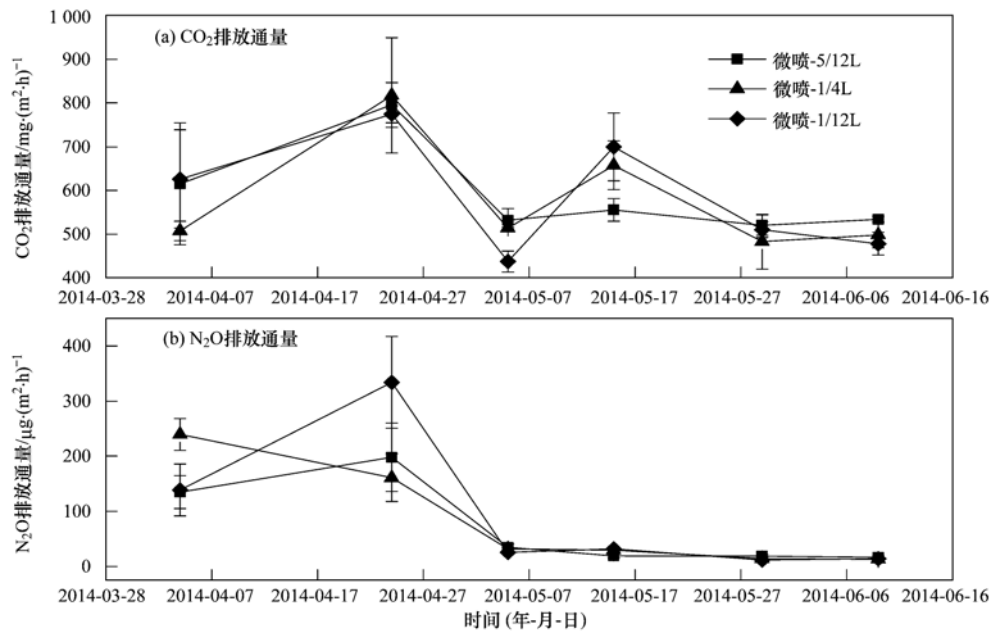


图3 返青期-成熟期冬小麦田土壤 CO₂ 排放通量与N₂O排放通量空间变化特征

Fig. 3 Spatial variation of soil CO₂ and N₂O emissions from returning green stage to harvest stage of winter wheat

2.4 小麦生物量及农田碳汇

除 2014-03-24 和 2015-05-15 外,微喷方式下冬小麦生物量均大于漫灌,根据生物量计算不同时段的 NPP、裸地土壤 CO₂ 累积排放量和 NEP(表 3)。在小麦返青期之前(2014-03-24 之前)及孕穗-开花期(2014-04-24 ~ 2014-05-05),小麦田生态系统是弱的碳源,其他时期均为碳汇。微喷和漫灌方式下,小麦生长季土壤异养呼吸通量平均值分别为 339.11 mg·(m²·h)⁻¹ 和 313.26

mg·(m²·h)⁻¹,累积排放量(以 C 计)分别为 468.49 g·m⁻²和 427.31 g·m⁻²,而作物固碳量(以 C 计)为 1 988.21 g·m⁻²和 1 770.54 g·m⁻²,生长生育期小麦田碳汇(以 C 计)分别为 1 519.72 g·m⁻²和 1 343.24 g·m⁻²。利用小麦田土壤呼吸与相应裸地土壤呼吸值的差值,得微喷和漫灌灌溉方式下小麦生长季土壤根系呼吸分别为 79.08 mg·(m²·h)⁻¹和 58.88 mg·(m²·h)⁻¹,分别占总土壤呼吸的 18.91%和 15.82%。

表3 不同灌溉对小麦生长季生物量、NPP 及 NEP 的影响 (以 C 计)/g·m⁻²

Table 3 Effects of irrigation on biomass, NPP and NEP during wheat growing season/g·m⁻²

日期	生物量		NPP		土壤异氧呼吸排放量		NEP	
	微喷	漫灌	微喷	漫灌	微喷	漫灌	微喷	漫灌
2014-03-24	130.16	139.06	130.16	139.06	230.67	160.21	-100.51	-21.15
2014-04-04	194.50	178.65	64.34	39.59	25.30	26.08	39.04	13.50
2014-04-24	693.31	619.78	498.81	441.13	74.33	86.78	424.47	354.34
2014-05-05	567.68	496.24	-125.62	-123.54	42.76	48.03	-168.39	-171.57
2014-05-15	979.89	1 089.97	412.21	593.74	28.01	32.70	384.20	561.04
2014-05-29	1 581.92	1 463.63	602.02	373.66	39.14	40.01	562.89	333.65
2014-06-09	1 988.21	1 770.54	406.29	306.91	28.28	33.49	378.01	273.42

2.5 土壤水分、温度变化及其与 CO₂ 和N₂O排放通量的相关性分析

不同灌溉方式下大气温度和土壤温度先下降至越冬期达到最小值,后逐渐升高,均在成熟期达到最大值,均表现为微喷 > 漫灌,且 T-air > T-0 cm > T-5 cm > T-10 cm,见图 4。在小麦返青期前,土壤水分

含量总体呈下降趋势,返青期后土壤水分含量上升,抽穗期后下降。微喷和漫灌方式下,土壤 0 ~ 10 cm 层土壤水分含量分别为 15.58%和 14.62%,土壤 10 ~ 20 cm 层土壤水分含量分别为 15.51%和 15.08%,均表现为微喷 > 漫灌,微喷及漫灌方式间均无显著差异。

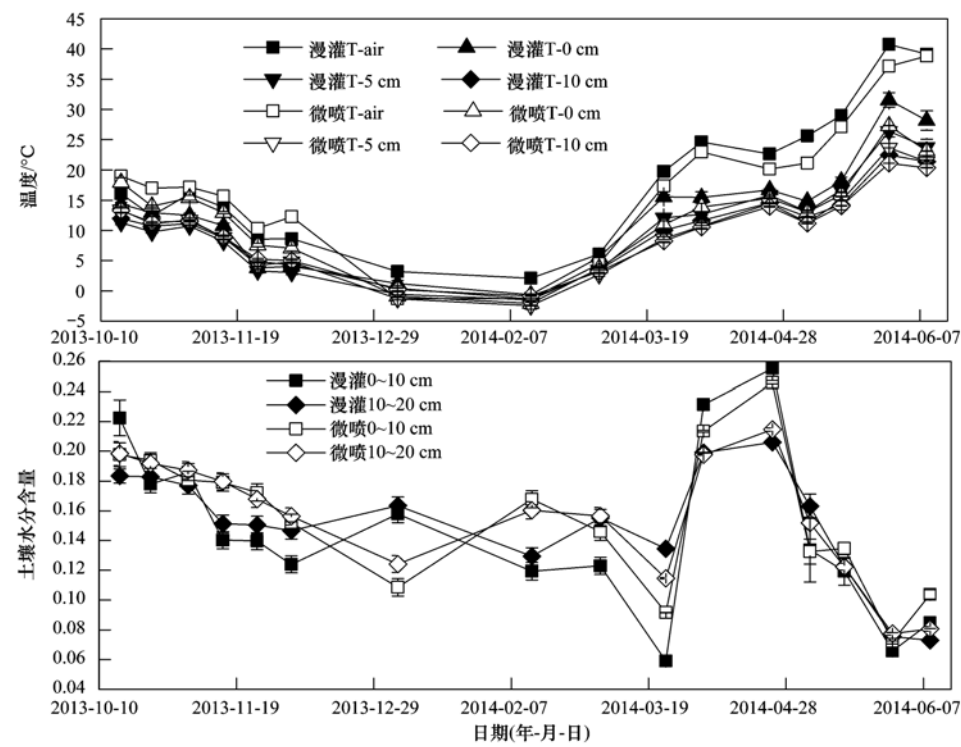


图 4 大气温度与土壤温度和土壤水分的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of air temperature, soil temperature and soil water content

在小麦的不同生长阶段,温度与土壤水分对CO₂及N₂O排放通量的影响存在一定的差异,结果见表4. 越冬前,微喷及漫灌方式下土壤CO₂排放通量与土壤水分、温度均呈明显正相关,且漫灌方式下土壤CO₂排放通量与土壤水分及不同温度指标的相关性均达到显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)水平. 而在越冬期,微喷与漫灌方式下土壤CO₂排放通量则与土壤水分均呈负相关关系,与温度呈显著($P < 0.05$)或极显著正相关($P < 0.01$). 在返青期-成熟期,微喷方式下土壤CO₂排放通量与

土壤水分极显著正相关($P < 0.01$),漫灌方式下土壤CO₂排放通量与土壤水分相关性不大,两种灌溉下土壤CO₂排放通量与土壤温度相关均不显著.

越冬前,微喷与漫灌方式下土壤N₂O排放通量与土壤水分均呈显著正相关($P < 0.05$),与温度呈现明显正相关. 在越冬期,N₂O排放通量与水分呈明显的负相关关系,而与温度呈显著($P < 0.05$)或极显著正相关($P < 0.01$). 在返青-成熟期,微喷及漫灌条件下土壤N₂O排放通量与土壤水分均呈极显著正相关($P < 0.01$),而微喷条件下土壤N₂O排放

表 4 微喷与漫灌条件下土壤水分、温度与CO₂及N₂O排放通量的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between soil CO₂ and N₂O emissions and soil water content, temperature under MSI and FI

项目	水热指标	越冬前		越冬期		返青期-成熟期	
		CO ₂	N ₂ O	CO ₂	N ₂ O	CO ₂	N ₂ O
微喷	SW _{0~10 cm}	0.695	0.821 *	-0.544	-0.792	0.534 **	0.784 **
	SW _{10~20 cm}	0.751	0.816 *	-0.492	-0.791	0.451 **	0.756 **
	T-air	0.802	0.760	0.860 *	0.945 *	-0.312 *	-0.551 **
	T-0 cm	0.825 *	0.791	0.889 *	0.951 *	-0.182	-0.398 **
	T-5 cm	0.786	0.774	0.889 *	0.960 **	-0.142	-0.421 **
	T-10 cm	0.779	0.788	0.900 *	0.963 **	-0.158	-0.422 **
漫灌	SW _{0~10 cm}	0.962 **	0.904 **	-0.884 *	-0.785	0.144	0.632 **
	SW _{10~20 cm}	0.844 *	0.815 *	-0.282	-0.121	0.115	0.592 **
	T-air	0.860 *	0.599	0.968 **	0.923 **	-0.124	-0.462
	T-0 cm	0.889 *	0.726	0.998 **	0.977 **	-0.060	-0.413
	T-5 cm	0.889 *	0.698	0.997 **	0.959 *	-0.084	-0.518 *
	T-10 cm	0.900 *	0.731	0.973 **	0.928 *	-0.063	-0.510 *

1) * 表示在 0.05 显著性水平下显著相关, ** 表示在 0.01 显著性水平下显著相关

通量与大气温度及土壤温度均呈极显著负相关($P < 0.01$), 漫灌条件下土壤 N₂O 排放通量仅与 5 cm、10 cm 低温显著负相关($P < 0.01$). 从整个生长季来看, 两种灌溉方式土壤 N₂O 通量均与土壤水分呈显著或极显著正相关.

3 讨论

3.1 节水灌溉对农田温室气体排放的影响

两种灌溉方式下, 小麦田土壤 CO₂ 排放通量及 N₂O 排放通量均表现出类似的季节变化特征, 微喷方式下土壤 CO₂ 排放通量均值比漫灌高 12.37%, N₂O 排放通量均值比漫灌高 76.22%, 与传统漫灌方式相比, 微喷节水灌溉方式的应用在一定程度上增加了土壤主要温室气体排放通量. 而在越冬前的观测中, 微喷方式下土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量均高于漫灌, 这种差异不是由灌溉方式造成的, 可能是翻耕及玉米植株粉碎物进入土壤增加碳投入带来土壤底物的差异, 从而增加了灌溉方式间土壤温室气体排放的差异.

关于微喷节水灌溉的研究结果还尚鲜见, 本研究与滴灌节水灌溉的研究结果相一致. 牛海生等^[17]的研究结果认为滴灌比漫灌更有利于冬小麦农田的土壤呼吸, 滴灌麦田的土壤碳排放总量显著高于漫灌麦田土壤碳排放量的 11.43%. 微喷和漫灌灌溉方式下, 小麦生长季土壤根系呼吸分别为 $79.08 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $58.88 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 分别占总土壤呼吸的 18.91% 和 15.82%, 且表现为微喷 > 漫灌, 可能与微喷降低了由于灌溉而造成的土壤密实, 使土壤保持相对疏松, 提高了根系活力有关^[30]. 张前兵等^[16,31]对新疆棉田土壤呼吸的研究中也认为, 主要是由于滴灌和漫灌两种灌溉方式下灌溉频率和灌溉量不同, 造成土壤含水量和灌溉强度均有所差异, 滴灌条件下土壤结构破坏程度小, 土壤微生物和根系活动增强, 而漫灌条件下土壤 O₂ 的扩散受到限制, 故滴灌明显大于漫灌. 本研究中微喷和漫灌方式下, 土壤 CO₂ 排放通量均与大气温度及土壤温度极显著正相关($P < 0.01$), 地温升高提高了微生物活性, 加速土壤中有机质的分解, 增强了作物根系和土壤呼吸^[32], 与微喷方式下土壤温度高于漫灌, 土壤微生物量碳含量高于漫灌, 及根系呼吸高于漫灌相一致.

微喷和漫灌方式下土壤 N₂O 排放通量均与土壤水分含量显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关, 土壤水分不仅影响微生物活性, 也影响 N₂O 在土

壤中的运输及向大气的扩散^[33]. 微喷方式下土壤水分含量和温度均高于漫灌, 且微喷增加了土壤微生物量碳含量, 促进土壤微生物作用下的硝化和反硝化反应, 带来土壤 N₂O 排放通量的增加^[33]. 微喷和漫灌方式下土壤 N₂O 排放量受排放峰值的影响较大, 造成了估算 N₂O 季节总量上的差异, 因此在 N₂O 排放高峰期, 在微喷处理中实施其它减少 N₂O 排放通量措施的研究有助于减缓小麦生长季微喷田土壤 N₂O 排放. 本研究结果与滴灌节水灌溉的研究结果不一致. Kallenbach 等^[18]研究认为地下滴灌比沟灌减少了 50% 的 N₂O 排放量. Sánchez-Martín 等^[20]也认为, 与沟灌相比, 滴灌减少了甜瓜田土壤 N₂O 的排放. 其原因可能是, 与沟灌相比, 滴灌模式下水分分布促进了硝化反应^[21]. 而本研究与目前国内对于节水灌溉条件下稻田土壤 N₂O 排放的研究结果较为一致, 可能是由于微喷灌水量小, 减小了对土壤的冲刷和对土体结构的明显破坏, 降低了由于灌溉而造成的土壤密实, 使土壤保持相对疏松, 通气性好. 对稻田土壤的研究结果表明, 与长期淹灌相比, 湿润灌溉^[34]、间歇灌溉^[35]、连续间歇灌溉^[36]及控制灌溉^[13,37]均增加了 N₂O 的排放量, 主要是节水灌溉方式下稻田长期保持无水层状态, 改善了土壤的通气性, 增加了土壤中氧气含量, 促进了 N₂O 的形成与产生. 朱士江^[38]研究了水稻全生育期淹灌、间歇灌溉、湿润灌溉及控制灌溉这 4 种灌溉模式下 N₂O 的排放量, 结果也表明, 土壤 N₂O 的平均排放量、累积排放量及综合温室效应均表现为控制灌溉 > 间歇灌溉 > 湿润灌溉 > 淹灌. 由此可以看出, 不同节水灌溉方式对土壤温室气体的排放通量影响也存在较大差异, 今后应进一步加强不同灌溉条件下温室气体排放通量及其影响机制的深入比较研究.

3.2 节水灌溉条件下农田温室气体排放的空间异质性

李志国等^[15]对滴灌棉花田进行土壤呼吸测定时, 将静态箱放置在滴灌管一侧, 同时覆盖干区和湿区的一半, 能更好地估算整块棉田的土壤呼吸排放量. 微喷条件下, 受作物植株的遮挡与阻碍及微喷本身设置的影响, 进入土壤的水分及肥料在距离微喷管不同距离的空间位置的分布差异性, 导致土壤温室气体在空间上的异质性. 小麦田土壤 CO₂ 累积通量表现为 $1/12\text{L} > 5/12\text{L} > 1/4\text{L}$, 距离微喷管最近的土壤 CO₂ 排放量最大, 不同测定位置土壤的 CO₂ 排放通量与土壤水分含量相关性较大(R 为 0.572 ~ 0.876), 但未达显著水平, 与土壤温度相关性不

大. 有研究认为该阶段内小麦根系生长处于高峰期, 根系呼吸所占比重增大, 因此影响土壤 CO_2 排放的关键因素不再是土壤温度, 作物生长成为影响 CO_2 排放的关键因素^[33,39]. 与该阶段微喷方式下根系呼吸占土壤呼吸的比例为 22.16%, 且高于整个生长季平均值一致.

本研究不同空间位置 N_2O 累积排放通量表现为 $1/12\text{L} > 1/4\text{L} > 5/12\text{L}$, 但不同空间位置土壤 N_2O 通量差异不显著. 与土壤水分与 N_2O 排放通量显著正相关 ($P < 0.05$) 一致, 距离微喷管越近, 累积通量越大; 而两条微喷管的中间位置, 距离微喷管最远, 累积通量也最小. Sánchez-Martín 等^[20] 对距离滴灌管不同远近的干区与湿区分别进行气体分析, 也认为水分的不均匀分布直接影响了土壤的硝化与反硝化反应, 因此滴灌湿区频繁的脉冲效应会增加氮氧化物的排放, 而干的区域由于深层土壤是湿土而同样排放氮氧化物. 总的来说, 目前已获得了关于滴灌的一些研究成果, 但关于微喷灌溉造成的水肥不均匀性对温室气体排放通量的影响结果则较为鲜见. 由于微喷水肥一体化正在华北平原开展大范围的示范与推广, 因此对该灌溉方式下温室气体的排放通量及空间差异性研究尤为迫切.

3.3 土壤呼吸组分及农田碳汇

在农田生态系统碳平衡估算中, 通过土壤异养呼吸与净初级生产量的差值可得净生态系统碳交换的量值, 从而可了解生态系统碳的源汇状况, 因而土壤异养呼吸是碳平衡估算的关键因子之一^[40]. 对于农田土壤异养呼吸部分的测定与估算, 常用的方法有成分综合法、根系生物量外推法、根排除法和同位素标记法等^[41], 其中, 根系排除法由于操作简便应用较为广泛, 但因根去除后的裸地无根际共生体的呼吸而降低了土壤异养呼吸的量值, 从而使农田的碳汇和根系呼吸的估算偏高. 同时, 裸地小区的设置也会影响土壤异养呼吸的估算, 裸地小区面积太小, 周围根系的影响相对增加, 使得裸地土壤呼吸估算结果偏高; 小区面积过大, 两种土壤的微环境差异增加^[42], 如无周围小麦的遮阴 (尤其是小麦拔节期之后) 以及作物对养分和水分的吸收, 裸地土壤具有土壤水分蒸发大、容易干裂和土壤温度高等特点, 使得土壤异养呼吸通量与实际也存在偏差^[43]. 本研究中微喷和漫灌方式下土壤异养呼吸占土壤呼吸的比例较高, 分别为 81.09% 和 84.18%, 可能跟裸地小区面积较小有关, 深层和延伸的小根系的呼吸使得裸地土壤异养呼吸偏高, 但

同时也缓冲或抵消了由于无根际共生体的呼吸造成的偏差. 本研究中根系呼吸分别占土壤呼吸通量的 18.91% 和 15.82%, 这与 Jia 等^[44] 农田生态系统根系呼吸占土壤总呼吸的比例约为 12% ~ 38% 的研究结果是一致的.

目前针对农田生态系统的碳平衡的研究方法有: 土壤排放法和生物量排放法^[45]. 土壤排放法根据土壤碳储量的变化对系统的净碳平衡进行评价, 以农田土壤为边界, 土壤是固碳的唯一有效主体; 生物量排放法则以农田系统为边界, 作物是固碳的主体, 由系统固碳量与系统碳排放决定^[46]. 本研究通过作物固碳和土壤碳排放的差值估算农田碳汇, 而微喷和漫灌两种方式下土壤有机碳含量无显著差异, 且在生育期内无明显变化, 故在碳平衡分析中, 未考虑土壤碳库的影响. 虽然这在短期的研究中是合理的, 但对于长期的碳平衡研究, 仍需进行土壤碳库变化的研究^[47].

4 结论

(1) 微喷方式下小麦生长季土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量均值均高于漫灌, 微喷方式下 CO_2 累积排放量比漫灌高 12.9%, 土壤 N_2O 累积排放量比漫灌高 77.0%. 温度和土壤水分是影响 CO_2 及 N_2O 排放通量的主要因素, 但在小麦的不同生长阶段, 影响作用存在一定的差异.

(2) 在返青期-成熟期, 微喷方式下土壤 CO_2 排放通量与土壤水分极显著正相关 ($P < 0.01$), 表现为距离微喷管近的土壤 CO_2 排放量最大. 土壤 N_2O 排放通量与土壤水分均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与大气温度及土壤温度均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 随距离微喷管的距离增加, 土壤 N_2O 累积排放量减小.

(3) 微喷与漫灌方式下土壤异养呼吸通量均值分别为 $339.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $313.26 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 根系呼吸分别为 $79.08 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $58.88 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 根系呼吸分别占土壤呼吸通量的 18.91% 和 15.82%.

(4) 在返青期之前及孕穗-开花期, 小麦田生态系统是弱的碳源, 其他时期均为碳汇. 微喷方式下, 小麦生长季土壤微生物异养呼吸通量和累积排放量均大于漫灌, 而微喷方式下初级生产力也大于漫灌, 微喷与漫灌方式下小麦田碳汇 (以 C 计) 为 $1519.72 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1343.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. 因此, 小麦田由传统漫灌转变为微喷节水灌溉后, 虽然农田土壤 CO_2 和 N_2O

排放通量均有增加, 但农田碳汇强度(以 C 计)也增加了 176.48 g·m⁻².

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007-the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Wang Y Y, Hu C S, Ming H, *et al.* Concentration profiles of CH₄, CO₂ and N₂O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, **164**: 260-272.
- [3] Deng W G, Wu W D, Wang H L, *et al.* Temporal dynamics of iron-rich, tropical soil organic carbon pools after land-use change from forest to sugarcane[J]. Journal of Soils and Sediments, 2009, **9**(2): 112-120.
- [4] Jacinthe P A, Lal R. Nitrogen fertilization of wheat residue affecting nitrous oxide and methane emission from a central Ohio Luvisol[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, **37**(6): 338-347.
- [5] Reicosky D C, Gesch R W, Wagner S W, *et al.* Tillage and wind effects on soil CO₂ concentrations in muck soils[J]. Soil and Tillage Research, 2008, **99**(2): 221-231.
- [6] Scheer C, Wassmann R, Kienzler K, *et al.* Methane and nitrous oxide fluxes in annual and perennial land-use systems of the irrigated areas in the Aral Sea Basin[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(10): 2454-2468.
- [7] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2009, **42**(9): 3354-3360.
- [8] 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.
- [9] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(7): 1303-1307.
- [10] 陈书涛, 朱大威, 牛传坡, 等. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2858-2865.
- [11] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. 环境化学, 2012, **31**(4): 407-414.
- [12] 贺京, 李涵茂, 方丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(20): 246-250.
- [13] Gao Y, Yang L L, Shen X J, *et al.* Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2014, **146**: 1-10.
- [14] 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.
- [15] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 膜下滴灌对新疆棉田生态系统净初级生产力、土壤异氧呼吸和 CO₂ 净交换通量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(4): 1018-1024.
- [16] 张前兵, 杨玲, 孙兵, 等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(14): 77-84.
- [17] 牛海生, 李大平, 张娜, 等. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(5): 749-755.
- [18] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, **137**(3-4): 251-260.
- [19] Kennedy T L, Suddick E C, Six J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, **170**: 16-27.
- [20] Sánchez-Martín L, Arce A, Benito A, *et al.* Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(7): 1698-1706.
- [21] Sánchez-Martín L, Meijide A, García-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.
- [22] Mosier A R. Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere[J]. Plant and Soil, 2001, **228**(1): 17-27.
- [23] 满建国, 王东, 于振文, 等. 不同带长微喷带灌溉对土壤水分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(8): 2186-2196.
- [24] 满建国, 王东, 张永丽, 等. 不同喷射角微喷带灌溉对土壤水分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(24): 5098-5112.
- [25] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. Global Change Biology, 2001, **7**(6): 667-677.
- [26] Tang J W, Baldocchi D D. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components[J]. Biogeochemistry, 2005, **73**(1): 183-207.
- [27] 董云社, 章申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化[J]. 科学通报, 2000, **45**(3): 318-322.
- [28] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, *et al.* The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1978, **199**(4325): 141-146.
- [29] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [30] 刘建国, 吕新, 王登伟, 等. 膜下滴灌对棉田生态环境及作物生长的影响[J]. 中国农学通报, 2005, **21**(3): 333-335.
- [31] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(12): 2420-2430.
- [32] 刘祥超, 王凤新, 顾小小. 水、热对土壤 CO₂ 排放影响的研究[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(2): 290-295.
- [33] 潘莹, 胡正华, 吴杨周, 等. 保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2771-

- 2776.
- [34] Liu S W, Zhang L, Jiang J Y, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice seedling nurseries under flooding and moist irrigation regimes in Southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **426**: 166-171.
- [35] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. *中国农业科学*, 2008, **41** (12): 4294-4300.
- [36] Jiao Z H, Hou A X, Shi Y, *et al.* Water management influencing methane and nitrous oxide emissions from rice field in relation to soil redox and microbial community[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, **37** (13-14): 1889-1903.
- [37] Hou H J, Peng S Z, Xu J Z, *et al.* Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. *Chemosphere*, 2012, **89** (7): 884-892.
- [38] 朱士江. 寒地稻作不同灌溉模式的节水及温室气体排放效应试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012. 57-69.
- [39] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. *应用生态学报*, 2004, **15** (9): 1552-1560.
- [40] 谢薇, 陈书涛, 胡正华. 中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35** (1): 334-340.
- [41] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. *地球科学进展*, 2003, **18** (4): 597-602.
- [42] 丁杰萍, 罗永清, 周欣, 等. 植物根系呼吸研究方法及其影响因素研究进展[J]. *草业学报*, 2015, **24** (5): 206-216.
- [43] 禄兴丽, 廖允成. 不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36** (6): 2266-2273.
- [44] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38** (4): 653-660.
- [45] Huang J X, Chen Y Q, Sui P, *et al.* Estimation of net greenhouse gas balance using crop-and soil-based approaches: two case studies[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 299-306.
- [46] 龙攀. 有机物料还田对麦玉两熟农田土壤有机碳和系统碳净平衡影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. 18.
- [47] 张权. 华北冬小麦-夏玉米轮作农田碳平衡特征及控制因素研究[D]. 北京: 清华大学, 2014. 80.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行