

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究	张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 汤洁, 唐宜西, 孟伟, 董瑶 (2439)
北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究	姚波, 周凌晔, 刘钊, 张根, 夏玲君 (2449)
浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征	方双喜, 周凌晔, 栾天, 马千里, 王红阳 (2454)
南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征	段卿, 安俊琳, 王红磊, 缪青 (2460)
西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM _{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较	程玉婷, 王格慧, 孙涛, 成春雷, 孟静静, 任艳芹, 李建军 (2468)
沙尘天气对兰州市 PM ₁₀ 中主要水溶性离子的影响	王芳, 陈强, 张文煜, 郭勇涛, 赵连彪 (2477)
上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究	梁宗敏, 杜睿, 杜鹏瑞, 王亚玲, 李梓铭 (2483)
重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量	彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇 (2490)
宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析	李璇, 王雪松, 刘中, 吴梁, 翁燕波, 胡杰 (2497)
包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选	王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 聂磊, 郝郑平 (2503)
氨水混合吸收剂脱除 CO ₂ 实验研究	夏芝香, 项群扬, 周旭萍, 方梦祥 (2508)
焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究	孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 陆勇, 吴昌敏, 罗锦洪 (2515)
2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源	邢建伟, 钱薇微, 绳秀珍 (2520)
千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异	王明珠, 张运林, 施坤, 高冀, 刘刚, 蒋浩 (2528)
千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析	殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明 (2539)
太湖夏季水体中尿素的来源探析	韩晓霞, 朱广伟, 许海, Steven W. Wilhelm, 秦伯强, 李兆富 (2547)
鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例	刘霞, 钱奎梅, 谭国良, 邢久生, 李梅, 陈宇炜 (2557)
不同营养湖泊沉积物中 ²¹⁰ Pb _{ex} 和营养盐垂向分布特征及相关性分析	王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼 (2565)
地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究	姜烈, 何江涛, 姜永海, 刘菲 (2572)
预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究	陈雯婧, 丛海兵, 徐亚军, 王巍, 蒋新跃, 刘玉娇 (2579)
类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附	王红宇, 刘艳 (2585)
粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学	孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙 (2590)
SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd ²⁺ 的影响	王建涛, 孟昭福, 杨亚提, 杨淑英, 李彬, 马麟莉, 许绍娥 (2596)
老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响	唐伟, 郭悦, 吴景贵, 黄兆琴, 代静玉 (2604)
TiO ₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究	李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 王莉, 刘晴, 刘钰鑫, 何丽丽 (2612)
荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用	朱江鹏, 梅婷, 彭云, 葛思怡, 李时银, 王国祥 (2620)
改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究	马楠, 田耀金, 杨广平, 谢鑫源 (2627)
催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨	王梦月, 马鲁铭 (2633)
聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 为反硝化固体碳源的脱氮特性研究	刘佳, 沈志强, 周岳溪, 曹蓉, 李元志 (2639)
某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解	青宪, 黄锦琼, 余小巍, 张素坤, 杨艳艳, 任明忠, 温玉龙 (2645)
嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究	卫丹, 万梅, 刘锐, 王根荣, 张讯达, 文晓刚, 赵远, 陈吕军 (2650)
提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法	李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 朱建平, 王淑莹 (2658)
滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价	郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 王薛平 (2664)
舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征	江敏, Le Huy Tuan, 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊 (2672)
青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析	谢婷, 张淑娟, 杨瑞强 (2680)
福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评价	黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 李绘, 陈文文, 张莉, 胡婷, 石燎 (2691)
不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析	张鸿, 赵亮, 何龙, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (2698)
桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素	李磊, 任景玲, 刘素美, 蒋增杰, 杜金洲, 方建光 (2705)
引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例	王幼奇, 白一茹, 王建宇 (2714)
三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征	李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 赵铮, 张金洋, 马明, 张成 (2721)
广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评价	何秀婷, 王奇, 聂湘平, 杨永涛, 程章 (2728)
青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价	张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 高宗军 (2736)
焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究	伯鑫, 王刚, 温柔, 赵春丽, 吴铁, 李时蓓 (2742)
Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响	王辉, 谢鑫源 (2748)
3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应	李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅 (2755)
施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究	陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 刘孝利, 叶长城, 罗梅梅, 毛懿德 (2762)
保护性耕作对茬冬小麦土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	潘莹, 胡正华, 吴杨周, 孙银银, 盛露, 陈书涛, 肖启涛 (2771)
渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系	贾曼莉, 郭宏, 李会科 (2777)
蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究	王宁, 彭胜, 陈家军 (2785)
铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究	牟姝君, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (2791)
连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征	赵晨阳, 魏源送, 葛振, 钟佳, 才兴, 张媛丽, 李洪枚 (2798)
冬季猪粪固体堆放过程中 NH ₃ 、N ₂ O 和 NO 排放特征研究	丁钢强, 韩圣慧, 袁玉玲, 罗琳, 王立刚, 李虎, 李萍 (2807)
填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究	黄友福, 许心雅, 范良鑫, 方艺民 (2816)
渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究	王东梅, 刘丹, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖 (2822)
中国铅流变化的定量分析	马兰, 毛建素 (2829)
半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展	赵志瑞, 侯彦林 (2834)
《环境科学》征稿简则 (2679)	
《环境科学》征订启事 (2735)	
信息 (2476, 2556, 2713, 2770)	

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响

潘莹^{1,3}, 胡正华^{1,2*}, 吴杨周^{1,3}, 孙银银³, 盛露^{1,3}, 陈书涛¹, 肖启涛^{1,3}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 为研究保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响, 在前茬进行常规耕作(T)、免耕(NT)、免耕+秸秆覆盖(NTS)、常规耕作+秸秆施用(TS)这4种处理, 采用静态箱-气相色谱法分析土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量。结果表明, 保护性耕作没有改变后茬土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的季节性规律, 对冬小麦生物量无明显影响; 保护性耕作显著减少了土壤 CO₂ 和 N₂O 累积排放量。与 T 相比, TS、NT、NTS 的全生育期土壤 CO₂ 累积排放量分别降低了 5.95% ($P=0.132$)、12.94% ($P=0.007$) 和 13.91% ($P=0.004$), 土壤 N₂O 累积排放量分别减少了 31.23% ($P=0.000$)、61.29% ($P=0.000$) 和 33.08% ($P=0.000$)。本研究表明免耕与秸秆施用能减少后茬作物生长季土壤的 CO₂ 和 N₂O 排放量。

关键词: 保护性耕作; 后茬; 土壤; CO₂; N₂O

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2771-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.047

Effects of Conservation Tillage on Soil CO₂ and N₂O Emission During the Following Winter-Wheat Season

PAN Ying^{1,3}, HU Zheng-hua^{1,2}, WU Yang-zhou^{1,3}, SUN Yin-yin³, SHENG Lu^{1,3}, CHEN Shu-tao¹, XIAO Qi-tao^{1,3}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to study the effect of conservation tillage on soil CO₂ and N₂O emissions in the following crop-growing season, field experiments were conducted in the winter wheat-growing season. Four treatments were conventional tillage (T), no-tillage with no straw cover (NT), no-tillage with straw cover (NTS), and conventional tillage with straw incorporation (TS), respectively. The CO₂ and N₂O fluxes were measured using a static chamber-gas chromatograph technique. The results showed that in the following winter wheat-growing season, conservation tillage did not change the seasonal pattern of CO₂ and N₂O emission fluxes from soil, and had no significant effect on crop biomass. Conservation tillage significantly reduced the accumulative amount of CO₂ and N₂O. Compared with the T treatment, the accumulative amount of CO₂ under TS, NT, and NTS treatments were reduced by 5.95% ($P=0.132$), 12.94% ($P=0.007$), and 13.91% ($P=0.004$), respectively, and the accumulative amount of N₂O were significantly reduced by 31.23% ($P=0.000$), 61.29% ($P=0.000$), and 33.08% ($P=0.000$), respectively. Our findings suggest that conservation tillage significantly reduced CO₂ and N₂O emission from soil in the following winter wheat-growing season.

Key words: conservation tillage; the following crop season; soil; CO₂; N₂O

大气温室气体浓度增加加剧了气候变暖, 陆地生态系统碳氮循环过程及机制已成为全球变化生态研究热点。CO₂ 和 N₂O 是重要的温室气体, 大气中 N₂O 浓度虽低, 但其百年尺度的增温潜势是 CO₂ 的 298 倍^[1]。农田土壤是 CO₂ 的重要源/汇和 N₂O 的重要排放源, 通过合适的耕作措施来促进农田增汇减排以减缓气候变暖有着巨大潜力^[2]。

农田保护性耕作是农业温室气体减排的重要技术之一^[3]。在美国、澳大利亚、加拿大、俄罗斯等发达国家, 保护性耕作已成为可持续农业的主导技术之一^[4]。保护性耕作能减少对土壤的扰动, 增加

地表覆盖, 改变土壤理化性质, 影响农田土壤生态效应, 如促进土壤有机碳的积累^[5], 改变硝化反硝化速率^[6], 抑制土壤有机质矿化速率, 从而减少 CO₂ 和 N₂O 的排放^[7]。Kern 等^[8]估计, 到 2020 年, 如果 57% 的耕地采用保护性耕作技术, 美国土壤的固碳能力将达到 80 ~ 129 Tg。但也有学者对保护性耕作

收稿日期: 2013-10-25; 修订日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175136, 41375006); 江苏省农业气象重点实验室开放基金项目(KYQ1302); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 潘莹(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地气碳氮交换与全球变化, E-mail: summerpansy@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

能否减少土壤 CO_2 和 N_2O 排放持保留或否定的态度,如 Lal^[9] 认为,保护性耕作会增加土壤 CO_2 排放. 不同的保护性耕作措施、水肥管理方案对土壤温室气体排放的影响程度也各不相同^[10,11]. 因此,保护性耕作对土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响规律仍需深入研究.

目前,有关保护性耕作对农田温室气体影响的研究多集中在当季作物生长阶段^[12],而对后茬作物时期土壤 CO_2 和 N_2O 排放的研究较少. 考虑到秸秆分解过程较慢,难以在一个作物生长季完全分解,有必要对后茬作物生长季进行研究. 本研究为大豆-冬小麦轮作系统,在大豆播种时进行免耕和秸秆施用处理,观测后茬冬小麦生长季土壤 CO_2 和 N_2O 的

排放通量,探讨保护性耕作对后茬农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响特征,有助于估算保护性耕作措施下区域农田温室气体的排放量,以期为农业固碳提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验地点与田间管理

田间试验在南京信息工程大学农业气象与生态试验站进行. 土壤为灰马肝土属,土壤质地为壤质黏土,耕层土壤黏粒含量 26.1%,土壤 pH(H_2O) 值为 6.22,有机碳和全氮的含量分别为 $37.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.59 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 冬小麦品种为宁麦 12 号,主要生育期及肥料管理见表 1.

表 1 冬小麦主要生育期及肥料管理

Table 1 Main growth stages of winter wheat and fertilization schedule

日期	生育期及肥料管理	日期	生育期及肥料管理
2011-11-08	播种,基肥(复合肥, $40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 含 N 18%, P_2O_5 46%)	2012-04-12	孕穗
2011-11-21	出苗	2012-04-19	抽穗
2012-01-03	越冬肥(复合肥, $40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 含 N 18%, P_2O_5 46%)	2012-04-26	扬花
2012-02-06	返青肥(尿素, $21 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)	2012-05-03	灌浆
2012-03-01	返青	2012-05-16	成熟
2012-04-05	拔节	2012-05-24	收获

1.2 实验设计

在大豆播种前进行如下处理:常规翻耕(T)、免耕(NT)、常规翻耕+秸秆施用(TS)、免耕+秸秆覆盖(NTS)这 4 种处理. 每个处理区的面积是 $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,处理区之间设有 15 cm 深 30 cm 宽的间隔,再将每个处理区分为 3 个试验小区,计 12 个试验小区. T 和 TS 处理区进行人工翻耕,深度约为 15 cm. 施用秸秆为水稻秸秆,切为 2~3 cm 长的小段,均匀覆盖在 TS 和 NTS 的土壤表面,TS 的秸秆被翻耕到土壤中. 秸秆施用量(干重)为 $225 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. 大豆收获后,在试验小区种植冬小麦,常规翻耕和免耕的处理依然采用人工翻耕和免耕方式,但不再施用秸秆.

1.3 气体采集与分析

气体样品的采集与分析采用静态箱-气相色谱法^[13]. 采样底座为高 10 cm、直径 22 cm 的无底圆形盆钵,上沿有 1.5 cm 深的凹槽以注水与采样箱密封. 底座安装在植株间的土壤中,底座内去除作物和杂草. 采样箱为高 1 m 的 PVC 圆柱,包裹有海绵和铝箔,以避免因太阳辐射引起箱内温度的变化. 采样时将采样箱套在底座上,注水密封,连接好采气设备和温度计后,用带有三通阀的医用针筒每隔 10 min 采集一次气体,即于关箱后的 0、10、20 min 采

气,每次抽样 60 mL. 同时记录箱内温度,用 WET-2 土壤水分温度电导率速测仪(Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK)测定 5 cm 深土壤温湿度. 考虑到冬小麦在越冬期停止生长,返青后小麦开始快速生长,所以本实验从返青期开始采样分析,每周 1 次,采样时间为 09:00~10:00. 气样用改装的 Agilent-6890N 气相色谱仪同步检测 CO_2 和 N_2O 的混合比,根据大气压力、温度、采样箱高度、普适气体常数等,可求得单位面积的排放量^[14].

1.4 生物量测定

冬小麦成熟后,将单位面积植株连根整株收获,用自来水细流仔细清洗根系土壤. 分植株地上部分和根,80℃烘干至恒重,测定生物量.

1.5 统计方法

用 Excel 2003 计算土壤 CO_2 和 N_2O 的排放通量和累积排放量并绘图,用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA)统计软件分析不同处理之间 CO_2 和 N_2O 累积排放量的差异性.

2 结果与分析

2.1 土壤温度与湿度

图 1 为冬小麦田土壤 5 cm 深处土壤温度与土壤湿度. 土壤温度变化范围为 $4.8 \sim 22.1^\circ\text{C}$,平均土

壤温度为 14.3℃,在冬小麦生长季呈上升趋势. 土壤湿度变化范围为 7.59%~23.13%,平均湿度为 13.52%,在冬小麦生长季呈一定的下降趋势.

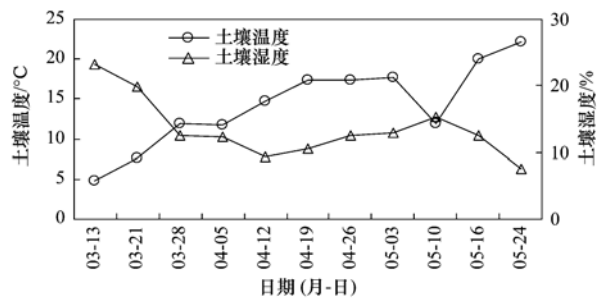


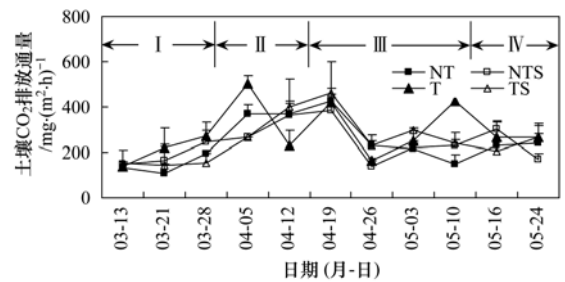
图1 土壤温湿度的变化

Fig. 1 Dynamic variation of soil temperature and soil moisture

2.2 保护性耕作对土壤 CO₂ 排放的影响

2.2.1 土壤 CO₂ 排放通量的季节性规律

由图2可见,各处理 CO₂ 排放通量的季节性变化模式基本相同,在返青期和拔节-孕穗期土壤 CO₂ 排放通量逐渐增加,进入抽穗期后逐渐降低,在抽穗-灌浆期和成熟期土壤 CO₂ 排放通量较低. 不同耕作措施没有改变后茬冬小麦土壤 CO₂ 排放通量的季节性变化规律.



I:返青期,II:拔节-孕穗期,III:抽穗-灌浆期,IV:成熟期,下同

图2 保护性耕作对土壤 CO₂ 排放通量的影响

Fig. 2 Effects of conservation tillage on CO₂ emission flux from soil

2.2.2 土壤 CO₂ 累积排放量

图3是不同生育期土壤 CO₂ 累积排放量. 与 T 相比,在返青期,TS、NT、NTS 的土壤 CO₂ 累积排放量分别降低了 31.56%、35.47%、15.98%;在拔节-孕穗期,各处理的土壤 CO₂ 累积排放量差异不明显;在抽穗-灌浆期,NT、NTS 的土壤 CO₂ 累积排放量降低了 9.58%和 16.80%,TS 的土壤 CO₂ 累积排放量略有增加,但差异性不显著;在成熟期,NT、NTS、TS 的土壤 CO₂ 累积排放量分别降低 10.10%、10.92%、11.06%. 全生育期来看,TS、NT、NTS 降低了土壤 CO₂ 累积排放量,降幅分别为 5.95% ($P = 0.132$)、12.94% ($P = 0.007$) 和

13.91% ($P = 0.004$). 可见,免耕和秸秆覆盖保护性耕作减少了后茬冬小麦生长季土壤的 CO₂ 累积排放量.

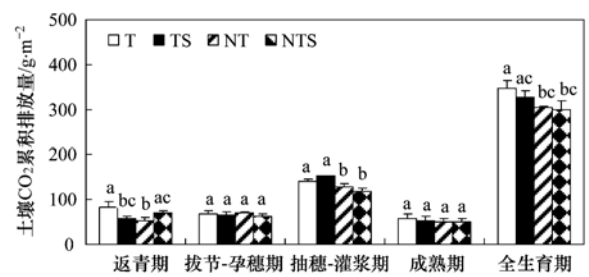


图3 保护性耕作对土壤 CO₂ 累积排放量的影响

Fig. 3 Effects of conservation tillage on the accumulative amount of CO₂ emission from soil

2.3 保护性耕作对土壤 N₂O 排放的影响

2.3.1 土壤 N₂O 排放通量的季节性规律

各处理的土壤 N₂O 排放通量见图4,N₂O 排放通量的变化模式基本相同,在返青期土壤 N₂O 排放通量较高,可能由于施加返青肥所致. 进入抽穗期后降低,在抽穗-灌浆期和成熟期土壤 N₂O 排放通量较低,不同耕作措施没有改变后茬土壤 N₂O 排放通量的季节性变化规律.

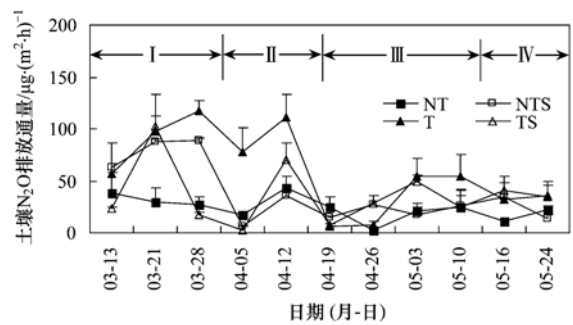


图4 保护性耕作对土壤 N₂O 排放通量的影响

Fig. 4 Effects of conservation tillage on N₂O emission flux from soil

2.3.2 土壤 N₂O 累积排放量

图5是不同生育期土壤 N₂O 累积排放量. 从中可见,与 T 相比,在返青期 TS、NT 和 NTS 的土壤 N₂O 累积排放量比 T 分别减少了 36.72%、66.61% 和 11.91%;在拔节-孕穗期 TS、NT 和 NTS 的土壤 N₂O 累积排放量分别减少了 57.68%、67.40% 和 76.32%;在抽穗-灌浆期 TS、NT 和 NTS 的土壤 N₂O 累积排放量分别减少了 2.24%、48.41% 和 31.40%;在成熟期 NT、NTS 的土壤 N₂O 累积排放量分别减少了 49.61%、33.90%,但 TS 升高了 8.45%. TS、NT 和 NTS 降低了全生育期土壤 N₂O 累积排放量,降幅分别为 31.32% ($P = 0.000$)、

61.29% ($P=0.000$)和33.08% ($P=0.000$). 可见,免耕和秸秆施用减少了后茬土壤 N_2O 累积排放量,在返青期和拔节-孕穗期降幅较大.

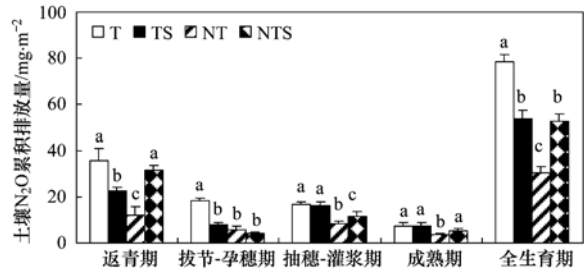


图5 保护性耕作对不同生育期土壤 N_2O 累积排放量的影响

Fig. 5 Effects of conservation tillage on the accumulative amount of N_2O emission from soil

2.4 保护性耕作对冬小麦生物量的影响

保护性耕作对冬小麦收获生物量的影响如表2所示, T与TS、NT、NTS处理间冬小麦的总生物量、地上生物量、地下生物量均不存在显著性差异,保护性耕作对后茬冬小麦生物量无明显的影响.

表2 保护性耕作对冬小麦生物量的影响/ $kg \cdot m^{-2}$

Table 2 Effects of conservation tillage on biomass of winter wheat/ $kg \cdot m^{-2}$

处理	地上生物量	地下生物量	总生物量
T	2.03 ± 0.45	0.09 ± 0.04	2.12 ± 0.49
TS	2.11 ± 0.17	0.08 ± 0.01	2.19 ± 0.16
NT	1.55 ± 0.17	0.15 ± 0.07	1.70 ± 0.22
NTS	1.84 ± 0.86	0.11 ± 0.03	1.98 ± 0.88

3 讨论

3.1 保护性耕作对冬小麦系统 CO_2 影响

免耕和秸秆施用降低了后茬土壤 CO_2 累积排放量,这与万运帆等^[15]、Reicosky 等^[16]对冬闲农田和美国东南沿海平原的研究结果一致. 保护性耕作对 CO_2 排放的影响与土壤质地以及空隙度密切相关^[17],土壤透气性越强,越有利于 CO_2 的排放. 免耕和秸秆覆盖降低了土壤透气性,抑制了土壤 CO_2 排放. 同时,免耕避免对土壤的翻动,减少深层土壤与空气的接触,减低了原土壤有机质的氧化和矿化速率,同时免耕可以增加土壤团聚体的稳定性,通过化学结合机制与物理保护促进土壤有机碳的积累^[18]. He 等^[19]研究发现,长期免耕使土壤表层的有机碳比翻耕增加16.1%. 并且秸秆覆盖通过降解、腐殖化等作用把秸秆转化为土壤有机碳,从而增加土壤有机碳含量. 研究表明,还田秸秆中8%~35.7%的碳以土壤有机碳的形式在土壤碳库中保存

下来^[20]. 保护性耕作增加土壤有机碳含量,减少温室气体排放^[21]. 在日本北海道农田的研究也发现,在少耕情况下,每 hm^2 可减少125.5 $kg CO_2$ 的排放量,相比传统耕作减少了15%~29%^[22]. 但也有研究表明,保护性耕作增加土壤温度、含水量^[23],提高土壤呼吸^[24]、土壤酶活性^[25]、土壤微生物数量^[26],在一定程度上能增加 CO_2 的排放. Franzluebbers 等^[27]在美国德克萨斯州的长期耕作试验发现,常规耕作比保护性耕作释放更少的 CO_2 .

结合图1和图2可见,在4月12日之前土壤温度低于15℃, CO_2 排放通量随着土壤温度的升高而增加,此时 CO_2 排放通量以土壤微生物代谢呼吸为主^[28],土壤温度是微生物代谢活动的主要限制因素,对 CO_2 排放影响显著;但4月12日之后土壤温度对 CO_2 的影响并不显著,小麦根系生长处于高峰期,根系呼吸所占比重增大,影响 CO_2 排放的关键因素不再是土壤温度,此时作物生长成为影响 CO_2 排放的关键因素,这与陈述悦等^[29]研究结果一致.

3.2 保护性耕作对冬小麦系统 N_2O 影响

免耕提高土壤容重、降低气体扩散速率^[30],进而使得硝化反硝化过程产生的 N_2O 在扩散逸出土面之前被进一步还原为 N_2 ,从而会降低 N_2O 排放^[6]. 本研究即发现免耕和秸秆覆盖降低了后茬土壤 N_2O 排放,这与蒋静艳等^[31]对当季作物的研究结果一致. 但 Rochette 等^[32]、Venterea 等^[33]认为,免耕和秸秆覆盖可以提高土壤含水量和底物有效性,并促进厌氧微环境的形成,有利于反硝化作用的发生,能增加土壤 N_2O 含量.

土壤温度影响微生物的代谢活动,土壤温度升高,促进土壤微生物硝化和反硝化作用, N_2O 排放增加. 陈卫卫等^[34]对三江平原农田的研究表明,温度是 N_2O 排放的主要影响因素. 土壤湿度不仅影响微生物的活性,同时也影响着 N_2O 在土壤中的运输及向大气中的扩散. 姚志生等^[35]研究表明,土壤湿度低于75% WFPS, N_2O 排放与土壤湿度呈正相关,反之则呈负相关. 本研究在返青期土壤 N_2O 排放通量较高,进入抽穗期后 N_2O 排放降低. 这可能是由于施加返青肥所致,氮肥的施用促进土壤 N_2O 排放,是农业土壤中 N_2O 的最大来源^[36].

秸秆施用对 N_2O 排放的影响与土壤 C/N、秸秆还田量以及水肥管理方式存在一定的关系. 秸秆施用提高了土壤的 C/N 比,引起微生物对 N 源的争夺

利用, N 素利用充分, 减少了硝化反硝化过程的中间产物 N₂O 的排出^[5]. 肖嫩群等^[10] 研究认为秸秆还田量间接影响着土壤中 N₂O 的排放, 适量的稻草还田后, 能增强土壤氨化和硝化作用; 而过量的稻草还田反而不利于氨化和硝化细菌的繁殖. 有学者提出不施氮或低施氮时, 秸秆还田可促进 N₂O 排放; 高施氮时, 秸秆还田抑制 N₂O 排放^[11].

免耕和秸秆施用有利于有机氮矿化, 增加土壤中有效氮素含量, 减少 N₂O 排放. 汪娟等^[37] 研究表明, 表层土壤全氮含量表现为 NTS > TS > NT > T. 但是, 秸秆施用增加土壤含水量和温度, 更容易引起氨的挥发损失与硝态氮的下渗淋失^[38]. 因此, 不同水热条件下保护性耕作对土壤氮素的影响不同. 本研究中保护性耕作对后茬冬小麦生物量无明显的影响, 表明保护性耕作对后茬土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响并非由于作物生长差异引起, 而是因为保护性耕作改变了土壤环境, 比如土壤温度、含水量、土壤碳氮含量等因素, 导致土壤 CO₂ 和 N₂O 排放差异的出现.

4 结论

(1) 免耕与秸秆施用没有改变后茬冬小麦生长季土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的季节性变化规律.

(2) 免耕与秸秆施用降低了后茬冬小麦生长季土壤 CO₂ 累积排放量.

(3) 免耕与秸秆施用减少了后茬土壤 N₂O 累积排放量, 特别是在返青期和拔节-孕穗期, 土壤 N₂O 减少的幅度较大.

参考文献:

- [1] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing [A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis [C]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. 141-212.
- [2] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 农田土壤固碳措施的温室气体泄漏和净减排潜力 [J]. 生态学报, 2009, **29**(9): 4993-5006.
- [3] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 等. 保护性耕作对农田碳效应影响研究进展 [J]. 中国农业科学, 2009, **42**(12): 4275-4281.
- [4] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势 [J]. 中国农业科学, 2007, **40**(12): 2702-2708.
- [5] 张四海, 曹志平, 张国, 等. 保护性耕作对农田土壤有机碳库的影响 [J]. 生态环境学报, 2012, **21**(2): 199-205.
- [6] Sey B K, Whalen J K, Gregorich E G, *et al.* Carbon dioxide and nitrous oxide content in soils under corn and soybean [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, **72**(4): 931-938.
- [7] Passianto C C, Ahrens T, Feigl B J, *et al.* Emissions of CO₂, N₂O and NO in conventional and no-till management practices in Rondonia, Brazil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, **38**(4): 200-208.
- [8] Kern J S, Johnson M G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, **57**(4): 200-210.
- [9] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [10] 肖嫩群, 张杨珠, 谭周进, 等. 稻草还田翻耕对水稻土微生物及酶的影响研究 [J]. 世界科技研究与发展, 2008, **30**(2): 192-194.
- [11] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N₂O 排放的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(6): 840-844.
- [12] 王娟, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下豆麦双序列轮作农田温室气体的排放特征及其增温潜势 [J]. 土壤通报, 2013, **44**(1): 57-63.
- [13] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(5): 842-844.
- [14] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型 [M]. 北京: 气象出版社, 2003. 81-83.
- [15] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH₄ 和 N₂O 排放通量的影响初探 [J]. 中国农业气象, 2004, **25**(3): 8-10.
- [16] Reicosky D C, Reeves D W, Prior S A, *et al.* Effects of residue management and controlled traffic on carbon dioxide and water loss [J]. Soil and Tillage Research, 1999, **52**(3): 153-165.
- [17] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 6-31.
- [18] 周萍, 宋国茵, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制 [J]. 土壤学报, 2009, **46**(2): 263-273.
- [19] He J, Li H W, Rasaily R G, *et al.* Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat-maize cropping system in North China Plain [J]. Soil and Tillage Research, 2011, **113**(1): 48-54.
- [20] Lu F, Wang X K, Han B, *et al.* Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland [J]. Global Change Biology, 2009, **15**(2): 281-305.
- [21] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应 [J]. 生态学报, 2003, **23**(4): 787-796.
- [22] Koga N, Tsuruta H, Tsuji H, *et al.* Fuel consumption-derived CO₂ emissions under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, **99**(1-3): 213-219.
- [23] 张国盛, Chan K Y, Li G D, 等. 长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响 [J]. 生态学报, 2008, **28**(6): 2722-2728.
- [24] 牛新胜, 牛灵安, 张宏彦, 等. 玉米秸秆覆盖免耕对土壤呼吸的影响 [J]. 生态环境, 2008, **17**(1): 256-260.
- [25] 高秀君, 张仁陟, 杨招弟. 不同耕作方式对旱地土壤酶活性动态的影响 [J]. 土壤通报, 2008, **39**(5): 1012-1016.
- [26] 杨江山, 张恩和, 黄高宝, 等. 保护性耕作对麦药轮作土壤

- 酶活性和微生物数量的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(3): 824-829.
- [27] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping [J]. Soil and Tillage Research, 1995, **34**(1): 41-60.
- [28] 李琳, 张海林, 陈阜, 等. 不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(12): 2765-2770.
- [29] 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.
- [30] Alvarez R, Steinbach H S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **104**(1): 1-15.
- [31] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(5): 552-556.
- [32] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, *et al.* Nitrous oxide emissions respond differently to no-till in a loam and a heavy clay soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, **72**(5): 1363-1369.
- [33] Venterea R T, Burger M, Spokas K A. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, **34**(5): 1467-1477.
- [34] 陈卫卫, 张友民, 王毅勇, 等. 三江平原稻田 N₂O 通量特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 364-368.
- [35] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N₂O 排放对比观测研究[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(6): 691-701.
- [36] 陈晓华. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004. 98-100.
- [37] 汪娟, 蔡立群, 毕冬梅, 等. 保护性耕作对麦-豆轮作土壤有机碳全氮及微生物量碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1516-1521.
- [38] 李友军, 付国占, 张灿军, 等. 保护性耕作理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008. 1-32.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaxing	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-hui, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-rui, HOU Yan-lin	(2834)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人