

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

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

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O_3 /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响

徐珊珊^{1,2}, 侯朋福², 范立慧^{1,2}, 薛利红^{2*}, 杨林章^{2,3}, 王绍华¹, 李刚华¹

(1. 南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 江苏滩涂生物农业协同创新中心, 盐城 224002)

摘要: 以养分回用为目的, 在原状土柱模拟试验条件下, 采用间歇密闭式抽气法研究了生活污水灌溉对麦秸还田稻田田面水铵态氮浓度、田面水 pH 以及稻田氨挥发损失的影响。结果表明: ①麦秸还田显著增加了田面水 NH_4^+ -N 浓度, 生活污水灌溉则显著降低了田面水 NH_4^+ -N 浓度。②正常灌溉施肥秸秆不还田稻田处理的总氨挥发量为 $58.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占总施氮量的 24.29%; 麦秸还田显著增加了稻田的氨挥发损失, 氨挥发损失量增加了近一倍, 达总施氮量的 45.66%; 而生活污水灌溉显著降低了稻田氨挥发损失量, 氨挥发损失量降至总施肥量的 17.26% (秸秆不还田) 和 32.72% (秸秆还田)。秸秆还田与生活污水处理具有显著的正交互作用。在 3 个肥期中, 分蘖肥期氨挥发损失率最高, 占总氮肥用量的 7.38% ~ 24.44%。③无论秸秆还田与否, 氨挥发通量与田面水 NH_4^+ -N 浓度之间均存在极显著的正相关关系, 与田面水 pH 值则相关性不显著。麦秸还田增加了稻田氨挥发损失, 而麦秸还田与生活污水灌溉耦合能降低稻田氨挥发损失, 同时污水中的氮可替代 44.41% 的化肥氮, 减少稻季化肥用量, 具有显著的生态环境效益。

关键词: 稻田; 秸秆还田; 污水灌溉; 氨挥发; 田面水铵浓度

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3963-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.10.039

Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields

XU Shan-shan^{1,2}, HOU Peng-fu², FAN Li-hui^{1,2}, XUE Li-hong^{2*}, YANG Lin-zhang^{2,3}, WANG Shao-hua¹, LI Gang-hua¹

(1. Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Synthetic Innovation Center for Coastal Bio-agriculture, Yancheng 224002, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effect of straw returning and domestic sewage irrigation on the dynamics of NH_4^+ -N concentration and pH in the flood water, and ammonia volatilization of paddy fields. The results showed that the NH_4^+ -N concentration in flood water was significantly increased by wheat straw returning while significantly decreased by domestic sewage irrigation. The cumulative ammonia volatilization in the whole rice season under tap water irrigation and straw removal treatment was $58.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for 24.29% of the total N applied. The N loss ratio of ammonia volatilization was significantly increased to 45.66% by wheat straw returning, while significantly decreased to 17.26% under straw removal and 32.72% under straw returning by domestic sewage irrigation. Significant positive interaction was observed between straw incorporation and domestic sewage irrigation on ammonia volatilization loss. The average N loss from ammonia volatilization during the tillering stage was the highest among the three fertilization stages, accounting for 7.38% - 24.44% of the total N applied. In addition, ammonia volatilization fluxes showed a significant positive correlation with the flood water NH_4^+ -N concentration, irrespective of the irrigation water, but had no significant correlation with pH. These results indicated that straw returning increased ammonia volatilization losses, whereas domestic sewage irrigation could effectively reduce ammonia volatilization losses and simultaneously replace 44.41% of chemical nitrogen fertilizer by the N contained in the domestic sewage. The combination of domestic sewage irrigation and straw returning would be an ecological and environmental-friendly measure for rice nitrogen management in Taihu Lake region.

Key words: paddy fields; straw returning; sewage irrigation; ammonia volatilization; NH_4^+ -N concentration in the flood water

随着水资源的日益短缺, 污水资源化已成为全社会普遍关注的问题^[1]。农村生活污水主要由洗涤剂、垃圾和粪便等产生, 其中具有大量含氮、磷等元素的无机盐类^[2,3]。如果直接排放至水体, 不仅造成环境污染, 更是一种资源的浪费。已有研究表明, 利用土地处理系统, 将生活污水用于农田灌溉^[4,5],

既可实现生活污水的综合利用, 达到节省水资源的

收稿日期: 2016-04-19; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503106); 江苏省自主创新项目(CX(14)2050)

作者简介: 徐珊珊(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为作物生理生态, E-mail: 229528798@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: njxuelihong@gmail.com

目的,又能起到养分回用的目的^[6,7],并能够减少化肥的施用^[2,8,9].前人关于污水灌溉对水稻生长和产量的影响研究较多^[10,11],但对氮素环境排放影响的研究较少.马资厚等^[12]研究发现生活污水灌溉能降低水稻前期径流流失风险和基肥期的氮挥发损失.Zou等^[11]发现稻田正常施肥下污灌增加了 N_2O 排放.秸秆还田作为一项重要的保护性耕作措施,具有蓄水保墒、培肥土壤、节本增效等良好的社会、经济和生态效益,近年来得到了广泛的应用.在稻季还田时,由于秸秆具有较高的碳氮比,造成土壤氮的固定^[13],会抑制水稻的前期生长^[14,15],进而影响水稻产量^[16,17].但是,稻季麦秸还田显著增加了田面水的 NH_4^+-N 浓度,增加了氮肥的氮挥发损失^[18,19].如汪军等^[20]发现麦秸还田后,乌栅土和黄泥土稻田氮挥发损失分别增加了19.8%和20.3%,与秸秆不还田处理差异显著.Wang等^[21]发现秸秆还田较不还田增加氮挥发损失28.5%.而氮挥发损失是稻田氮素损失的主要途径^[22],约占施氮量的9%~40%^[21,23,24].此外,秸秆因其较高的碳氮比,

还田后会造成氮的短期固定现象^[14,15],而生活污水中含有大量的无机氮源,碳氮比含量较低,秸秆还田条件下耦合生活污水灌溉,是否能影响土壤以及田面水氮动态,减少氮挥发排放等还有待于进一步研究证实.为此,本研究开展了麦秸还田条件下的污水灌溉原状土柱模拟试验,以自来水处理为对照,分析了秸秆还田以及污水灌溉对稻田田面水氮浓度以及土壤氮挥发的影响,以期明确污水灌溉是否能减少秸秆还田稻田的氮挥发损失.

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于江苏省农业科学院进行,供试水稻土壤取自于太湖流域宜兴周铁镇,为黄泥土.耕作层土壤基本理化性质如下:pH 5.60、全氮 $1.62\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $156.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $18.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $136\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.生活污水与自来水的水质成分如表1,各项指标均符合农田灌溉水水质标准.

表1 供试生活污水和自来水的水质

Table 1 Properties of the experiment sewage and tap water

类型	pH	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+-N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TK / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TOC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	C:N (以TOC计)
自来水	7.78	2.22	0.07	0.13	0.14	18.24	5.61	8.20
生活污水	7.61	21.47	18.14	1.23	1.61	79.66	55.72	3.71

1.2 试验设计

试验采用原状模拟土柱,土柱高度为100 cm,直径为30 cm.试验设置6个处理,分别为秸秆还田正常施肥+污水灌溉(SWN1)、秸秆还田正常施肥+自来水灌溉(STN1)、秸秆还田不施肥+自来水灌溉(STN0)、正常施肥+污水灌溉(WN1)、正常施肥+自来水灌溉(TN1)、不施肥+自来水灌溉(TN0),每个处理3次重复.本研究所用化学氮肥为尿素,整个生育期中总氮施用量为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (包括污水中灌溉带入的氮),氮肥运筹是基肥占

30%,蘖肥占30%,穗肥占40%,分别于6月22日、7月2日、8月12日施用(表2).每个处理的磷钾肥用量相同,分别为 $P_2O_5:150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $K_2O:100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,作基肥一次性施入.水稻于6月22日进行移栽,11月5日收获.水分管理为分蘖期和拔节期之间晒田一次,收获前期稻田自然落干,其余时间保持田间2~5 cm水层的淹水状态.灌溉前取样分析污水和自来水的pH、TN等指标,记录灌溉水量,根据灌溉水中总氮浓度和灌溉水量计算当次灌溉由生活污水带入稻田系统的总氮量.蘖肥的化肥氮用

表2 各处理氮肥施用情况/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 2 Nitrogen application in different treatments/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

项目	类型	处理	化肥投入氮	污水投入氮	自来水投入氮	总施氮量
秸秆还田	生活污水	SWN1	133.41	106.59	0	240
	自来水	STN1	228.72	0	11.28	240
	不施氮	STN0	0	0	0	0
不还田	生活污水	WN1	133.41	106.59	0	240
	自来水	TN1	228.72	0	11.28	240
	不施氮	TN0	0	0	0	0

量由本次追肥应投入总氮量减去之前因灌溉水源而带入的氮量, 穗肥的化肥氮量由本次追肥应投入总氮量减去蘖肥到穗肥期由灌溉水源带入的氮及灌浆期灌溉可能带入的氮量, 从而保证各处理间总氮素投入量一致。当灌浆期生活污水处理的总氮投入量达到预期用量时, 即采用自来水灌溉至收获。秸秆添加量是根据小麦亩产量为 400 kg、收获指数 0.35 进行全量还田折算。

1.3 样品的采集与测定

采用密闭室法测定氨挥发量, 每次施肥后 7 d 内连续每天测定, 其他时候每隔 5~7 d 测定一次, 每次 09:00~11:00 和 15:00~17:00 共测定 4 h, 并计算出每天的总氨挥发量^[20,25,26]。

氨挥发测定的同时同步采集田面水样, 并于每天下午 14:00~16:00 用型号为 PHS-3C 的 pH 仪测定田面水 pH。采集水样后用型号为 SKALAR 的连续流动分析仪测定 NH_4^+ -N 浓度。

1.4 数据处理

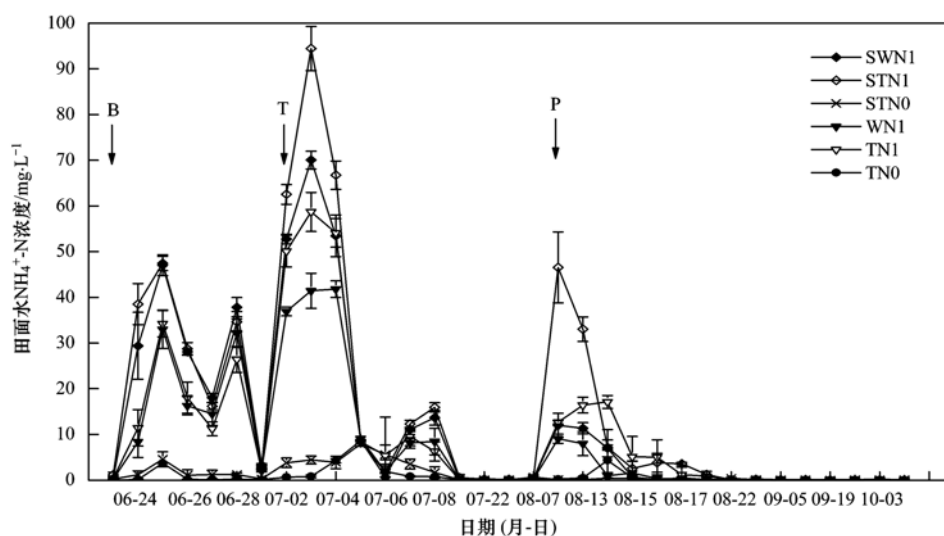
数据计算和分析采用 Microsoft Excel 2007 和

SPSS 19.0 统计软件进行方差分析; 绘图采用 Origin 8.0 软件。

2 结果与分析

2.1 田面水中 NH_4^+ -N 浓度变化动态

施肥后, 田面水 NH_4^+ -N 浓度在第 1~3 d 达到峰值, 随后逐渐降低, 至第 7 d 左右时降至最低值, 3 次施肥后不同处理间田面水 NH_4^+ -N 浓度曲线变化趋势相似(图 1)。蘖肥时期田面水 NH_4^+ -N 浓度最高, 显著高于基、穗肥时期, 穗肥期最低。氮肥施用显著增加了田面水 NH_4^+ -N 浓度, 不施氮处理的田面水 NH_4^+ -N 浓度显著低于各个施肥处理。与不还田相比, 秸秆还田后的田面水 NH_4^+ -N 浓度均高于不还田处理, 蘖肥期峰值分别较不还田处理高 67.5% (污水灌溉) 和 60.9% (自来水灌溉)。污水灌溉处理降低了田面水 NH_4^+ -N 浓度, 蘖肥期峰值分别较自来水灌溉低 25.9% (秸秆还田) 和 28.8% (秸秆不还田), 不受秸秆是否还田的影响。



B 表示基肥、T 表示蘖肥、P 表示穗肥, 下同

图 1 不同处理的田面水 NH_4^+ -N 浓度动态变化

Fig. 1 Dynamics of NH_4^+ -N concentrations in surface water under different treatments

2.2 田面水 pH 变化动态

各处理的田面水 pH 均为中性偏碱 (>6.5)。施肥后, 田面水 pH 均表现为短暂升高, 于第 2 d 或第 3 d 达到峰值, 随后逐渐降低, 水稻生育后期田面水 pH 值有增加趋势。3 次施肥后不同处理田面水 pH 曲线变化趋势相似。氮肥施用显著增加了田面水 pH, 不施氮处理的田面水 pH 显著低于各个施肥处理。与不还田相比, 秸秆还田后的田面水 pH 略高

于不还田处理, 但差异不显著。污水灌溉处理降低了田面水 pH, 不受秸秆是否还田的影响(图 2)。

2.3 稻季氨挥发动态

施肥后, 氨挥发通量在第 2 d 或第 3 d 达到峰值, 随后逐渐降低, 至第 7 d 左右时降至最低值, 3 次施肥后不同处理间氨挥发量曲线变化趋势相似(图 3)。蘖肥时期氨挥发量最高, 各处理氨挥发通量的峰值在 $1.18 \sim 22.64 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, 显著高于

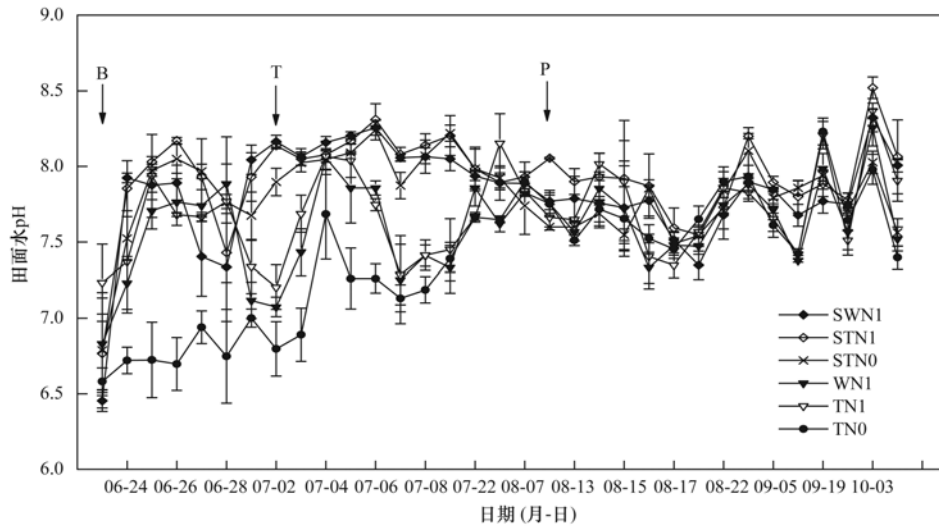


图2 不同处理的田面水 pH 动态变化

Fig. 2 Dynamics of surface water pH under different treatments

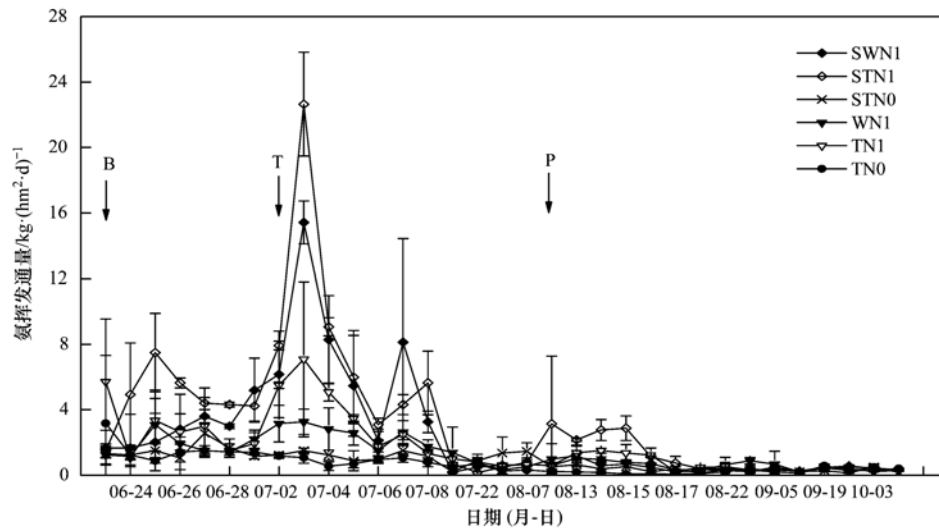


图3 不同处理的氨挥发通量变化

Fig. 3 Dynamics of ammonia volatilization flux under different treatments

基、穗肥时期,穗肥期最低。氮肥施用显著增加了氨挥发量,不施氮处理的氨挥发通量显著低于各个施肥处理。秸秆还田后的氨挥发通量均高于不还田处理,蘖肥期峰值分别较不还田处理高 3.7 倍(污水灌溉)和 2.2 倍(自来水灌溉)。污水灌溉处理降低了氨挥发速率,蘖肥期峰值分别较自来水灌溉低 31.9% (秸秆还田)和 54.0% (秸秆不还田),不受秸秆是否还田的影响。

2.4 累积氨挥发损失量

氮肥施用显著提高了水稻整个生育期的氨挥发总量,秸秆还田下增加了 3~4 倍,秸秆不还田时增加了 2~3 倍(表 3)。氨挥发损失量蘖肥期最高,占总损失量的 42.72%~62.18%,明显高于基肥和穗

肥期,穗肥期最小。秸秆还田后,无论是污水灌溉还是自来水灌溉,施氮处理在各个肥期的氨挥发总损失量均明显增加,氨挥发损失量达总施氮量的 32.72%~45.66%,占施化肥氮量的 47.91%~58.85%;蘖肥期和穗肥期差异显著,整个生育期的氨挥发总量约增加了 1 倍左右;但对不施氮肥处理的影响不显著,仅提高了穗肥期及其以后的氨挥发量,总氨挥发量提高了 24% 左右。在同等施氮条件下,无论秸秆是否还田,生活污水灌溉明显降低了施肥期的氨挥发量,略微增加了灌浆期的氨挥发量,总累积氨挥发量表现为降低,降至总施氮量的 17.26%~32.72% 分别较自来水组低 28.34% (秸秆还田)和 28.92% (秸秆不还田)。

秸秆还田显著增加了基肥、蘖肥、灌浆期氨挥发量以及总量,对穗肥期影响不显著;污水灌溉显著增加了3个肥期氨挥发量和总量,对灌浆期影响不显著;秸秆还田与污水灌溉的耦合具有显著的正交互作用,显著增加了氨挥发总损失量,但对各个肥期影响不显著.

表3 稻季不同肥期氨挥发损失量与比例¹⁾

Table 3 Volumes and ratios of cumulative ammonia emission in different periods of paddy season

处理	基肥 /kg·hm ⁻²	蘖肥 /kg·hm ⁻²	穗肥 /kg·hm ⁻²	灌浆期 /kg·hm ⁻²	总量 /kg·hm ⁻²	氨挥发占总施氮量 /%	氨挥发占化肥氮 /%
SWN1	20.00b	48.83b	4.74b	4.95a	78.52b	32.72	58.85
STN1	32.50a	58.66a	13.21a	5.20a	109.58a	45.66	47.91
STN0	10.48c	8.46c	2.80b	6.17a	27.91c	—	—
WN1	12.51b	17.70b	4.40b	6.82a	41.43b	17.26	31.06
TN1	19.20a	26.68a	6.73a	5.67ab	58.29a	24.29	25.48
TN0	11.01b	6.32c	0.90c	4.28b	22.51c	—	—
S	42.73***	253.93***	3.95 ^{ns}	5.45*	383.21***		
W	36.43***	22.55**	9.88*	0.80 ^{ns}	112.59***		
S×W	3.35 ^{ns}	0.05 ^{ns}	3.21 ^{ns}	1.93 ^{ns}	9.91*		

1) 同一列字母不同表示处理之间存在显著差异, $P < 0.05$; * 表示在 $P < 0.05$ 条件下显著; ** 表示在 $P < 0.01$ 条件下显著; *** 表示在 $P < 0.001$ 条件下显著; ns 表示不显著; S 表示秸秆; W 表示生活污水

3 讨论

稻田氨挥发是指稻田田面水中游离的 NH_4^+ 转换为气态 NH_3 后经水面挥发到空气中的过程,是一个复杂的动力学过程. 因此,稻田氨挥发主要受田面水 NH_4^+ -N 浓度、pH 以及农业管理措施如肥料种类和施氮量等的影响^[4,27]. 前人研究表明,田间氨挥发速率的动态变化主要受到田面水中 NH_4^+ -N 浓度的控制^[28],田面水中 NH_4^+ -N 浓度决定了氨气挥发潜能,田面水 NH_4^+ -N 浓度作为稻田氨挥发的重要驱动因子,其差异会对稻田氨挥发速率产生较大的影响^[29]. 因此,可通过合理施肥、改变肥料特性等措施来设法降低施肥后田面水 NH_4^+ -N 浓度,进而减少稻田化肥氮的损失^[30,31]. 本研究也发现稻季田面水 NH_4^+ -N 浓度和田面水 pH 的动态变化趋势均与氨挥发通量的动态特征相似(图 1~3),氨挥发通量与田面水中 NH_4^+ -N 浓度间呈极显著($P < 0.05$)正相关关系($r = 0.799^{**}$, $N = 198$),与前人的结果一致^[23,32,33]. 施氮后 1~3d 田面水中 NH_4^+ -N 浓度迅速升高并达到峰值(图 1),表明田面水中 NH_4^+ -N 浓度主要受施氮量的影响,这是由于施肥时期主要在 6~8 月,高温使得尿素以铵态氮的形式快速释放出来^[34]. 麦秸还田增加了田面水 NH_4^+ -N 浓度,显著高于秸秆不还田,这是由于秸秆还田能够促进尿素水解,从而提高田面水 NH_4^+ -N 浓度^[21,35,36]. 污水灌溉相比自来水灌溉能够显著降低田面水 NH_4^+ -N 浓度:一方面污水灌溉减少了化肥速效性无机氮-尿素的施用量^[2];另一方面,污水中高含量的氨氮进入土

壤后,大部分被土壤胶体所吸附^[37],迁移能力差,并且污灌提供的有效铵态氮(表 1)强化了土壤的硝化作用,铵态氮快速转化为硝态氮,因此使田面水中 NH_4^+ -N 浓度降低^[38]. 污水灌溉和秸秆还田处理存在着显著的交互作用,能够显著降低 NH_4^+ -N 浓度,这可能与污水中自带的微生物种类及其对土壤微生物活动的影响有关^[39,40]. 污水中富含铵态氮,是影响土壤氨氧化细菌群落结构的重要因子^[41,42],污灌后土壤中氨氧化细菌含量显著高于清水灌溉^[12],而土壤中氨氧化细菌可矿化秸秆中大量有机氮源^[43]成 NH_4^+ -N 供植物和微生物吸收利用,并能氧化铵态氮成硝态氮、亚硝态氮^[40]. 秸秆还田与污水灌溉两者耦合后,有效降低了田面水氨氮浓度,因此降低了氨挥发损失.

田面水 pH 也是影响稻田氨挥发的一个重要因素. 田面水 pH 升高可以加快 NH_4^+ 向 NH_3 转化速率,从而提高氨挥发速率^[21,44]. 麦秸还田略微增加了田面水 pH,而污水灌溉处理则略微降低了田面水 pH,这也是麦秸还田处理氨挥发增加、污水灌溉处理氨挥发降低的一个原因. 但本研究中氨挥发通量与田面水 pH 并未呈显著的相关性,这可能是因为试验为小区试验,供试土壤相同,灌溉污水与自来水的 pH 值较为相似,因此对各个处理田面水 pH 的影响不显著.

除了田面水氨浓度、pH 等内在因素外,温度、风速、光照等外在环境因素的变化也会影响到氨挥发动态. 本研究采用的是统一的外部环境试验条件和相同的施氮量,因此,处理间对作物生长的影响也

较小,各处理间温度、风速和光照等这些环境因素基本一致。然而,秸秆还田耦合污水灌溉后,可能会促进了秸秆的腐解而导致田面水温度发生变化,从而对氨挥发动态产生影响,这一点还有待于进一步研究。

稻田氨挥发损失总量是由水稻生长期氨挥发通量决定的。图3表明,不同处理氨挥发通量变化趋势相同,在施肥后1~3 d内达到峰值,随后逐渐降低,于7 d左右降至最低值,这与前人研究结果一致^[23,25]。在整个生育期中,最大氨挥发通量发生在蘖肥期,穗肥期最小,这是因为蘖肥期时间较长,温度高光照强,促进了氨挥发的产生^[23];而穗肥期稻田郁闭度较高,此时水稻植株生长旺盛、对养分的需求较高,加上气温相对较低,不利于氨挥发^[45]。因此,与基肥、穗肥期相比,蘖肥期氨挥发损失率最高,在7.38%~24.44%之间,其次为基肥期(5.21%~13.54%),穗肥期氨挥发损失率最低,仅有1.84%~5.51%,与前人^[46,47]关于太湖黄泥稻田土中追肥氨挥发损失量大于基肥的研究结果相符^[48]。不同处理间累积氨挥发损失量差异显著(表3)。麦秸还田较不还田处理显著增加了两种灌溉水中的累积氨挥发损失量,使整个生育期的氨挥发总量约增加了1倍左右;而污水灌溉组的氨挥发量分别较自来水组低28.34%(秸秆还田)和28.92%(秸秆不还田),差异显著。本研究表明,在秸秆还田稻田实施污水灌溉,不仅能有效减少化肥氮用量,还能减少秸秆还田带来的氨挥发损失增加的副作用,同时消纳和净化了污水,减少了对环境的污染,是一项值得应用的一举多得的农业管理措施。

4 结论

(1) 稻季麦秸还田显著增加了田面水 NH_4^+ -N浓度,污水灌溉则显著降低了田面水 NH_4^+ -N浓度。

(2) 相比秸秆不还田处理,稻季麦秸还田生活污水和自来水灌溉处理的累积氨挥发损失量分别增加了89.50%和88.0%。无论秸秆还田与否,生活污水灌溉均明显降低了整个稻季累积氨挥发量,分别较自来水组低28.34%(秸秆还田)和28.91%(秸秆不还田)。

(3) 田面水 NH_4^+ -N浓度与氨挥发通量呈极显著的正相关关系,田块尺度下田面水pH则与其相关性不显著。

(4) 稻季麦秸还田耦合生活污水灌溉,可减少44.4%的化肥氮施用,并显著降低了稻田氨挥发,是

一项值得应用的农业管理措施。

参考文献:

- [1] Jang T, Jung M, Lee E, *et al.* Assessing environmental impacts of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields using bioindicator[J]. *Irrigation Science*, 2013, **31**(5): 1225-1236.
- [2] Li S, Li H, Liang X Q, *et al.* Rural wastewater irrigation and nitrogen removal by the paddy wetland system in the Tai Lake region of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, **9**(5): 433-442.
- [3] Kaboosi K. The assessment of treated wastewater quality and the effects of mid-term irrigation on soil physical and chemical properties (case study: Bandargaz-treated wastewater) [J]. *Applied Water Science*, 2016; 1-12, doi: 10.1007/s13201-016-0420-5.
- [4] Sun H J, Zhang H L, Wu J S, *et al.* Laboratory lysimeter analysis of NH_3 and N_2O emissions and leaching losses of nitrogen in a rice-wheat rotation system irrigated with nitrogen-rich wastewater[J]. *Soil Science*, 2013, **178**(6): 316-323.
- [5] 胡慧蓉, 王海龙, Kimberley M. 长期污水灌溉后林地土壤中磷的含量与移动[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1951-1958.
Hu H R, Wang H L, Kimberley M. Contents and movement of phosphorus in soil of long term effluent irrigated land forest [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1951-1958.
- [6] Jeong H, Kim H, Jang T, *et al.* Assessing the effects of indirect wastewater reuse on paddy irrigation in the Osan River watershed in Korea using the SWAT model [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, **163**: 393-402.
- [7] Jang T I, Kim H K, Seong C H, *et al.* Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, **104**: 235-243.
- [8] 路学军, 陈玉香. 生活污水用于农田灌溉的研究[J]. *中国资源综合利用*, 2005, (10): 23-26.
Lu X J, Chen Y X. Research on wastewater from living irrigating farmland [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2005, (10): 23-26.
- [9] 王浩, 陈玉松, 胡开林, 等. 污水灌溉研究综述[J]. *江苏环境科技*, 2007, **20**(2): 73-76.
Wang H, Chen Y S, Hu K L, *et al.* Summary on wastewater Irrigation [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2007, **20**(2): 73-76.
- [10] 黄俊友, 胡晓东, 俞青荣. 污水灌溉对水稻生长影响的实验研究[J]. *农机化研究*, 2006, (1): 177-179.
Huang J Y, Hu X D, Yu Q R. Effects of sewage irrigation on growth of paddy [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, (1): 177-179.
- [11] Zou J W, Liu S W, Qin Y M, *et al.* Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(4): 516-522.
- [12] 马资厚, 薛利红, 潘复燕, 等. 太湖流域稻田对3种低污染水氮的消纳利用及化肥减量效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(4): 570-576.
Ma Z H, Xue L H, Pan F Y, *et al.* Utilization of nitrogen in wastewater low in pollution degree in paddy fields and its effect on reducing fertilizer application in Tai Lake region [J]. *Journal of*

- Ecology and Rural Environment, 2016, **32**(4): 570-576.
- [13] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田条件下稻田田面水不同形态氮动态变化特征研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(4): 410-418.
- Wang J, Guo X S, Wang Y Q, *et al.* Study on dynamics of nitrogen in different forms in surface water of paddy field under straw return[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(4): 410-418.
- [14] 李勇, 曹红娣, 储亚云, 等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响[J]. 土壤, 2010, **42**(4): 569-573.
- Li Y, Cao H D, Chu Y Y, *et al.* Effects of wheat straw returning and nitrogen application model on rice yield and soil nitrogen supply[J]. Soils, 2010, **42**(4): 569-573.
- [15] 张传辉, 杨四军, 顾克军, 等. 秸秆还田对小麦碳氮转运和产量形成的影响[J]. 华北农学报, 2013, **28**(6): 214-219.
- Zhang C H, Yang S J, Gu K J, *et al.* Effect of straw-returning on carbon and nitrogen assimilate translocation and yield formation in wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, **28**(6): 214-219.
- [16] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. 土壤通报, 2011, **42**(1): 81-85.
- Zhu L Q, Zhang D W, Bian X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, **42**(1): 81-85.
- [17] 李继福, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 麦秆还田配施不同腐解剂对水稻产量、秸秆腐解和土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(35): 270-276.
- Li J F, Lu J W, Li X K, *et al.* Effect of wheat straw returning with different organic matter-decomposing inoculants (OMIs) on the yield of rice, the decomposition of straw and soil nutrients[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, **29**(35): 270-276.
- [18] 王德建, 常志州, 王灿, 等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(9): 1073-1082.
- Wang D J, Chang Z Z, Wang C, *et al.* Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(9): 1073-1082.
- [19] 朱坚, 纪雄辉, 石丽红, 等. 稻田氨挥发及控制技术研究进展[J]. 湖南农业科学, 2011, (23): 73-75, 84.
- Zhu J, Ji X H, Shi L H, *et al.* Advances in ammonia volatilization in paddy-field and its control technology[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011, (23): 73-75, 84.
- [20] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 27-33.
- Wang J, Wang D J, Zhang G, *et al.* Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake region[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 27-33.
- [21] Wang J, Wang D J, Zhang G, *et al.* Effect of wheat straw application on ammonia volatilization from urea applied to a paddy field[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, **94**(1): 73-84.
- [22] 李慧琳, 韩勇, 蔡祖聪. 运用 Jayaweera-Mikkelsen 模型对太湖地区水稻田稻季氨挥发的模拟[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1045-1052.
- Li H L, Han Y, Cai Z C. Modeling the ammonia volatilization from common urea and controlled releasing urea fertilizers in paddy soil of Taihu region of China by Jayaweera-Mikkelsen model[J]. Environmental Science, 2008, **29**(4): 1045-1052.
- [23] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, **41**(2): 265-269.
- Song Y S, Fan X H, Lin D X, *et al.* Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(2): 265-269.
- [24] 上官宇先, 师日鹏, 李娜, 等. 垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1987-1993.
- Shangguan Y X, Shi R P, Li N, *et al.* Factors influencing ammonia volatilization in a winter wheat field with plastic film mulched ridges and unmulched furrows[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 1987-1993.
- [25] Chen A Q, Lei B K, Hu W L, *et al.* Characteristics of ammonia volatilization on rice grown under different nitrogen application rates and its quantitative predictions in Erhai Lake Watershed, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, **101**(1): 139-152.
- [26] 王德建, 张刚, 汪军, 等. 水稻基肥尿素干施与湿施对氮素损失及水稻氮素吸收的影响[J]. 土壤学报, 2010, **47**(3): 483-489.
- Wang D J, Zhang G, Wang J, *et al.* Effects of dry deep-placement and wet broadcast of urea as basal in paddy field on nitrogen loss and plant N uptake[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(3): 483-489.
- [27] Huda A, Gaihre Y K, Islam M R, *et al.* Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, **104**(1): 53-66.
- [28] Pain B F, Van der Weerden T J, Chambers B J, *et al.* A new inventory for ammonia emissions from U. K. agriculture[J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**(3): 309-313.
- [29] 邓欧平, 姜丽娜, 陈丁江, 等. 大量沼液施灌稻田的氨挥发特征[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(6): 233-236.
- Deng O P, Jiang L N, Chen D J, *et al.* Ammonia volatilization from the biogas slurry irrigation paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(6): 233-236.
- [30] 李菊梅, 李冬初, 徐明岗, 等. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境, 2008, **17**(4): 1610-1613.
- Li J M, Li D C, Xu M G, *et al.* Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system[J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(4): 1610-1613.
- [31] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1133-1138.
- Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1133-1138.
- [32] 王旭刚, 郝明德, 陈磊, 等. 长期施肥条件下小麦农田氨挥

- 发损失的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(1): 18-24.
- Wang X G, Hao M D, Chen L, *et al.* In situ study of ammonia volatilization from wheat cropland under long-term continuous fertilization[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, **12**(1): 18-24.
- [33] 黄进宝, 范晓晖, 张绍林. 太湖地区铁渗水耕人为土稻季上氮肥的氨挥发[J]. 土壤学报, 2006, **43**(5): 786-792.
- Huang J B, Fan X H, Zhang S L. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in the rice field of Fe-leachi-Stagnic Anthrosols in the Taihu Lake region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, **43**(5): 786-792.
- [34] Dong Z Z, Wu L H, Chai J, *et al.* Effects of nitrogen application rates on rice grain yield, nitrogen-use efficiency, and water quality in paddy field[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, **46**(12): 1579-1594.
- [35] Tian G M, Cai Z C, Cao J L, *et al.* Factors affecting ammonia volatilisation from a rice-wheat rotation system [J]. Chemosphere, 2001, **42**(2): 123-129.
- [36] 张静, 王德建. 太湖地区乌栅土稻田氨挥发损失的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(6): 84-87.
- Zhang J, Wang D J. Ammonia volatilization in gleyed paddy field soils of Taihu Lake region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, **15**(6): 84-87.
- [37] 江德爱, 王永华, 唐懿达, 等. 含氮化合物在土壤和地下水中的迁移转化和积累——生活污水中含氮化合物进入土壤后的动态研究[J]. 环境科学, 1983, **4**(3): 29-34.
- Jiang D A, Wang Y H, Tang Y D, *et al.* Transfer, transformation and accumulation of nitrogen compounds in soil and underground water[J]. Environmental Science, 1983, **4**(3): 29-34.
- [38] 姜翠玲, 夏自强, 刘凌, 等. 污水灌溉土壤及地下水三氮的变化动态分析[J]. 水科学进展, 1997, **8**(2): 183-188.
- Jiang C L, Xia Z Q, Liu L, *et al.* Variation trends of three types of nitrogen in the soil and groundwater after wastewater irrigation [J]. Advances in Water Science, 1997, **8**(2): 183-188.
- [39] 于健, 杨敏, 齐嵘, 等. 城市污水处理系统中氨氧化细菌种群结构研究[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(3): 521-526.
- Yu J, Yang M, Qi R, *et al.* Community structures of ammonia-oxidizing bacteria in different municipal wastewater treatment systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(3): 521-526.
- [40] Chopp K M. 潘言明, 译. 利用城市污水灌溉的土壤中氨氧化细菌的种群和活性[J]. 农业环境与发展, 1985, (2): 23-24.
- Chopp K M. Pan Y M, trans. Stocks and active of the soil AOB irrigated by municipal wastewater[J]. Agriculture Environment and Development, 1985, (2): 23-24.
- [41] Lydmark P, Almstrand R, Samuelsson K, *et al.* Effects of environmental conditions on the nitrifying population dynamics in a pilot wastewater treatment plant [J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(9): 2220-2233.
- [42] Ottawa K, Asano R, Ohba Y, *et al.* Molecular analysis of ammonia-oxidizing bacteria community in intermittent aeration sequencing batch reactors used for animal wastewater treatment [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(11): 1985-1996.
- [43] 史然, 陈晓娟, 沈建林, 等. 稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展[J]. 土壤, 2013, **45**(2): 193-198.
- Shi R, Chen X J, Shen J L, *et al.* A review on application of rice straw in soil carbon sequestration and greenhouse gases emission in paddy ecosystems[J]. Soils, 2013, **45**(2): 193-198.
- [44] 倪康, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期定位试验土壤小麦季氨挥发损失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(12): 2614-2622.
- Ni K, Ding W X, Cai Z C. Ammonia volatilization from soil as affected by long-term application of organic manure and chemical fertilizers during wheat growing season [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(12): 2614-2622.
- [45] 曹金留, 田光明, 任立涛, 等. 江苏南部地区稻麦两熟土壤中尿素的氨挥发损失[J]. 南京农业大学学报, 2000, **23**(4): 51-54.
- Cao J L, Tian G M, Ren L T, *et al.* Ammonia volatilization from urea applied to the field of wheat and rice in southern Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2000, **23**(4): 51-54.
- [46] 叶世超, 林忠成, 戴其根, 等. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, **25**(1): 71-78.
- Ye S C, Lin Z C, Dai Q G, *et al.* Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, **25**(1): 71-78.
- [47] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, **38**(3): 263-269.
- Deng M H, Yin B, Zhang S L, *et al.* Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields [J]. Soils, 2006, **38**(3): 263-269.
- [48] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, **38**(3): 324-332.
- Tian G M, Cai Z C, Cao J L, *et al.* Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in Zhenjiang hilly region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, **38**(3): 324-332.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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