

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

近 20 年来中国典型区域 PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 杨扬, 商春雪, 喻臻钰 (3003)
西安市 PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹, 史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪, 王飞, 孙业乐 (3022)
南京北郊秋季 PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞, 曹芳, 高嵩, 鲍孟盈, 石一凡, 章炎麟, 刘晓妍, 范美益, 张雯淇, 卞航, 刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气 PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林, 孙俊英, 张养梅, 刘畅, 徐婉筠, 张根, 刘旭艳, 马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节 PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾, 姬亚芹, 张军, 王士宝, 李越洋, 赵静琦, 张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪, 马嫣, 郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志, 李茜, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲, 程明超, 张璐, 何秋生, 郭利利, 王新明 (3075)
杭州地区大气 CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣, 徐宏辉, 姜瑜君, 杜荣光, 齐冰 (3082)
典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征	景盛翱, 王红丽, 朱海林, 杨强, 卢滨, 夏阳, 余传冠, 陶士康, 李莉, 楼晟荣, 黄成, 唐伟, 井宝莉 (3090)
地级市域工业 VOCs 排放源产排特性及其控制技术应用现状: 以秦皇岛市为例	胡旭睿, 虎啸宇, 王灿 (3096)
青霉素发酵尾气 VOCs 污染特征及健康风险评价	郭斌, 么瑞静, 张硕, 马磊, 康江, 王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究	黄成, 胡馨遥, 鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 钱新, 王金花, 李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇, 卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季 pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸, 毛蓉, 李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝, 华琨, 李洲, 李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青, 刘雨倩, 杨佳敏, 王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽, 张玮, 尚光霞, 张军毅, 王丽卿, 魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊, 陈光杰, 康文刚, 陈丽, 王教元, 陈小林, 刘园园, 冯钟, 张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平, 谢瑞, 晁建颖, 姬昌辉, 于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福, 潘潜澄, 李映雪, 陈晓艺, 王佳俊, 周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河, 高伟国, 陈子成, 张海丰, 王旭明 (3194)
Fe/Cu 双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶, 鲍建国, 杜江坤, 冷一非, 孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中 Cd(II) 的吸附行为及机制	康丽, 刘文, 刘晓娜, 刘宏芳, 李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 董杨, 刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响: 共沉淀法与机械物理混合法	仲艳, 王建燕, 陈静, 张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴, 刘金梦, 王新华, 李秀芬, 李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求	李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 梅宁, 李帅, 张杰 (3247)
基质浓度对 ABR 反应器 SAD 协同脱氮除碳效能影响	张敏, 姜滢, 汪瑶琪, 韦佳敏, 陈重军, 沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳, 潘建新, 马景德, 王丰, 吴海珍, 韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣, 孙大阳, 安冉, 赵楠, 焦二龙, 祝海兵 (3271)
基于高通量测序的 SBR 反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖, 姚俊芹, 马斌, 徐双, 张彦江 (3279)
纳米零价铁 (NZVI) 对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华, 丁丽雨, 任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千, 吉芳英, 付旭芳, 陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥, 唐珠, 杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌 H97 的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜, 何腾霞, 冶青, 李振轮 (3314)
PFOS 前体物质 (PreFOSs) 降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳, 周涛, 王博慧, 梁田坤, 柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍, 宁卓, 何泽, 张敏, 石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏, 贾彤, 曹苗文, 柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖, 李玉冰, 薛生国, 廖嘉欣, 王琼丽, 吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊, 李启权, 王昌全, 张浩, 肖怡, 唐嘉玲, 代天飞, 李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶, 贡璐, 安申群, 李杨梅, 陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲 4 种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群, 贡璐, 李杨梅, 陈新, 孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅, 孙国新, 陈正, 胡莹, 郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳, 田志清, 梁亮, 陈俊德, 张志民, 朱祥民, 王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉, 郑有飞, 魏莉, 关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠, 谢青, 樊宇飞, 王永敏, 张成, 王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾, 王文昌, 李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹, 李玉友, 裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶, 蒋宁玲, 徐贤, 韦顺艳, 邵立明, 吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤, 张敬沙, 吴杰, 李志琳, 蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事 (3141) 《环境科学》征稿简则 (3202) 信息 (3229, 3433, 3451)	

兽用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 NH_3 挥发的影响

庞炳坤, 张敬沙, 吴杰, 李志琳, 蒋静艳*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 为了研究兽用抗生素对稻田 NH_3 挥发的影响, 本文采用稻田原位观测试验, 分别对比分析了磺胺二甲嘧啶土壤高残留(常规施肥模式, 基肥复合肥, 追肥尿素)及随有机肥源(基肥猪粪, 追肥尿素)进入土壤, 对稻田 NH_3 挥发的影响。试验共设5个处理: 对照无肥料无兽用抗生素处理(CK); 基肥为复合肥, 无兽用抗生素(CF)及添加磺胺二甲嘧啶处理(CF + SD); 基肥为猪粪, 无兽用抗生素(CM)及添加磺胺二甲嘧啶处理(CM + SD)。结果表明, 无论基肥是复合肥还是猪粪, 磺胺二甲嘧啶均未改变稻田 NH_3 挥发的季节性排放规律, 但均极显著促进了水稻追肥期的 NH_3 挥发($P < 0.01$)。整个观测期 NH_3 挥发损失率 CF + SD 处理和 CM + SD 处理分别是 CF 和 CM 处理的 1.65 和 2.78 倍, 说明磺胺二甲嘧啶对猪粪为基肥的稻田 NH_3 挥发促进效应更为明显。磺胺二甲嘧啶显著促进了土壤脲酶活性($P < 0.05$), 而 NH_3 挥发速率同脲酶活性及土壤氨氮呈显著正相关($P < 0.05$), 表明磺胺二甲嘧啶改变了土壤脲酶活性及无机氮含量, 进而改变了土壤 NH_3 挥发。如何控制兽用抗生素的滥用以及随粪源大量进入农田导致的环境生态风险是我国目前亟需解决的问题。

关键词: 磺胺二甲嘧啶; 稻田; NH_3 挥发; 有机肥; 无机肥

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3460-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711095

Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure

PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, LI Zhi-lin, JIANG Jing-yan*

(College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Veterinary antibiotics have been widely detected in croplands due to the application of animal excrements as fertilizer. However, their effects on ammonia (NH_3) volatilization remain unclear. A field experiment was conducted to evaluate the effect of sulfamethazine on NH_3 volatilization from a paddy field when conventional synthetic fertilizer or manure was applied as basal fertilizer. Five different treatments were conducted in this study: without application of fertilizers and antibiotics (CK), compound fertilizer used as basal fertilizer with and without the addition of sulfamethazine (CF + SD and CF respectively), and pig manure used as base fertilizer with and without the addition of sulfamethazine (CM + SD and CM respectively). Urea was used for topdressing in the CF, CF + SD, CM, and CM + SD treatments. The results showed that regardless of the fertilizer type applied, sulfamethazine did not affect the seasonal pattern of NH_3 volatilization. However, it promoted the NH_3 volatilization rate in the topdressing stage significantly ($P < 0.01$). During the observation period, the proportions of applied N lost as NH_3 -N in the CF + SD and CM + SD treatments were 1.65 and 2.78 times higher than those in the CF and CM treatments, respectively. The promoting effect of sulfamethazine was more obvious in the pig manure treatment than in the compound fertilizer treatment. Sulfamethazine significantly increased the soil urease activity ($P < 0.05$). Furthermore, the NH_3 volatilization rate was positively correlated with urease activity and soil ammonia nitrogen content ($P < 0.05$). This indicates that sulfamethazine can increase the NH_3 volatilization rate by changing the soil urease activity and inorganic nitrogen content. Controlling the misuse of veterinary antibiotics and environmental and ecological risks posed by the antibiotic residues in farmland excrements are urgent problems in China that need to be solved.

Key words: sulfamethazine; paddy field; NH_3 volatilization; organic fertilizer; inorganic fertilizer

NH_3 挥发是土壤氮素损失的重要途径之一, 由农业生产活动所引起的 NH_3 挥发不仅造成了农田氮肥利用率的下降, 还带来了许多的环境问题^[1]。大气中 NH_3 的干湿沉降会导致土壤酸化, 使生态系统遭到破坏, 同时会加重水体和陆地生态系统负荷, 造成水体富营养化等相关问题^[2,3]。 NH_3 还可在大气中通过相关反应最终生成 N_2O 、 NO 等温室气体, 对全球气候变暖产生影响^[4]。据最新研究结果表明, NH_3 挥发与空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空变化有着密切

的关系, NH_3 挥发是加重中国大部分地区霾问题的重要因素^[5]。因此, NH_3 挥发所引起的环境问题不可忽视, 减少 NH_3 挥发对于改善环境具有十分重要的意义。

抗生素是目前世界上使用范围最广, 使用量最

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375150, 41675148)

作者简介: 庞炳坤(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染与全球变化, E-mail: 2015103032@njau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lilacjy@njau.edu.cn

大的药物^[6]。由于兽用抗生素对畜牧养殖业的发展有着极其重要的作用,因此被广泛用于饲料中。据有关资料表明,2000 年时我国兽用抗生素年平均消费水平就已高达 6 000 t^[7]。兽用抗生素主要以磺胺类、大环内酯类、喹诺酮类、四环素类、 β -内酰胺类等五大类为主。其中,磺胺类药物由于具有性质稳定、价格低廉、抗菌谱广等优点,被大量用于畜牧畜禽和水产养殖业^[8]。磺胺类药物进入生物体内后约有 50%~90% 不能被有机体吸收,以母体或代谢产物的形式随动物粪尿一起排出体外进入生态系统^[9~11],对环境造成危害。进入生物体内的磺胺二甲嘧啶有一部分经代谢转化为对位氨基乙酰化磺胺二甲嘧啶^[12],但这部分代谢较少。王小庆等^[13]的研究结果表明,用药期内猪粪中对位氨基乙酰化磺胺二甲嘧啶的平均残留水平仅约为其原形浓度的 27%。我国磺胺类兽药在不同牲畜粪便中的暴露浓度为 100~46 700 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14]。规模化养殖场产生的大量畜禽粪便直接或者被做成有机粪肥后施用于菜地、农田和果园^[15],现已经成为环境中抗生素污染的重要来源。Ji 等的研究表明^[16],上海施用过猪粪的农田土壤磺胺类抗生素含量范围高达 5.85~33.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,磺胺类抗生素的高残留对土壤生态环境造成了较大的危害。

NH_3 是土壤氮素循环的产物,氮肥施入土壤后在微生物的作用下转变成 NH_4^+-N ,经一系列复杂的动力学过程,最终会以氨气的形式从土壤表层扩散到大气中^[17]。 NH_3 挥发是一个微生物参与的过程,因此凡是影响土壤微生物活动的因素,均会对 NH_3 挥发产生影响。王冉等的研究表明^[18],磺胺二甲嘧啶会减少土壤中细菌和真菌的数量;刁晓平等的研究表明^[19],磺胺二甲嘧啶会对土壤微生物的呼吸产生作用。因此,抗生素会通过影响微生物活动从而间接影响土壤的 NH_3 挥发。

目前,有关磺胺类药物的研究多集中于药物在土壤中吸附、光解等环境行为方面^[20, 21],有关 NH_3 挥发的研究多集中于施氮量和施肥方式等方面^[22~24],但关于磺胺类抗生素对土壤 NH_3 挥发影响的研究尚无有关报道。因此,本文采用稻田原位观测试验,以磺胺二甲嘧啶为研究对象,分析其在土壤高残留的常规施肥条件下或随有机肥猪粪进入土壤后对稻田 NH_3 挥发的影响及其可能的影响机制,以期了解兽用抗生素进入农田后的生态环境效应及农田兽用抗生素胁迫条件下 NH_3 挥发情况提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料概况

试验田位于江苏省南京市江宁区淳化街道(118°59'E, 31°57'N),试验时间为 2016 年 6~10 月。该地区气候类型为亚热带季风气候,夏季高温多雨,水稻季日平均气温为 25.94℃,总降雨量为 1 101.7 mm,如图 1 所示。试验田土壤类型为粉质壤土,全氮含量为 1.61 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机碳为 22.97 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 为 7.57,土壤容重为 1.15 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

供试猪粪为从未接触过任何抗生素的家猪排泄物,全氮含量为 1.36%,有机质为 80.25%,全磷为 0.67%,全钾为 0.56%。供试复合肥和尿素均为国内正规厂家所产。供试水稻品种为南粳 55 号。供试抗生素为上海麦克林公司生产的磺胺二甲嘧啶试剂。

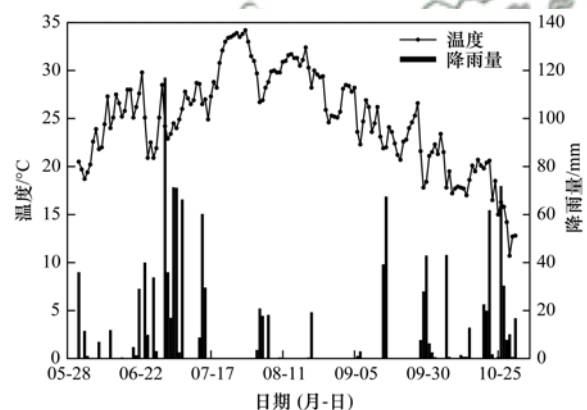


图 1 水稻生长季日均温度和降雨量

Fig. 1 Variation in the average daily temperature and precipitation during the rice-growing season

1.2 试验设计

本试验为稻田原位观测试验,共设 5 个处理,分别为:无肥料无抗生素施加处理(CK);基肥为复合肥处理(CF);基肥为猪粪处理(CM);基肥为复合肥,同时添加兽用抗生素磺胺二甲嘧啶处理(CF+SD);基肥为猪粪,同时添加磺胺二甲嘧啶处理(CM+SD)。CF+SD 与 CM+SD 处理中抗生素添加的浓度均为 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除 CK 外,4 种施肥处理追肥均为尿素。各处理小区面积 10 m^2 ,每处理设 3 个重复,在每个小区之间设有 80 cm 宽,30 cm 高的田埂。田埂用塑料薄膜包裹,且每个小区灌排水系统各自独立,可有效防止水肥串流。

1.3 试验田管理

2016 年 5 月 25 日开始水稻育苗,6 月 18 日进行试验田秧苗移栽。移栽前一天即 6 月 17 日进行

稻田翻耕及施基肥. 除 CK 外, 其它处理施氮总量 (以 N 计) 均为 $216 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中基肥占 62.5%, 分蘖肥和穗肥各为 18.75%. 磷肥 (P_2O_5)、钾肥 (K_2O) 均为 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 均作基肥一次性施入. 分蘖肥和穗肥的施肥时间分别为 7 月 27 日和 8 月 16 日. 除肥料外, 试验田按照当地常规措施进行水药管理. 秧苗移栽后稻田为持续淹水状态, 7 月 30 日 ~ 8 月 3 日为烤田期, 烤田之后为干湿交替状态.

1.4 样品采集及测定

本试验采用通气法进行土壤 NH_3 挥发测定^[25]. 分别将两块相同海绵 (厚度为 2 cm, 直径为 16 cm) 用 15 mL 磷酸甘油溶液均匀浸润, 分上下两层放置于内径 15 cm, 高 12 cm 的圆形 PVC 塑料管内. 样品收集时, 将 PVC 塑料管插入土壤 2 cm 处, 同时将下层海绵放置距土壤 5 cm 处, 上层海绵与 PVC 管顶部持平. 下层海绵用于吸收土壤 NH_3 挥发, 上层海绵用于吸收空气中 NH_3 , 以防止接触下层海绵. 移栽当天开始采集土壤 NH_3 挥发, 在每个处理小区随机放置 3 个采集装置, 于 6 ~ 8 h 后采样. 采样时, 将 PVC 管中的下层海绵迅速取出, 装入自封袋中密封. 随后将 PVC 管随机移动至其他位置, 以便于下次样品采集. 施肥第一周内每两天采样一次, 之后每周采样两次, 直至其它处理与 CK 无显著差异时停止采样.

将采集的下层海绵带回实验室, 装进 500 mL 塑料瓶中, 用 300 mL 氯化钾 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 溶液浸提. 浸提液用连续流动分析仪 (型号: AA3, SEAL Analytical, 产地: 英国) 进行测定, 并计算出土壤 NH_3 挥发速率, 计算结果均以 N 计.

土壤 NH_3 挥发速率 [$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 计算公式为:

$$\text{NH}_3 \text{ 挥发速率} = \frac{C \times V}{A \times D} \times 10^{-2}$$

式中, C 为每个捕获装置单次测得的 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为浸提液体积 (L); A 为 PVC 管横截面积 (m^2); D 为每次采集时间 (d).

$$\text{NH}_3 \text{ 挥发损失率} (\%) = \frac{E_T - E_{\text{CK}}}{N} \times 100$$

式中, E_T 为各施肥处理单位面积的 NH_3 挥发量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), E_{CK} 为 CK 处理的单位面积 NH_3 挥发量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N 为单位施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

每隔 7 ~ 10 d 用土钻采集 0 ~ 10 cm 土壤样品, 以便测定土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量、pH 及脲酶活性变化. 土壤 pH 使用电位计 (pHS-3C) 进行测定;

脲酶活性按照靛酚蓝比色法进行测定, 测定结果以 NH_3 -N 计; 土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 测定方法为: 将土壤用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液浸提, 振荡过滤后用连续流动分析仪 (型号: AA3, SEAL Analytical, 产地: 英国) 进行测定; 其他土壤理化性质按照土壤农化分析^[26] 所列方法进行测定.

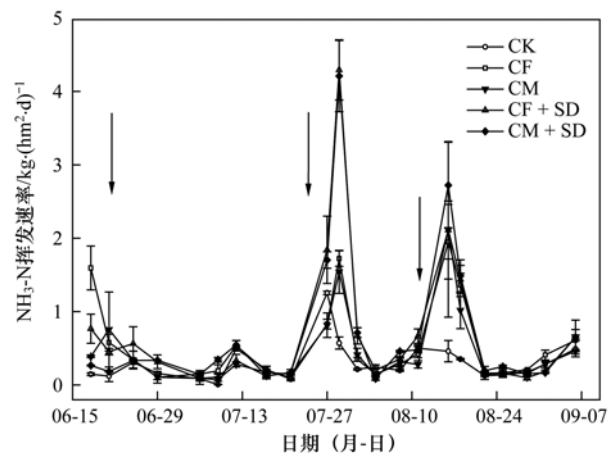
1.5 数据处理

本文采用 SPSS 19.0 和 Microsoft 2010 软件进行数据计算以及统计分析, 采用 OriginPro 2015 软件对数据进行作图.

2 结果与分析

2.1 NH_3 挥发速率动态变化

各处理 NH_3 挥发速率动态变化如图 2 所示, 从中可知各处理间土壤 NH_3 挥发趋势基本相同. 根据实测时间, 将 NH_3 挥发速率分为基肥阶段 (6 月 17 日 ~ 7 月 26 日) 和追肥阶段 (7 月 27 日 ~ 9 月 6 日). 除 CK 处理外, 各处理的土壤 NH_3 挥发速率均在追肥期出现最大峰值, 其中第一次追肥后以 CF + SD 处理 NH_3 挥发速率最高, 达到 $4.293 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, CM + SD 处理其次, 也高达 $4.208 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 第二次追肥后以 CM + SD 处理速率最高为 $2.721 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 两次追肥后, 各处理的 NH_3 挥发速率均在达到峰值后迅速下降, 最终达到相对较低的稳定水平, 到 9 月 6 日后各处理间已无明显差异.



图中实线箭头代表施基肥和追肥日期

图 2 水稻生长季不同施肥处理 NH_3 挥发动态变化

Fig. 2 Dynamic variation in ammonia volatilization for different treatments during the rice-growing season

以不同处理和各次独立观测时间对稻田 NH_3 挥发速率作二因子方差分析, 得到如下结果: 整个观测期内, CM + SD 与 CF + SD 处理无明显差异 (P

>0.05), CM 与 CM + SD 处理、CF 与 CF + SD 处理间均有极显著性差异($P < 0.01$)。对各处理进行分阶段分析,结果表明:CF 与 CF + SD 处理、CM 与 CM + SD 处理的 NH₃ 挥发速率在追肥阶段均呈极显著性差异($P < 0.01$),而在基肥阶段均无显著性差异($P > 0.05$)。

2.2 NH₃ 挥发累积量

不同观测阶段 NH₃ 挥发累积量如表 1 所示。基肥阶段除 CK 外,各处理间均无显著性差异($P > 0.05$)。追肥阶段 CM 与 CM + SD 处理、CF 与 CF +

SD 处理间均呈显著性差异($P < 0.05$)。添加抗生素处理的 NH₃ 挥发是不加抗生素的 1.5 倍左右。整个观测期, NH₃ 挥发累积量大小顺序为:CF + SD > CM + SD > CF > CM > CK,其中 CM + SD 与 CF + SD 处理间累积量无明显差异($P > 0.05$)。而 CM + SD 与 CM 处理、CF + SD 与 CF 处理之间的 NH₃ 挥发累积量均呈显著性差异($P < 0.05$),两组处理中前者的 NH₃ 挥发损失率分别是后者的 2.78 倍和 1.65 倍,由此可见磺胺二甲嘧啶明显促进了土壤 NH₃ 挥发,增加了 NH₃ 挥发损失率。

表 1 不同施肥阶段 NH₃-N 挥发累积量及 NH₃-N 挥发损失率¹⁾

处理	基肥阶段		追肥阶段		整个观测期	
	NH ₃ -N 挥发累积量 /kg·hm ⁻²	NH ₃ -N 挥发 损失率/%	NH ₃ -N 挥发累积量 /kg·hm ⁻²	NH ₃ -N 挥发 损失率/%	NH ₃ -N 挥发累积量 /kg·hm ⁻²	NH ₃ -N 挥发 损失率/%
CK	7.22 ± 0.21b	—	14.20 ± 0.44c	—	21.42 ± 0.63c	—
CF	12.56 ± 1.15a	2.47	23.60 ± 0.72b	4.35	36.16 ± 1.34b	6.82
CM	9.21 ± 2.19ab	0.92	20.88 ± 0.81b	3.09	30.09 ± 2.95b	4.01
CF + SD	11.00 ± 2.23ab	1.75	34.67 ± 1.85a	9.48	45.67 ± 3.94a	11.23
CM + SD	10.07 ± 0.49ab	1.41	35.39 ± 0.23a	9.81	45.46 ± 0.72a	11.13

1) 表中数值表述为平均值 ± 标准误差(SE); 同列数值不同字母代表处理之间差异显著($P < 0.05$)

2.3 土壤 NH₃ 挥发与环境因子的相关性

将观测期土壤 NH₃ 挥发同各影响因素做相关性分析,结果如表 2 所示。其中, NH₃ 挥发速率同土壤 NH₄⁺-N 及脲酶活性均呈显著性正相关($P < 0.05$),与气温呈极显著性正相关($P < 0.01$),与 pH 和土壤 NO₃⁻-N 均未表现出较强相关性($P > 0.05$)。以处理和各次独立观测时间对脲酶活性做双因素方差分析可知:整个观测期,CF 与 CF + SD 处理之间呈显著性差异($P < 0.05$),CM 与 CM + SD 处理之间呈极显著性差异($P < 0.01$)。其中,基肥阶段 CF

与 CF + SD 处理无显著性差异,CM 与 CM + SD 处理之间呈极显著性差异($P < 0.01$),而追肥阶段 CF 与 CF + SD 处理、CM 与 CM + SD 处理间均呈极显著性差异($P < 0.01$)。另外,将追肥期施肥处理的土壤脲酶活性和 NH₃ 挥发速率进行平均,发现 NH₃ 挥发平均速率与土壤脲酶平均活性呈显著正相关($P < 0.05$,如图 3),说明无论施用何种基肥,磺胺二甲嘧啶均在追肥期促进了土壤脲酶活性,CF + SD 处理的脲酶活性均值是 CF 的 1.09 倍,CM + SD 处理是 CM 的 1.13 倍。

表 2 水稻生长季 NH₃-N 挥发速率与环境因子的相关性¹⁾

	NH ₃ -N 挥发速率	土壤 NH ₄ ⁺ -N	土壤 NO ₃ ⁻ -N	脲酶活性	气温	pH
NH ₃ -N 挥发速率	1					
土壤 NH ₄ ⁺ -N	0.278 *	1				
土壤 NO ₃ ⁻ -N	0.048	-0.404 **	1			
脲酶活性	0.360 *	0.395 **	-0.108	1		
气温	0.462 **	0.459 **	-0.204	0.053	1	
pH	-0.068	0.199	-0.066	-0.046	0.153	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 稻田 NH₃ 挥发季节性排放趋势及环境因子分析

除 CK 处理外,本研究中其它处理均表现出

NH₃ 挥发速率在追肥后达到最高且在施肥 1 ~ 3 d 后出现峰值(如图 2),这与张静等^[27]和宋勇生等^[28]的报道中稻田 NH₃ 挥发主要发生在追肥后的结果一致,说明抗生素磺胺二甲嘧啶未改变 NH₃ 挥发的季节性排放趋势,仅是改变了 NH₃ 挥发速率。

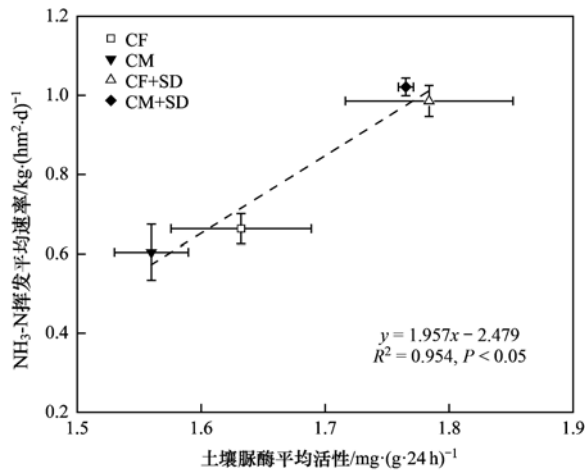


图3 追肥期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发平均速率与土壤脲酶平均活性的相关关系

Fig. 3 Relationship between the average $\text{NH}_3\text{-N}$ volatilization rate and the average soil urease activity during the topdressing period

温度是影响土壤 NH_3 挥发的重要因素,温度升高会加快 NH_4^+ 、 NH_3 的扩散速率,加快 NH_3 脱离稻田液相进入大气^[29]。本试验结果表明温度与稻田挥发速率呈极显著性正相关,与倪康等^[30]和肖娇等^[31]的研究结果一致。由于水稻田主要处于淹水的缺氧状态^[29],所以土壤中的无机氮主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式存在,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的增加会使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 NH_3 的动力学平衡发生改变,进而促进稻田的 NH_3 挥发。习斌等^[32]和贺发云等^[33]的研究结果表明,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 NH_3 挥发速率呈显著性正相关,与本研究结果一致。同时本试验中脲酶活性与 NH_3 挥发速率呈显著性正相关,原因可能是脲酶可促使尿素水解为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,进而促进 NH_3 挥发。董怡华等的研究表明^[34], pH 与 NH_3 挥发速率呈显著性正相关。而本研究中 pH 与 NH_3 挥发速率并无相关性,这可能是由于本研究中土壤 pH 变化幅度较小的缘故。

3.2 磺胺二甲嘧啶对稻田 NH_3 挥发的影响

整个观测期,CF 与 CF + SD 处理、CM 与 CM + SD 处理的 NH_3 挥发累积量及 NH_3 挥发速率均呈显著性差异。对于 NH_3 挥发累积量,CF + SD 处理是 CF 处理的 1.26 倍,CM + SD 处理是 CM 处理的 1.5 倍,说明磺胺二甲嘧啶会促进稻田土壤 NH_3 挥发。究其原因,应该是磺胺二甲嘧啶对土壤脲酶活性及土壤微生物活动产生了影响。脲酶是促进尿素在土壤中转化的主要酶类之一,其活性的强弱会直接影响土壤 NH_3 挥发的增损^[35]。整个观测期、CF 与 CF + SD 处理、CM 与 CM + SD 处理的脲酶活性均呈显著性差异 ($P < 0.05$),说明磺胺二甲嘧啶会对土壤

脲酶活性产生影响。基肥阶段,CF 与 CF + SD 处理的脲酶活性无显著性差异,CM 与 CM + SD 处理之间脲酶活性呈极显著性差异 ($P < 0.01$),但两组处理间 NH_3 挥发速率均无明显差异,其原因可能是由于经过腐熟的有机肥中可供脲酶分解的底物较少,虽脲酶活性有差异但 NH_3 挥发速率差异不明显。到了追肥阶段,两组处理 NH_3 挥发速率明显增加,并且 CF 与 CF + SD 处理、CM 与 CM + SD 处理间脲酶活性均呈极显著性差异 ($P < 0.01$)。这说明追肥阶段磺胺二甲嘧啶促进了土壤脲酶活性,加速了尿素水解,进而改变了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,为 NH_3 的产生提供了充足的底物,促进了 NH_3 挥发。抗生素对土壤的影响机制非常复杂,除影响脲酶活性外,还会影响其他与 NH_3 挥发有关的微生物。刁晓平等的研究表明^[36],磺胺二甲嘧啶会对土壤微生物种群产生影响,而在不同土壤中所产生的作用有所差异。王冉等的研究表明^[18],试验条件下,磺胺二甲嘧啶会对土壤微生物产生抑制作用,但随着时间变化,作用减弱。国彬等的研究表明^[37],培养试验条件下土壤中残留的高浓度磺胺类药物会对土壤氨化作用呈现激活规律。而本试验中添加抗生素处理的 NH_3 挥发累积量较高,可能是磺胺二甲嘧啶或其在土壤中的降解产物刺激了相关微生物的生长,促进了土壤有机氮向无机氮的转化,增加了土壤 NH_3 挥发。但具体是磺胺二甲嘧啶还是其在土壤中的降解产物对 NH_3 挥发产生的作用还有待进一步研究。

整个观测期,CM + SD 与 CF + SD 处理均促进了土壤 NH_3 挥发,但二者之间 NH_3 挥发速率和累积量均无显著性差异。说明无论对稻田施加有机肥还是无机肥,在磺胺二甲嘧啶进入土壤后均会引起土壤 NH_3 挥发的增加。磺胺类抗生素进入土壤后会发生吸附、积累且降解缓慢,多次施入含有磺胺类抗生素的有机肥,会对稻田土壤造成严重污染,而其蓄积越多,对土壤 NH_3 挥发促进就越大,进而对环境造成恶劣影响,因此如何有效控制兽用抗生素进入环境是当前亟需解决的难题。

4 结论

兽用抗生素磺胺二甲嘧啶无论是随有机肥源猪粪进入稻田还是土壤高残留常规施肥措施均未改变稻田 NH_3 挥发的季节性排放规律,但均显著增加了水稻追肥阶段的 NH_3 挥发,且对有机肥源稻田 NH_3 挥发促进作用更加明显。这种促进机理可能是由于磺胺二甲嘧啶显著提高了土壤脲酶活性,改变了土

壤 NH_4^+ -N含量,而土壤 NH_3 挥发同土壤脲酶活性、 NH_4^+ -N均呈显著性正相关。

参考文献:

- [1] 范会, 姜珊珊, 魏茨, 等. 农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH_3 和 N_2O)减排效果比较: 以夏玉米季为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2906-2913.
Fan H, Jiang S S, Wei Y, *et al.* Assessment of gaseous nitrogen (NH_3 and N_2O) mitigation after the application of a range of new nitrogen fertilizers in summer maize cultivation [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2906-2913.
- [2] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. Science, 2004, **303**(5665): 1876-1879.
- [3] Erisman J W, Bleeker A, Galloway J, *et al.* Reduced nitrogen in ecology and the environment [J]. Environmental Pollution, 2007, **150**(1): 140-149.
- [4] Hayashi K, Nishimura S, Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. Science of the Total Environment, 2008, **390**(2-3): 485-494.
- [5] Wu Y Y, Gu B J, Erisman J W, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ pollution is substantially affected by ammonia emissions in China [J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 86-94.
- [6] 郭丽, 王淑平. 兽用抗生素在土壤中运移规律研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(s2): 237-246.
Guo L, Wang S P. Migration law of veterinary antibiotics in soil [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(s2): 237-246.
- [7] Hu X G, Zhou Q X, Luo Y. Occurrence and source analysis of typical veterinary antibiotics in manure, soil, vegetables and groundwater from organic vegetable bases, northern China [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(9): 2992-2998.
- [8] 许静, 王娜, 孔德洋, 等. 磺胺类药物在土壤中的降解性[J]. 环境化学, 2013, **32**(12): 2349-2356.
Xu J, Wang N, Kong D Y, *et al.* Degradation of sulfonamides in soils [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(12): 2349-2356.
- [9] Martínez-Carballo E, González-Barreiro C, Scharf S, *et al.* Environmental monitoring study of selected veterinary antibiotics in animal manure and soils in Austria [J]. Environmental Pollution, 2007, **148**(2): 570-579.
- [10] 王惠惠, 王淑平. 畜禽排泄物中抗生素残留与控制技术研究进展[J]. 土壤通报, 2011, **42**(1): 250-256.
Wang H H, Wang S P. Residue antibiotics in livestock and poultry excretion and related control technologies: a review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, **42**(1): 250-256.
- [11] 邵义萍, 莫测辉, 李彦文, 等. 长期施用粪肥菜地土壤中四环素类抗生素的含量与分布特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1182-1187.
Tai Y P, Mo C H, Li Y W, *et al.* Concentrations and distribution of tetracycline antibiotics in vegetable field soil chronically fertilized with manures [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1182-1187.
- [12] 段丽丽. 磺胺二甲嘧啶及其主要代谢产物在砂质壤土中转归的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005. 1-6.
- [13] 王小庆, 郭瑞鹏, 马保华, 等. 3种兽药及其主要代谢产物在猪粪中的排泄规律[J]. 中国兽医学报, 2014, **34**(2): 269-274.
Wang X Q, Guo R P, Ma B H, *et al.* Excretion of sulfamethazine, chlortetracycline, tylosin and their main metabolites in pig manure [J]. Chinese Journal of Veterinary Science, 2014, **34**(2): 269-274.
- [14] Samrah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. Chemosphere, 2006, **65**(5): 725-759.
- [15] Golet E M, Strehler A, Alder A C, *et al.* Determination of fluoroquinolone antibacterial agents in sewage sludge and sludge-treated soil using accelerated solvent extraction followed by solid-phase extraction [J]. Analytical Chemistry, 2002, **74**(21): 5455-5462.
- [16] Ji X L, Shen Q H, Liu F, *et al.* Antibiotic resistance gene abundances associated with antibiotics and heavy metals in animal manures and agricultural soils adjacent to feedlots in Shanghai; China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **235**-**236**: 178-185.
- [17] 姜珊珊. 氮肥减量及不同品种肥料配施对稻麦农田 CH_4 和 N_2O (直接和间接) 排放的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. 6-9.
- [18] 王冉, 刘铁铮, 耿志明, 等. 兽药磺胺二甲嘧啶在土壤中的生态行为[J]. 土壤学报, 2007, **44**(2): 307-311.
Wang R, Liu T Z, Geng Z M, *et al.* Ecotoxicology and ecological behavior of sulfamethazine in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(2): 307-311.
- [19] 刁晓平, 孙英健, 孙振钧, 等. 3种兽药对土壤微生物呼吸的影响[J]. 中国农业大学学报, 2006, **11**(2): 39-43.
Diao X P, Sun Y J, Sun Z J, *et al.* Effects of three kinds of veterinary drugs on microbe respiration in different soils [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, **11**(2): 39-43.
- [20] 张从良, 王岩, 王福安. 磺胺类药物在土壤中的微生物降解[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(5): 1658-1662.
Zhang C L, Wang Y, Wang F A. Microbial degradation of sulfonamides in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(5): 1658-1662.
- [21] 郭欣妍, 王娜, 许静, 等. 5种磺胺类抗生素在土壤中的吸附和淋溶特性[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 3083-3091.
Guo X Y, Wang N, Xu J, *et al.* Adsorption and leaching behavior of sulfonamides in soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(11): 3083-3091.
- [22] 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.
- [23] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氮挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(1): 99-104.
Li X, Ju X T, Zhang L J, *et al.* Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(1): 99-104.
- [24] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉

- 米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(6): 1449-1457.
- Zhou L P, Yang L P, Bai Y L, *et al.* Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, **22**(6): 1449-1457.
- [25] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(2): 205-209.
- Wang Z H, Liu X J, Ju X T, *et al.* Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, **8**(2): 205-209.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 唐良梁, 李艳, 李恋卿, 等. 不同施氮量对稻田氨挥发的影响及阈值探究[J]. 土壤通报, 2015, **46**(5): 1232-1239.
- Tang L L, Li Y, Li L Q, *et al.* Effect of different nitrogen application rate on paddy ammonia volatilization and nitrogen threshold[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, **46**(5): 1232-1239.
- [30] 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.
- [31] 肖娇, 樊建凌, 叶桂萍, 等. 不同施肥处理下小麦季潮土氨挥发损失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(10): 2011-2018.
- Xiao J, Fan J L, Ye G P, *et al.* Ammonia volatilization from fluvo-aquic clay soil and its influencing factors during wheat growing season under different fertilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(10): 2011-2018.
- [32] 习斌, 张继宗, 左强, 等. 保护地菜田土壤氨挥发损失及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(2): 327-333.
- Xi B, Zhang J Z, Zuo Q, *et al.* Study on the losing of ammonia volatilization and its influencing factors on the protected vegetable fields' soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(2): 327-333.
- [33] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, **42**(2): 253-259.
- He F Y, Yin B, Jin X X, *et al.* Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(2): 253-259.
- [34] 董怡华, 张玉革, 孙树林, 等. 不同尿素配施处理下土壤氨挥发特性[J]. 生态杂志, 2014, **33**(11): 2943-2949.
- Dong Y H, Zhang Y G, Sun S L, *et al.* Soil ammonia volatilization under different urea combined fertilization treatments [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(11): 2943-2949.
- [35] 杜建军, 苟春林, 崔英德, 等. 保水剂对氮肥氨挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1296-1301.
- Du J J, Gou C L, Cui Y D, *et al.* Effects of water retaining agent on ammonia volatilization and nutrient leaching loss from N, P and K fertilizers [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(4): 1296-1301.
- [36] 刁晓平, 孙英健, 孙振钧, 等. 磺胺二甲基嘧啶对土壤微生物活动的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(4): 694-697.
- Diao X P, Sun Y J, Sun Z J, *et al.* Effects of sulfamethazine on microbial activity in different types of soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, **24**(4): 694-697.
- [37] 国彬, 姚丽贤, 刘忠珍, 等. 磺胺类兽药对土壤生化功能及氮素的影响[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 596-600.
- Guo B, Yao L X, Liu Z Z, *et al.* Effects of sulfonamide veterinary drugs on soil biochemical function and nitrogen [J]. Soils, 2012, **44**(4): 596-600.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	 HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	 YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	 FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	 SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	 ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	 ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	 ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	 AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	 HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	 PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)