

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH₃和N₂O)减排效果比较:以夏玉米季为例 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO₂、CH₄和N₂O通量的观测 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO₂和CH₄分压特征分析 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce³⁺与Cu²⁺协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO₂光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硝酸盐的吸附解吸作用研究 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羟基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu²⁺、Zn²⁺的吸附特性 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

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

范会, 姜姗姗, 魏荧, 蒋静艳*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 为了解不同品种新型氮肥相对常规施肥其氨 (NH_3) 和氧化亚氮 (N_2O) 的减排效果, 本文通过田间原位试验同步研究了夏玉米生长季氮肥施用后的农田 NH_3 挥发和 N_2O 排放及其主要驱动因子。以常规施肥 (复合肥 + 尿素, CK) 为对照, 设置了 5 个肥料处理, 分别为脲铵氮肥 (UA)、稳定性复合肥料 (UHD)、硫包衣氮肥 (SCU)、脲甲醛复合肥 (UF) 和有机肥 (OF), 施氮量 (以 N 计) 均为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。相关分析结果表明, 氨挥发和 N_2O 排放受环境因子影响, 均与土壤 WFPS 呈显著负相关 ($P < 0.05$), N_2O 排放还与土壤硝态氮呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。进一步回归分析表明, N_2O 排放 ($F_{\text{N}_2\text{O}}$) 主要取决于土壤硝态氮 (x) 含量的变化, 而氨挥发 (F_{NH_3}) 主要取决于土壤铵态氮 (x) 含量的变化。与 CK 相比, 除了 UA, 其它肥料处理都降低了土壤的氨挥发, 尤其是 UF 和 OF 处理减少了 37% ~ 43%。但对于 N_2O 排放, 所有处理与 CK 皆无显著差异。进一步计算每种处理氨挥发和 N_2O 的气态氮损失总量, 与 CK 相比, UHD、SCU、UF 和 OF 分别减排了 9%、5%、30% 和 23%, 而 UA 增加了 3%。

关键词: 夏玉米; 氮肥; 氨挥发; 氧化亚氮排放

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2906-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.011

Assessment of Gaseous Nitrogen (NH_3 and N_2O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation

FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, JIANG Jing-yan*

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

Abstract: In order to evaluate the potential of a range of new nitrogen fertilizers in comparison with the conventional fertilization to mitigate ammonia (NH_3) and nitrous oxide (N_2O) emissions, a field experiment was conducted to investigate NH_3 volatilization and N_2O emissions from the summer maize field and the relevant driving factors under the different nitrogen fertilizer treatments. Five new varieties of nitrogen fertilizers including the urea ammonium (UA), stability urea with dicyandiamide and hydroquinone (UHD), sulfur coated urea (SCU), urea formaldehyde compound fertilizer (UF) and organic fertilizer (OF) were applied in this experiment, and conventional fertilization (compound fertilizer + urea, CK) was used as the control. The nitrogen amount of $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was applied in all treatments. Correlation analysis showed that both NH_3 volatilization and N_2O emissions were influenced by environmental factors. They were negatively correlated with soil water-filled pore space ($P < 0.05$). Moreover, N_2O emissions were positively correlated with soil nitrate nitrogen ($P < 0.01$). Regression analysis showed that N_2O emissions were mainly determined by the soil nitrate content, while NH_3 volatilization was mainly dependent on the values of soil ammonium nitrogen. Compared with CK, in addition to UA, other fertilizer treatments decreased the NH_3 volatilization, especially the UF and OF treatments decreased NH_3 volatilization by up to 37% - 43%, while all treatments had no significant difference in N_2O emissions. Considering the total gaseous nitrogen losses (NH_3 volatilization + N_2O emissions), in comparison with CK, the UHD, SCU, UF and OF were reduced by 9%, 5%, 30% and 23%, respectively, while the UA was increased by 3%. Therefore, considering environmental benefit under this experimental condition, urea formaldehyde compound fertilizer and organic fertilizer were more suitable for maize cultivation.

Key words: summer maize; nitrogen fertilizer; ammonia volatilization; nitrous oxide emission

氮肥不仅是世界上农业生产需要量最大的化肥品种,更是作物高产的重要保证因素之一^[1]。目前,中国已是世界上氮肥使用量最多的国家,化肥氮的消耗达到 23.93 Mt^[2]。然而,我国的氮肥利用效率较低,传统氮肥的利用率约为 35%^[3],其余很大一部分氮素以各种形式进入到大气或水环境,不仅造成肥料和能源的浪费,而且对环境产生污染。其中,氨 (NH_3) 挥发是氮肥气态损失的重要途径。有研究表明,我国北方潮土上种植的玉米氨挥发损失率可

达施氮量的 11% ~ 48%^[4]。 NH_3 进入大气后随着降水或干沉降重新进入自然生态系统,引起土壤酸化和水体富营养化等环境问题。同时,另一种含氮气体氧化亚氮 (N_2O) 是引起全球变暖和臭氧层损耗的一种重要温室气体。IPCC 第五次评估报告指出

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41375150)

作者简介: 范会 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染与全球变化, E-mail: 2013103042@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lilacjy@njau.edu.cn

N₂O潜在的增温作用约为CO₂的265倍,并且其在大气中的存留时间更为长久^[5].在我国,每年由于农业生产活动排放的N₂O更是占人类活动排放N₂O总量的70%^[6].另外,土壤的NH₃挥发和N₂O排放随着氮肥施用量的增加而增强^[7].因此,氮肥施用后所导致的环境问题不可忽视,人们有必要通过减少氮肥的气态氮损失来提高氮肥的利用效率.

近些年,随着新型肥料生产的快速发展,有机肥和缓/控释肥的使用量也在不断增加.这些不同品种的新型氮肥施入田间后,对土壤氮素的转化和释放具有不同程度的影响.关于不同品种新型氮肥的氮素以NH₃或N₂O形式释放的单一研究报道已有不少,但一些结果相互之间存在矛盾.部分研究显示,施用缓/控释肥和有机肥能够降低NH₃挥发损失,提高氮肥利用效率^[8,9],但也有研究指出施用有机肥增加了NH₃挥发的排放^[10].同样,一部分研究指出施用有机肥和控释肥能够减少N₂O的排放^[11,12],但也有研究表明,缓/控释肥的施用造成N₂O排放的增加,未能达到固氮减排的效果^[13,14].导致不同类型的氮肥施入土壤后NH₃挥发和N₂O排放的研究结果出现差异的原因可能是由于气候条件、土壤环境和农田管理措施等的影响^[15~20].因此,为了系统比较多种不同类型新型氮肥施用后气态氮的排放效果,有必要开展相同的气候与土壤环境条件下典型新型肥料NH₃挥发和N₂O排放的同步研究.

玉米作为中国重要的粮食作物,占农作物总播种面积的22.44%,在当今三大粮食作物中所占耕地面积最大,且播种面积一直呈上升趋势^[2].因此,种植玉米需要更多的氮肥.本文以夏玉米为研究对象,以常规肥料为对照,选择5种不同类型的肥料(包括脲铵氮肥、稳定性复合肥料、硫包衣氮肥、脲

甲醛复合肥和有机肥),采用通气法和静态箱法系统分析了不同氮肥处理下玉米的NH₃挥发和N₂O排放及环境因子变化情况,以期降低氮肥的气态氮损失和指导玉米合理施用氮肥提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田观测试验于2014年6~9月在江苏省南京市江宁区李家庄(118.72°E,31.66°N)进行,该区属亚热带季风气候,夏季高温多雨,整个玉米生长季内平均温度为24.2℃,降雨量为724.3mm,分别约比过去10年内低1.1℃和多200mm.土壤WFPS始终保持在较高水平,变化范围为59.1%~73.6%,平均为67.3%,具体的动态变化如图1所示.耕层土壤为壤质黏土,有机质含量为18.36g·kg⁻¹,pH为6.1,全氮为2.11g·kg⁻¹,速效磷为11.07mg·kg⁻¹,速效钾为72.38mg·kg⁻¹,土壤容重为1.23g·cm⁻³.

1.2 试验设计

本试验玉米供试品种为苏玉1号,于6月9日播种,9月21日收获.以常规施肥(硫酸钾型复合肥+尿素)为对照,设置5个不同的新型氮肥处理,分别是:硫包衣氮肥(SCU)、脲铵氮肥(UA)、稳定性复合肥料(UHD)、脲甲醛复合肥(UF)和有机肥(OF).这5种肥料皆是国内常规生产且已有大面积应用的具有代表性的新型肥料.硫包衣氮肥代表了通过改变氮肥的物理性状的物理型控释氮肥;脲铵氮肥、稳定性复合肥料和脲甲醛复合肥是通过改变普通氮肥化学性质的化学型缓释氮肥的代表,其中稳定性复合肥料是添加了脲酶抑制剂和硝化抑制剂的生物化学性缓释氮肥;最后一种是利用味精生

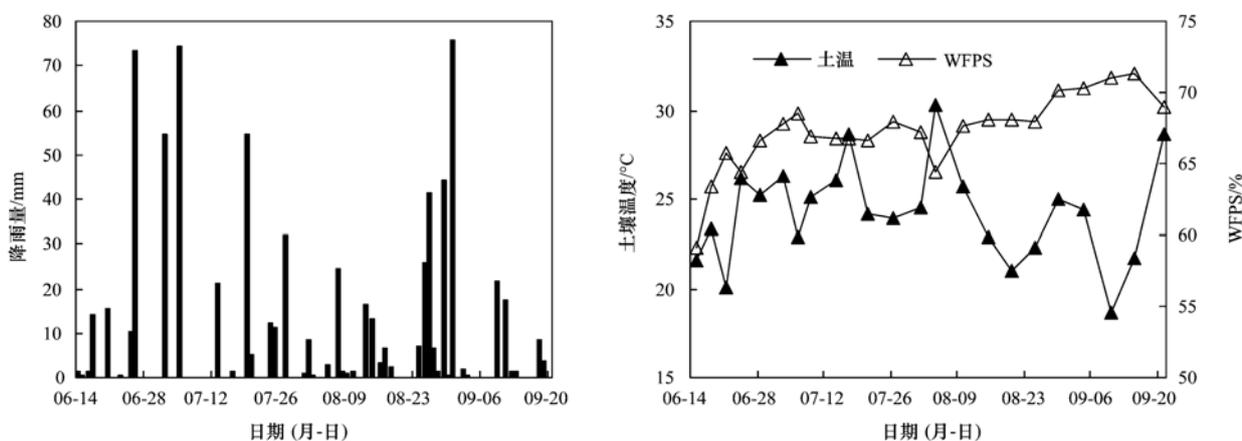


图1 玉米生长季降雨量、5 cm土壤温度和土壤孔隙含水量的动态变化

Fig. 1 Variation of precipitation, WFPS and soil temperature at 5 cm depth during the maize growing season

产过程中所剩余的废物合成的环保型有机肥的代表. 各处理施氮量(以 N 计)均为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 除脲甲醛复合肥处理的磷(P_2O_5)钾肥(K_2O)为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 外,其它处理磷(P_2O_5)钾肥(K_2O)皆为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 于 6 月 14 日施入基肥,8 月 1 日施入追

肥. 其中 CK、UA 和 OF 处理氮肥分 2 次施用,总量的 50% 作基肥,50% 作追肥,而 UHD、SCU 和 UF 处理按照习惯,氮肥均 100% 作基肥施用. 各处理磷肥和钾肥皆作基肥一次性施入. 所有肥料都采用均匀撒施方式,具体的施肥方案如表 1 所示.

表 1 氮肥施用方案

Table 1 Description of N fertilization in the experiments

处理	肥料种类	肥料参数 N-P-K/%	基肥(以 N 计) / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	追肥(以 N 计) / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	总施氮量 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
CK	硫酸钾型复合肥/尿素	15-15-15/46-0-0	150	150	300
UA	脲铵氮肥	30-0-0	150	150	300
UHD	稳定性复合肥料	21-8-10	300	0	300
SCU	硫包衣氮肥	35-0-0	300	0	300
UF	脲甲醛复合肥	15-15-15	300	0	300
OF	有机肥	4.5-0-0	150	150	300

玉米的种植方式:穴播,每穴 1 株,行距 \times 株距 = $50 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$. 各处理的小区面积为 60 m^2 ,每个处理设置 3 个重复,小区之间筑有 80 cm 宽, 30 cm 高的田埂,并覆以塑料薄膜以防止肥水串流. 除氮肥处理外其它农业管理措施与当地大面积生产一致.

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 氨挥发

采用王朝辉等^[21]的方法测定氨挥发. 试验所用的收集装置是用 PVC 管制成,内径 15 cm ,高 12 cm . 采样时将 PVC 管插入土壤中 2 cm ,分别将两块海绵(厚度为 2 cm 、直径为 16 cm ,已均匀浸润 15 mL 的磷酸甘油溶液)置于 PVC 塑料管中,下层的海绵距地面 5 cm ,上层的海绵与管顶部相平,两海绵之间距离约为 1 cm . 下层海绵用来吸收土壤挥发的氨,上层海绵吸收空气中的氨,并防止其被下层海绵吸收. 土壤氨挥发的捕获于施肥后的当天开始,在各小区的不同位置,随机放置 3 个氨捕获装置,一般 $6 \sim 8 \text{ h}$ 后取样. 取样时,将通气装置下层海绵取出,迅速装入塑料袋中密封,上层海绵视其干湿情况更换. 随后更换 PVC 管位置,将装置重新固定好,便于下次试验的进行. 施肥后第 1 周每 2 d 取样 1 次,以后每周取样 2 次,直至监测不到氨挥发为止,下雨天停止采样. 将捕获装置中下层的海绵带回试验室后,分别装入 500 mL 的塑料瓶中,加入 300 mL $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液,使海绵完全浸于其中,振荡 1 h 后,浸取液中的铵态氮用流动注射分析仪(型号:SEAL XY-2 SAMPLER,产地:澳大利亚)测定. 根据所测得的氨氮量和捕获装置的横截面积及每次连续捕获的时间计算出土壤的氨挥发速率,且计算

的结果均以 N 计.

1.3.2 氧化亚氮

采用静态暗箱-气相色谱法监测田间 N_2O 的排放通量^[22]. 在各个小区的中心范围内,分别将 3 个不锈钢底座于玉米播种前埋入土壤中固定,底座上有 3 cm 深的凹型槽. 每个底座内播种一株玉米. 采样箱所用材料也为不锈钢,箱体的横截面积为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,箱体高度随箱内玉米的生长而增加,箱内装有微型风扇以保持气体均匀混合. 采集气样时将采样箱罩在底座凹型槽上,凹型槽内注满水与采样箱密封. 玉米施肥后开始进行气样监测,采样频率为每周两次,其中玉米刚施肥时加密采样. 每次采样在上午 $08:30 \sim 12:00$ 之间进行,箱体密封后的 0、10 及 20 min 时分别用注射器收集 150 mL 气体样品,并立即贮存于气袋中,同时记录下 0 及 20 min 时的采样箱温度取其平均值作为箱内气温. 样品用改装的 Agilent 4890D 气相色谱仪检测^[22]. 通过对每组 3 个样品的 N_2O 混合比与相对应的采样间隔时间(0、10、20 min)进行直线回归(回归系数 R^2 大于 0.9 的结果符合要求),可求得该采样点的 N_2O 排放速率. 继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、 N_2O 分子量等,求得单位面积的排放通量. 整个季节的 N_2O 排放通量计算参照文献^[17],计算的结果均以 N 计.

每次气体样品采集的同时用 MP-406 III 型土壤水分温度测定仪(南通中天精密仪器有限公司)测定各个小区土壤水分和 5 cm 深度的土壤温度,根据土壤容重将所测土壤水分(体积比)换算成土壤孔隙含水量(WFPS: Water Filled Pore Space). 降雨量采用无线翻斗式自记雨量计(型号:TFA36010,产

地:德国)进行自动观测. 另外,每间隔 10~15 d 采集一次各小区田间 0~10 cm 深的土壤样品,以用于测定土壤的有效氮的变化. 土壤样品采好后,放入冰箱中 4℃ 冷藏保存并尽快测定.

1.4 测定方法

土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾含量采用常规方法测定; 土壤 pH 采用 1:2.5 的土水比制备土壤悬液,用电位计法测定; 土壤铵态氮和硝态氮采用 2.0 mol·L⁻¹ 的氯化钾溶液浸提,振荡过滤后用流动注射分析仪(型号:SEAL XY-2 SAMPLER,产地:澳大利亚)测定.

1.5 数据处理

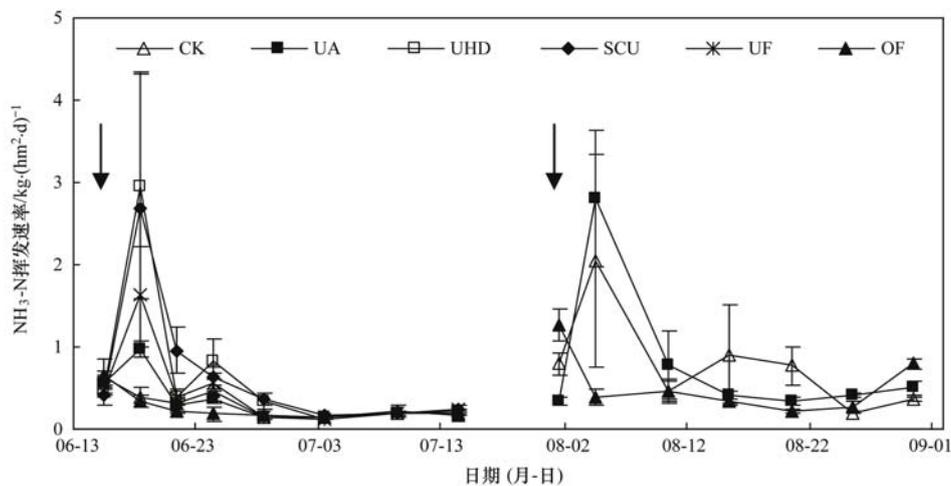
数据处理采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 NH₃ 挥发动态变化

NH₃ 挥发动态变化如图 2 所示,不同的施肥处理之间存在明显差异. 根据大田实际测定时间,将 NH₃ 挥发的测定分为基肥阶段(6 月 15 日~7 月 14 日)和追肥阶段(8 月 1 日~8 月 30 日). 基肥阶段

NH₃ 挥发速率变化较大,基本在 0.12~2.94 kg·(hm²·d)⁻¹ 之间. 氮肥施入后,各处理的 NH₃ 挥发迅速升高,在 1~4 d 内出现大小不一的峰值,随后不断的下降. CK 和 OF 处理的 NH₃ 挥发在第 1 d 就出现最大峰值,分别为 0.63 kg·(hm²·d)⁻¹ 和 0.67 kg·(hm²·d)⁻¹,而 UA、UHD、SCU 和 UF 都在第 4 d 才达到最大峰值,分别为 0.98、2.94、2.68 和 1.64 kg·(hm²·d)⁻¹. 以肥料处理和各次独立观测对氨挥发作二因子方差分析,结果表明:在施基肥后两周内,不同肥料处理对 NH₃ 挥发有显著影响($P=0.0280$),随后便无显著差异($P=0.837$),而在整个基肥阶段各次独立观测之间 NH₃ 挥发均有显著差异($P=0.0000$). 追肥阶段 OF 的 NH₃ 挥发速率在施肥后第 1 d 达到峰值 1.28 kg·(hm²·d)⁻¹,CK 和 UA 第 4 d 达到峰值,分别为 2.05 kg·(hm²·d)⁻¹ 和 2.80 kg·(hm²·d)⁻¹. NH₃ 挥发速率也是在出现峰值后就迅速下降,最终达到较低的稳定水平. 方差分析表明,追肥阶段无论是肥料处理还是各次独立观测之间的 NH₃ 挥发均有显著差异(P 值分别为 0.0000 和 0.0003). 另外,CK、UA 和 OF 处理的 NH₃ 挥发在追肥阶段明显高于基肥阶段.



图中实线箭头表示基肥和追肥的日期,下同

图 2 玉米季不同氮肥处理氨挥发动态变化

Fig. 2 Dynamic variation of ammonia volatilization during the maize growing season

2.2 N₂O 排放季节变化

玉米生长期不同内不同类型氮肥处理下农田 N₂O 排放通量变化趋势基本相同,先缓慢上升到最高峰后再逐渐下降(图 3). 以肥料处理和各次独立观测对 N₂O 排放作二因子方差分析,结果如下:在整个观测阶段,肥料处理和各次独立观测间的 N₂O 排放均有显著差异($P=0.0000$, $P=0.0000$),这表明 N₂O 排放季节性动态变化不同的原因是氮肥的氮素释放特

性不同,以及各次独立观测时的环境因子的变化不同. 另外,由于基肥期降雨比较频繁,各处理均出现了几个大小不一的高峰. 其中,CK 和 UA 处理的 N₂O 排放的最高峰出现在施基肥后的 19 d,分别为 1 807.9 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 1 420.5 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; SCU、UF 及 OF 处理的 N₂O 排放的最高峰出现在施基肥后的 14 d,分别为 3 086.7、2 319.0 和 2 719.9 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; 而 UHD 处理的 N₂O 排放的最高

峰值却出现在第 42 d, 为 $2\,901.9 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 追肥后 UA 和 OF 的 N_2O 排放最高峰在追肥后的第 3 d 出现, 而 CK 是第 14 d 出现. CK、UA 及 OF 在追肥期 N_2O 排放的最高峰值分别是 $1\,125.2$ 、 $1\,002.8$ 及 $834.1 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 与它

们在基肥期的最高峰值相比, 分别降低了 37.8%、29.4% 和 71.6%. 从图 3 中可以明显看出 CK、UA 和 OF 处理基肥期 N_2O 排放速率明显高于追肥期, 且各处理 N_2O 排放的最高峰都集中在基肥期.

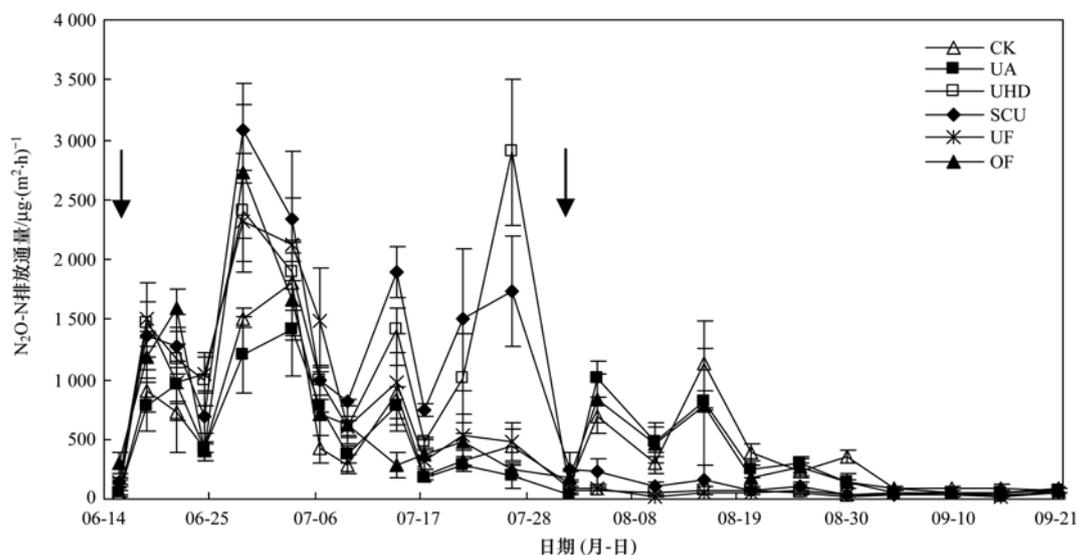


图 3 玉米生长季 N_2O 排放的季节性动态变化

Fig. 3 Seasonal dynamic variations in N_2O emissions during the maize growing season

2.3 NH_3 和 N_2O 累计排放量

表 2 为各处理氨和氧化亚氮累积排放量. 整个玉米生长期, 各处理的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发累积量达到 $17.36 \sim 33.14 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 与 CK 相比, UF 和 OF 的 NH_3 挥发累积量有显著地减少 ($P < 0.05$), 其它三者没有显著差异; 均值上除了 UA 的 NH_3 挥发累积量增加 8%, 其余的处理均有所减少, 尤其 UF 和 OF 减少高达 37% ~ 43%. 另外, CK、UA 及 OF 在基肥期的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发累积量分别为 7.87 、 9.33 及 $6.81 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 仅占总量的 28.5% ~ 35.6%, 这表明这 3 个处理的 NH_3 挥发累积量主要来自追肥之后. 从表 2 中可以看出不同类型氮肥处理下玉米田 N_2O -N 累积排放量为 $10.49 \sim 17.26 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 除了 SCU 显著高于 CK, 其它处理与 CK 相比, N_2O 累积排放量无显著差异, 仅 UA 数值上减少了 10%. 在基肥和追肥 1:1 施

氮肥的情况下, CK、UA 及 OF 处理在基肥期的 N_2O 累积排放量占整个玉米生长季的 63.7% ~ 73.1%, 这表明基肥期的 N_2O 排放量远高于追肥期, 刚好与 NH_3 挥发相反. 对于 UHD、SCU 和 UF 处理而言, 氮肥在基肥期一次性施入, 从 6 月 15 日到 8 月 1 日, N_2O 排放占整个玉米季排放量的 93.5% ~ 96.3%, 且明显高于同时期的另外 3 个处理的 N_2O 累积排放量. 这说明 N_2O 排放主要集中在施肥后的一段时间.

夏玉米肥料的气态氮 (NH_3 挥发和 N_2O 排放) 总损失计算结果见表 2. 各处理均是 NH_3 挥发损失量高于 N_2O 排放损失量, 总损失量为 $29.36 \sim 43.63 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间, 从大到小依次为 $\text{UA} > \text{CK} > \text{SCU} > \text{UHD} > \text{OF} > \text{UF}$. 与 CK 相比, 仅 UA 气态氮排放量增加了 3%, 其余 4 种肥料减排了 5% ~ 30%, 其中以 UF 减排效果最好, OF 次之.

表 2 NH_3 挥发和 N_2O 排放的累积量

Table 2 Cumulative emissions of NH_3 volatilization and N_2O emission

处理	$\text{NH}_3\text{-N}$ 累积挥发量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	相对于 CK /%	N_2O -N 累积排放量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	相对于 CK/%	气态氮损失总量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	相对于 CK /%
CK	$30.58 \pm 3.25\text{ab}$	100	$11.63 \pm 1.30\text{bc}$	100	42.21	100
UA	$33.14 \pm 1.96\text{a}$	108	$10.49 \pm 1.67\text{c}$	90	43.63	103
UHD	$22.64 \pm 3.30\text{ab}$	74	$15.73 \pm 1.48\text{ab}$	135	38.37	91
SCU	$22.83 \pm 4.29\text{ab}$	75	$17.26 \pm 1.97\text{a}$	148	40.09	95
UF	$17.36 \pm 1.55\text{b}$	57	$12.00 \pm 1.81\text{bc}$	103	29.36	70
OF	$19.15 \pm 2.51\text{b}$	63	$13.22 \pm 1.59\text{abc}$	114	32.37	77

3 讨论

3.1 NH₃ 挥发和N₂O排放环境驱动因子分析

不同氮肥处理其土壤铵态氮和硝态氮季节性动态变化不同(图4),这主要取决于不同氮肥氮素释放特性及施用时间和施肥次数等. 将NH₃挥发和N₂O与不同的土壤环境因子进行相关性分析,结果如表3所示. 在本研究条件下,玉米地NH₃挥发仅与农田土壤孔隙含水量呈显著负相关($P < 0.05$),而N₂O排放量与土壤硝态氮呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤孔隙含水量呈极显著负相关($P < 0.01$). 因夏玉米季土壤温度变化范围为18.6~30.6℃,皆在生物化学反应适宜范围内,故其不是NH₃挥发和N₂O排放的限制因子. 而本研究中土壤WFPS始终保持在较高水平,导致NH₃挥发和N₂O排放皆与其呈反相关.

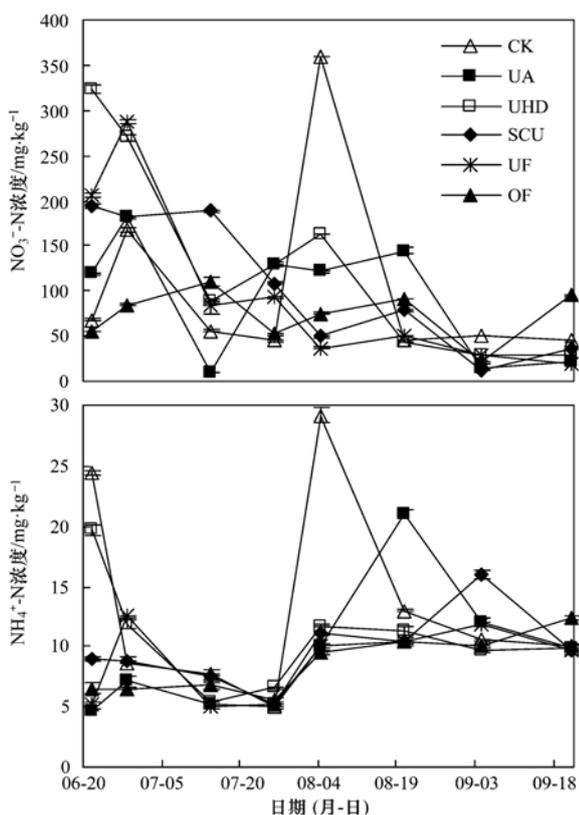


图4 玉米季土壤铵态氮和硝态氮季节性动态变化

Fig. 4 Seasonal dynamic variations of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen during the maize growing season

为了确定NH₃挥发和N₂O排放的关键环境驱动因子,对其进行了进一步的逐步回归分析,结果玉米季NH₃挥发速率可以定量表示为:

$$F_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0.162e^{0.0535x}$$

$$(R^2 = 0.175, n = 30, P < 0.05)$$

式中, $F_{\text{NH}_3\text{-N}} [\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$ 指的是NH₃-N挥发速率, x 指的是土壤铵态氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).说明NH₃挥发主要取决于土壤中铵态氮的高低,这与杨淑莉等^[23]的研究结果基本一致.但决定系数 R^2 较小,意味着还有其它因素会影响到土壤的NH₃挥发.这可能是由于玉米生长季中较高的土壤水分在一定程度上影响了NH₃挥发.而经过非线性拟合,N₂O排放可以定量表示为:

$$F_{\text{N}_2\text{O-N}} = 186.78e^{0.0102x}$$

$$(R^2 = 0.351, n = 48, P < 0.05)$$

式中, $F_{\text{N}_2\text{O-N}} [\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ 指的是N₂O-N排放通量, x 指的是土壤硝态氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).这个表达式表明N₂O排放的主要驱动因子是土壤硝态氮,其大小随着硝态氮含量的增加呈指数增加.由于 R^2 是0.351,这意味着在这个土壤环境下接近35.1%的N₂O排放量受土壤硝态氮的影响,这与Hellebrand等^[24]的研究结果基本一致. Dobbie等^[25]认为土壤WFPS在70%~90%时N₂O排放通量最大,且以反硝化产生为主. Bateman等^[26]也发现在WFPS为70%时几乎所有的N₂O皆以反硝化产生,而WFPS在35%~60%时以硝化为主要产生过程.封克等^[27]指出WFPS为45%~75%时,硝化细菌和反硝化细菌都可能成为N₂O的主要制造者,硝化和反硝化共同作用产生较多的N₂O.本研究土壤WFPS变化范围为59.1%~73.6%,平均为67.3%,说明N₂O产生是硝化和反硝化共同作用的结果,也解释了本研究N₂O累积排放量(表3)偏高的原因.硝态氮既可为硝化作用的产物,也可为反硝化作用的底物,故本研究中N₂O排放主要取决于土壤硝态氮的变化.

不同氮肥氮素释放特性不同,如常规肥料尿素施入土壤后3d左右土壤铵态氮就出现峰值,随后快速下降,UA亦是如此.尿素和UA追肥后铵态氮含量很高,导致其追肥期NH₃挥发较高.但UA的硝态氮含量较低对土壤的反硝化作用有所抑制,导致N₂O排放量减少.而UHD、SCU和UF施入玉米田降低了NH₃挥发,这是由于与普通尿素相比,UHD中脲酶抑制剂可有效降低脲酶活性,这是其NH₃挥发较低的重要原因;SCU和UF施入土壤后,氮素释放缓慢,导致土壤铵态氮含量基本保持在较低的水平,从而达到降低或延缓土壤NH₃挥发速率的效果^[9,28].此外,由于UHD、SCU和UF都是一次性施肥,基肥期施肥量是CK的2倍,导致土壤中的

硝态氮含量显著较高,促进 N_2O 排放. OF 施入土壤后铵态氮和硝态氮随时间变化幅度一直较小,维持在较低的水平. 这是其 NH_3 挥发和 N_2O 排放相对较低的主要原因之一. 另外,有的研究表明与习惯施氮相比,基于作物阶段氮素吸收特点,增加追肥比例

和施氮次数的优化施氮措施能有效减少肥料氮的氮挥发损失和土壤 N_2O 排放^[29,30]. 由于本研究中肥料的施用方式均按照各肥料常规施肥模式进行,故关于施肥次数对气态氮损失的影响在此不做进一步探讨.

表 3 氮挥发、氧化亚氮排放与环境因子的相关性¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients for NH_3 and N_2O emissions against environment parameters

	氧化亚氮	氮挥发	硝态氮	铵态氮	土壤温度	WFPS
氧化亚氮	1(138)					
氮挥发	0.114(90)	1(90)				
硝态氮	0.533** (48)	0.298(30)	1(48)			
铵态氮	-0.183(48)	0.361(30)	0.339* (48)	1(48)		
土壤温度	0.116(138)	0.067(90)	-0.069(48)	0.007(48)	1(138)	
WFPS	-0.229** (138)	-0.241* (90)	-0.515** (48)	-0.130(48)	-0.171* (138)	1(138)

1) **表示在 0.01 水平上显著相关; *表示在 0.05 水平上显著相关; 括号内为样本数 n

3.2 不同类型的氮肥气态氮的减排效果分析

本试验在相同施氮量的情况下,施用不同类型的氮肥, NH_3 挥发的损失总量为 17.36 ~ 33.14 $kg \cdot hm^{-2}$, N_2O 的累积排放量为 10.49 ~ 17.26 $kg \cdot hm^{-2}$. 与其它采用相同施氮量的研究结果相比,本研究中 NH_3 挥发损失总量与卢艳艳等^[31]所测得的结果基本一致,但明显高于降雨极少的东北黑土玉米季 NH_3 挥发损失^[32],同时又低于华北平原碱性潮土地区的夏季玉米田^[33]. 而 N_2O 的累积排放量与等氮量的其他研究结果相比偏高^[34,35],可能是基肥施用后玉米季降雨比较频繁导致 WFPS 始终保持在较高水平,有利于硝化和反硝化的共同作用,进而产生较多的 N_2O ,再加上土壤温度(变化范围为 18.8 ~ 30.6 $^{\circ}C$,平均 24.5 $^{\circ}C$)基本处在产 N_2O 微生物最佳的活动范围^[36],导致 N_2O 的排放增加.

本研究结果表明不同的新型氮肥,除了 UA,其余几种氮肥与常规施肥对比都能降低农田 NH_3 挥发;这与其它施用控释肥、脲甲醛肥和稳定复合肥料的研究结果一致^[8,37],而 Shan 等^[38]的研究结果却显示有机肥提高 NH_3 挥发排放. 而对于 N_2O 排放,效果却与 NH_3 挥发相反,仅有 UA 能轻微降低 N_2O 的排放,这与易琼等^[13]和 Chu 等^[14]的报道一致,在施用缓/控释肥时 N_2O 未能达到减排效果. 但却与文献[11,34,35]的研究结果相反. 这表明相同类型的氮肥在不同环境条件下其氮素释放特性不同. 汇总 NH_3 挥发和 N_2O 排放的结果表明,与 CK 相比仅有 UA 增加了 3% 的气态氮损失,其余肥料处理减少气态氮排放 5% ~ 30%,其中以 UF 减排效果最好,OF 次之. 因此,了解不同氮肥品种氮素释放特

性及作物需肥规律,实现养分供应与作物需求一致是减少氮素损失的关键. 如何优化组合各氮肥品种及适宜的施氮量,在维持作物高产的同时减少氮素损失,保护环境,尚需进一步系统地研究.

4 结论

在相同的土壤和气候条件下,夏玉米生长季施用氮肥后,农田 NH_3 挥发主要取决于土壤铵态氮含量的变化,而 N_2O 排放的主要驱动因子为土壤硝态氮. 与常规施肥相比,除脲胺氮肥外,硫包衣氮肥、稳定性复合肥料、脲甲醛复合肥料和有机肥皆能降低农田 NH_3 挥发,而对 N_2O 排放无显著减排效果. 针对气态氮(NH_3 挥发 + N_2O 排放)总损失而言,也是除了脲胺氮肥,其它肥料处理减少气态氮排放 5% ~ 30%,其中以脲甲醛复合肥料减排效果最好,有机肥次之.

参考文献:

- [1] 颜旺, 刘强, 张玉平, 等. 夏玉米施用控释尿素的土壤氮挥发特征[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(4): 136-140.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [4] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3): 187-195.
- [5] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [6] Yan X, Du L, Shi S, et al. Nitrous oxide emission from wetland

- rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilizers and mid-season aeration [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **32**(1): 60-66.
- [7] 马银丽, 吉艳芝, 李鑫, 等. 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氮挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(2): 225-230.
- [8] 李雨繁, 贾可, 王金艳, 等. 不同类型高氮复混(合)肥氮挥发特性及其对氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(3): 615-623.
- [9] 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 等. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氮挥发的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(5): 199-203.
- [10] 倪康, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期定位试验土壤小麦季氮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.
- [11] 翟振, 王立刚, 李虎, 等. 有机无机肥料配施对春玉米农田N₂O排放及净温室效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(12): 2502-2510.
- [12] 段智源, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮肥处理春玉米温室气体的排放[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(24): 216-224.
- [13] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(8): 1432-1437.
- [14] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K. NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes in winter barley field of Japanese Andisol as affected by N fertilizer management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(1): 330-339.
- [15] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氮挥发研究进展[J]. *生态环境*, 2003, **12**(2): 240-244.
- [16] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤N₂O产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 792-800.
- [17] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田N₂O排放的影响[J]. *环境科学*, 2001, **22**(6): 19-23.
- [18] 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.
- [19] 董文旭, 胡春胜, 陈素英, 等. 保护性耕作对冬小麦-夏玉米农田氮肥氮挥发损失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(11): 2278-2284.
- [20] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统CH₄和N₂O排放的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1979-1986.
- [21] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定——通气法[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, **8**(2): 205-209.
- [22] 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.
- [23] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 不同施氮量和施氮方式下田间氮挥发损失及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2010, **27**(3): 415-421.
- [24] Hellebrand H J, Scholz V, Kern J. Fertiliser induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(36): 8403-8411.
- [25] Dobbie K E, McTaggart I P, Smith K A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D21): 26891-26899.
- [26] Bateman E J, Baggs E M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **41**(6): 379-388.
- [27] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. *土壤学进展*, 1995, **23**(6): 35-42.
- [28] 谷佳林, 边秀举, 徐凯, 等. 不同缓控释氮肥对高羊茅草坪生长及氮素挥发的影响[J]. *草业学报*, 2013, **22**(2): 235-242.
- [29] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氮挥发损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(1): 6-13.
- [30] 梁国庆, 周卫, 夏文建, 等. 优化施氮下稻-麦轮作体系土壤N₂O排放研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(2): 304-311.
- [31] 卢艳艳, 宋付朋, 赵杰, 等. 控释尿素对土壤氮挥发和无机氮含量及玉米氮素利用率的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(6): 79-82.
- [32] 纪玉刚, 孙静文, 周卫, 等. 东北黑土玉米单作体系氮挥发特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(5): 1044-1050.
- [33] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氮挥发[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(3): 409-413.
- [34] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 等. 氮肥管理对夏玉米土壤CH₄和N₂O排放的影响[J]. *中国科学: 化学*, 2011, **41**(1): 117-128.
- [35] Jiang J Y, Hu Z H, Sun W J, *et al.* Nitrous oxide emissions from Chinese cropland fertilized with a range of slow-release nitrogen compounds [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **135**(3): 216-225.
- [36] Smith K A, Thomson P E, Clayton H, *et al.* Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(19): 3301-3309.
- [37] 赵斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释肥对夏玉米产量及田间氮挥发和氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(11): 2678-2684.
- [38] Shan L N, He Y F, Chen J, *et al.* Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **38**: 14-23.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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