

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究： 以长江中下游地区夏玉米季为例

桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 为了解农田常规施肥条件下的不同途径氮素损失特征, 本文通过田间原位试验同步研究了长江中下游地区夏玉米生长季氮肥施用后的农田 N_2O 排放、 NH_3 挥发、氮渗漏和地表径流的变化。结果表明, 在复合肥为基肥, 尿素为追肥, 基追肥氮素水平均为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的条件下, 整个玉米生长季 N_2O 排放系数为 3.3%, NH_3 挥发损失率为 10.2%, 氮渗漏和地表径流损失率分别为 11.2% 和 5.1%。此外, 基肥施用以氮素渗漏损失为主, 而追肥氮素损失以氨挥发和渗漏为主, 表明不同途径化肥氮素损失主要受氮肥品种影响, 玉米季追肥可改用低氨挥发氮肥品种以减少氮素损失。

关键词: 夏玉米; N_2O 排放; NH_3 挥发; 氮渗漏和地表径流; 氮损失率

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3358-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.031

Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An *In-situ* Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, JIANG Jing-yan*

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

Abstract: In order to better understand the characteristics of nitrogen loss through different pathways under conventional fertilization conditions, a field experiment was conducted to investigate the variations of N_2O emission, NH_3 volatilization, N losses through surface runoff and leaching caused by the application of nitrogen fertilizers during summer maize growing season in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, China. Our results showed that when compound fertilizer was used as basal fertilizer at the nitrogen rate of $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and urea with the same level of fertilizing as topdressing, the N_2O emission coefficient in the entire growing season was 3.3%, NH_3 volatilization loss rate was 10.2%, and nitrogen loss rate by leaching and surface runoff was 11.2% and 5.1%, respectively. In addition, leaching was the main pathway of nitrogen loss after basal fertilizer, while NH_3 volatilization and nitrogen leaching accounted for the majority of nitrogen loss after topdressing, which suggested that nitrogen loss from different pathways mainly depended on the type of nitrogen fertilizer. Taken together, it appears to be effective to apply the new N fertilizer with low ammonia volatilization instead of urea when maize needs topdressing, so as to reduce N losses from N fertilizer.

Key words: summer maize; N_2O emission; NH_3 volatilization; nitrogen leaching and surface runoff; nitrogen loss rate

中国目前是世界上化肥氮的最大消费者。以 2013 年为例, 中国化肥氮的消耗达到 23.94Mt, 占世界消费的 23%^[1,2]。与此同时, 我国的氮肥利用率却较低, 传统氮肥利用率约为 35%^[3]。化学氮肥施入土壤后, 基本归宿主要有 3 个方面即作物吸收, 土壤固定和以各种形式损失。其损失途径主要有以氨挥发或硝化反硝化形成气态氮(N_2O 、NO 和 N_2 等) 的形式进入大气环境和以硝酸盐等形态淋洗或径流损失进入水体环境^[4,5]。朱兆良^[3]在总结国内研究结果的基础上, 对我国农田中化肥氮的去向进行了初步估计: 作物吸收 35%、氨挥发 11%、表观硝化-反硝化 34% (其中 N_2O 排放率为 1.0%)、淋洗损失 2%、径流损失 5% 以及未知部分 13%。由于积累的数据不多以及方法论上存在的一些问题, 这一估计

具有较大的不确定性。

N_2O 是重要的温室气体之一, Xing 等^[6]曾报道中国 N_2O 排放急剧增加的主要原因是化肥氮投入的增多, 它对 N_2O 排放的贡献占 73.9%。土壤中的氨挥发进入大气后经过一系列的转化会影响当地、局域甚至全球的 N 循环^[7,8]。据 Zheng 等^[8]估算, 伴随着化肥氮投入的增加, 亚洲农田氨挥发量从 1961 年的 $1.7 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到 2000 年的 $8.2 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 到 2030 年, 可能会增加到 $12.2 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。82% 的氨挥发将很快又沉降返还到陆地生态系统, 其余 12% 则经

收稿日期: 2015-01-23; 修订日期: 2015-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375150)

作者简介: 桑蒙蒙(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染与全球变化, E-mail: 2012103041@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lilacjy@njau.edu.cn

对流沉降到海洋生态系统. 氮肥施用的增加导致以硝酸盐形态淋洗或径流损失的增加, 并引起河流和湖泊水质的富营养化甚至污染地下水及饮用水, 威胁人类的健康. Li 等^[9]的研究表明在我国华北平原小麦-玉米轮作系统上分别施用氮素水平为 200、400 和 800 kg·(hm²·a)⁻¹ 的尿素其 NO₃⁻-N 流失量分别为 6、58 和 149 kg·(hm²·a)⁻¹, 分别占施入氮的 3%、14.5% 和 18.6%. 目前对氮肥施用所导致的农田 N₂O 排放, 氨挥发已进行了大量观测试验和机制研究^[10,11], 关于淋洗和径流氮损失的原位研究报道相对较少^[12], 且研究多集中在单一途径氮素损失, 对 4 种途径氮素损失的同步原位研究鲜见报道. 已有的报道多采用模拟试验^[13] 或计算机模型来模拟研究农田氮素各种途径损失^[14,15]. 本研究以农业面源污染风险极高的长江中下游产粮区为对象, 通过大田原位试验, 探讨了常规施肥条件下夏玉米季农田不同途径氮素损失特征, 分析了农田氮流失, 氨挥发及氧化亚氮排放的影响因素, 以期为正确估算我国化肥氮素损失, 提高氮素管理水平和减少农业面源污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田观测试验于 2014 年玉米生长季实施. 试验区设在南京市郊江宁区横溪镇(118.72°E, 31.66°W). 耕层土壤为壤质黏土, 土壤容重为 1.23 g·cm⁻³, pH(H₂O) 为 6.1, 有机质为 18.36 g·kg⁻¹, 全氮为 2.11 g·kg⁻¹. 2014 年玉米生长季(6~9 月) 内平均温度为 25.1℃, 降水总量为 724.3 mm, 分别比常年同期低 1.1℃ 和多 200 mm 左右.

1.2 试验设计

试验处理设对照(不施肥)和常规施肥管理. 供试玉米品种为苏玉 1 号, 于 6 月 9 日播种, 9 月 21 日收获. 玉米播种间距为 50 cm × 40 cm. 农田管理按常规方式操作, 全生育期氮肥用量为 300 kg·hm⁻², 一半作基肥, 一半作追肥, 采用均匀撒施方式. 硫酸钾型复合肥(N:P₂O₅:K₂O = 15:15:15) 作为基肥, 于 6 月 14 日施入; 尿素为追肥, 于 8 月 1 日施入. 小区面积 25 m², 重复 3 次, 随机区组排列. 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.

1.3 样品采集测定方法

N₂O 的测定采用静态暗箱-气相色谱法^[16]. N₂O 样品的采集使用不锈钢静态封闭箱, 横截面积

为 50 cm × 50 cm, 箱体高度随作物高度而增加. 玉米播种后, 在各采样点预先放置并固定一个不锈钢底座作为水封. 采样时, 将采样箱罩在该底座上, 箱内装有微型风扇以保持气体均匀混合. 每周采样 2 次, 每次采集时间为上午的 08:30 ~ 12:00 之间. 各采样点每次采样 3 个, 每个间隔 10 min, 样品量为 150 mL, 现场注入 300 mL 的气袋中保存. 样品 N₂O 浓度用改装后的 Agilent 4890D 气相色谱仪检测^[16]. 所用载气为 99.999% 高纯氩甲烷(Ar₂:CH₄ = 95:5), 检测器为电子捕获检测器(ECD), 检测温度为 330℃. 通过对每组 3 个样品的 N₂O 混合比与相对应的采样间隔时间(0、10、20 min) 进行直线回归, 可求得该采样点的 N₂O 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、N₂O 分子量等, 求得单位面积的排放量. N₂O 季节排放总量计算参照文献[17] 的计算方法.

土壤氨挥发的测定采用通气法^[18]. 气体捕获装置用 PVC 塑料管制成, 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(5% 磷酸 + 4% 丙三醇) 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. 土壤挥发氨的捕获于施肥后当天开始, 在各小区随机放置氨挥发捕获装置, 一般放置 6~8 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, 随后更换 PVC 管放置位置. 施肥后第 1 周每 2 天取样 1 次, 以后每周取样 2 次, 直至监测不到氨挥发时为止, 约 30 d 左右. 雨天停止采样. 将捕获装置中下层的海绵分别装入 500 mL 的塑料瓶中, 加 300 mL 1.0 mol·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土壤的氨挥发速率^[18].

渗漏水的采集采样直管型渗漏计法^[19], 渗漏计由 PVC 材料制成, 管内径 10 cm, 长 90 cm, 底部封闭, 管口套有盖子, 并在距底部 25 cm 处从下而上 15 cm 内均匀打 3 排孔径为 5 mm 的渗水小孔, 其外用塑料纱网紧贴管壁将渗水小孔包住, 以阻隔淤泥进入管中. 将渗漏计埋入土壤 70 cm, 小孔在地下 30 cm 以下, 即保证所有小孔均在犁底层以下, 收集

通过犁底层的水样. 渗漏水每周采集 2 次,直至处理与对照硝态氮和铵态氮浓度无显著差异为止. 采样时用泵将水样全部抽出,记录体积数,同时取 50 mL 样品带回实验室. 水样经过滤后,同前用流动注射分析仪测定硝态氮和铵态氮. 氮素渗漏量采用的估算方法为:因每一 PVC 管直径为 10 cm,埋入土壤中时第一排孔距土壤表面为 30 cm,故将其抽象地认为每一 PVC 管所收集的渗漏水及氮素量是一个直径为 20 cm ($30/2 + 10/2$),长轴为 30 cm 的半椭球体土壤所贡献的渗漏量(不考虑各个半球体相互间的侧渗),根据半椭球体体积计算公式($V = 4/3 \times \pi \times ab^2$, 式中, a 为长轴, b 为短轴)计算出半椭球体体积为 0.00628 m^3 , 面积为 1 hm^2 的 30 cm 厚土层中约含 477 707 个半椭球体,进而估算稻田氮素渗漏量^[19].

试验区地势平坦,在各小区出口一侧,有地面导水槽与地表径流收集池相连. 地表径流水一般雨后从地表径流收集池采样^[12]. 水样采集后同前用流动注射分析仪测定硝态氮和铵态氮浓度,结合径流量进而计算地表径流氮素总流失量^[12].

每次样品采集的同时,采用 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)换算成土壤充水孔隙度(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.

1.4 数据处理

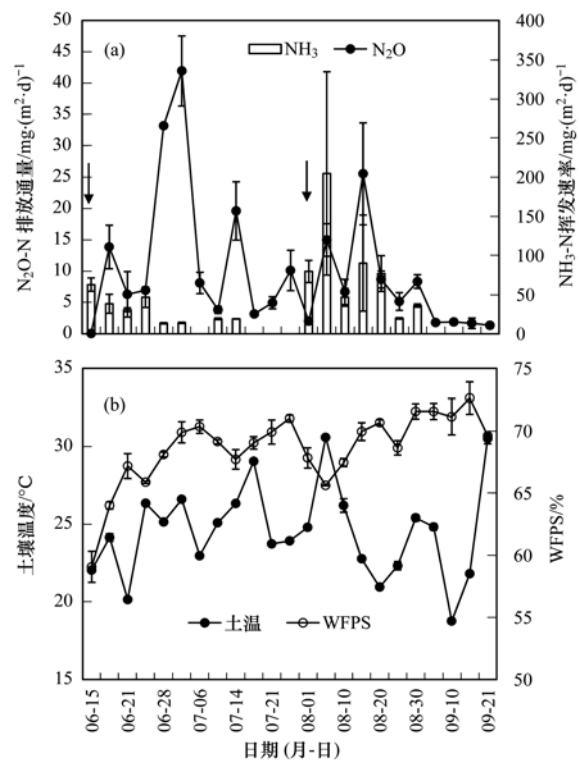
为估算施用的氮肥对大气,水体的贡献和影响,试验结果采用施氮处理区与对照区的差值来反映(算数平均值 $\pm$ 标准误差). 试验数据采用 SPSS 19.0 软件统计分析.

2 结果

2.1 不同途径氮素损失的季节动态变化

在玉米生长季期间,氮肥施加导致较高的 N_2O 排放量,其排放高峰期一般出现在氮肥施用后的 15 ~ 20 d [图 1(a)],最大峰值出现在基肥复合肥施用后的第 19 d. 由图 1 中还可以看出,等氮量的基肥复合肥导致的 N_2O 排放通量较追肥尿素要高. 而 NH_3 挥发一般在氮肥施用后 1 ~ 3 d 内出现峰值,随后持续下降. 追肥尿素的 NH_3 挥发明显高于基肥复合肥. 该生长季内土壤温度变化不大,变化范围为 $18.8 \sim 30.6^\circ\text{C}$,平均 24.5°C . 由于降雨频繁,土壤水

分 WFPS 变化范围为 $59.1\% \sim 71.6\%$,平均 68.6% [图 1(b)]. 相关分析表明,玉米季施加氮肥导致的 N_2O 排放或 NH_3 挥发与土壤温度和土壤水分未达显著相关($P > 0.05$). 单独将对照或施氮处理的 N_2O 排放和 NH_3 挥发速率与土壤温度和土壤水分进行相关分析可知仅对照的 N_2O 排放通量与土壤水分在 0.1 水平上显著相关($P = 0.077$),表明本玉米生长季因高温高湿水分和温度不是 N_2O 排放和 NH_3 挥发的主要限制因子.



图中箭头表示基肥和追肥施用日期,下同
图 1 玉米生长季氮肥施用导致的 N_2O 排放和 NH_3 挥发速率
季节动态变化和土壤温度及土壤水分(WFPS)的变化
Fig. 1 Seasonal variations in N_2O emissions and NH_3 volatilization
caused by the application of nitrogen fertilizers and soil temperature
and WFPS during the maize growing season

由图 2 中可以看出,基肥(复合肥)导致的渗漏液的 NO_3^- -N 浓度一直处于较高的水平,而 NH_4^+ -N 浓度一直处于较低的水平. 施用追肥尿素后,渗漏液的 NH_4^+ -N 浓度一直处于较高的水平,而 NO_3^- -N 浓度前期一直处于较低的水平,直至施肥后的第 14 d 出现峰值. 追肥 20 d 后,不施肥区与施肥区已无显著差异,反映在图 2 中渗漏液的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度几乎为零.

从 6 月 14 日到 8 月 30 日共有 37 次降雨,其中日降水量 $< 5 \text{ mm}$ 为无效降水量,无径流产生(图 3). 本研究仅收集了基肥施用后的 20 d 内的 4 次

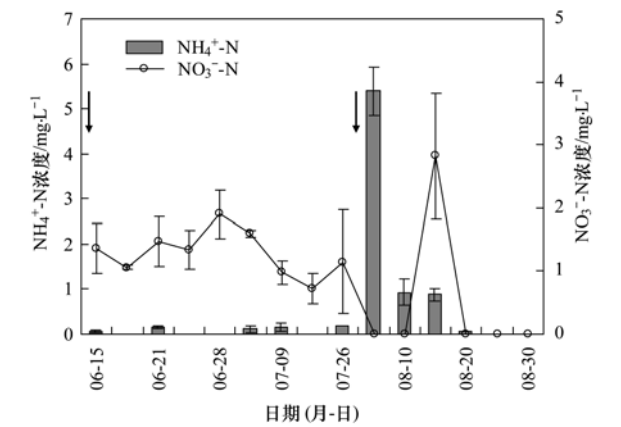


图2 施氮肥导致渗漏液的NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度的动态变化

Fig. 2 Variations of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N concentration in leachate caused by the application of nitrogen fertilizers

径流水和追肥施用后的30 d内的6次径流水. 从图3中可以看出,与渗漏液有相似规律,也是基肥导致的地表径流水的NO₃⁻-N浓度处于较高的水平,而NH₄⁺-N浓度处于较低的水平,基肥施用20 d后不试肥区与施肥区已无显著差异,反映在图3中7月5日的地表径流水的NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度几乎为零. 施用追肥尿素后,地表径流水的NH₄⁺-N浓度很快处于高水平,然后呈逐渐下降趋势. 而NO₃⁻-N浓度一直处于较低的水平,未出现明显峰值. 追肥30 d后,不试肥区与施肥区已无显著差异,反映在图3中最后一次收集的地表径流水的NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度接近为零.

2.2 不同途径氮素损失量及损失率

鉴于基肥和追肥氮肥品种不同,我们将追肥施用时间作为前后分界线,分阶段统计不同途径的氮素损失量,结果见表1. 同时计算各阶段肥料氮损失

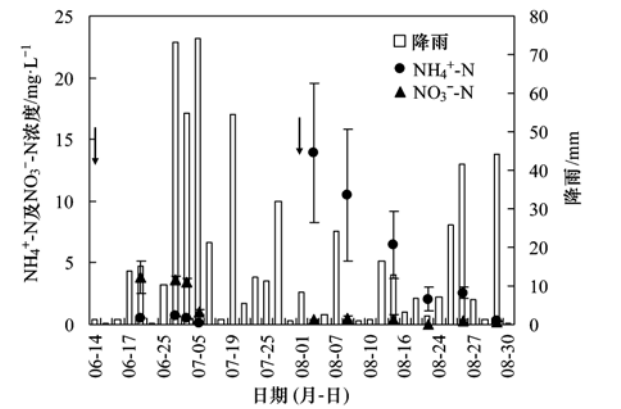


图3 施氮肥导致玉米季(6月14日至8月30日)地表径流水的NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度的动态变化及同时期降雨的变化

Fig. 3 Variations of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N concentration in runoff caused by the application of nitrogen fertilizers and daily rainfall during the experimental period (June 14-August 30)

率,即不同时期不同途径氮素损失量占施入氮量的百分比. 因土壤N₂O是由土壤硝化反硝化过程产生,基肥中的部分氮素可能在追肥后依旧作为N₂O的氮源,在此假定8月1~30日N₂O排放主要是尿素导致的,同时9月1日后N₂O排放很少,仅占整个生长季的5%左右,故此处分阶段计算N₂O排放系数,误差不大. 从表1中可以看出,不同时期不同途径氮素损失量不同. 追肥后即8月1~30日这一阶段各途径氮素总损失值是基肥的1.23倍. 基肥导致的氮素损失途径以NO₃⁻-N渗漏为主,占复合肥氮素损失的44%左右,其它途径如N₂O排放,氨挥发和硝酸盐地表径流损失相当,基本各占复合肥氮素损失的17%左右,NH₄⁺-N渗漏和地表径流损失最低,仅占2.5%左右. 而尿素导致的氮素损失途径以氨挥发为主,占总损失量一半左右;渗漏和地表径

表1 玉米生长季不同时期施氮肥导致的N₂O排放,NH₃挥发及渗漏和地表径流液的无机氮的累积量¹⁾

Table 1 Nitrogen losses through N₂O emission, NH₃ volatilization, leaching and surface runoff caused by the application of nitrogen fertilizers in the different stage

玉米生长时期 (月-日)	N ₂ O-N 累积排放量 /kg·hm ⁻²		N ₂ O 排放系数 /%	NH ₃ -N 累积挥发量 /kg·hm ⁻²		氨挥发损失率 /%
06-14~07-30	5.79±0.41a		3.9	7.87±0.45b		5.2
08-01~08-30	3.61±0.73b		2.4	22.70±7.18a		15.1
整个生长季	9.94±1.05		3.3	30.58±6.98		10.2
玉米生长时期 (月-日)	渗漏			径流		
	NO ₃ ⁻ -N 累积渗流量 /kg·hm ⁻²	NH ₄ ⁺ -N 累积渗流量 /kg·hm ⁻²	无机氮渗漏 损失率/%	NO ₃ ⁻ -N 累积径流量 /kg·hm ⁻²	NH ₄ ⁺ -N 累积径流量 /kg·hm ⁻²	无机氮径流 损失率/%
06-14~07-30	17.33±3.06a	1.01±0.22b	12.2	6.74±0.37a	1.07±0.13b	5.2
08-01~08-30	4.23±1.54b	10.89±1.48a	10.1	0.56±0.20b	6.87±2.88a	5.0
整个生长季	21.56±4.60	11.90±1.70	11.2	7.30±0.57	7.94±3.01	5.1
						29.8

1) 表中纵栏的括号内不同小写字母表示2个生长时期有显著差异(P<0.05)

流 NH_4^+ -N损失也较高,占尿素氮损失的36%; N_2O 排放损失较小,占尿素氮损失的7%左右。 NO_3^- -N地表径流损失最低,仅占1%左右,这说明因雨水过多,尿素氮转化为 NH_4^+ -N,还来不及转化为 NO_3^- -N就以铵氮形式被淋洗或径流损失了。

尽管氮肥施用导致的玉米整个生长季 N_2O 直接排放系数仅为3.3%,是4个途径氮损失率最低的,但其它途径的氮素损失进入环境亦能转变为 N_2O 。根据IPCC(2006)对化学氮肥施用引起的农田 N_2O 直接排放和间接排放的划分,本研究借鉴IPCC推荐的氮的渗漏和径流 N_2O 间接排放因子为0.75%和大气中的 NH_3 转化成 N_2O 的系数为1.0%^[27],进一步计算氮肥施用后的氨挥发和无机氮流失转化为 N_2O -N的量为 $0.67\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,则本研究中的氮肥施用后的 N_2O 总排放系数为3.5%。

3 讨论

无论哪种途径的氮素损失,皆受多种因素的影响,如氮肥品种,施氮量,土壤理化性质,气象条件,水肥管理等,这也是各地测定结果时空变异较大的原因。但是每种途径的氮素损失在特定的地区均有其主要的驱动因子。本研究中的土壤温度(变化范围为 $18.8\sim 30.6^\circ\text{C}$,平均 24.5°C)和WFPS(变化范围为 $59.1\%\sim 71.6\%$,平均 68.6%),基本上在产 N_2O 的微生物活动最佳范围之内^[20,21],土壤温度和水分不是 N_2O 排放的限制因子, N_2O 排放主要受氮源的影响^[10],反映在基肥和追肥后 N_2O 的排放有显著差异。另外 N_2O 排放一般与施氮量呈指数非线性回归关系^[15]。土壤温湿度适宜也导致 N_2O 排放系数较高,为3.3%,远高于相同施肥方式且等氮量施用条件下的我国北方地区玉米季的 N_2O 排放系数0.44%^[22]和1.15%^[23],也高于同地区雨量偏少季的0.67%^[17]。同理, NH_3 挥发一般受土壤温度,土壤水分,土壤氮素和土壤pH等因子的影响^[11,24,25]。低土壤温度和高土壤水分不利于土壤 NH_3 挥发,而高土壤 NH_4^+ -N和碱性土壤有利于 NH_3 挥发的增多^[26]。 NH_3 挥发一般与施氮量呈线性正相关^[15]。在本研究中 NH_3 挥发与土壤温度和WFPS均未达显著相关,也主要受氮肥品种的影响,反映在追肥施用后的 NH_3 挥发显著高于基肥施用。不同氮肥其氮素形态和释放速率不同,从而导致氮素损失不同。本研究中的 NH_3 挥发量占施入氮的10.2%,与IPCC的推荐值10%^[27]相当,但远低于华北平原

相同施肥方式且等氮量施用条件下的 NH_3 挥发损失率23.7%~33.1%^[28]和用微气象学法(梯度扩散法)测定华北平原低施氮量条件下的大面积农田土壤氮挥发的试验结果24.5%~37.0%^[29]及用模型估算的全国 NH_3 挥发损失率24%^[15];同时又高于等施氮量条件下东北黑土玉米季 NH_3 挥发损失率4.49%^[30]。

通过渗漏和地表径流途径的氮素损失主要与施N量,降雨及灌溉有关^[12,31,32]。张玉铭等^[31]在栾城的两年试验表明,玉米N渗漏量与渗漏水的体积有关,而渗漏水的体积与降水和灌溉有关,多雨季节N渗漏损失率高达17.6%~48.9%。地表径流 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N浓度变化是降雨与径流扰动和搬运地表土壤氮素的结果^[33]。本研究中,无论是渗漏水还是地表径流水中的 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N浓度均受施肥品种的影响,反映在基肥施用和追肥施用后的氮素形态有明显区别,但等氮量施用条件下2种肥料的无机氮的损失率比较接近。以往大部分研究认为渗漏和地表径流中的氮素形态以 NO_3^- -N为主^[12,31],但本研究发现尿素追肥后渗漏水的地表径流水中的氮素以 NH_4^+ -N为主,这与王鹏等的报道一致^[34]。可能与强降雨有关,尿素中的氮水解为 NH_4^+ -N还未转化为 NO_3^- -N,就被淋洗和流失了。本研究中的无机氮渗漏损失率为11.2%,高于黄淮海平原地区的5.7%~9.4%^[35],低于Wang等的研究14%^[15]。无机氮地表径流的损失率5.1%则与朱兆良的全国估计值相当^[3]。

我国从20世纪80年代起到现在,农业面源氮污染输出负荷总体上是呈增加的趋势^[36],大量氮素损失进入环境后引起一系列环境问题如森林退化、土壤和淡水酸化、水体富营养化、地下水硝态氮污染、物种组成变化和生物多样性减少等^[15,37,38],应该引起政府部门对氮素管理的重视。在农业生产实际中,无法改变气象条件和土壤本身的理化性质,如何减少农业生产中的氮素损失,主要靠农业管理措施的调整。以本研究为例,长江中下游地区夏季高温多湿,作物的生育期也是基本固定的,唯一能减少氮素损失的途径是测土配方施肥和选择合适的氮肥品种。了解不同氮肥品种氮素释放特性及作物需肥规律,实现根层养分供应与高产作物需求在数量上匹配、时间上同步,提高氮肥利用率是减少氮素损失的关键。研究表明长江中下游地区基肥施用以氮素渗漏损失为主,而追肥氮素损失以氨挥发和渗

漏为主, 可以考虑选择多种肥料组合, 如追肥不用尿素, 改用其它 NH_3 挥发较少的肥料品种, 如缓控释肥料^[14,39]等。至于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各途径氮素损失, 保护环境, 尚需进一步系统地研究。

4 结论

在相同的气候条件和土壤环境下, 氮肥施用导致的不同途径氮素损失不同。在玉米季常规施肥条件下, 基肥施用以氮素渗漏损失为主, 而追肥氮素损失以氨挥发和渗漏为主。渗漏液和地表径流水中氮素形态和不同途径氮素损失率主要受氮肥品种影响。

参考文献:

- [1] 中国统计局. 2014 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [2] Food and Agricultural Organization of the United Nations[Z]. FAOSTAT Database (<http://www.fao.org/faostat/>).
- [3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, **45**(5): 778-783.
- [4] Smil V. Nitrogen in crop production: An account of global flows [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, **13**(2): 647-662.
- [5] Sun B, Shen R P, Bouwman A F. Surface N balances in agricultural crop production systems in china for the period 1980-2015[J]. Pedosphere, 2008, **18**(3): 304-315.
- [6] Xing G X, Yan X Y. Direct nitrous oxide emissions from agricultural fields in China estimated by the revised 1996 IPPC guidelines for national greenhouse gases [J]. Environmental Science & Policy, 1999, **2**(3): 355-361.
- [7] Gruber N, Galloway J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. Nature, 2008, **451**(7176): 293-296.
- [8] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, *et al.* The Asian nitrogen cycle case study[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, **31**(2): 79-87.
- [9] Li X X, Hu C S, Delgado J A, *et al.* Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in north china plain [J]. Agricultural Water Management, 2007, **89**(1-2): 137-147.
- [10] Aguilera E, Lassaletta L, Sanz-Cobena A, *et al.* The potential of organic fertilizers and water management to reduce N_2O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, **164**: 32-52.
- [11] 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.
- [12] 谭德水, 江丽华, 张骞, 等. 不同施肥模式调控沿湖农田无机氮流失的原位研究——以南四湖过水区粮田为例[J]. 生态学报, 2011, **31**(12): 3488-3496.
- [13] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, **35**(12): 1493-1499.
- [14] 林立, 胡克林, 李光德, 等. 高产粮区不同施肥模式下玉米季农田氮素损失途径分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2617-2624.
- [15] Wang G L, Chen X P, Cui Z L, *et al.* Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **197**: 293-300.
- [16] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(5): 842-844.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 汪华, 杨京平, 金洁, 等. 不同氮素用量对高肥力稻田水稻-土壤-水体氮素变化及环境影响分析[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(1): 50-54.
- [20] 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.
- [21] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, *et al.* Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2007, **373**(2-3): 501-511.
- [22] Cui F, Yan G X, Zhou Z X, *et al.* Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **48**: 10-19.
- [23] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 等. 氮肥管理对夏玉米土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国科学: 化学, 2011, **41**(1): 117-128.
- [24] 张承先, 武雪萍, 吴会军, 等. 不同土壤水分条件下华北冬小麦基施不同氮肥的氨挥发研究[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (5): 27-32.
- [25] 马玉华, 刘兵, 张枝盛, 等. 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH_3 挥发及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5556-5564.
- [26] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [27] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry, and Other Land Use[Z]. IPCC.
- [28] 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氨挥发[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 409-413.
- [29] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发[J]. 华北农学报, 2002, **17**(1): 76-81.

- [30] 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.
- [31] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. 土壤学报, 2006, **43**(1): 17-25.
- [32] Zhang J S, Zhang F P, Yang J H, *et al.* Emissions of N_2O and NH_3 , and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **140**(1-2): 164-173.
- [33] 黄满湘, 章申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, **58**(1): 147-154.
- [34] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1671-1675.
- [35] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(1): 65-70.
- [36] 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 等. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- [37] 方华, 莫江明. 活性氮增加: 一个威胁环境的问题[J]. 生态环境, 2006, **15**(1): 164-168.
- [38] 赵新峰, 杨丽蓉, 施茜, 等. 东北海伦地区农村地下水硝酸盐氮污染特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 2993-2998.
- [39] 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.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行