

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娴 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地区环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响

刘希玉^{1,2}, 邹敬东³, 徐丽丽², 张心昱^{2*}, 杨凤亭², 戴晓琴², 王忠强¹, 孙晓敏²

(1. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 江西省吉安市农业科学研究所, 吉安 343000)

摘要: 土壤中碳、氮淋失降低土壤肥力, 污染水体环境。为探究不同施肥种类对稻田红壤碳氮淋失影响, 本试验依托中国科学院千烟洲生态站(114°53'E, 26°48'N) 1998 年建立的红壤稻田长期定位控制试验, 选用负压法采集土壤溶液, 研究秸秆还田(ST)、有机肥(OM)、化肥(NPK)对土壤碳、氮淋失状况及时间动态的影响。结果表明: ①稻田土壤中氮素淋失以铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)为主, 施用 NPK 使土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 淋失最严重, 施用 OM 使土壤中可溶性有机碳(DOC) ($27.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 淋失最严重, 且土壤中 DOC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均在水稻营养生长期淋失最严重 ($P < 0.05$); ②施用 OM 与 NPK 可以增加稻田红壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DOC、总有机碳(SOC) 和总氮(TN) 含量, 且施用 NPK 增加 TN 效果最显著, 施用 OM 增加 SOC 最显著; ③土壤渗滤液中 DOC 含量与稻田红壤中 SOC 含量呈显著正相关 ($P < 0.01$), 土壤渗滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与稻田红壤中 TN 含量呈显著正相关 ($P < 0.01$)。

关键词: 稻田红壤; 土壤渗滤液; 铵态氮; 可溶性有机碳; 化肥; 有机肥; 营养生长期; 生殖生长期

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3083-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.08.035

Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil

LIU Xi-yu^{1,2}, ZOU Jing-dong³, XU Li-li², ZHANG Xin-yu², YANG Feng-ting², DAI Xiao-qin², WANG Zhong-qiang¹, SUN Xiao-min²

(1. College of Geographic Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Ji'an Agricultural Sciences, Jiangxi Province, Ji'an 343000, China)

Abstract: Enhanced fertilization could decrease nitrogen utilization rate and increase carbon and nitrogen leaching, leading to water pollution in agricultural ecosystem. A long-term field experiment had been established on a reddish paddy soil of Qianyanzhou Ecological Experimental Station (114°53'E, 26°48'N) in Jiangxi Province in 1998. Soil solution samples were collected by clay tube and vacuum pump. Four fertilizer species treatments were selected: control with no fertilizer (CK), straw return (ST), nitrogen, phosphorus and potassium mineral fertilizers (NPK) and pig manure (OM), aiming to evaluate the effects of different species of fertilizer on carbon and nitrogen leaching in a double rice cropping system. The results showed that: ① ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) was the major type of N in soil leachate in reddish paddy soil. The application of NPK could significantly increase the ammonium nitrogen concentration ($1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) compared with the CK, ST and OM treatments, and the application of OM could significantly increase the dissolved organic carbon (DOC) concentration ($27.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) in soil leachate. The carbon and nitrogen leaching were more notable in the vegetative growth stage than the reproductive growth stage of rice ($P < 0.05$); ② the long-term application of NPK and OM increased the $\text{NH}_4^+\text{-N}$, DOC, soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents. The NPK was best beneficial to improve TN contents and OM to improve SOC contents. ③ The DOC contents in soil leachate and SOC in paddy soil had a positive correlation ($P < 0.01$), while $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in soil leachate and TN contents in paddy soil had a positive correlation ($P < 0.01$).

Key words: reddish paddy soil; soil leachate; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; DOC; NPK; OM; vegetative growth stage; reproductive growth stage

我国是世界上水稻种植面积第二大国, 水稻产量位居世界首位, 大规模水稻种植导致的营养物质污染主要集中在我国南方亚热带中部^[1,2]。红壤在我国南方热带和亚热带地区所占面积为 2 035 300 km^2 , 丰富的降水量和适宜的温度, 使该区域成为我国农业重要产区, 该区域作物以水稻为主, 其水稻生产量占世界产量的 29%^[3]。碳素和氮素是评价土

壤肥力和质量的重要指标之一^[4], 肥料的施用使我国稻田红壤中碳氮含量增加约一倍^[5]。近年来为追

收稿日期: 2014-01-03; 修订日期: 2014-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171153); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-310); 中国科学院地理科学与资源研究所自主部署创新项目(201003006)

作者简介: 刘希玉(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳氮循环, E-mail: liuxiyudexinxiang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangxy@igsnrr.ac.cn

求高产,满足粮食需求,现代农业生产大量施用化肥,施肥量与20世纪80年代相比提高约2倍^[6],我国稻田氮肥施用量占世界水稻氮肥总消耗量的37%^[7],而吸收利用率仅为30%~35%^[8].大量氮肥施用到土壤后,降低了氮素利用效率,土壤中氮素向下淋溶^[9],且通过地表径流、农田排水和淋溶途径进入水体^[10],导致土壤养分流失增多,水体富营养化^[11]和地下水体中硝酸盐污染^[12]现象严重.

土壤可溶性有机碳淋失是水体中有机碳污染的重要来源^[13],针对农业生态系统的研究表明,施用氮肥使土壤中可溶性有机碳和硝态氮淋失量增多^[14].目前,土壤中碳、氮淋失导致环境污染现象严重^[15],针对土壤中碳、氮淋失的研究也越来越多.化肥和有机肥的长期施用导致深层土壤中氮素累积量大幅增加,氮素淋失严重^[16].从2002~2007年,华北平原区潜水与承压水中硝态氮含量增长了约一倍^[17].但对于不同施肥种类对稻田土壤中碳氮淋失状况及其与土壤中碳、氮含量相关研究还较少.

本研究依托中国科学院千烟洲生态站1998年建立的红壤稻田长期定位施肥试验,采用负压法采集土壤溶液,研究秸秆还田(ST)、有机肥(OM)、化肥(NPK)对土壤碳、氮淋失状况及时间动态的影响,以为不同肥料种类对稻田土壤碳氮淋失评价提供依据,为稻田施肥的合理管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

中国科学院千烟洲生态试验站位于江西省泰和县(26°48'N,114°531'E),为典型红壤丘陵区,地处中亚热带季风气候区,雨量充沛,四季分明,年平均气温17.8℃,年平均无霜期为280 d,年均降雨量为1471 mm.试验地位于河漫滩,地势平坦.

1.2 试验设计

长期定位试验于1998年开始,一年两季种植水稻,早稻每年4月底移栽,7月底收获,晚稻7月底移栽,11月初收获.每个处理3次重复,每个小区面积为3 m×5 m=15 m²,小区间以水泥田埂相隔.本研究选择其中4个处理:对照(CK):不施任何肥料;秸秆还田(ST):不施任何肥料,但小区收获后的秸秆还田;有机肥(OM):施用猪粪;化肥(NPK):施用氮磷钾化肥.

两季稻施肥总量:OM(猪粪,含N 0.55%):225 kg·(hm²·a)⁻¹,做基肥一次性施用;ST(秸秆还田,含N 0.55%,秸秆量约4500 kg·hm⁻²):25

kg·(hm²·a)⁻¹,含C量为2295 kg·(hm²·a)⁻¹;NPK:施225 kg·(hm²·a)⁻¹(尿素,含N 46%),135 kg·(hm²·a)⁻¹(钙镁磷肥,含P₂O₅ 13%),225 kg·(hm²·a)⁻¹(氯化钾,含K₂O 60%),早、晚稻的施肥比例为1:1.25,基追肥比为6:4.

试验处理前土壤的基本性质为:pH 6.0;土壤有机碳9.7 g·kg⁻¹;全氮1.0 g·kg⁻¹;速效磷1.6 mg·kg⁻¹;速效钾17.6 mg·kg⁻¹.

1.3 样品采集与分析

本研究在2011年早、晚两季水稻生长期进行采样.早稻于2011年4月20日施底肥,4月21日插秧,4月30日追肥,7月15日早稻收获;晚稻于7月19日施底肥,7月20日插秧,8月2日追肥,11月5日晚稻收获.

在水稻整地后、施底肥前,在土壤40 cm深度埋设陶土头负压采样计(图1),采用负压法采集土壤溶液,收集50 mL土壤溶液,4℃保存.

土壤溶液采样频率为:分别在早稻和晚稻追肥前的第2 d、第4 d、和追肥后的第2 d、第4 d、第6 d和第8 d采集土壤溶液,采样频率为1次/2 d,每季各采样六次.在早稻和晚稻插秧后的第24~38 d之间,在水稻营养生长期(秧苗期和分蘖期),采样频率为1次/7 d,每季各采样3次.在早稻和晚稻的第55~85 d之间,在水稻的生殖生长期(孕穗期、抽穗开花期和灌浆结实期),采样频率为1次/15 d,每季各采样3次,水稻收获后停止采样.在早晚稻两个生育期内,总计采样24次.

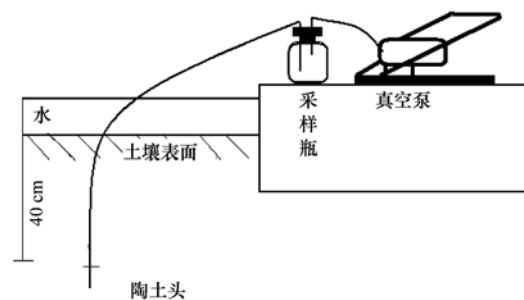


图1 土壤溶液采集装置示意

Fig. 1 Sketch map of soil leachate collection device

土壤样品于2011年11月晚稻收获后,用土钻采集0~20 cm土层土壤样品,每个小区以对角线5点混合成一个样品.

土壤理化性质分析方法如下^[18]:土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N采用鲜土,用1 mol·L⁻¹KCl浸提,液土比10:1;土壤溶解性有机碳(DOC)采用超纯水浸提,液土比5:1.土壤浸提液和渗漏液NH₄⁺-N和NO₃⁻-N使用

德国 Bran Luebbe 连续流动分析仪 (AA3) 测定, 土壤浸提液和渗漏液中可溶解性有机碳 (DOC) 采用德国 Elementar 总有机碳分析仪 (Liquid II) 测定, 土壤总有机碳 (SOC) 和总氮 (TN) 采用德国 Elementar 元素分析仪 (Vario Max CN) 测定.

数据使用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 进行单因素方差 (One-way ANOVA) 分析, 采用 LSD 进行多重比较检验, $P < 0.05$ 为差异显著.

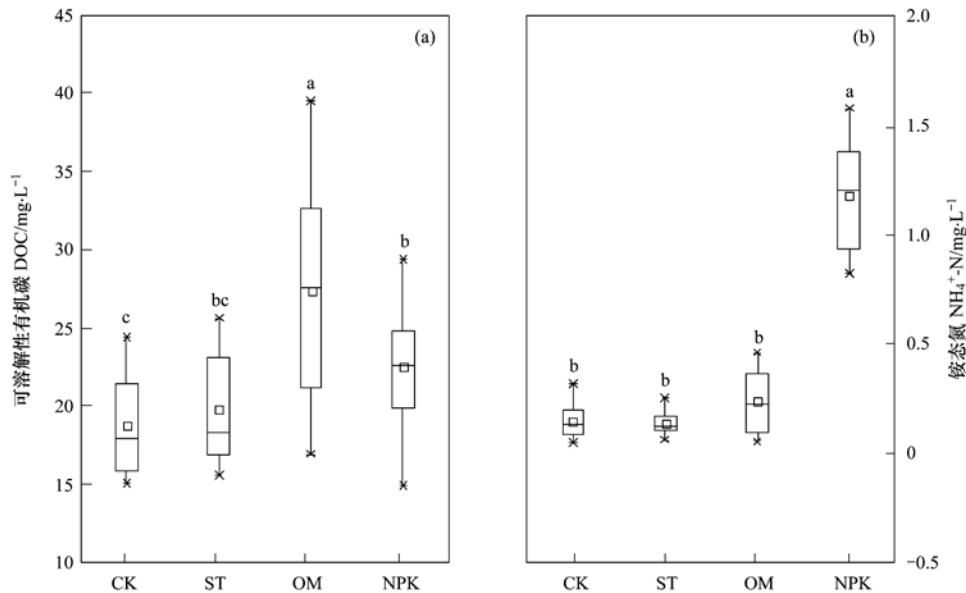
2 结果与分析

2.1 不同肥料种类对土壤渗漏液中 DOC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响

施用有机肥和化肥显著增加了土壤渗漏液中 DOC 含量, 而秸秆还田处理则影响不显著[图 2(a)]. CK 处理土壤渗漏液中 DOC 含量最低 ($18.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

$\pm 0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), OM 处理土壤渗漏液中 DOC 含量最高 ($27.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 分别为 CK、ST 和 NPK 处理的 1.5、1.4 和 1.2 倍, 且差异显著 ($P < 0.05$). NPK 处理土壤渗漏液中 DOC 含量 ($22.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于 CK 和 ST 处理, 是 CK 和 ST 处理的 1.2 和 1.1 倍 ($P < 0.05$).

稻田红壤渗漏液中硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量基本未检出. 土壤渗漏液中铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量主要受施用化肥影响, 秸秆还田、有机肥对土壤渗漏液中铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量影响均不显著[图 2(b)], 其中 NPK 处理土壤渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最高, 为 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 显著高于 CK ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、ST ($0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 OM ($0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 处理, 且差异达到显著水平 ($P < 0.05$).



箱型图中从上至下三条横线分别表示上四分位数, 中位数, 下四分位数; “x”表示极大值和极小值; “□”表示平均值;

不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图2 不同施肥种类对4~11月土壤渗漏液中DOC和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响

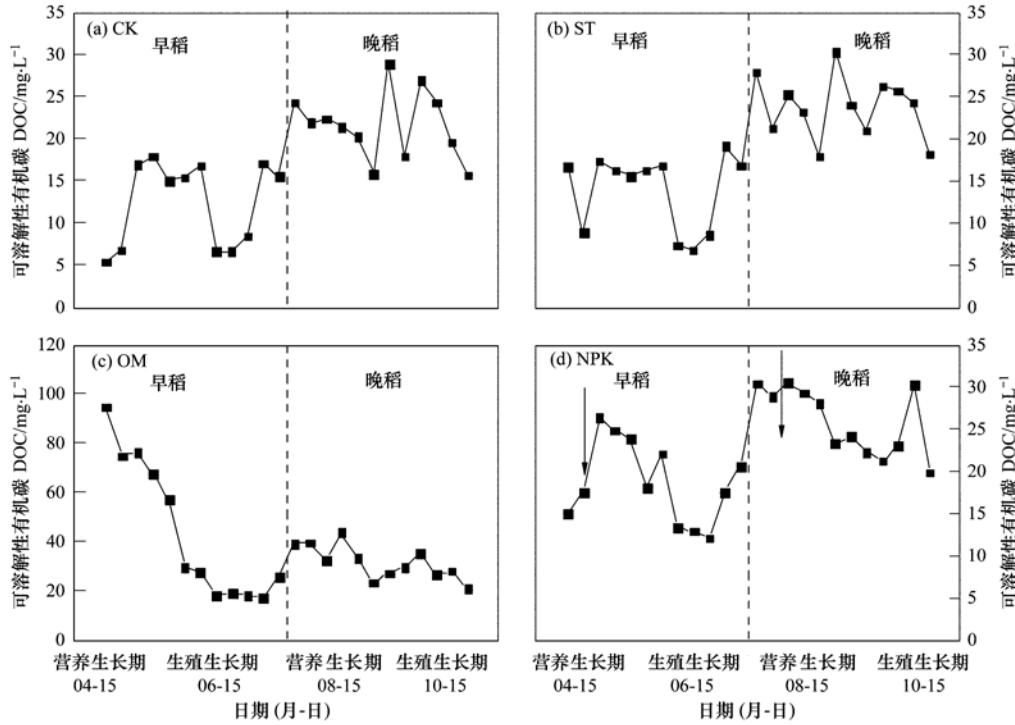
Fig. 2 Effects of different fertilizer species on soil dissolve organic carbon and ammonium nitrogen contents of soil leachate from April to November

2.2 不同肥料种类对土壤渗漏液中 DOC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量时间动态变化的影响

不同处理方式下两季水稻营养生长期土壤渗漏液中 DOC 含量总体趋势均高于水稻生殖生长期 (图3). 与 CK、ST 和 NPK 处理相比, 施用 OM 增加了水稻营养生长期土壤渗漏液中 DOC 含量, 早稻时在营养生长期 DOC 含量最高, 达到 $95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 生殖生长期下降到 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 晚稻时在营养生长期 DOC 含量最高, 达到 $44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 生殖生长期下降到

$23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 整体看早稻营养生长期时土壤渗漏液中 DOC 含量明显高于晚稻. ST 和 NPK 处理方式下, 土壤渗漏液中 DOC 含量在早晚稻时期内的变化趋势基本保持一致, 早稻在 $5 \sim 31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 晚稻在 $16 \sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且从整体看晚稻营养生长期时土壤渗漏液中 DOC 含量明显高于早稻.

施用有机肥和化肥均增加了水稻营养生长期土壤渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 (图4). 两季水稻营养生长期的土壤渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均较高, CK 与 ST 处



↓为施加追肥, ↓表示划分早、晚稻,下同

图 3 不同施肥种类土壤渗漏水 DOC 含量的时间动态变化

Fig. 3 Effects of different fertilizer species on DOC content dynamic

理的土壤渗漏水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度在早晚稻营养生长期最高值分别为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；ST 处理在晚稻时土壤渗漏水

铵态氮含量出现增高的趋势,最高值为 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；施用 NPK 处理对晚稻营养生长期土壤渗漏水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 增加效果最明显,最高值达 8.5

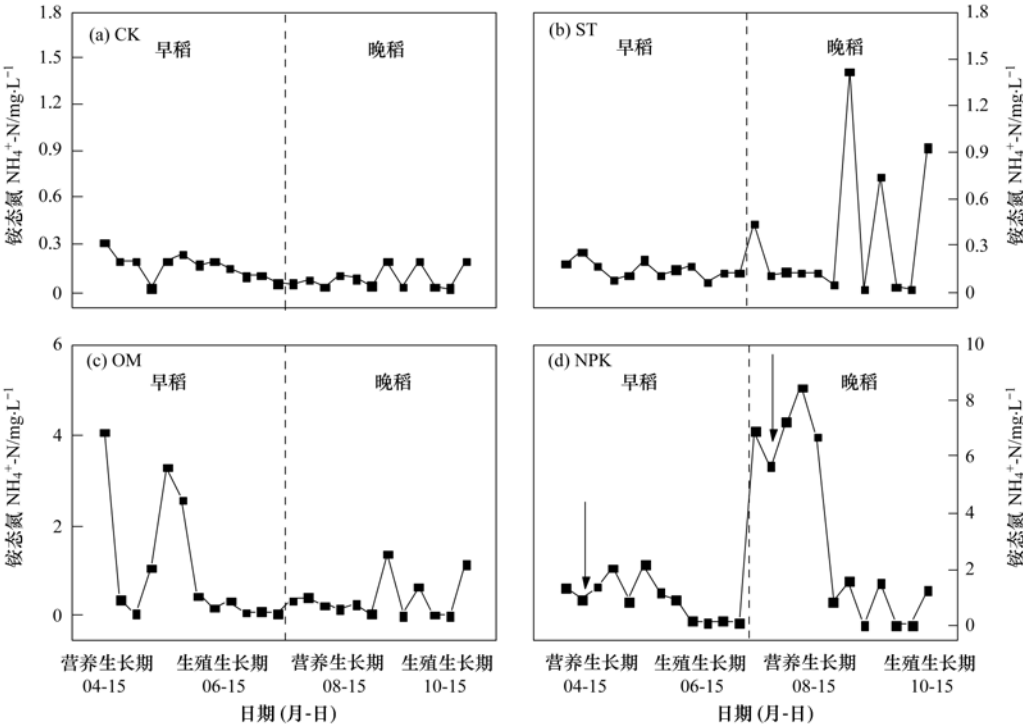


图 4 不同施肥种类土壤渗漏水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的时间动态变化

Fig. 4 Effects of different fertilizer species on $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ content dynamic

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ST 和 NPK 处理方式下晚稻营养生长期时土壤渗漏液中 NH_4^+-N 含量明显高于早稻. 施用 OM 对早稻营养生长期土壤渗漏液中 NH_4^+-N 含量增加最明显, 达 $4.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在晚稻期间增加效果不明显, 且从整体上看早稻营养生长期时土壤渗漏液中 NH_4^+-N 含量明显高于晚稻.

2.3 不同肥料种类对土壤中碳氮含量的影响

肥料的施用使稻田红壤中 DOC 和 SOC 含量升高[图 5(a) 和 5(b)]. 各处理土壤中 DOC 含量从高到低顺序为: $\text{NPK} > \text{OM} > \text{ST} > \text{CK}$, 与 CK 处理 ($173.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 13.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比较, ST、OM 和 NPK 处理分别增加土壤中 DOC 含量 11.5%、18.2% 和 27.7%, 化肥增加效果显著 ($P < 0.05$). OM 处理稻田红壤中 SOC 含量最高 ($21.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 2.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 分别为 CK 和 ST 处理的 2.3 和 1.7

倍, 且差异显著 ($P < 0.05$). NPK 处理稻田红壤中 SOC 含量 ($17.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 1.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 是 CK 和 ST 处理的 1.9 和 1.4 倍 ($P < 0.05$).

肥料的施用显著增加了土壤中总氮和铵态氮含量[图 5(c) 和 5(d)], 土壤中无机氮常以硝态氮(NO_3^--N) 和铵态氮(NH_4^+-N) 形态存在. 与 CK 处理 ($1.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比较, ST、OM 和 NPK 处理增加了稻田红壤中 NO_3^--N 含量, 但差异未达到显著水平 ($P > 0.05$) [图 5(e)]. 施用 NPK 显著增加了土壤中 TN ($1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 NH_4^+-N ($11.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量 ($P < 0.05$). 施用 OM 显著增加了土壤中 NH_4^+-N ($11.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$), 而对土壤中 TN ($1.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量增加效果不显著.

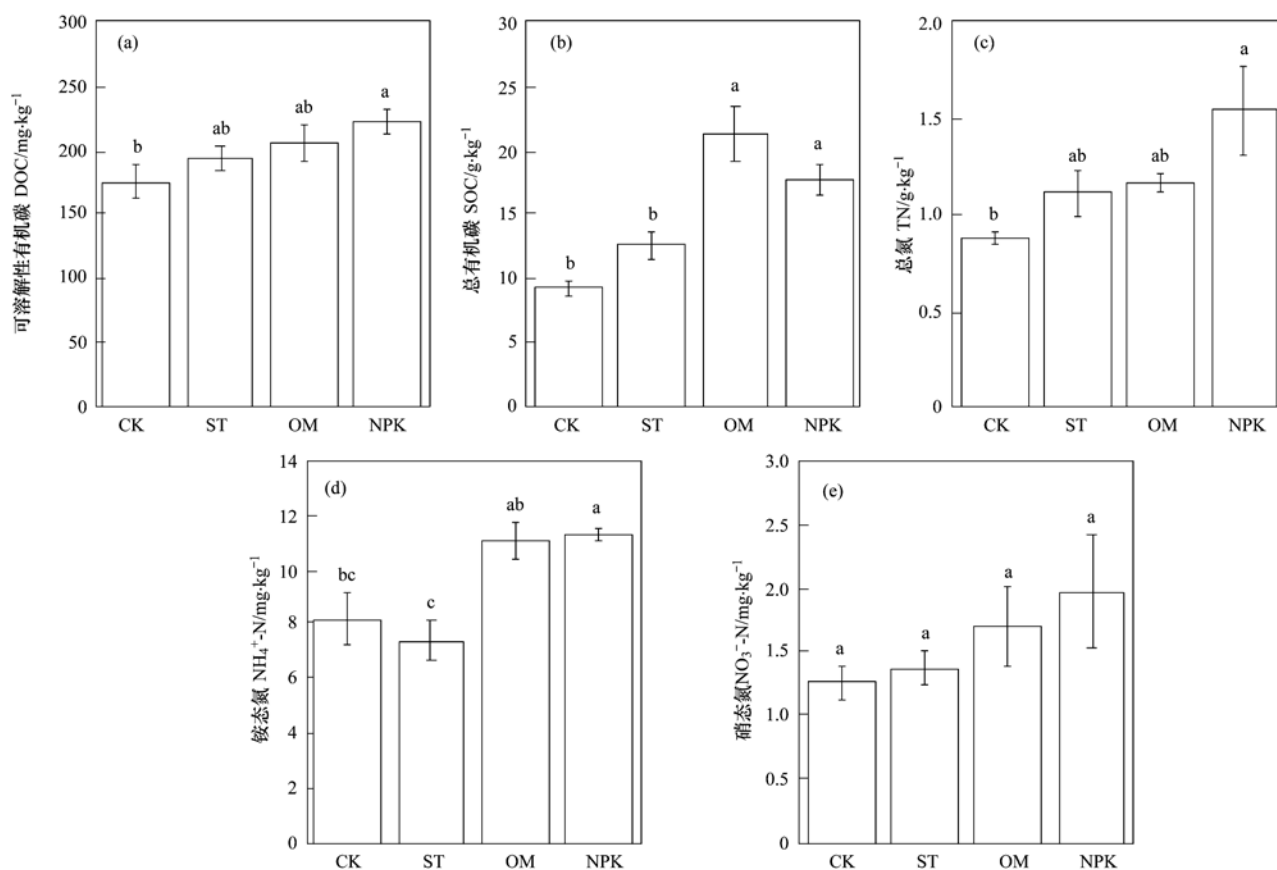


图 5 不同施肥种类对土壤中 DOC、SOC、TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的影响

Fig. 5 Effects of different fertilizer species on soil dissolve organic carbon, soil organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents

相关分析表明, 稻田土壤渗漏液中 DOC 含量与土壤中 SOC 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 稻田土壤渗漏液中 NH_4^+-N 含量与土壤中 TN 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$) (图 6). 土壤渗漏液

中 DOC 和 NH_4^+-N 含量与土壤 DOC、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 相关不显著. 结果表明, 随着肥料的施用, 稻田红壤中 SOC 和 TN 总量增加, 土壤中碳氮淋失量也增多.

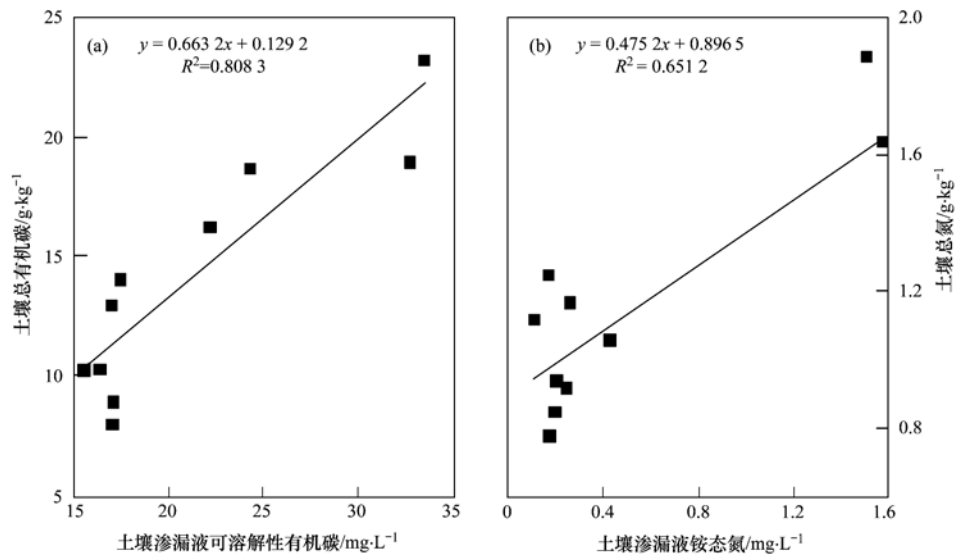


图6 稻田红壤中 SOC、TN 含量与土壤渗漏液中 DOC、NH₄⁺-N 含量之间的线性关系

Fig. 6 Linear relationships between soil organic carbon and total nitrogen contents in paddy soil and dissolved organic carbon and ammonium nitrogen contents in soil leachate

3 讨论

3.1 不同肥料种类对土壤 NH₄⁺-N 淋失的影响

稻田土壤中氮素流失以铵态氮为主,土壤渗漏液中铵态氮含量显著高于硝态氮含量. 湖南长沙小流域监测研究结果也表明,随着稻田面积增加,水体中铵态氮含量增加^[19]. 红壤水稻土渗漏液中 NO₃⁻-N 含量基本未检出,这可能是由于监测期内土壤处于淹水条件,虽然水稻根系能分泌氧气,这些氧气在硝化微生物的作用下将 NH₄⁺ 氧化成 NO₃⁻,但是在根表形成的 NO₃⁻ 被水稻立即吸收^[20]. 吴建富等^[21]研究也发现,施用化肥后红壤稻田渗漏液中 NH₄⁺-N 含量约为 NO₃⁻-N 含量的 2 倍,水稻土渗漏液中氮素淋失以 NH₄⁺-N 为主.

与施用有机肥相比,施用化肥显著增加了土壤中氮素淋失量. 施氮量与土壤中氮素淋失量呈正相关^[22]. 在本研究中表明施用肥料增加了土壤渗漏液中 NH₄⁺-N 含量,且化肥处理效果更显著,这与以往研究结果相一致^[23-26]. 这主要是由于猪粪中的氮主要是有机态氮,有机肥做为缓性肥料释放慢,而且腐解的有机物能够吸附 NH₄⁺,所以在施氮水平相同的 OM 与 NPK 中,NPK 处理方式下土壤中氮素淋失量更多^[27].

两季水稻土壤渗漏液中 NH₄⁺-N 含量均在营养生长期较高,营养生长期过后土壤渗漏液中 NH₄⁺-N 浓度有所下降,基本保持稳定. 汪军等^[28]和李勇

等^[29]研究结果表明,氮肥施入土壤后,渗漏液中 NH₄⁺-N 含量会在 2~4 d 左右出现峰值,氮素的淋失也主要发生在营养生长期,这可能是由于有机肥作为底肥与化肥作为追肥施用后,导致水稻营养生长期碳氮供给量高于需求量所致,同时随着水稻生长,需氮量逐渐增加,大量氮素被水稻根系吸收,减少了相应的氮素渗漏损失,因此土壤渗漏液中 NH₄⁺-N 含量在营养生长期过后趋于稳定^[30].

3.2 不同肥料种类对土壤 DOC 淋失的影响

与施用化肥相比,施用有机肥增加了土壤中 DOC 淋失量,土壤渗漏液中 DOC 含量与土壤中 SOC 含量呈极显著正相关. 目前鲜见不同施肥方式对土壤中碳淋失影响的研究. 已有大量研究结果表明,施用有机肥和化肥显著增加了稻田土壤中 SOC 含量,并且施用有机肥效果更显著^[31]. 化肥的施用增加了植物根系和残体量,从而增加了土壤活性有机碳含量^[32];施用有机肥在为植物提供充足养分同时,自身也会携带大量微生物,加速了土壤微生物代谢作用^[33],从而增加了土壤中 SOC 含量. 14 a 长期施用有机肥和化肥,导致土壤中 SOC 含量累积和土壤中 pH 值降低^[34],土壤 pH 的变化可能改变土壤中离子结构组成和溶解度,从而可能改变土壤渗漏液中 DOC 含量^[35].

本研究中也发现,土壤渗漏液中 DOC 含量变幅较大,并且土壤渗漏液中 DOC 含量在水稻营养生长期时更高. ST 和 NPK 处理方式下晚稻营养生长期

时土壤渗滤液中 DOC 含量明显高于早稻,这可能是由于早稻残茬增加了晚稻土壤有机质含量,从而导致晚稻营养生长期土壤渗滤液中 DOC 含量明显高于早稻。而在 OM 处理方式下早稻营养生长期时土壤渗滤液中 DOC 含量明显高于晚稻,这可能是因为有有机肥是在早稻前作为基肥一次性施用,在早稻营养生长期养分供给量明显高于植物需求量所致。

4 结论

(1)在早晚稻生长周期内,土壤碳、氮淋失多发生在水稻营养生长期;ST 和 NPK 处理方式下,晚稻季土壤渗滤液中 NH_4^+ -N 和 DOC 含量高于早稻,OM 处理方式下早稻季土壤渗滤液中 NH_4^+ -N 和 DOC 含量高于晚稻。

(2)土壤渗滤液中 DOC 含量与稻田土壤中 SOC 含量呈极显著正相关,土壤渗滤液中 NH_4^+ -N 含量与红壤中 TN 含量呈极显著正相关。化肥处理方式下土壤中 NH_4^+ -N 淋失最严重,而施用有机肥使土壤中 DOC 淋失严重。

致谢:感谢中国科学院千烟洲生态试验站对本研究野外工作的支持和帮助!

参考文献:

- [1] Duan S W, Zhang S, Huang H Y. Transport of dissolved inorganic nitrogen from the major rivers to estuaries in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, **57**(1): 13-22.
- [2] Tang J L, Zhang B, Gao C, *et al.* Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a multi-scale monitoring in an agricultural catchment [J]. *Catena*, 2008, **72**(3): 374-385.
- [3] Sun W, Huang Y. Global warming over the period 1961-2008 did not increase high-temperature stress but did reduce low-temperature stress in irrigated rice across China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(9): 1193-1201.
- [4] Watts D B, Torbert H A, Prior S A, *et al.* Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, **74**(4): 1239-1247.
- [5] 刘希玉, 王忠强, 张心昱, 等. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(16): 4949-4955.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, **327**(5968): 1008-1010.
- [7] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略 [J]. *中国农业科学*, 2002, **35**(9): 1095-1103.
- [8] 李庆逵, 于天仁, 朱兆良. 中国农业持续发展中的肥料问题 [M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998.
- [9] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(11): 200-205.
- [10] 徐志伟, 张心昱, 孙晓敏, 等. 2004-2009 年我国典型陆地生态系统地下水硝态氮评价 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2827-2833.
- [11] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施 [J]. *生态学报*, 2002, **22**(3): 291-299.
- [12] Guo H M, Li G H, Zhang D Y, *et al.* Effects of water table and fertilization management on nitrogen loading to groundwater [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **82**(1-2): 86-98.
- [13] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展 [J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(4): 422-429.
- [14] Brye K R, Norman J M, Bundy L G, *et al.* Nitrogen and carbon leaching in agroecosystems and their role in denitrification potential [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(1): 58-70.
- [15] Zhang X Y, Xu Z W, Sun X M, *et al.* Nitrate in shallow groundwater in typical agricultural and forest ecosystems in China, 2004-2010 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(5): 1007-1014.
- [16] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(6): 711-716.
- [17] 陈淑峰, 李帷, 胡克林, 等. 基于 GIS 的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3541-3547.
- [18] 欧阳竹, 孙波, 刘健, 等. 陆地生态系统土壤观测规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [19] Wang Y, Li Y, Liu F, *et al.* Linking rice agriculture to nutrient chemical composition, concentration and mass flux in catchment streams in subtropical central China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, **184**(1): 9-20.
- [20] 段英华, 张亚丽, 沈其荣. 水稻根际的硝化作用与水稻的硝态氮营养 [J]. *土壤学报*, 2004, **41**(5): 803-809.
- [21] 吴建富, 张美良, 刘经荣, 等. 不同肥料结构对红壤稻田氮素迁移的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7**(4): 368-373.
- [22] 胡玉婷, 廖千家骅, 王书伟, 等. 中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算 [J]. *土壤*, 2011, **43**(1): 19-25.
- [23] 徐丽丽, 王秋兵, 张心昱, 等. 不同施肥处理对红壤丘陵区水稻土养分状况的影响 [J]. *自然资源学报*, 2012, **27**(11): 1890-1898.
- [24] 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 and Environment*, 2011, **140**(1): 164-173.
- [25] Xiong Z Q, Huang T Q, Ma Y C, *et al.* Nitrate and ammonium leaching in variable-and permanent-charge paddy soils [J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(2): 209-216.
- [26] Ji X H, Zheng S X, Shi L H, *et al.* Systematic studies of nitrogen loss from paddy soils through leaching in the Dongting Lake area of China [J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(6): 753-762.

- [27] 纪雄辉, 郑圣先, 刘强, 等. 施用猪粪和化肥对稻田土壤表面水氮磷动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 29-35.
- [28] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 秸秆还田条件下氮肥用量对稻田氮素淋失的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(12): 1650-1657.
- [29] 李勇, 杨林章, 殷广德. 太湖地区直播稻田氮素渗漏损失试验研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(1): 99-104.
- [30] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [31] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土活性碳的影响[J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 554-559.
- [32] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 277-282.
- [33] 徐丽丽, 王秋兵, 张心昱, 等. 不同肥料对稻田红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 909-914.
- [34] Dong W Y, Zhang X Y, Wang H M, *et al.* Effect of different fertilizer application on the soil fertility of paddy soils in red soil region of southern China [J]. Plos One, 2012, **7**(9): e44504.
- [35] Andersson S, Nilsson S I, Saetre P. Leaching of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in mor humus as affected by temperature and pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(1): 1-10.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人