

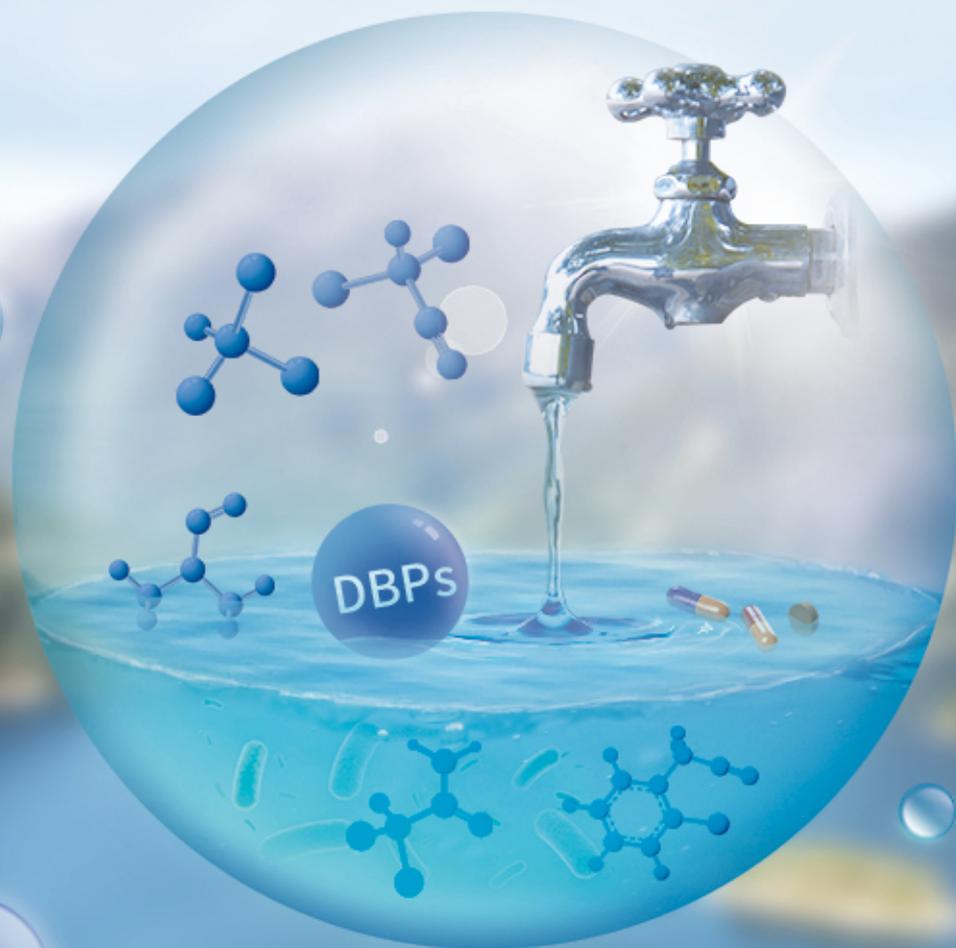
方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略
楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑾, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜璐, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响

姜海斌^{1,2,3}, 张克强^{1,3}, 邹洪涛², 马瑛骏^{1,3}, 渠清博¹, 谷艳茹¹, 沈仕洲^{1,3*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 3. 国家农业环境大理观测实验站, 大理 671004)

摘要: 稻田氮素淋溶流失是农田面源污染的主要流失途径之一。为探究洱海流域稻田合理的施肥模式, 减少稻田氮素淋溶流失, 通过田间小区试验, 在减氮条件下设置单施化肥、单施有机肥、有机无机配施和单施缓控释肥处理, 研究不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失和水稻产量的影响。结果表明, 与常规施肥处理(CF)相比, 单施化肥处理(T1)和有机无机配施处理(T3)水稻籽粒和秸秆产量无显著差异; 单施有机肥处理(T2)水稻籽粒产量降低 13.0%, 秸秆产量降低 17.1%; 单施缓控释肥处理(T4)水稻籽粒和秸秆产量分别增加 15.7% 和 21.0%。与常规施肥处理(CF)相比, 单施化肥处理(T1)、单施有机肥处理(T2)和有机无机配施处理(T3)土壤 30 cm 处总氮淋溶流失量分别降低了 26.9%、18.0% 和 33.9%, 铵态氮淋溶流失量分别降低了 24.4%、36.9% 和 36.6%, 硝态氮淋溶流失量分别降低了 40.2%、4.8% 和 46.4%; 土壤 60 cm 处总氮淋溶流失量分别降低了 34.2%、26.3% 和 42.1%, 铵态氮淋溶流失量分别降低了 31.4%、35.7% 和 46.6%, 硝态氮淋溶流失量分别降低了 8.0%、10.1% 和 23.9%, 单施缓控释肥处理(T4)在 30 和 60 cm 深度总氮流失量增加 41.6% 和 14.0%。综合考虑不同施肥模式的农学效益和环境效益等因素, 单施化肥处理 T1 和有机无机配施处理 T3 是可供选择的环境友好型施肥模式。

关键词: 洱海流域; 稻田; 施肥模式; 淋溶; 氮素流失; 产量

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5405-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202104111

Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen

JIANG Hai-bin^{1,2,3}, ZHANG Ke-qiang^{1,3}, ZOU Hong-tao², MA Ying-jun^{1,3}, QU Qing-bo¹, GU Yan-ru¹, SHEN Shi-zhou^{1,3*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. Dali Observation and Experimental Station of National Agricultural Environment, Dali 671004, China)

Abstract: Nitrogen leaching loss in paddy fields is one of the main ways of farmland non-point source pollution. To explore the suitable fertilization of rice fields in the Erhai Lake Basin and reduce the nitrogen loss from paddy fields, a field experiment was conducted by setting single applications of chemical or organic fertilizer, combined organic and inorganic application, and single application of controlled release fertilizer under reduced nitrogen conditions. The results showed that, compared with the conventional fertilization treatment (CF), there was no significant difference in rice grain and straw yield between the single chemical fertilizer treatment (T1) and the organic-inorganic combined treatment (T3); the single organic fertilizer treatment (T2) decreased the rice grain yield by 13.0%, and decreased straw yield by 17.1%; single application of controlled-release fertilizer (T4) increased rice grain and straw yield by 15.7% and 21.0%, respectively. Further, compared with CF, the single application of chemical fertilizer (T1), organic fertilizer (T2), and organic-inorganic combined application (T3) reduced the total nitrogen leaching loss at 30 cm depths by 26.9%, 18.0%, and 33.9%, respectively. The loss of ammonia nitrogen leaching with T1, T2, and T3 decreased by 24.4%, 36.9%, and 36.6%, respectively, and the loss of nitrate nitrogen leaching decreased by 40.2%, 4.8% and 46.4%. The total nitrogen leaching at 60 cm soil depths was reduced by 34.2%, 26.3%, and 42.1%, the loss of ammonia nitrogen leaching was reduced by 31.4%, 35.7%, and 46.6%, and the loss of nitrate nitrogen leaching was reduced by 8.0%, 10.1%, and 23.9% for T1, T2, and T3, respectively. The total nitrogen loss at 30 and 60 cm depths increased by 41.6% and 14.0% in the single application of controlled release fertilizer (T4) treatment. Considering factors such as agronomic and environmental benefits of different fertilization modes, T1 and T3 are suitable environmentally friendly alternative fertilization modes.

Key words: Erhai Lake basin; paddy field; fertilization mode; leaching; nitrogen loss; yield

我国农业生产每年大约使用3 000万 t 氮肥, 约占全球农业氮肥使用量的 30%^[1]。近 20 年来, 研究人员普遍认为我国化肥使用量过高、增产效果下降和环境污染加重^[2~5]。生态环境部和农业农村部共同发布的第二次全国污染源普查公报显示, 种植业造成的水污染排放物中, 总氮排放量为 71.95 万 t, 占农业源总氮排放量的 50.85%。氮肥投入是作物生长过程的重要养分来源, 对保证作物的高产稳产起决定性作用^[6, 7]。然而, 当肥料施用量超过作物需求总量或某一需肥时期用量时, 氮素易以径流、淋溶、氨挥发和反硝化等途径损失, 引起农业面源污

染^[8~10]。施用氮肥以后氮素以淋溶的方式进入水体, 对水体的污染越来越引起人们的重视^[11~13]。Libutti 等^[14]的研究发现意大利南部地区农田氮素渗漏总量平均每年可达 156 kg·hm⁻²。张刚等^[15]在江苏常熟地区进行原状土柱模拟试验, 结果显示氮素淋溶量在 5.68~8.94 kg·hm⁻²之间。土壤中氮素

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800103); 云南省科技创新开放基金项目(2017HC015); 云南省基础研究青年基金项目(2019FD120)

作者简介: 姜海斌(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业面源污染防治, E-mail: jianghb1989@163.com

* 通信作者, E-mail: shenshizhou@126.com

的淋溶流失是氮素损失的重要途径之一,硝态氮的淋溶也是导致地下水资源氮素污染的重要原因^[16].

如何合理施肥能在保证作物产量的情况下减少农田淋溶所造成的面源污染一直是人们研究的重点.俞映惊等^[17]在太湖流域稻田土壤系统中研究表明,减少33%的施氮量,可降低进入地下水体总氮浓度36.9%~49.0%.秦雪超等^[18]在华北平原小麦-玉米试验结果表明,减施氮肥处理(施氮量150 kg·hm⁻²)氮平均淋失浓度和年均淋失量分别降低了32.5%和30.6%.合理地进行化肥减量配施有机肥不仅能保证作物的稳产增产,而且能降低环境污染的风险,实现农业资源循环再利用^[19].徐明岗等^[20]的研究表明,有机无机配施的水稻产量比不施氮肥的产量提高68%,有利于水稻中后期干物质累积和养分吸收,提高单位面积总穗数和穗粒数,是南方水稻田简单易行的环境保护性施肥技术.减氮条件下有机肥与缓控释肥能有效保证氮素集中在表层土壤中,减少氮素渗漏流失,更有利于作物吸收利用.

洱海作为云南省第二大高原淡水湖泊,近5年的水质从Ⅱ类逐步向Ⅲ类过渡,已成为我国初期富营养化湖泊的典型代表^[21,22].其中农业面源污染是导致洱海水质下降和水体富营养化的重要因素之一^[23].洱海流域作为典型的农业流域,水稻种植面积大,占春季整个流域总面积的10%左右,主要位于流域北部、西部和南部的坝区^[24].本试验以洱海流域稻田为研究对象,在减氮条件下设置单施化肥、单施有机肥、有机无机配施和单施缓控释肥处理,通过设置田间小区试验,分析洱海流域不同施肥模

式对稻田氮素淋溶流失的影响,结合水稻产量,探究有效减少稻田氮素淋溶流失的施肥处理,以期对洱海流域水稻种植氮素减排提供科学数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地位于云南省大理市喜洲镇,国家农田生态系统大理野外科学观测研究站(北纬25°53'34",东经100°10'27").该地区属于典型低纬高原中亚热带西南季风气候类型,海拔1980 m,气候温和,光照充足,年平均气温14.6℃,多年平均降雨量为1048 mm^[25].供试土壤为暗棕壤,0~20 cm土壤基本理化性质:pH为7.1、有机质57.3 g·kg⁻¹、全氮3.3 g·kg⁻¹、全磷0.9 g·kg⁻¹、硝态氮21.64 mg·kg⁻¹、铵态氮14.22 mg·kg⁻¹和有效磷35.3 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计

本试验共设6个处理:①不施肥处理(CK);②常规施肥处理(CF);③单施化肥处理(常规施肥减量20%)(T1);④单施有机肥处理(T2);⑤有机无机配施处理(T3);⑥单施缓控释肥处理(T4).各处理施肥量见表1,每个处理3次重复,共18个小区,随机区组设计.每个试验小区面积为30 m²(6 m×5 m),小区间用水泥砂浆筑埂,埂宽0.24 m,埂高0.20 m,地表面以下筑入1 m.本试验地地下水位较浅,同时60 cm深度开始土壤多为砂质土壤,氮素淋失风险大,故每个小区建设前在地下30 cm和60 cm深度安装淋溶管用于稻田淋溶液收集,利用脚踏式吸引器采集不同深度的淋溶液.

表1 不同处理施肥类型和施肥量

Table 1 Types and amount of fertilization application under different treatments

处理	基肥(有机肥) /kg·hm ⁻²	分蘖肥/kg·hm ⁻²			穗肥(尿素) /kg·hm ⁻²	折合纯氮/kg·hm ⁻²		
		尿素	过磷酸钙	氯化钾		缓控释肥	N	P ₂ O ₅
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
CF	0	297	450	180	127	195	72	90
T1	0	237	375	144	102	156	60	72
T2	6 500	0	0	0	0	156	150	375
T3	2 609	142	0	0	61	156	60	149
T4	0	0	0	0	624	156	67.8	81

1.3 田间管理

供试水稻品种为云粳25,种植时间为2020年5月23日至2020年11月11日.水稻田间管理按当地种植管理方式,其中常规施肥氮肥为尿素(N)46%,磷肥为过磷酸钙(P₂O₅)16%,钾肥为硫酸钾(K₂O)50%;缓控释肥氮磷钾比例为25:12:8;有机肥为牛粪商品有机肥,含有机质14.5%,氮(N)2.3%,磷(P₂O₅)2.4%,钾(K₂O)5.7%.有机肥用作

基肥,在翻耕前一次性施入,翻耕深度约20 cm,缓控释肥和磷钾肥在分蘖期一次性施入,单施化肥处理(CF、T1)和有机无机配施处理(T3)的尿素分两次施入,在分蘖期施入总量的70%,在穗肥期施入总量的30%.所有施肥处理肥料均人工撒施.2020年5月23日施入有机肥并且翻耕土地,对稻田进行灌水,用以浸泡耕作层土壤.5月30日插秧,株距9 cm,行距23 cm,每蔸2~3株.6月8日施用分蘖

肥, 8月15日施用穗肥. 11月11日水稻收获. 田面水高度维持在10 cm左右, 水面低至2~3 cm补充灌溉水, 每周约2次, 在水稻生长中期人工除草1次.

1.4 样品采集和测定

在水稻生育期内淹水条件下, 每天根据封闭PVC管高度变化监测, 计算出稻田水分垂直淋溶平均速率为 $4.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 即每天淋溶体积为 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. 稻田施入基肥、分蘖肥和穗肥后连续7 d采集稻田淋溶液, 非施肥期每7 d采集一次淋溶液, 样品混匀后装于100 mL塑料瓶带回实验室测定, 不能及时测定时放于 -20°C 冰箱冷冻保存, 水稻季淋溶液共采集35次. 水样分别测定总氮、铵态氮和硝态氮. 总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, 铵态氮采用纳氏试剂分光光度法, 硝态氮采用紫外分光光度法^[26]. 水稻成熟后测产, 分别收获每个小区的水稻籽粒和秸秆并称重.

1.5 计算方法和数据分析

氮素淋溶量计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n \rho_i \times V$$

式中, P 为氮素淋溶量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ρ_i 为第 i 次淋溶水中氮的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为水稻季淋溶液平均体积 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$).

运用 Microsoft Excel 2010 进行数据分析、处理和绘图, 运用 SPSS 19 单因素方差分析进行显著性检验 ($P < 0.05$), LSD 和 Duncan 法进行均值比较.

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式 30 cm 深度稻田淋溶液氮素浓度变化特征

整个水稻季 30 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度变化范围为 $0.58 \sim 43.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $3.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各施肥处理 30 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度在基肥期较高, 分蘖肥期由于追施尿素, 稻田淋溶液总氮浓度小幅度升高, 分蘖肥期过后降至较低浓度并趋于稳定 (图 1). 整个施肥期各施肥处理 30 cm 深度稻田淋溶液平均总氮浓度呈: 基肥期 ($10.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 分蘖肥期 ($2.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 穗肥期 ($1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 施用缓控释肥处理 (T4) 30 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度在水稻基肥期和分蘖肥期明显高于其他施肥处理, 其中在 5 月 26 日泡田后第 1 d 高至 $43.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 直至分蘖肥期后才与其他施肥处理无明显差异. 在基肥期常规施肥处理 (CF) 30 cm 深度稻田淋溶液平均总氮浓度为 $12.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在分

蘖肥期浓度降至 $3.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅低于施用缓控释肥处理 (T4) 稻田淋溶液总氮浓度, 但在穗肥期与其他施肥处理浓度无显著差异.

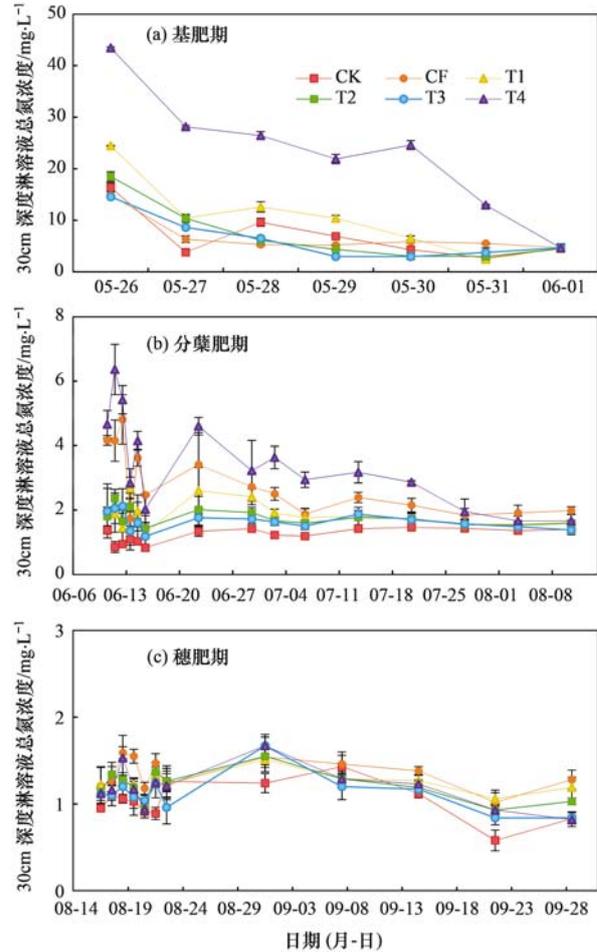


图 1 30 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度变化

Fig. 1 Concentrations of total nitrogen concentration in 30 cm depth leaching water from rice fields

整个水稻季 30 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度变化范围为 $0.17 \sim 3.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $0.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各施肥处理 30 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度在整个水稻生长期缓慢下降, 在 3 个施肥时期都会呈初期较高并且逐渐缓慢下降的趋势 (图 2). 整个施肥期各施肥处理 30 cm 深度稻田淋溶液平均总氮浓度呈: 分蘖肥期浓度 ($1.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 基肥期浓度 ($1.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 穗肥期浓度 ($0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 分蘖肥期施用尿素比基肥期施用有机肥更容易提高 30 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度, 这与尿素施入稻田后迅速水解提高田面水铵态氮有关. 缓控释肥处理 (T4) 在分蘖肥期施入缓控释肥, 使其 30 cm 深度稻田淋溶液铵态氮在分蘖肥前期高于其他施肥处理. 常规施肥处理 (CF) 在分蘖肥期投入尿素使其 30 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度迅速升高, 在整个生长期缓慢下降, 这与当地农民主要在分蘖肥期施入肥料有关.

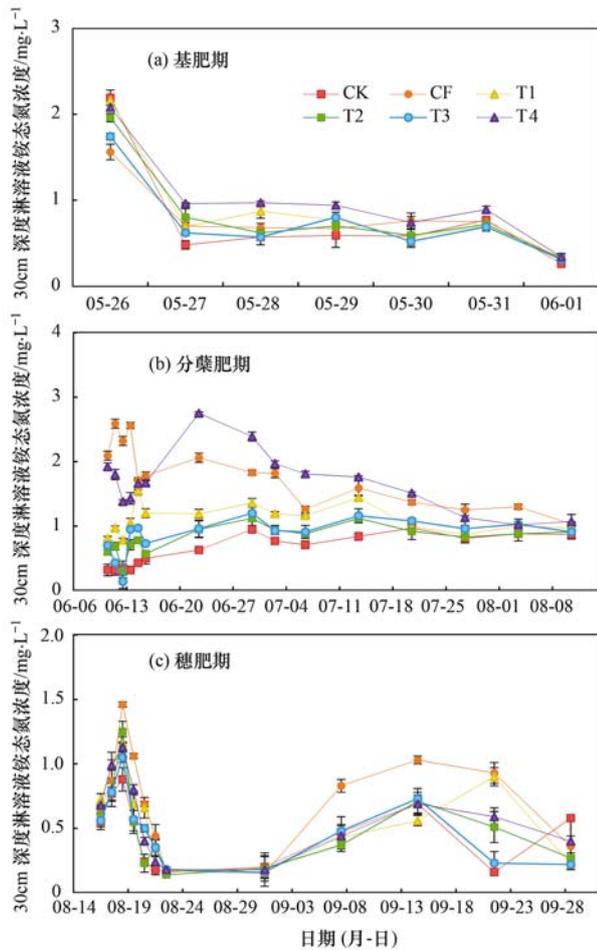


图2 30 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度变化

Fig. 2 Concentrations of ammonia nitrogen in 30 cm depth leaching water from rice fields

整个水稻季 30 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度变化范围为 $0.14 \sim 26.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $1.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各施肥处理 30 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度呈现基肥期高浓度, 分蘖肥期后降至较低浓度并趋于稳定 (图 3). 和 30 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度动态变化较为相似, 整个施肥期各施肥处理平均硝态氮呈: 基肥期浓度 ($7.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 分蘖肥期浓度 ($1.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 穗肥期浓度 ($0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 仅在基肥期各施肥处理硝态氮浓度较高. 施用缓控释肥处理 (T4) 30 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度在基肥期明显高于其他施肥处理硝态氮浓度, 但是在分蘖肥期和穗肥期与其他施肥处理差异不大, 都处于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.

2.2 不同施肥模式 60 cm 深度稻田淋溶液氮素浓度变化特征

整个水稻季 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度变化范围为 $0.78 \sim 32.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $3.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度呈现基肥期高浓度, 分蘖肥期各施肥处理降至较低浓度并稳定 (图 4). 整个施肥期 60 cm 深度稻田淋溶液

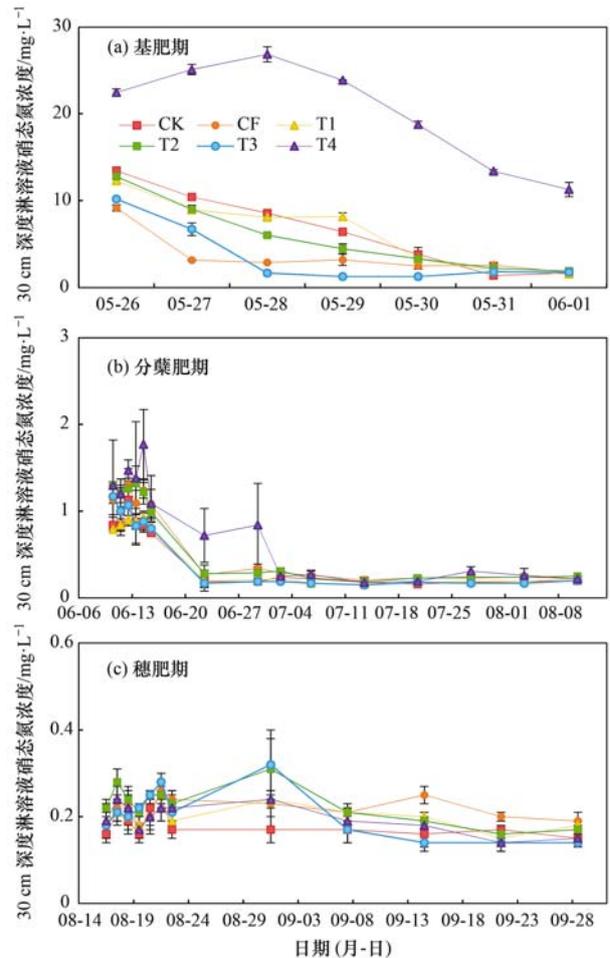


图3 30 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度变化

Fig. 3 Concentrations of nitrate nitrogen in 30 cm depth leaching water from rice fields

平均总氮浓度呈: 基肥期浓度 ($9.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 分蘖肥期浓度 ($1.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 穗肥期浓度 ($1.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 施用缓控释肥处理 (T4) 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度在基肥期明显高于其他施肥处理, 平均浓度为 $19.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 常规施肥处理 (CF) 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度在基肥期和分蘖肥期都处于较高水平, 土壤残留和追施尿素是导致 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度较高的主要原因.

整个水稻季 60 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度变化范围为 $0.22 \sim 2.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $1.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各施肥处理 60 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度在整个水稻生长期为缓慢下降的趋势, 在 3 个施肥时期则分别呈初期较高并且缓慢下降的共同趋势 (图 5). 整个施肥期 60 cm 深度稻田淋溶液平均铵态氮浓度呈: 分蘖肥期浓度 ($0.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 基肥期浓度 ($0.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 穗肥期浓度 ($0.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 3 个施肥期浓度之间无显著差异, 可能和铵态氮移动性差有关, 施肥只引起 30 cm 深度稻田

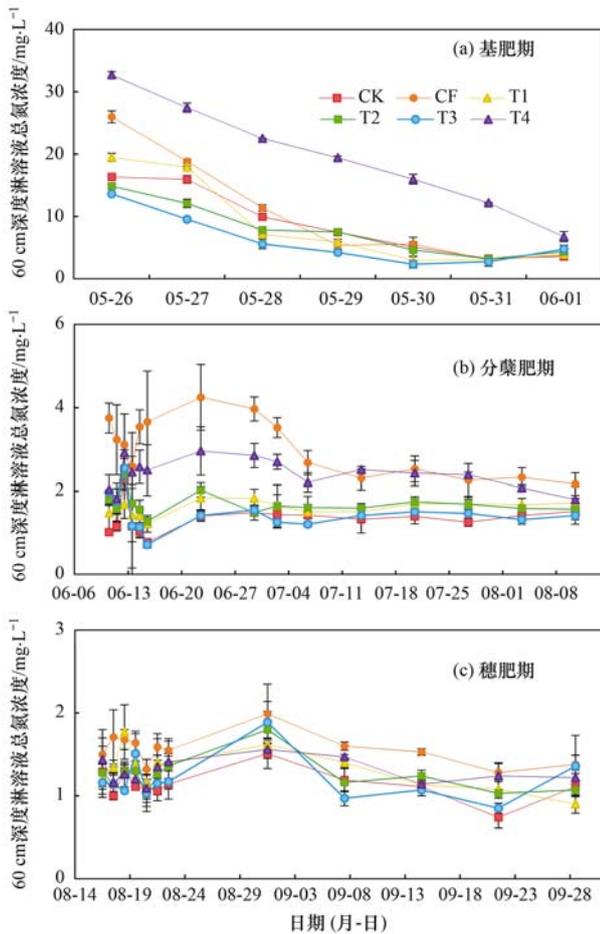


图 4 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度变化

Fig. 4 Concentrations of total nitrogen concentration in 60 cm depth leaching water from rice fields

淋溶液铵态氮浓度变化而未改变 60 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度变化. 常规施肥 (CF) 60 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度仅在分蘖肥前期高于其他施肥处理, 其平均浓度为 $1.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

整个水稻季 60 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度变化范围为 $0.11 \sim 29.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $1.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各施肥处理 60 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度总体呈现基肥期高浓度, 至分蘖肥期较低浓度并趋于稳定 (图 6). 整个施肥期 60 cm 深度稻田淋溶液平均硝态氮浓度呈: 基肥期浓度 ($7.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 分蘖肥期浓度 ($1.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 穗肥期浓度 ($0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 仅在基肥期各施肥处理 60 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度较高. 施用缓控释肥 (T4) 60 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度在基肥期明显高于其他施肥处理, 但是在其余时期与其他施肥处理无显著差异, 都处于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.

2.3 不同施肥模式对稻田淋溶流失量的影响

30 cm 和 60 cm 深度稻田氮素淋溶流失量如表 2, 30 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量在 $7.74 \sim$

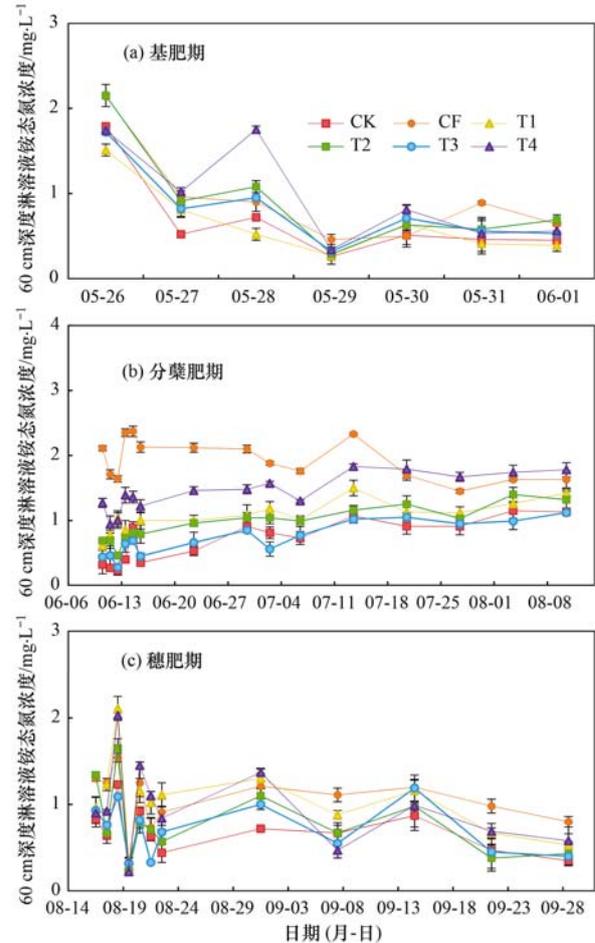


图 5 60 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度变化

Fig. 5 Concentrations of ammonia nitrogen in 60 cm depth leaching water from rice fields

$19.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 呈: $T4 > CF > T2 > T1 > T3 > CK$. 常规施肥处理 (CF) 30 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量为 $13.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施用缓控释肥处理 (T4) 30 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量比常规施肥增加 41.6%. 与当地施肥习惯有关, 在蚕豆-水稻轮作模式下, 水稻季施用缓控释肥不能消减氮素流失量. 和常规施肥相比, 单施化肥处理 (T1) 降低 30 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量 26.9%, 有机肥处理 (T2 和 T3) 降低 30 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量 18.0% 和 33.9%. 30 cm 深度稻田淋溶液铵态氮流失量在 $3.21 \sim 6.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 呈: $T4 > CF > T1 > T3 > T2 > CK$, 铵态氮流失量占总氮流失量的 32.8% ~ 46.7%. 30 cm 深度稻田淋溶液硝态氮流失量在 $1.12 \sim 3.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 呈: $T4 > CF > T2 > CK > T1 > T3$, 铵态氮流失量占总氮流失量的 12.5% ~ 19.1%.

60 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量在 $8.14 \sim 16.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 呈: $T4 > CF > T2 > T1 > CK > T3$. 常规施肥 (CF) 60 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量为 $14.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施用缓控释肥 (T4) 增加 60 cm

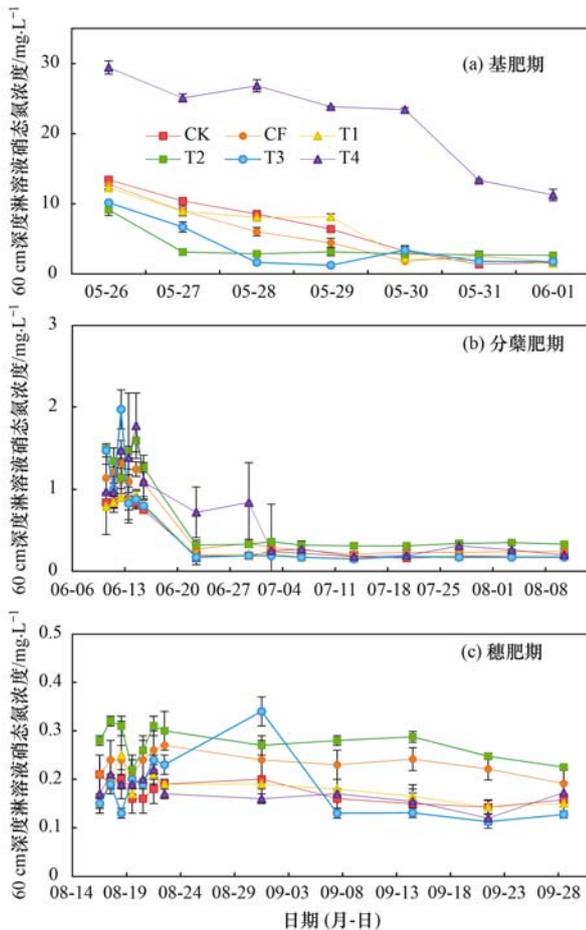


图 6 60 cm 深度稻田淋溶液硝态氮浓度

Fig. 6 Concentrations of nitrate nitrogen in 60 cm depth leaching water from rice fields

表 2 稻田氮素淋溶流失量¹⁾

Table 2 Leaching loss of nitrogen in paddy fields

处理	30 cm 深度					60 cm 深度				
	总氮 /kg·hm ⁻²	铵态氮 /kg·hm ⁻²	占比 /%	硝态氮 /kg·hm ⁻²	占比 /%	总氮 /kg·hm ⁻²	铵态氮 /kg·hm ⁻²	占比 /%	硝态氮 /kg·hm ⁻²	占比 /%
CK	7.74 ± 0.31c	3.21 ± 0.66d	41.5	1.31 ± 0.18b	16.9	8.69 ± 0.12d	3.73 ± 0.76d	42.9	0.82 ± 0.21b	9.4
CF	13.52 ± 1.88b	6.10 ± 2.90ab	45.1	2.09 ± 0.69b	15.5	14.05 ± 1.23ab	7.46 ± 3.84a	53.1	1.38 ± 0.24b	9.8
T1	9.88 ± 1.00c	4.61 ± 0.80cd	46.7	1.25 ± 0.16b	12.7	9.24 ± 1.11d	5.12 ± 0.62cd	55.4	1.27 ± 0.24b	13.7
T2	11.09 ± 0.84bc	3.85 ± 0.37cd	34.7	1.99 ± 0.35b	17.9	10.36 ± 0.50cd	4.80 ± 1.12cd	46.3	1.24 ± 0.23b	12.0
T3	8.94 ± 0.32c	3.87 ± 1.05cd	43.3	1.12 ± 0.20b	12.5	8.14 ± 0.43d	3.98 ± 1.04d	48.9	1.05 ± 0.19b	12.9
T4	19.14 ± 2.57a	6.28 ± 2.22a	32.8	3.66 ± 1.03a	19.1	16.02 ± 2.68a	6.33 ± 1.51abc	39.5	3.16 ± 1.08a	19.7

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同表 3 水稻籽粒和秸秆产量/t·hm⁻²Table 3 Grain and straw yield of rice/t·hm⁻²

处理	籽粒产量	秸秆产量
CK	7.98 ± 0.55d	5.74 ± 0.82d
CF	9.61 ± 1.53b	7.37 ± 1.41b
T1	9.79 ± 1.07b	7.61 ± 1.14b
T2	8.36 ± 0.61cd	6.11 ± 0.40cd
T3	9.10 ± 0.48bc	6.96 ± 1.19bc
T4	11.12 ± 0.95a	8.92 ± 0.94a

深度稻田淋溶液总氮流失量 14.0%, 单施化肥处理 (T1) 降低 60 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量 34.2%, 有机肥处理 (T2 和 T3) 降低 60 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量 26.3% ~ 42.1%。60 cm 深度稻田淋溶液铵态氮流失量在 3.73 ~ 7.46 kg·hm⁻² 之间, 呈: CF > T4 > T1 > T2 > T3 > CK, 铵态氮流失量占总氮流失量的 39.5% ~ 55.4%。60 cm 深度稻田淋溶液硝态氮流失量在 0.82 ~ 3.16 kg·hm⁻² 之间, 呈: T4 > CF > T1 > T2 > T3 > CK, 铵态氮流失量占总氮流失量 9.4% ~ 19.7%。

2.4 不同施肥模式对水稻产量的影响

不同施肥模式水稻籽粒和秸秆产量如表 3。不同施肥模式稻田籽粒产量呈: T4 > T1 > CF > T3 > T2 > CK, 和常规施肥相比, 单施化肥处理 (T1) 和有机无机配施处理 (T3) 籽粒产量无显著差异, 但有机肥处理 (T2) 籽粒产量比常规施肥下降 13.0%, 仅为 8.36 t·hm⁻², 单施缓控释肥处理 (T4) 籽粒产量增加 15.7%。不施肥处理 (CK) 水稻籽粒产量最低, 为 7.98 t·hm⁻²。不同施肥处理稻田秸秆产量呈: T4 > T1 > CF > T3 > T2 > CK, 常规施肥 (CF) 秸秆产量为 7.37 t·hm⁻², 施用缓控释肥处理 (T4) 秸秆产量达到 8.92 t·hm⁻², 比常规施肥高出 17.4%, 为所有施肥处理中秸秆产量最高, 单施化肥处理 (T1) 秸秆产量和常规施肥无显著差异, 为 7.61 t·hm⁻²。单施有机肥处理 T2 降低稻田秸秆产量, 下降 17.1%。

3 讨论

3.1 不同施肥模式对稻田淋溶液氮素浓度的影响

氮素是水稻生长阶段需求量最大的营养元素之一, 但过量施用氮肥会加大氮素流失风险^[21]。稻田土壤表层氮素含量明显高于下层氮素含量, 整个水稻季 30 cm 和 60 cm 深度稻田淋溶液中总氮浓度变化特征一致, 但 30 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度大

于 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度. 不同施肥模式 30 cm 和 60 cm 深度稻田淋溶液总氮浓度呈: 基肥期 > 分蘖肥期 > 穗肥期, 施用有机肥处理 (T2 和 T3) 在施用有机肥作基肥后进行灌水泡田, 此时期水稻还未插秧, 有机肥中有机态氮转化和土壤赋存氮素存在于稻田水及淋溶水中, 从而使稻田淋溶液总氮浓度升高, 这与刘汝亮等^[27]的研究结果一致. 俞映惊等^[28]的研究指出太湖流域麦稻轮作系统中小麦季各施肥处理总氮浓度小麦前期明显高于小麦生长后期, 与本研究的结论一致, 水稻生长前期秧苗生长较小且根系不够发达, 对田面水中氮素的吸收和固持能力较差, 同时稻田中的部分氮素也会以氨气的形式挥发到大气中, 水稻生长后期秧苗根系发达, 大量氮素被水稻生长吸收, 导致水稻生长后期稻田氮素含量偏低. 不同施肥模式 30 cm 和 60 cm 深度稻田淋溶液铵态氮浓度呈现分蘖肥期 > 基肥期 > 穗肥期, 与施用化肥相比, 施用有机肥显著降低稻田淋溶液铵态氮浓度, 这主要因为基肥期施用的有机肥中的氮素在被水稻吸收利用之前, 需要微生物的降解过程, 而分蘖肥期直接撒施尿素, 尿素中无机态氮更易水解, 显著提高了稻田淋溶液铵态氮的浓度, 与 Li 等^[29]的研究结果一致. 有研究同样表明^[30~32], 不同施肥模式稻田硝态氮浓度呈: 基肥期 > 分蘖肥期 > 穗肥期, 这与稻田淋溶液总氮浓度变化一致, 本研究中稻田硝态氮浓度在分蘖肥期后浓度降至 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 明显低于稻田铵态氮浓度. 稻田铵态氮和硝态氮约占总氮 $51.9\% \sim 69.1\%$, 稻田土壤氮素除以总氮、铵态氮和硝态氮形式存在以外, 也会以有机态、酰胺态和亚硝态氮素形式存在.

3.2 不同施肥模式对稻田淋溶液氮素流失量的影响

稻田氮素流失主要受降雨、灌溉、干湿沉降、土壤和施肥等因素共同影响, 而施肥对稻田氮素流失影响更大^[33~36]. 稻田长期处于淹水环境, 肥料施入的氮素更易迁移到地下水中, 从而增加水体的富营养化风险. 本研究结果表明, 稻田 30 cm 和 60 cm 深度稻田淋溶液总氮流失量分别在 $7.74 \sim 19.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8.14 \sim 16.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 分别占施肥总量的 $2.67\% \sim 7.17\%$ 和 $2.56\% \sim 6.51\%$. 化肥减量处理明显降低了稻田淋溶总氮流失量, 有机肥替代处理都不同程度减少了稻田淋溶总氮流失量, 缓控释肥增加了稻田淋溶总氮流失量. Maeda 等^[37]的研究通过长期定位试验研究同样认为, 施用有机肥可以显著降低 60 cm 深度氮素淋溶, 同时提高土壤有机质含量和作物产量, 从而提高化肥养分利用率

并降低养分损失, 但过量施用有机肥则效果不显著甚至也会增加养分淋溶损失. 而刘汝亮等^[27]对宁夏引黄灌区控释氮肥全量基施水稻氮素淋失研究表明, 农民常规施肥的氮素淋失总量为 $24.57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 控释氮肥各处理氮素淋洗损失总量在 $11.54 \sim 17.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施用控释氮肥显著降低氮素淋洗损失量, 这与本试验的结果不同, 可能因为本试验前季作物为蚕豆, 蚕豆本身具有固氮作用, 施入的复合肥同时带入氮素, 而其余施入化肥处理仅提供磷钾养分, 导致大量氮素残留在土壤环境中, 进而导致水稻季缓控释肥处理总氮淋溶流失量高于其他施肥处理. 俞映惊等^[17]对太湖流域不同氮肥管理模式稻田土壤氮素渗漏的研究表明, 20 ~ 120 cm 总氮淋失量在 $1.68 \sim 4.69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 在 20 ~ 40 cm 土壤深度内, 缓控释肥的总氮淋失量最大, 但其氮素流失量明显小于本试验, 这与试验地所在地区土壤性质有关, 当地土壤在 60 cm 深度开始以砂质土壤为主, 保水保肥能力较差, 淋溶流失风险大, 导致本试验氮素流失量高于其他试验数据.

3.3 不同施肥模式对水稻产量的影响

有研究表明^[38~41], 施肥能显著提高作物的产量. 本研究结果表明, 施用缓控释肥明显提高作物产量, 和常规施肥相比, 施用缓控释肥处理使水稻籽粒产量增加 15.71% ; 常规施肥减量 20% 并没有使水稻籽粒产量降低, 和常规施肥产量无显著差异. 在考虑有机肥矿化率 25% 下施用有机肥, 水稻的产量和常规施肥无显著差异; 而有机肥等氮替代化肥的处理则会显著降低产量, 降幅为 5.31% 和 13.01% . 化肥减量配施有机肥可以增加土壤氮、磷养分, 提高土壤有机质和微生物群落, 促进作物生长发育, 提高作物产量, 从而达到经济效益与环境效益的相统一. 本研究发现, 化肥减量配施适量有机肥没有出现减产的现象, 可以达到稳产效果.

4 结论

(1) 在减少 20% 施氮量条件下, 单施化肥处理和有机无机配施处理水稻籽粒和秸秆产量无显著差异, 而单施有机肥处理降低水稻籽粒和秸秆产量, 单施缓控释肥处理增加水稻籽粒和秸秆产量.

(2) 单施化肥处理可降低 30 cm 和 60 cm 深度淋溶液总氮淋溶量, 在减少化肥施用量的基础上, 有机无机配施处理可降低 30 cm 和 60 cm 深度淋溶液总氮淋溶量, 单施缓控释肥处理增加稻田 30 cm 和 60 cm 深度淋溶液总氮淋溶量.

(3) 综合考虑不同施肥模式的农学效益和环境效益等因素, 单施化肥处理和有机无机配施处理是

可供选择的稻田环境友好型施肥模式.

参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT data [DB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/>, 2021-05-01.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, **327** (5968): 1008-1010.
- [3] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494** (7438): 459-462.
- [4] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, *et al.* Managing nitrogen for sustainable development [J]. *Nature*, 2015, **528** (7580): 51-59.
- [5] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(1): 1-6.
Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(1): 1-6.
- [6] Singh N, Pal N, Mahajan G, *et al.* Rice grain and starch properties: effects of nitrogen fertilizer application [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, **86**(1): 219-225.
- [7] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, *et al.* How a century of ammonia synthesis changed the world [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(10): 636-639.
- [8] 王小治, 高人, 朱建国, 等. 稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失 [J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 600-604.
Wang X Z, Gao R, Zhu J G, *et al.* Nitrogen loss via runoff and leaching from employ of different urea bleeds in paddy season [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(5): 600-604.
- [9] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5326-5332.
Hou P F, Xue L X, Yu Y L, *et al.* Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5326-5332.
- [10] Piirainen S, Domisch T, Moilanen M, *et al.* Long-term effects of ash fertilization on runoff water quality from drained peatland forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, **287**: 53-66.
- [11] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, *et al.* Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu lake region, China [J]. *Plant and Soil*, 2009, **319**(1-2): 225-234.
- [12] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**(2-3): 117-127.
- [13] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, *et al.* Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice-wheat rotation system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **195**: 61-67.
- [14] Libutti A, Monteleone M. Soil vs. groundwater: the quality dilemma. Managing nitrogen leaching and salinity control under irrigated agriculture in Mediterranean conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, **186**: 40-50.
- [15] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(4): 877-885.
Zhang G, Wang D J, Yu Y C, *et al.* Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(4): 877-885.
- [16] 王吉苹, 朱木兰, 李青松. 农田土壤氮素渗漏淋失研究进展 [J]. *四川环境*, 2014, **33**(6): 118-125.
Wang J P, Zhu M L, Li Q S. Research progress of nitrogen leaching in farmland soil [J]. *Sichuan Environment*, 2014, **33**(6): 118-125.
- [17] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响 [J]. *土壤学报*, 2011, **48**(5): 988-995.
Yu Y L, Xue L H, Yang L Z, *et al.* Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(5): 988-995.
- [18] 秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 等. 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(7): 1558-1567.
Qin X C, Pan J T, Guo S F, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction combined with biogas fertilizer on crop yield of wheat-maize rotation and soil nitrogen loss in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(7): 1558-1567.
- [19] 段然, 汤月丰, 王亚男, 等. 不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(12): 1815-1822.
Duan R, Tang Y F, Wang Y N, *et al.* Effects of different fertilization modes on rice yield and nitrogen loss in paddy soils under double cropping rice [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(12): 1815-1822.
- [20] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, **41**(10): 3133-3139.
Xu M G, Li D C, Li J M, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41**(10): 3133-3139.
- [21] 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 等. 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
Li X H, Lei Q L, Zhou J G, *et al.* Effect of rainfall intensity on the content of nitrogen and phosphorus components in plateau areas: a case study of the Fengyu river watershed [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- [22] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同施氮强度对水稻季稻田氨挥发的影响 [J]. *土壤通报*, 2014, **45**(3): 672-678.
Shi Z S, Xu Y B, Lei B K, *et al.* Ammonia volatilization under different nitrogen application rates in paddy soil in the northern Erhai Lake area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, **45**(3): 672-678.
- [23] 项颂, 吴越, 吕兴菊, 等. 洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略 [J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(11): 2474-2483.
Xiang S, Wu Y, Lü X J, *et al.* Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake Basin and its classified control strategy [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(11): 2474-2483.
- [24] 薛鹏程, 庞燕, 项颂, 等. 模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(7): 1362-1368.
Xue P C, Pang Y, Xiang S, *et al.* Nitrogen loss characteristics of

- farmland runoff under simulated precipitation conditions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(7): 1362-1368.
- [25] 吴凡, 张克强, 谢坤, 等. 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氮挥发变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(8): 1735-1742.
- Wu F, Zhang K Q, Xie K, *et al.* Characteristics of ammonia volatilization from rice paddy fields under different fertilization treatments in typical agricultural areas of Erhai basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(8): 1735-1742.
- [26] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 701-705.
- [27] 刘汝亮, 王芳, 张爱平, 等. 控释氮肥全量基施对宁夏引黄灌区水稻氮素利用效率和淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(5): 251-256.
- Liu R L, Wang F, Zhang A P, *et al.* Effects of application of controlled-release nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and leaching of rice in Ningxia Yellow River Irrigation area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(5): 251-256.
- [28] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式对麦季氮素利用与流失的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(12): 2475-2482.
- Yu Y L, Xue L H, Yang L Z. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Taihu Lake Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(12): 2475-2482.
- [29] Li H, Hou J, Liu X M, *et al.* Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, **75**(6): 2128-2135.
- [30] 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 & Environment*, 2014, **184**(1): 9-20.
- [31] 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.
- Duan Y H, Zhang Y L, Shen Q R. Nitrification in rice rhizosphere and the nitrate nutrition of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, **41**(5): 803-809.
- [32] 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.
- Wu J F, Zhang M L, Liu J R, *et al.* Effect of different structure of fertilizer on the migration of nitrogen in red rice soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, **7**(4): 368-373.
- [33] 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 等. 不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 963-969.
- Zhou J W, Su B L, Huang N B, *et al.* Runoff pollution experiments of paddy fields under different irrigation patterns[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 963-969.
- [34] 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 等. 不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3083-3090.
- Liu X Y, Zou J D, Xu L L, *et al.* Effects of different fertilizer species on carbon and nitrogen leaching in a reddish paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3083-3090.
- [35] 夏红霞, 朱启红, 刘希东, 等. 模拟径流试验条件下紫色土有机肥氮素流失特征研究[J]. *河南农业科学*, 2020, **49**(6): 74-83.
- Xia H X, Zhu Q H, Liu X D, *et al.* Characteristics of nitrogen losses of organic fertilizers in purple soil in simulating runoff experiments[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, **49**(6): 74-83.
- [36] 缪杰杰, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(5): 86-93.
- Miao J J, Liu Y F, Hu H X, *et al.* Effects of different fertilization modes on nitrogen and phosphorus loss and yield in paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(5): 86-93.
- [37] Maeda M, Ihara H, Ota T. Deep soil adsorption of nitrate in a Japanese and soil in response to different nitrogen sources[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **72**(3): 702-710.
- [38] 田昌, 周旋, 杨俊彦, 等. 化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响[J]. *土壤*, 2020, **52**(2): 311-319.
- Tian C, Zhou X, Yang J Y, *et al.* Effects of reducing nitrogen and phosphorus fertilizers on rice yield, nitrogen and phosphorus losses in paddy field[J]. *Soils*, 2020, **52**(2): 311-319.
- [39] 斯圆丽, 朱少威, 王季丰, 等. 施用包膜尿素对水稻生长和氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(3): 48-53.
- Si Y L, Zhu S W, Wang J F, *et al.* Effects of coated urea application on rice growth and runoff losses of nitrogen and phosphorus from paddy field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(3): 48-53.
- [40] 张晓龙, 张玉平, 高德才, 等. 不同施肥模式对旱地土壤氮磷钾径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(6): 36-40.
- Zhang X L, Zhang Y P, Gao D C, *et al.* Effects of different kinds of fertilization modes on soil nitrogen, phosphorus and potassium runoff in dryland field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(6): 36-40.
- [41] 黄东风, 李卫华, 王利民, 等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(2): 62-66.
- Huang D F, Li W H, Wang L M, *et al.* Effects of water and fertilizer managements on yield, nutrition uptake of rice and loss of nitrogen and phosphorus by runoff from paddy field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(2): 62-66.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)