

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响

王甜¹, 黄志霖^{1*}, 曾立雄¹, 肖文发¹, 宋文梅²

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 湖北省秭归县林业局, 宜昌 443631)

摘要: 本试验以三峡库区秭归县生态站所在流域内的柑橘园土壤作为研究对象, 通过0~20、0~40、0~60 cm深度的原状土柱淋溶试验对不同施肥量对柑橘园土壤中氮素淋失及残留量的影响进行研究。试验中设置4种施肥处理, 为不施肥处理(CK)、低氮施肥处理(T1: 250 kg·hm⁻²)、中氮施肥处理(T2: 500 kg·hm⁻²)、高氮施肥处理(T3: 750 kg·hm⁻²)。结果表明: ①柑橘园土壤中氮素淋失的主要形态为硝态氮(NO₃⁻-N), 占总氮(TN)淋失量的36.93%~60.07%, 铵态氮(NH₄⁺-N)的比例为4.40%~5.79%。土壤中NO₃⁻-N残留量占TN残留量的比例为11.31%~45.66%, NH₄⁺-N残留量的比例为1.05%~2.07%; ②相同深度的柑橘园土壤中, 氮素的淋失量和残留量与施肥量呈显著正相关。不同施肥量下土壤中TN的淋失量和残留量分别为11.35~30.11 kg·hm⁻²和0.30~1.86 g·kg⁻¹。其中, NO₃⁻-N和NH₄⁺-N的淋失量占TN淋失量的比例在T2处理下达到峰值, NO₃⁻-N和NH₄⁺-N的残留量占TN残留量比例峰值分别出现在T1和T2处理; ③相同施肥量下, 土壤中氮素不同形态的淋失量和残留量受土壤深度影响的差异较大。施肥后, NO₃⁻-N淋失量和残留量的峰值分别出现在20 cm和40 cm深度, NH₄⁺-N淋失量和残留量的峰值主要出现在20 cm深度。从试验中的结果推论, 0~40 cm土柱中的中氮处理更有利于肥料氮向无机态氮转化以供植物吸收并降低施肥后氮素淋失的风险。

关键词: 三峡库区; 柑橘园土壤; 施肥量; 氮; 淋失及残留量

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1468-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201805147

Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area

WANG Tian¹, HUANG Zhi-lin^{1*}, ZENG Li-xiong¹, XIAO Wen-fa¹, SONG Wen-mei²

(1. State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Forestry Bureau of Zigui County, Yichang 443631, China)

Abstract: This experiment has the citrus orchard soil in the basin of the Zigui County Ecological Station in the Three Gorges Reservoir Area as its research object. Leaching tests of an undisturbed soil column at 0-20, 0-40, and 0-60 cm depth were performed in a citrus orchard. The effects of nitrogen leaching and residual amounts in the soil were studied. Four kinds of fertilization treatments were set up in the experiment: no fertilization treatment (CK), low nitrogen fertilization treatment (T1: 250 kg·hm⁻²), medium nitrogen fertilization treatment (T2: 500 kg·hm⁻²), and high nitrogen fertilization treatment (T3: 750 kg·hm⁻²). The results showed that: ① The main form of nitrogen leaching in citrus orchard soil was nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), accounting for 36.93%-60.07% of total nitrogen (TN) leaching. The ratio of TN to ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) was 4.40% to 5.79%. The ratio of NO₃⁻-N residues in soil to TN residues was 11.31%-45.66%, and the ratio of NH₄⁺-N residues to TN residues was 1.05%-2.07%. ② Nitrogen leaching and residual amounts in citrus orchards at the same depth showed significant positive correlation with the amount of fertilizer applied. The leaching losses and residual amounts of TN in soil at different fertilization rates were 11.35-30.11 kg·hm⁻² and 0.30-1.86 g·kg⁻¹, respectively. Among them, the ratio of leaching losses of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N to TN leaching amounts peaked under T2 treatment, and the peaks of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N residues in TN residual amounts appeared in T1 and T2 treatment, respectively. ③ Given the same fertilization amounts, the leaching amounts and residual amounts of different forms of nitrogen in the soil were greatly affected by soil depth. After fertilization, the peaks of NO₃⁻-N leaching and residual amounts appeared at 20 cm and 40 cm, respectively, and the peaks of NH₄⁺-N leaching and residual amounts mainly appeared at 20 cm depth. Inferred from the results of the experiment, the neutral nitrogen treatment in the 0-40 cm soil column is more conducive to the conversion of fertilizer nitrogen to inorganic nitrogen for plant absorption, and reduces the risk of nitrogen leaching after fertilization.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; citrus orchard soil; fertilization; nitrogen; leaching and residual amounts

三峡库区自三峡工程蓄水以后, 库区生境敏感性逐渐提高, 加上过高的移民压力和不科学的农业活动, 以及库区土质较弱的保水保肥能力, 使得大量化肥从土壤中流失, 从中国环境监测总站对三峡库区的统计资料中得知, 仅2016年库区的化肥流失量为1.06万t, 占所施化肥量的8.87%, 大量的

氮磷养分通过地表径流和淋溶途径进入库区水体, 导致库区水体出现富营养化现象^[1~4]。因此农业面

收稿日期: 2018-05-17; 修订日期: 2018-07-24

作者简介: 王甜(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用及其生态环境效应, E-mail: 1494951212@qq.com

* 通信作者, E-mail: hzlin66@163.com

源污染已经成为三峡库区亟待解决的首要研究问题. 到目前为止, 国内学者通过室内模拟、室外监测和模型等方法对农业面源污染展开了大量的研究^[5-7], 研究显示过量施用化肥已经成为了农业面源污染的主要原因之一^[8,9].

柑橘作为三峡库区的主要支柱产业之一, 到 2016 年为止, 占三峡库区农用地面积的 35.84%^[4]. 在对三峡库区进行的农事调查中发现, 当地农户因盲目追求高产出、高收益导致柑橘园的管理过程中存在不科学施肥行为. 过量施用的化肥不仅使得土壤有机质和全氮、全磷、可溶性氮的含量大幅度增加, 加大了氮磷淋失的风险, 还造成了肥料的浪费, 加速了柑橘园土壤的酸化过程, 是库区土壤退化和水体富营养化的主要原因之一^[10-12]. 有鉴于此, 许多学者通过调整施肥量、施肥种类或施肥方式等方法来控制土壤氮磷的流失^[13-17], 但目前的研究多集中于水稻、玉米等粮食作物^[16-18], 对柑橘园土壤氮素受施肥量影响的研究较少. 因此本文以三峡库区柑橘园土壤作为研究对象, 通过原状土柱模拟试验对不同施肥处理下土壤氮的淋失量和残留量进行分析, 探讨施肥量对三峡库区柑橘园土壤养分在垂

直方向上变化的影响, 寻求柑橘园合理的施肥和管理方式, 减量施肥对养分的流失有辅助作用. 从本试验中得到的三峡库区柑橘园土壤氮淋失及残留量的研究结果, 可为三峡库区农业面源污染的防控提供参考依据, 为三峡库区农业合理施肥的发展方向提供帮助, 这对三峡库区水环境安全有着重要的意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于湖北省秭归县茅坪镇三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 地理位置为 110°18'36"E, 30°37'52"N, 地处三峡库区西陵峡地段, 是湖北省著名的柑橘种植区. 秭归县内地势西高东低, 属于典型的亚热带大陆性季风气候, 全年日照时数 1 200 ~ 1 600 h, 年平均气温 7.8 ~ 18℃, 无霜期 205 ~ 306 d, 年平均降水量在 950 ~ 1 900 mm 之间且降雨时空分布不均, 多集中在 5 ~ 9 月, 空气相对湿度 72%^[18]. 研究地所在柑橘园的土壤类型是从砂页岩发育而来的黄壤, 土壤质地为沙壤土, 孔隙度大、入渗能力强, 部分理化性质见表 1.

表 1 土壤基本理化性质									
Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil tested									
土地利用类型	海拔 /m	土壤	深度 /cm	TN /g·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /g·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	含水率 /%	土壤容重 /g·cm ⁻³
柑橘园	275	黄壤土	20	1.36	7.1	4.22	0.16	15.69	1.58
			40	1.51	5.78	8.81	0.14	14.53	1.41
			60	1.64	4.17	6.70	0.15	13.58	1.35

1.2 研究方法

1.2.1 试验装置

本试验所用的自制简易试验装置主体由壁厚 0.5 cm, 直径 20 cm 的 PVC 管制成, 土柱分为四段, 从下往上依次为砂石过滤段(5 cm), 原状土柱段(20、40、60 cm)、肥料混合段(5 cm)和淋洗超高段(10 cm).

本试验开始前, 将 PVC 管竖直打入土壤中, 在保证原状土不松动和原来结构情况下, 取出土柱, 下方盖上盖子, 同时取一些土壤表层的浮土, 将土柱和浮土编号后带回试验室. 之后在土柱底层垫上两层纱布, 纱布间填上粒径 2 ~ 5 mm 的石英砂(装柱前石英砂经盐酸浸泡 24 h, 再用蒸馏水反复冲洗, 烘干备用), 将浮土与肥料混合均匀后用细纱布袋装好放在土壤表层铺平后再放一层纱布, 一方面防止加水时对土壤表层产生冲击或结皮并减少水分挥发, 另一方面使降水与土壤和肥料充分结合,

土柱上方留出 10 cm 的超高以供浇灌. 土柱填充后用架子固定, 下面连接淋滤液收集装置, 上面连接加水装置, 装置安装示意如图 1 所示. 在采集原状土柱的同时, 用环刀在相同地点相同土层深度取样, 用冷藏箱带回实验室后分析土壤理化性质.

1.2.2 试验设计

在试验前期对研究区农户的农事活动进行调查后可知, 柑橘园所施用的化肥量普遍过高, 根据农户的施肥习惯, 本试验按照施氮量设置 4 个施肥处理, 分别为: 不施肥处理(CK)、低氮施肥处理(T1: 250 kg·hm⁻²)、中氮施肥处理(T2: 500 kg·hm⁻²)、高氮施肥处理(T3: 750 kg·hm⁻²), 每个施肥处理设置 3 个重复, 肥料品种为尿素. 中氮施肥处理的施肥量与试验区农户在柑橘园所施用化肥量相近. 试验期间土壤平均温度为 22℃. 在原状土柱中施加肥料后静置 24 h, 利用设施向原状土柱内加入纯水. 从秭归县定位站多年收集到的雨季降雨数据进行计

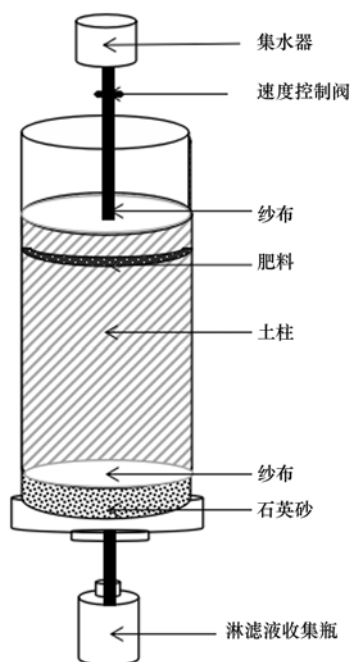


图1 试验装置示意

Fig. 1 Sketch of the test device

算后得知, 秭归县雨季次平均降雨量为 32.3 mm , 次平均降雨强度为 $3.94 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 换算到每根原状土柱约为 1014 mL 纯水, 为试验方便, 本试验中每次在 8 h 内匀速向柱内加入 1000 mL 纯水, 当土壤淋滤液每次出流到 100 mL 时采集一次样品并对其进行编号, 更换采样瓶直至土壤淋滤液不再流出为止, 同时记录土壤淋滤液的起止时间及取样时间, 每次试验监测时长为 72 h . 样品采集后在 4°C 冰箱保存备用, 试验结束后取土柱表面和底层土壤对其理化性质进行分析.

1.3 样品测定与数据处理

土壤淋滤液的监测指标主要为: 总氮 (TN)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$). 其中, 利用上海精科仪器有限公司生产的紫外分光光度计对淋滤液中的 TN 进行测定, 可溶性氮中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 利用意大利 AMS/Westco 科学仪器公司产 Smartchem140 型化学间断分析仪进行测定.

土壤理化性质测定: 土壤风干后过筛用 5% 的 KCl 溶液浸提, $5:1$ 水土比, 振荡后静置, 取上清液用与土壤淋滤液相同方法对 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进行测定^[19].

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对试验数据进行处理与分析, 采用 SPSS 22.0 对不同氮添加处理进行单因素方差分析 (ANOVA), 氮添加量为主要影响因子, 显著性水平为 0.05 , 其后多重比较为 Turkey HSD 法, 采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin9.0 软件进行图表制作.

2 结果与分析

2.1 施肥量对土壤氮淋失的影响

由图 2 可知, TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶浓度的变化与施肥量和土壤深度相关. 淋溶试验期间, 不同施肥处理下 20 、 40 和 60 cm 土柱土壤淋滤液中 TN 的淋溶浓度范围分别为 $56.76 \sim 169.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值为 $75.08 \sim 113.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 $48.71 \sim 156.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值为 $73.81 \sim 117.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 $37.16 \sim 153.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值为 $53.54 \sim 139.425 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶浓度分别为 $24.64 \sim 80.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值为 $27.89 \sim 65.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 $29.01 \sim 69.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值为 $33.50 \sim 57.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 $27.54 \sim 71.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值为 $30.29 \sim 61.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶浓度分别为 $3.12 \sim$

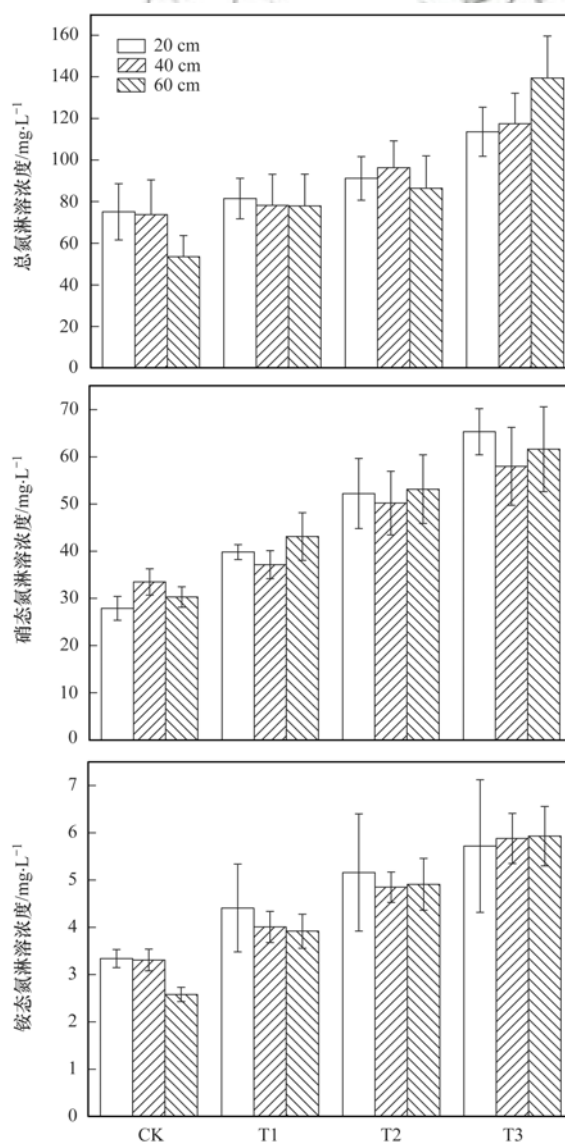


图2 不同施肥量土柱淋溶液中氮的平均浓度

Fig. 2 Average concentration of nitrogen at different depths of soil columns at different fertilization rates

7.25 mg·L⁻¹ (平均值为 3.34 ~ 5.72 mg·L⁻¹)、2.88 ~ 7.17 mg·L⁻¹ (平均值为 3.31 ~ 5.88 mg·L⁻¹) 和 2.37 ~ 7.08 mg·L⁻¹ (平均值为 2.58 ~ 5.93 mg·L⁻¹)。

对所有施肥处理在 20、40 和 60 cm 土柱淋滤液中测得的试验结果进行差异性统计分析,并结合图 2,可知同种深度土柱土壤淋滤液中 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的淋溶浓度皆随施肥量的增加而显著增加。其中,土柱淋滤液中 TN 淋溶浓度在 CK 和 T1 处理间均无显著性差异 ($P > 0.05$),随着施肥量的增加,淋溶浓度显著增加 ($P < 0.05$)。与 CK 处理相比,T1、T2 和 T3 施肥处理下 TN 淋溶浓度的上升幅度分别在 20 cm 为 8.51%、21.4% 和 51.28%; 40 cm 为 5.87%、30.47% 和 59.12%; 60 cm 土柱为 45.61%、61.36% 和 160.40%。结果表明,施肥量是影响 TN 淋溶的主要因素,且施肥量超出一定值后 TN 淋溶浓度会大幅度上升。其次土壤深度对 TN 淋溶浓度的分布也有影响,呈现先降低后上升的趋势。NO₃⁻-N 在 20 cm 和 60 cm 土柱淋滤液中的淋溶浓度均随施肥量的增加而显著增加 ($P < 0.05$),在 40 cm 土柱淋滤液中,只有 T1 和 T2 处理下的淋溶浓度存在明显差异。

相对于 CK,3 种施肥处理下 NO₃⁻-N 的上升幅度分别为 42.74%、87.31% 和 134.17%; 40 cm 为 10.93%、49.85% 和 73.10%; 60 cm 土柱为 42.40%、75.50% 和 103.40%。相对于 TN,NO₃⁻-N 受施肥量影响更大,且在 20 cm 深度淋溶浓度变化差异最为显著。NH₄⁺-N 在 60 cm 土柱淋滤液中的淋溶浓度随施肥量增加而显著增加 ($P < 0.05$),且上升幅度最大,为 51.94%、90.231% 和 129.84%; 40 cm 土柱淋滤液中,NH₄⁺-N 的淋溶浓度在 T1 和 T2 处理间无显著性差异 ($P > 0.05$),浓度上升幅度

为 21.15%、46.52% 和 77.64%; 20 cm 土柱淋滤液中,NH₄⁺-N 的淋溶浓度在 T2 和 T3 处理间无显著性差异 ($P > 0.05$),浓度上升幅度为 32.03%、54.49% 和 71.26%。

2.2 施肥量对氮淋失量及流失率的影响

结合表 2 和图 3 可以发现,在 3 种深度的土柱中,随着施肥量的增加,土壤淋滤液中 TN 和 NH₄⁺-N 的淋失量显著增加 ($P < 0.05$),NO₃⁻-N 的淋失量在施肥量达到高氮处理时明显降低,同时 TN 淋失量占施肥的比例随施肥量的增加而显著下降。NO₃⁻-N 淋失量占 TN 淋失量的比例为 36.93% ~ 60.07%,NH₄⁺-N 的比例为 4.40% ~ 5.79%,可以看出 NO₃⁻-N 是土壤氮素淋溶流失的主要形态。从图 2 中得知,随施肥量的增加,NO₃⁻-N 淋失量占 TN 的比例变化趋势呈现出单峰曲线。对比 3 种深度的 NO₃⁻-N 淋失量比例发现,20 cm 土柱受施肥量的影响最为明显,随施肥量增加而上涨的幅度为 11.78%、8.40% 和 -0.19%; 在 40 cm 土柱中,

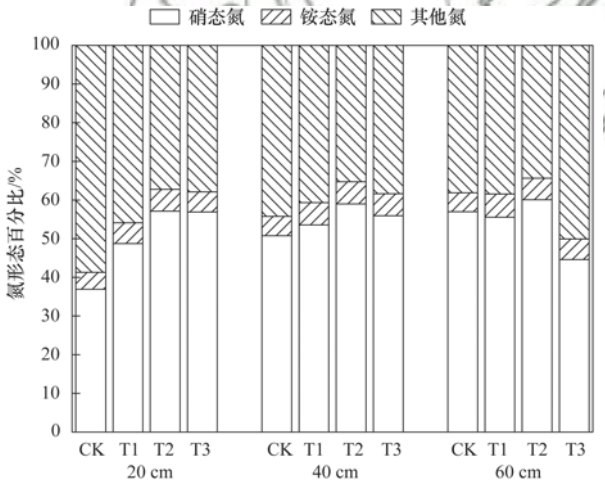


图 3 不同施肥量不同深度土柱淋滤液中氮各形态比例
Fig. 3 Ratios of different forms of nitrogen at different depths of soil columns at different fertilization rates

表 2 不同施肥量下不同深度土柱氮淋失量¹⁾

Table 2 Leaching amount of nitrogen at different depths of soil columns at different fertilization rates					
深度 /cm	施肥处理	TN 淋失量 /kg·hm ⁻²	NO ₃ ⁻ -N 淋失量 /kg·hm ⁻²	NH ₄ ⁺ -N 淋失量 /kg·hm ⁻²	氮素淋失量 占施肥量的比例/%
20	CK	20.66a	7.63a	0.91a	
	T1	22.95a	11.18b	1.24a	9.18
	T2	25.3b	14.45c	1.43b	5.06
	T3	30.11c	17.14d	1.56b	4.02
40	CK	17.96a	9.12a	0.9a	
	T1	19.16a	10.26b	1.11a	7.66
	T2	22.94b	13.53c	1.32b	4.59
	T3	28.15c	15.75d	1.61c	3.75
60	CK	11.35a	6.47a	0.55a	
	T1	16.99b	9.27a	0.85b	6.8
	T2	18.91c	11.36b	1.05c	3.9
	T3	29.03d	12.96c	1.24d	3.87

1) 同一列中不同小写字母表示不同施肥量间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

NO_3^- -N的淋失量比例上涨幅度为 2.77%、5.43%、-3.03%；在 60 cm 土柱中， NO_3^- -N的淋失量比例上涨幅度为 -2.44%、5.51%，-15.43%。 NH_4^+ -N的淋失率在 20 cm 和 60 cm 土柱中都是在 T2 处理达到最高值，在 40 cm 土柱中是在 T1 处理达到最高值。可见施肥量过高会抑制 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的转化。

2.3 施肥量对土壤氮残留量的影响

淋溶试验结束后，3 种深度土柱土壤中 TN、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的残留量如表 3 所示。从中得知，施肥量对土壤中氮的残留量有着显著的影响。其中 TN 的残留量随施肥量的增加而显著增加，对比 T1 和 T2 处理，TN 残留量的涨幅为 75.86% ~ 135.56%，对比 T2 和 T3 处理，TN 残留量的涨幅为 69.61% ~ 177.78%。 NO_3^- -N的残留量随施肥量的增加呈单峰曲线状，在 T2 处理时达到残留量最大

值， NO_3^- -N残留量占 TN 残留量的比例随施肥量的增加而减少。在 20 cm 土柱中 NH_4^+ -N残留量随施肥量的增加涨幅最大，40 cm 和 60 cm 土柱在 CK 处理下的 NH_4^+ -N残留量高于 T1 处理下的残留量， NH_4^+ -N残留量占 TN 残留量的比例随施肥量的增加呈单峰曲线状。对比 3 种深度的土柱土壤中氮素的残留量得知，在 CK 和 T1 施肥处理下，土壤 TN 的残留量随土柱深度增加而增加，在 T2 和 T3 施肥下，20 cm 土柱土壤中 TN 残留量最高，40 cm 土柱中最低； NH_4^+ -N与 TN 相似，CK 处理下的残留量随土柱深度增加而增加，但施肥后的残留量随深度增加而减少； NO_3^- -N在 T3 处理下的残留量随土柱深度的增加而降低，CK、T1 和 T2 处理下 NO_3^- -N残留量呈现单峰曲线状，在 40 cm 土柱达到峰值。

表 3 不同施肥量下不同深度土柱氮肥残留量¹⁾

Table 3 Nitrogen residue in soil columns at different depths and different fertilization rates

土柱深度 /cm	施肥处理	TN /g·kg ⁻¹	NO_3^- -N /mg·kg ⁻¹	NO_3^- -N残留量 比例/%	NH_4^+ -N /mg·kg ⁻¹	NH_4^+ -N残留量 比例/%
20	CK	0.30 a	11.85 a	39.50	0.46a	1.53
	T1	0.45 a	16.58 b	36.84	0.63 a	1.40
	T2	1.06 b	34.70d	32.74	2.19 b	2.07
	T3	1.86 c	26.98c	14.51	3.59 c	1.93
40	CK	0.40 a	12.27a	30.68	0.78 a	1.95
	T1	0.53 a	24.20 b	45.66	0.61 a	1.15
	T2	0.98 b	42.09d	42.95	1.94 b	1.98
	T3	1.70 c	22.88c	13.46	2.82 c	1.66
60	CK	0.41 a	8.86a	21.61	0.82 a	2.00
	T1	0.58 a	21.52 b	37.10	0.61 a	1.05
	T2	1.02 b	37.79c	37.05	1.84 b	1.80
	T3	1.73 c	19.57 b	11.31	2.66 c	1.54

3 讨论

在淋溶试验过程中，氮肥进入土壤与水发生反应，生成铵盐，在土壤微生物的氧化作用下，生成硝酸盐。其中，未被作物吸收的铵盐和硝酸盐，一部分随地表径流和土壤淋溶等多种途径进入周边受纳水体^[20-22]，形成农业面源污染，另一部分富集于土壤中，对土壤、作物产生负面影响的同时也成为地下水污染的潜在来源^[23, 24]。因此想要对三峡库区农业面源污染进行防控工作，从土壤氮素流失和残留两个方向进行研究。

从本试验结果得知， NO_3^- -N是氮素淋失的主要形态，其淋失量占 TN 淋失量比例基本超过 50%， NH_4^+ -N淋失量比例为 4.27% ~ 5.79%，且施肥量是影响 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N淋失量的主要因素。国内很多学者所进行的试验都证明了这一结论，其中张敏等^[25]在太湖地区水稻田进行的淋溶试验中无机态

氮比例与本研究接近，为 41.1% ~ 59.5%，如吴家森等^[13]在浙江临安雷竹林所进行的试验， NO_3^- -N 占总氮的比例范围为 75.7% ~ 83.6%，而陈维梁等^[2]在四川绵阳市紫色土坡耕地进行的试验中，所测得的 NO_3^- -N比重峰值可高达 93.65%。可能因为张敏等人的试验选取的土层厚度、施肥量和施肥种类与本研究接近，因此 NO_3^- -N所占比重相近；吴家森等^[13]的研究中土层厚度为 30 cm，施肥量接近，但施肥种类为复合肥、缓释肥和微生物肥，与尿素相比更易于与水产生化学反应，产生硝化作用；陈维梁等^[2]的试验同样位于三峡库区，土层厚度相同，但灌溉方式为自然降雨中的暴雨和中雨，单次的灌溉量和灌溉强度都较高，因此无机态氮的比重与同类型试验结果相比较。综上所述，土壤中氮素淋失是多重因素综合作用的结果，不仅受施肥量和土层厚度的影响，施肥种类、灌溉量和灌溉强度（降雨量和降雨强度）等因素都会对其产生影响。

土壤氮素残留量中, 无机态氮所占比例极小, 与氮素淋失量相同的是, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 残留量占 TN 残留量的比例是在 40 cm 土柱中比重最大. 这与胡明芳等^[26] 和戴腾飞等^[27] 的试验结论相似, 都认为 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 主要分布在 0 ~ 40 cm 土层, 并且其在土壤中的含量随施肥量增加或土层厚度的增加呈现先增加后降低的趋势, 施肥量过高会抑制氮的转化过程. 但胡明芳和戴腾飞都是在滴灌施肥方式下获得以上结论, 在戴腾飞等^[27] 试验中的沟施处理和王虎等^[28] 的大田试验中所得到的研究结论则是 NO_3^- -N 主要分布在 0 ~ 20 cm 土层, 与本研究结果存在差异. 在南镇武等^[29] 的试验中, 土壤中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的积累量在不同施肥处理下其显著增加量为 112% ~ 396% 和 69% ~ 259%, 其最大值远高于本试验结果, 可能因为南镇武等的试验为长期施肥试验, 较长的试验周期使得土壤中的氮素转化成无机态氮. 因此, 在氮肥施入土壤后, 其迁移转化过程受时间、土壤类型、施肥深度、土壤性质(土壤含水率、pH、温度和湿度)等因素影响, 因此施肥方式、施肥种类和灌溉方式等都会对土壤中氮素的分布产生影响, 但本研究受条件所限, 采取的是常规灌溉和表施方式, 未对其他施肥处理进行更进一步的对照研究.

4 结论

(1) 在相同深度的柑橘园土壤中, 其氮素的淋失量和残留量与施肥量呈显著正相关. 其中, T3 处理下, TN 和 NH_4^+ -N 的淋失量、残留量的变化幅度最大, 在 T2 处理下, NO_3^- -N 的淋失量、残留量的变化幅度最大.

(2) 在相同施肥量下, 柑橘园不同深度土壤中氮素淋失量、残留量的变化趋势存在较大差异. 在 CK、T1 和 T2 处理下, TN 和 NH_4^+ -N 的淋失量与土柱深度呈负相关; 在 T3 处理下, TN 淋失量最大值在 20 cm 土柱中, NH_4^+ -N 淋失量最大值在 40 cm 土柱中. 在 4 个施肥处理下, NO_3^- -N 淋失量的最大值皆出现在 40 cm 土柱中. 施肥后, 土壤中 TN 残留量最小值主要出现在 40 cm 土柱中, NH_4^+ -N 残留量最小值主要出现在 60 cm 土柱中, NO_3^- -N 残留量最大值主要出现在 40 cm 土柱中.

参考文献:

- [1] 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 等. 三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3035-3042.
Zeng L X, Xiao W F, Huang Z L, et al. Characteristics of nutrient loss of Lanlingxi watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3035-3042.
- [2] 陈维梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2129-2138.
Chen W L, Gao Y, Lin Y M, et al. Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil[J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- [3] 赵欣. 浅析我国农业面源污染防治研究现状与对策[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(33): 80-84.
Zhao X. Brief analysis of present situation and countermeasures of agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(33): 80-84.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017.
- [5] 湛芸, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 31-34, 43.
Chen Y, He B H, Zhao X L, et al. Effect of soil erosion and water loss in farmland on water eutrophication in Xiaojiang River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(4): 31-34, 43.
- [6] McDowell R W, Sharpley A N. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004, **102**(1): 17-27.
- [7] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 农业非点源污染田间模型及其应用[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3509-3513.
Li Q K, Li H E, Hu Y W, et al. Establishment and application of the estimation model for agricultural non-point source pollution in the field[J]. Environmental Science, 2009, **30**(12): 3509-3513.
- [8] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2770-2778.
Han X F, Gao M, Xie D T, et al. Reduction effect of reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers on phosphorus loss of purple soil sloping field[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2770-2778.
- [9] 刘志欣. 近十年来重庆三峡库区农业面源污染变化研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2016.
Liu Z X. Changes of agricultural non-point source pollution in Chongqing Three Gorges Reservoir Area in recent ten years[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2016.
- [10] 孙军益. 三峡库区紫色土氮磷淋溶试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Sun J Y. Research in nitrogen and phosphorus leaching in Three Gorges Reservoir Region [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [11] 李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(9): 1832-1838.
Li X P, Sun Y, Shi X J. Characteristics of phosphorus leaching and its impact on groundwater in purple paddy soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(9): 1832-1838.
- [12] 唐平, 叶荣生, 商要风, 等. 重庆三峡库区柑橘园土壤酸碱度及有效氮磷钾的含量特征[J]. 贵州农业科学, 2016, **44**(3): 96-98, 105.
Tang P, Ye R S, Shang Y F, et al. Characteristics of soil pH and available NPK contents of Citrus Orchards in Chongqing Sanxia Reservoir Area [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, **44**(3): 96-98, 105.
- [13] 吴家森, 陈闻, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤氮、磷渗漏流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 33-37, 44.

- Wu J S, Chen W, Jiang P K, *et al.* Effects of different fertilization on seepage losses of nitrogen and phosphorus in the soil under *phyllostachys praecox* stand[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(2): 33-37, 44.
- [14] 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.
- [15] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. *水利学报*, 2010, **41**(11): 1374-1381.
- Zhou M H, Zhu B, Wang T, *et al.* Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil[J]. *Shuili Xuebao*, 2010, **41**(11): 1374-1381.
- [16] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2015, **21**(2): 326-335.
- Xi B, Zhai L M, Liu S, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(2): 326-335.
- [17] 彭佩钦, 仇少君, 刘强, 等. 洞庭湖平原典型水稻土氮素固持动态及氮的残留形态[J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1139-1145.
- Peng P Q, Qiu S J, Liu Q, *et al.* Dynamics of labeled Substrate N by microorganism and soil clay immobilized and its residue fractions in typical paddy soils in Dongting Lake floodplain[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 1139-1145.
- [18] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3390-3396.
- Zeng L X, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Nitrogen and phosphorus loss in different land use types and its response to environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3390-3396.
- [19] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3825-3831.
- Wu D, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Control of soil nutrient loss of typical reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3825-3831.
- [20] 赵建博. 香溪河流域坡耕地土壤氮磷淋溶流失模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [21] Dise N B, Matzner E, Forsius M. Evaluation of organic horizon C:N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe[J]. *Environmental Pollution*, 1998, **102**(1): 453-456.
- [22] Ulén B, Jakobsson C. Critical evaluation of measures to mitigate phosphorus losses from agricultural land to surface waters in Sweden[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **344**(1-3): 37-50.
- [23] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(7): 103-110.
- Shang F Z, Yang P L, Li Y K, *et al.* Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(7): 103-110.
- [24] 朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3): 525-533.
- Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al.* Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(3): 525-533.
- [25] 张敏, 赵森, 田玉华, 等. 太湖地区高产高效措施下水稻氮淋溶和径流损失的研究[J]. *土壤*, 2018, **50**(1): 35-42.
- Zhang M, Zhao M, Tian Y H, *et al.* Study on N leaching and runoff under integrated high yield and high efficiency practices in paddy fields of Taihu Lake Region[J]. *Soil*, 2018, **50**(1): 35-42.
- [26] 胡明芳, 田长彦, 吕昭智, 等. 氮肥施用量对新疆棉花产量及植株和土壤中硝态氮含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(4): 63-68.
- Hu M F, Tian C Y, Lv Z Z, *et al.* Effects of N rate on cotton yield and nitrate-N concentration in plant tissue and soil[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2006, **34**(4): 63-68.
- [27] 戴腾飞, 席本野, 闫小莉, 等. 施肥方式和施氮量对欧美108杨人工林土壤氮素垂向运移的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(6): 1641-1648.
- Dai P F, Xi B Y, Yan X, *et al.* Effects of fertilization method and nitrogen application rate on soil nitrogen vertical migration in a *Populus × euramericana* cv. 'Guariento' plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(6): 1641-1648.
- [28] 王虎, 王旭东, 赵世伟. 滴灌施肥条件下土壤水分和硝态氮的分布规律[J]. *西北农业学报*, 2008, **17**(6): 309-314.
- Wang H, Wang X D, Zhao S W. Distribution of soil water and nitrate in Lou soil under drip fertigation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, **17**(6): 309-314.
- [29] 南镇武, 刘树堂, 袁铭章, 等. 长期定位施肥土壤硝态氮和铵态氮积累特征及其与玉米产量的关系[J]. *华北农学报*, 2016, **31**(2): 176-181.
- Nan Z W, Liu S T, Yuan M Z, *et al.* Characteristics of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen accumulation in soil and its relationship with Maize Yield on long-term located fertilization[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, **31**(2): 176-181.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)