

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



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷

严坤^{1,2}, 王玉宽^{1,3*}, 刘勤^{1,3,4}, 徐佩^{1,3}, 闫洋洋^{1,3}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 水利部三峡工程运维系统万州典型区水土保持监测站, 万州 404020; 4. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059)

摘要: 通过对三峡库区顺坡沟垄构型的规模化柑橘园集水区次降雨过程径流氮、磷进行动态监测, 分析典型降雨事件氮和磷流失负荷, 并探讨了规模化柑橘种植对土壤氮磷流失及入库河流水环境的影响。结果表明: ① 顺坡沟垄柑橘园集水区径流氮和磷年流失负荷分别为 $13.43 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $1.26 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 春季施肥及强降雨冲刷是集水区污染物高负荷的主要原因; ② 集水区全年总氮(TN)和总磷(TP)的 EMC 为 $8.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超过发生水体富营养化含量标准; ③ 春季施肥后的 2 场典型降雨中, 长历时暴雨径流硝态氮(NN)和溶解态磷(DP)负荷为 $4.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占 TN 和 TP 流失负荷的 92.90% 和 64.69%; 短历时大雨径流 NN 和 DP 负荷为 $0.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占 TN 和 TP 的 65.92% 和 74.88%, 溶解态氮和磷是顺坡沟垄坡面果园径流氮和磷流失的主要途径; ④ 集水区氮磷流失表现出显著的“初始冲刷效应”, 初期 20% 的地表径流流失了 58.0% 的 TN, 57.0% 的 DN, 58.5% 的 NN, 79.0% 的 AN, 62.0% 的 TP, 63.5% 的 DP 和 60.0% 的 PP, 控制初期地表径流对降低入库径流养分具有重要作用。

关键词: 三峡库区; 顺坡沟垄; 集水区; 面源污染; 规模化果园

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3646-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202002075

Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area

YAN Kun^{1,2}, WANG Yu-kuan^{1,3*}, LIU Qin^{1,3,4}, XU Pei^{1,3}, YAN Yang-yang^{1,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Wanzhou Key Regional Soil and Water Conservation Monitoring Station of Three Gorges Project Operation and Maintenance System, Wanzhou 404020, China; 4. Earth Sciences Faculty, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: To comprehend the runoff load of nitrogen (N) and phosphorus (P) and the impact on the receiving river in an agricultural area with an intensive orchard plantation and a longitudinal ridge and furrow morphology in the Three Gorges Reservoir Area, the runoff and N and P concentrations were dynamically monitored in a typical citrus orchard catchment in Wanzhou Country, Chongqing, China. The results showed that the nutrient concentration in runoff water from the intensive citrus planting catchment was very high. The average annual event mean concentrations (EMC) were $9.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for total nitrogen (TN), $8.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for dissolved nitrogen (DN), $5.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for nitrate nitrogen (NN), $0.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for ammonium nitrogen (AN), $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for total phosphorus, $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for solved phosphorus (DP), and $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for particulate phosphorus (DP). In addition, the annual loss loads were 13.43, 12.20, 8.77, 0.75, 1.26, 0.84, and $0.42 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ for TN, DN, NN, AN, TP, DP, and PP, respectively. The annual average concentrations of TN and TP were $8.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, which exceeded the category V values of the surface water quality standards (GB3838-2002) by 4.25 times and 2.2 times, respectively, and also exceeded the internationally recognized thresholds for the eutrophication of waterbodies. The TN and TP loss load from storm runoff was one of the main reasons for the degradation of the river water quality, thus suggesting the need to treat surface runoff and control runoff nutrient losses, especially during the first storm events after fertilization. During two typical long-duration springtime rainfall events after fertilization, the loads of nitrate nitrogen (NN) and dissolved phosphorus (DP) were $4.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, which accounted for 92.90% and 64.69% of the total annual TN and TP loss loads, respectively. The loads of NN and DP in a short-duration high-intensity rainfall event were 0.52 and $0.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively, which accounted for 65.92% and 74.88% of the total annual TN and TP loss loads, respectively. The DN and DP were the main forms of nitrogen and phosphorus losses from the intensive citrus orchard with a longitudinal ridge and furrow morphology. Meanwhile, the catchment showed a significant first-flush phenomenon during a typical rainfall event, with a total of 58.0%, 57.0%, 58.5%, 79.0%, 62.0%, 63.5%, and 60.0% of the mass of TN, DN,

收稿日期: 2020-02-13; 修订日期: 2020-02-23

基金项目: 中国科学院“一三五”方向项目(KFJ-STZ-ZDTP); 国家自然科学基金项目(41701114); 三峡工程运行安全综合监测系统项目(Y3A3720720)

作者简介: 严坤(1983~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为水土流失与面源污染, E-mail: yankun@imde.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn

NN, AN, TP, DP, and PP in the initial 20% of the runoff, respectively. Hence, controlling the surface runoff at the early runoff stage plays an important role in reducing nutrient losses.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; longitudinal ridge and furrow morphology; catchment; non-point source pollution; intensive orchard

三峡库区是我国重要的柑橘生产适宜区,柑橘业对库区农村经济发展和移民安稳致富发挥了重要作用^[1]. 近年来,快速城镇化导致耕地撂荒或闲置,土地流转和三峡库区生态屏障建设加快了柑橘种植,逐渐形成了1 667 km² 柑橘生态屏障带,对库周土地利用格局造成重大改变. 由于大部分规模化柑橘园分布在紫色土丘陵坡地上,紫色土土层瘠薄且“上覆土壤、下伏岩石”的岩土二元结构,土地生产力普遍较低,规模化柑橘园在整地时沿顺坡高厢聚土起垄,在坡面顺坡方向形成“宽垄-窄沟”相间的坡面构型,达到快速排水与增厚土层,形成柑橘适宜的生长条件^[2]. 坡面是地表过程发生和发展的基础单元^[3],也是径流形成和养分迁移主要的界面,坡面形态能显著影响地表径流和壤中流以及伴随发生的溶质运移^[4~6]. 三峡库区中部规模化柑橘园整地形成的顺坡垄沟不同于传统意义上自然坡面、人工改造坡面(如梯田、鱼鳞坑和水平阶等)和农田耕作微地形,具有独特的坡面水文过程和养分输移机制. 目前虽有众多水文模型与养分迁移模型,但大多数养分迁移机制模型假设条件为理想坡面,难以模拟复杂微地形下养分流失负荷,并不清楚“宽垄-窄沟”坡面构型的集中连片柑橘园养分流失特征及规律.

在三峡库区柑橘种植面积占农地面积的35%以上^[7],因其化肥施用量大,氮磷流失负荷远高于传统粮食作物,是区域重要的面污染源^[8]. 目前,在三峡库区面源污染方面研究多集中于传统农作物(如玉米和红薯等)坡耕地氮素迁移特征和过程^[9~11],而柑橘面源污染主要通过地块尺度平顺径流小区监测,分析不同农业措施(如覆盖、生草和植物篱等模式)径流、泥沙与养分流失特征^[12~15],缺乏对径流、养分流失等复杂过程的研究,难以制定基于过程的柑橘园污染物控制措施^[16]. 本文以三峡库区中部广泛分布的规模化柑橘园为研究对象,连续监测顺坡垄沟坡面构型的柑橘集水区径流、氮及磷养分输出形态、浓度和负荷变化,分析该区域规模化果园普遍采用的整地方式对水质的影响,明确春季施肥后典型降雨事件对非点源污染贡献,以期为三峡库区规模化果园面源污染负荷定量评估与氮磷面源污染防控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区中部重庆市万州区龙沙镇龙安村,地理位置(108°10'E, 30°25'N,图1),属于三峡库区入库支流瀼渡河流域.

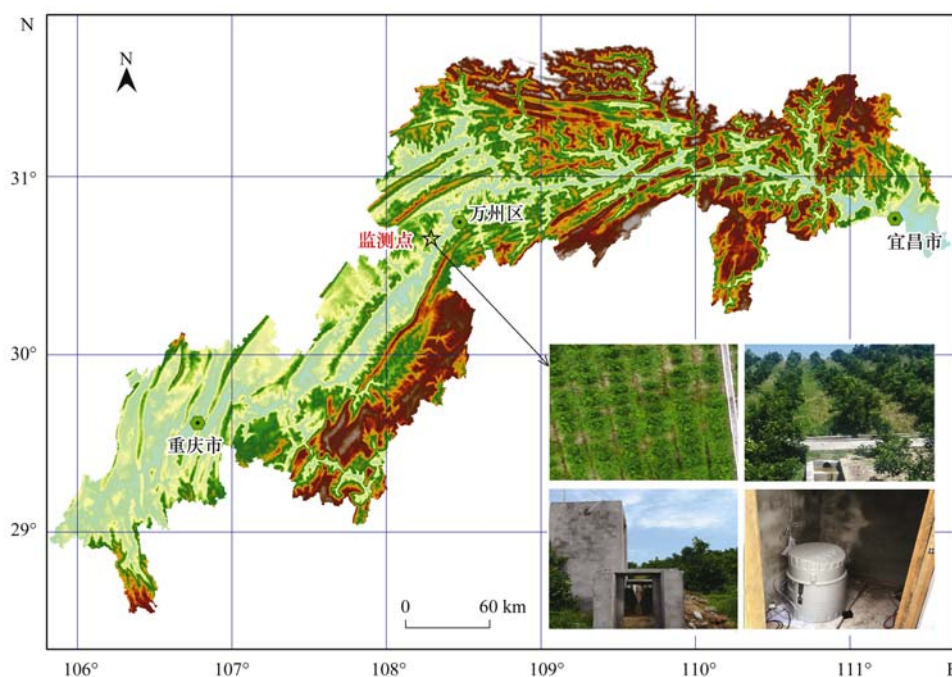


图1 研究区位置及规模化柑橘集水区监测点示意

Fig. 1 Location of the orchard catchment

该流域所在的区域属亚热带季风湿润气候,年均气温 18.0℃,年均降雨量 1 229 mm,年均相对湿度 82%,年均日照 1 258 h,适宜的柑橘生长气候使该区成为三峡库区重要的柑橘种植区,近 5 年万州区大力发展晚熟柑橘[品种为塔罗科血橙(*Tarocco*)]

产业,新建、改造和更新品种面积超过 80 km²,目前规模化柑橘园主要采用顺坡沟垄方式整地(垄沟规格为:垄宽 2.0~2.5 m,垄高 0.4~0.5 m,沟宽 0.5~0.8 m,沟深 0.3~0.5 m),并在垄上按 4 m 株距栽种柑橘(图 2).

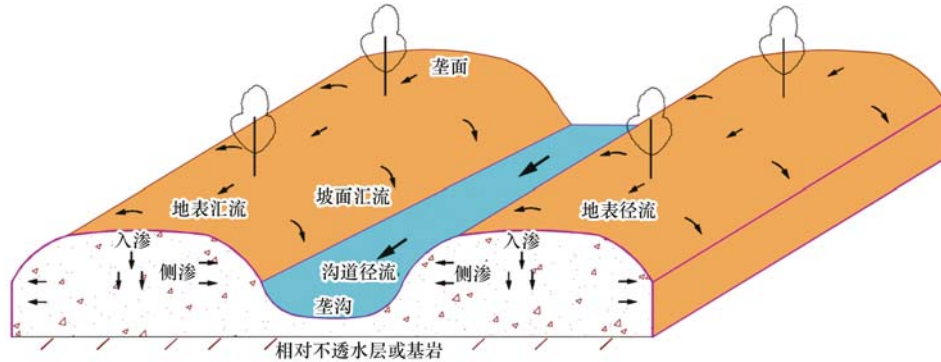


图 2 顺坡沟垄整地方式及汇流示意

Fig. 2 Longitudinal ridge-furrow morphology and flow concentration sketch

该区域土壤类型为紫色土,呈微碱性或中性,土壤理化性质如下:pH 7.23±0.29、有机质(15.2±4.45)g·kg⁻¹、速效氮(82.03±17.5)mg·kg⁻¹、速效磷(85.3±2.26)mg·kg⁻¹和速效钾(285.78±20.0)mg·kg⁻¹,降雨后规模化柑橘园地表径流通过顺坡沟垄和排水沟道汇入瀼渡河并排入水库.

1.2 研究方法

1.2.1 降雨量与径流量监测

在 0.6 hm² 的柑橘坡面集水区下侧修建 V 型测流堰,通过完整的坡面沟渠系统,将地表径流汇入堰槽进行实时监测.利用自计水位仪(HOBO U20),每 5 min 记录一次过堰水位,并根据“水位-流量”关系计算径流量,同时利用测流堰站房上安装自动降雨监测设备(HOBO RG3-M),连续记录降雨量及降雨历时.

1.2.2 水样采集及分析

利用全自动水质采样器(ISCO 6712)采集径流水样.当降雨达到一定条件时(连续 4 h 累积降雨量超过 10 mm),采样器自动触发并按照设定的采样条件采集瞬时水沙样品,前 30 min 时每 10 min 采样一次,30~90 min 时每 20 min 采样一次,90~540 min 时每 30 min 采样一次,540~720 min 时每 60 min 采样一次,之后每 120 min 采样一次,每瓶采集 1 L,共采集 24 个过程样.取样结束后,立即将水样转移到聚乙烯瓶并放入 4℃ 冰箱保存,48 h 内完成分析.分析指标包括总氮(TN)、溶解性总氮(DN)、硝态氮(NN)、氨氮(AN)、总磷(TP)和溶解性总磷(DP).其中,TN 和 TP 用摇匀后的水样直接测定;DN、AN、NN 和 DP 用经 0.45 μm 滤膜过滤后的水样测定.TN 和 TP 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法

测定;NN、AN、DN 和 DP 采用流动注射分析仪(AutoAnalyzer3)测定,PP 用 TP 与 DP 差值表示.

1.2.3 数据处理

(1) 次降雨事件地表径流平均浓度 EMC

降雨径流污染物浓度随降雨随机性也表现出相应的波动特征^[17],目前 EMC 是评价单次降雨径流对水质影响的重要指标,计算公式为:

$$EMC = \frac{\int_0^T c_t q_t dt}{\int_0^T q_t dt} \quad (1)$$

式中,EMC 为次降雨径流事件流量加权平均浓度,mg·L⁻¹; c_t 为 t 时刻污染物浓度,mg·L⁻¹; q_t 是 t 时刻径流流量,L·s⁻¹; T 为单次降雨径流结束时间,min.

(2) 无因次累积负荷-累积径流量变化曲线 M - V

单次降雨事件期间,普遍使用累积污染物负荷-累积径流量变化曲线 M - V 能反映初期冲刷效应(污染物负荷增加率高于径流量增加率)^[18].该方法在水平轴上绘制累积径流比 V_t ,在垂直轴上绘制累积污染物负荷比 M_t ,其中:

$$V_t = \frac{\int_0^t q_t dt}{\int_0^T q_t dt} \quad (2)$$

$$M_t = \frac{\int_0^t c_t q_t dt}{\int_0^T c_t q_t dt} \quad (3)$$

式中, t 为单次降雨径流某一采样时间,min.

(3) MFF_n

MFF_n 值是另一种定量分析污染物“初期冲刷效应”标准^[19],表示累积径流量占总径流量的 *n*% 时,累积污染物负荷百分比与累计径流量百分比之比,其计算公式为:

$$\text{MFF}_n = \frac{\left(\int_0^t c_t q_t dt\right) / M}{\left(\int_0^t q_t dt\right) / V} \quad (4)$$

式中,*n* 是从径流产生到 *t* 时刻累积径流百分比,0 ~ 100%; *M* 是次降雨事件污染物流失总量,g; *V* 是次降雨事件径流总量,L.

本实验数据采用 SigmaPlot 12.0 和 SPSS 19.0 进行绘图和统计分析.

2 结果与分析

2.1 集水区降雨与径流特征

规模化柑橘种植区降雨主要分布在 4 ~ 10 月,累积降雨量 904.5 mm,占全年降雨量的 81%.由图 3 可知,4 ~ 5 月降雨较为集中,夏季存在季节性干旱.整个观测期集水区径流量为 620.55 m³,最大次降雨地表径流量为 173.08 m³ (2018 年 5 月 5 日),春季 6 场降雨径流量占全年的 71.0%.对集水区降雨与径流进行相关分析发现,次降雨径流量与雨量存在显著相关性(*r* = 0.687, *P* < 0.01).

表 1 表 1 EMC 与年降雨径流氮磷流失负荷(*n* = 14)

统计指标	TN	DN	NN	AN	TP	DP	PP
平均值/mg·L ⁻¹	8.49	7.38	4.98	0.45	0.87	0.59	0.28
最大值/mg·L ⁻¹	28.53	25.63	17.06	4.79	2.82	1.76	1.05
最小值/mg·L ⁻¹	1.31	1.08	0.11	0.02	0.11	0.06	0.04
标准偏差/mg·L ⁻¹	7.58	7.06	4.80	1.25	0.66	0.43	0.26
变异系数/%	89.27	95.61	96.34	275.83	75.99	72.71	92.41
年流失负荷/kg·hm ⁻²	13.43	12.20	8.77	0.75	1.26	0.84	0.42

小次降雨径流 EMC 的 240 倍.

整个监测期 TN、DN、NN、AN、TP、DP 和 PP 的流失负荷分别为 13.43、12.20、8.77、0.75、1.26、0.84 和 0.42 kg·hm⁻²,略低于曹瑞霞等^[20]对三峡库区新政小流域氮磷流失负荷估算值,该研究得到的氮磷流失负荷是根据观测到的两场降雨径流平均氮磷浓度与这两场降雨占全年降雨量的比例估算而得,监测的两场降雨均为强降雨事件,使用其径流氮磷浓度作为全年氮磷的平均浓度,可能会高估该流域氮磷流失负荷.本研究还发现,虽然 TN 和 DN 的浓度虽随降雨事件变化,但 NN 始终是其主要流失形态,监测期内超过 60% 的降雨事件中 NN/DN 比值超过 1/2,且 NN 与 DN 之间呈显著的线性正相关 (NN = 0.751 6 × DN - 2.882, *r* = 0.899 7, *P* <

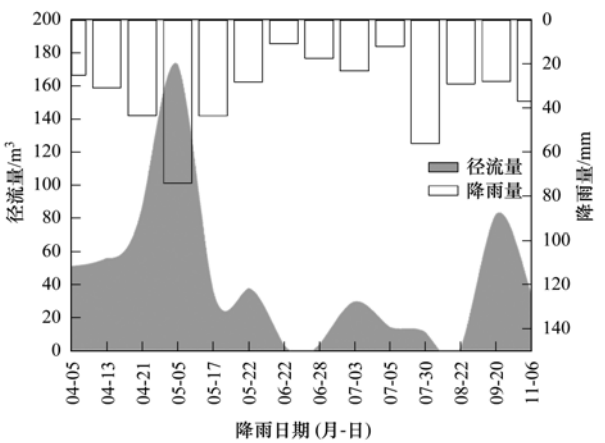


图 3 2018 年集水区降雨与径流关系

Fig. 3 Rainfall and runoff volumes for the entire rainfall-runoff events during 2018

2.2 EMC 与年流失负荷

由表 1 可知,监测期间 14 场产流径流水中 TN、DN 和 NN 的 EMC 平均值为 8.49、7.38 和 4.98 mg·L⁻¹,变异系数 89.27%、95.61% 和 96.34%; AN 的 EMC 平均值为 0.45 mg·L⁻¹,变异系数 275.83%.TP、DP、PP 的 EMC 平均值为 0.87、0.59 和 0.28 mg·L⁻¹,变异系数 75.99%、72.71% 和 92.41%.较高变异系数体现了不同降雨事件径流氮、磷 EMC 存在较大差异,特别是 AN 具有较高的变异系数,施肥后首场降雨 AN 的 EMC 甚至达到最

0.01),而 AN/DN 比值较小(0.16% ~ 18.69%),且与降雨无显著相关关系(*P* > 0.05).

2.3 氮磷流失过程

4 ~ 11 月(除 10 月外)集水区均产生地表径流和径流养分流失,整个观测期单场降雨事件 TN、DN、NN、TP、DP 和 PP 最大流失负荷为 5.32、5.09、4.95、0.44、0.28 和 0.15 kg·hm⁻² (5 月 5 日),单场降雨事件 AN 最大流失负荷为 0.69 kg·hm⁻² (4 月 21 日,施肥后第 4 d,施肥后的首场降雨).通过对各养分浓度和距施肥天数进行相关分析发现,AN 流失浓度与距施肥天数呈显著负相关 (*P* < 0.01),施肥是影响顺坡沟垄柑橘园 AN 流失最显著的影响因子^[21].

利用养分流失累积曲线描述集水区养分年内流

失过程(图4),氮磷养分流失具有明显的阶段性特征,大致可以分为5个时期.其中,第Ⅰ阶段(春季施肥之前)、第Ⅳ阶段(6月22日~9月20日)氮磷流失较为平稳;第Ⅲ阶段(5月5日~6月22日)、第5阶段(9月20日之后)氮磷流失有小幅增加的趋势;第Ⅱ阶段(春季施肥后~5月5日)也是春季施肥后

的前两场产流降雨(两场降雨分别达到大雨、暴雨标准),是全年径流养分快速流失期,此阶段贡献了全年TN、DN、NN、AN、TP、DP和PP总流失量的70.4%、72.1%、68.9%、94.1%、67.1%、64.1%和73.0%,顺坡沟垄柑橘园土壤养分流失是降雨与施肥耦合作用的结果.

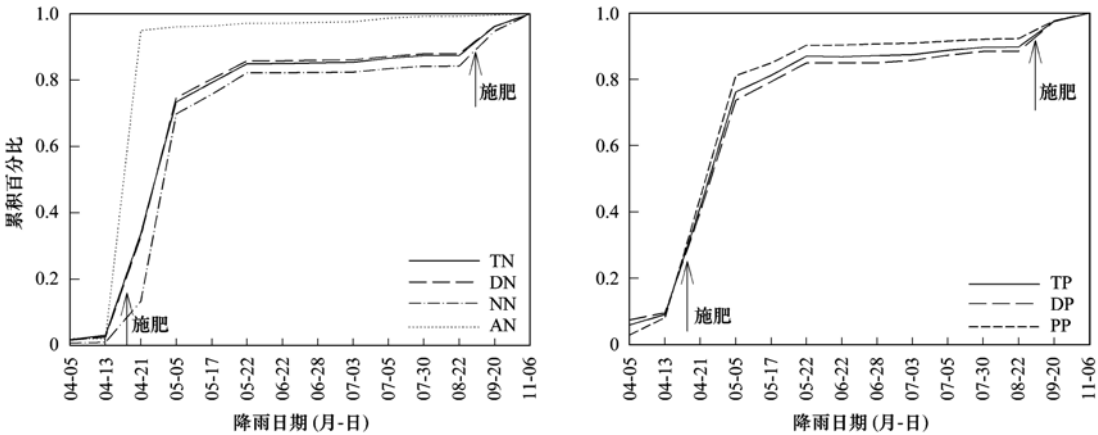


图4 集水区养分流失年累积曲线
Fig. 4 Cumulative curve of N and P loss in the orchard catchment

2.4 典型降雨径流养分流失特征
2.4.1 典型降雨径流特征

选择两场典型降雨事件(5月5日和5月17日)进行分析,其降雨特征见表2.两场降雨分别代表长历时暴雨和短历时大雨事件,其中5月5日降雨为春季施肥后首场暴雨,也是全年降雨量最大的次降雨事件.

长历时暴雨事件(5月5日)降雨具有波动性,

前期径流随雨强增加迅速增大并出现第一次径流峰值,而后伴随雨强降低径流有所减少,当雨强再次增大后出现第二次径流峰值;而短历时大雨事件(5月17日)降雨量与径流量趋势基本一致,且具有明显的径流单峰峰值(图5).两场降雨事件共产生径流213 m³,约占全年径流量的1/3,其中仅5月5日暴雨事件径流量占全年径流量的27.89%.受前期降雨量的影响^[23],5月5日降雨初损值为6 mm,5

表2 典型降雨事件特征

Table 2 Characteristics of typical rainfall events					
降雨日期(月-日)	降雨量/mm	历时/h	最大雨强/mm·h ⁻¹	API ¹⁾ /mm	施肥后天数/d
05-05	74.2	23.0	11.2	29.29(Ⅱ)	18
05-17	43.6	4.0	32.2	16.20(Ⅱ)	30

1) $API = \sum (k^i \times P_i)$, P_i 是降雨事件前降雨量($i=1,2,\cdots,14$), k 为常数($k=0.85$); 根据 API 分级指标将土壤干湿程度分为^[22]: I (干旱) $0 \leq API \leq 15$ mm; II (中等) $15 < API \leq 30$ mm; III (湿润) $API \geq 30$ mm

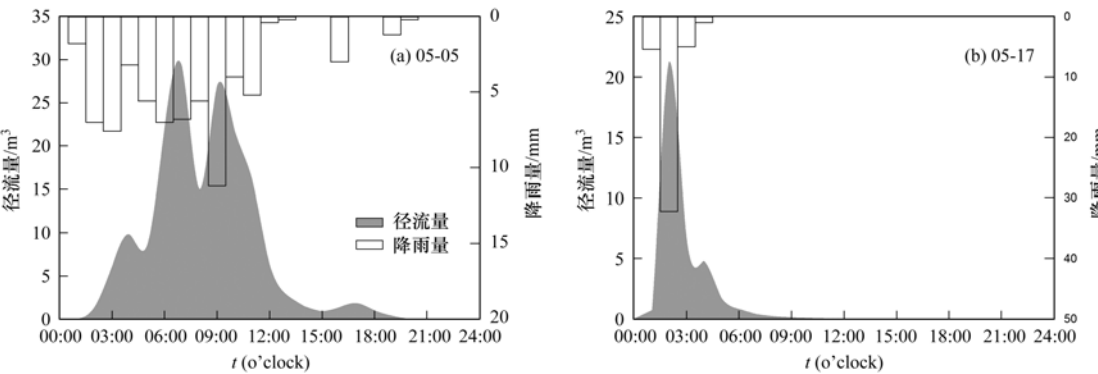


图5 两场典型降雨事件降雨-径流关系
Fig. 5 Rainfall-runoff relationship for the two typical rainfall events

月 17 日为 11.4 mm. 径流峰值较降雨峰值表现出滞后性, 其中 5 月 17 日大雨事件径流峰值出现在雨峰后 6 min, 峰值流量达 $19.54 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$.

此外还发现, 两场降雨事件均出现径流快速回落的现象, 这可能与顺坡沟垄坡面构型和集水区面积较小有关^[24]. 在土层浅薄、基岩埋深较浅的坡面上, 土壤层自身涵水能力较低^[25], 而对于沟垄坡面而言, 高强度降雨或前期连续降雨能够促进垄面土壤迅速饱和, 并伴随优先流的产生, 在基岩处形成侧向流, 回归进入垄沟地表径流^[26], 沟垄构型加快径流的汇集, 同时固定的顺坡流路促进了径流排导^[27], 因此该坡面构型下地表径流对降雨的响应快于紫色土区传统自然坡面和小流域^[28].

2.4.2 典型降雨径流氮磷浓度

长历时暴雨径流样中 TN、DN 和 NN 浓度分别

为 (17.64 ± 5.18) 、 (16.72 ± 4.89) 和 $(16.05 \pm 5.02) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, AN 浓度为 $(0.06 \pm 0.13) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP、DP 和 PP 浓度分别为 (1.37 ± 0.26) 、 (0.89 ± 0.17) 和 $(0.48 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 通过配对样本 t 检验发现, 长历时暴雨径流 TN、DN 和 NN 之间无显著性差异 ($df = 24, P > 0.05$), 且表现较好的一致性; 短历时大雨径流样中 TN、DN、NN 浓度分别为 (18.79 ± 6.13) 、 (16.47 ± 5.42) 和 $(10.62 \pm 2.93) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, AN 浓度为 $(0.02 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP、DP 和 PP 浓度分别为 (0.91 ± 0.23) 、 (0.65 ± 0.18) 和 $(0.26 \pm 0.06) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 见图 6.

结合图 5 的降雨径流关系发现, 长历时暴雨径流中各形态氮浓度峰值出现的时间早于径流峰值, 而各形态磷浓度峰值略晚于径流峰值. 图 6 可知, 暴雨径流前期 (径流产生后 400 min 内) TN、DN 和 NN

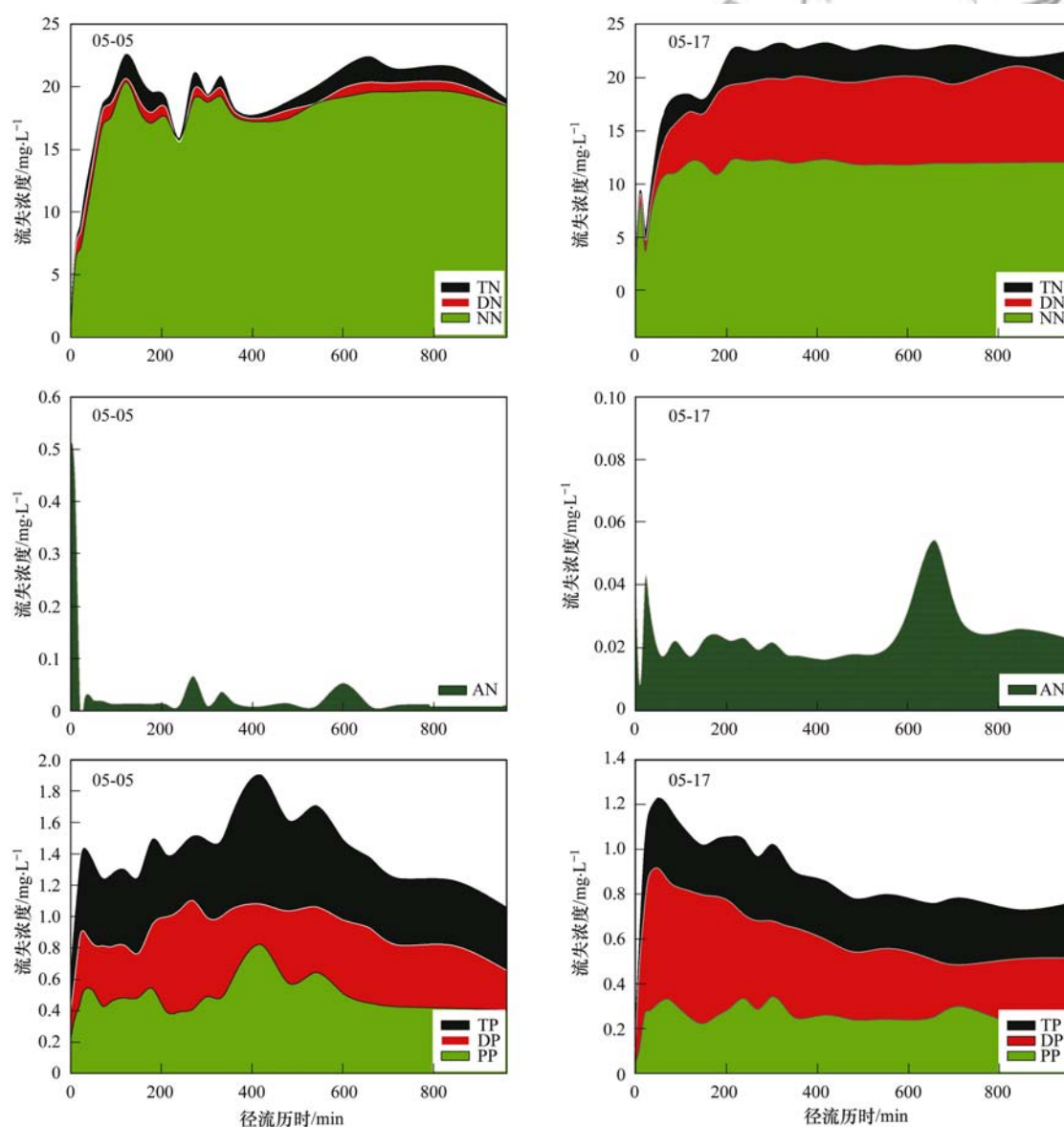


图 6 典型降雨事件径流养分各形态氮磷浓度变化

Fig. 6 Changes of runoff N and P concentrations during two typical rainfall events

浓度峰值为 22.57、20.68 和 20.41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度峰值出现后, 随着径流延长, TN、DN 和 NN 浓度趋于相对稳定; AN 在径流形成时浓度最高, 随着降雨推移而迅速降低且保持较低的平稳状态, 这与唐柄哲^[29]的研究结果相似. 本研究的典型暴雨事件距前期春季施肥时间较短, 且 API 值为 29.29 mm, 土壤处于偏湿润状态, 王辉等^[30]的研究发现土壤前期较高含水量能够快速溶解表层 NN, 导致 NN 在径流前期快速流失, 而本研究 NN 与 TN 存在显著的线性关系 ($\text{TN} = 0.9567 \times \text{NN} - 0.8723$, $r = 0.9906$), 各形态氮素流失浓度在短时间迅速增加达到峰值, 后期由于降雨量变化、淋溶和侧流补给, 浓度总体处于平稳波动, 但始终维持较高的浓度水平. 径流磷各形态浓度随时间变化趋势较为接近, DP 占径流 TP 的质量分数为 65%, 溶解态磷是顺坡垄沟坡面集水区磷素随径流流失的主要形态.

短历时大雨径流前期(径流产生后 150 min 内)各形态氮浓度差异不显著 ($df = 9$, $P > 0.05$), 当后期径流量小于 $1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, 主要是壤中流出流形成的地表径流, 以 NN 为主, 此阶段与长历时暴雨事件径流后期地表径流 TN、DN 平均浓度无显著性差异 ($df = 15$, $P > 0.05$); 各形态磷峰值出现的时间略晚于径流峰值, 这与于兴修等^[25]在沂蒙山区小流域典型次降雨各形态磷素浓度峰值早于径流峰值的研究结果有所差异.

两场典型降雨事件径流氮磷流失负荷较高, 长历时暴雨事件地表径流 TN 和 TP 流失负荷为 $5.32 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.44 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, NN 和 DP 流失负荷为 $4.95 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.28 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别占 TN 和 TP 的 95.69% 和 64.49%; 短历时大雨事件地表径流 TN 和 TP 流失负荷为 $0.78 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.06 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, NN 和 DP 流失负荷为 $0.52 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.05 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别占 TN 和 TP 的 88.08% 和 74.88%. NN 和 DP 是顺坡沟垄柑橘集水区径流氮磷的主要流失形态, 特别在长历时暴雨事件中氮素几乎全部以 NN 形态流失, 氮素流失主要形态与张林等^[31]在库首兰陵溪小流域观测结果基本一致.

2.4.3 初期冲刷效应

并不是任何降雨事件都能够出现“初期冲刷效应”^[32], 降雨特征、下垫面特征和流域面积等均可能对污染物“初期冲刷效应”产生影响^[33,34]. 大雨和暴雨事件各形态氮磷的 $M-V$ 曲线均位于 1:1 对角线的上方(图 7), 各形态氮流失主要集中在径流初期, 这与杨小林等^[24]的研究结果有所不同, 其发现在紫色土丘陵区农林复合小流域径流中后期 TN、DN 和 NN 流失负荷较高, 在相对不透水比例较高的集镇

小流域, TN 和 AN 主要集中在径流初期阶段; 张林等^[31]的研究发现在三峡库区农林复合小流域 AN 流失主要集中在暴雨径流前期, 而 TN 和 NN 在径流后期集中流失, 本研究对象柑橘园地表径流具有快速回落的特征, 加上表层土壤氮素随土壤水迅速通过垄沟沟壁侧渗出流补给地表径流, 能够实现氮素特别是 NN 的快速流失. 各形态磷流失也主要集中在径流初期, 这与徐亚娟等^[28]的研究发现在紫色土丘陵区小流域大雨及暴雨径流过程中, TP 初期径流流失负荷较高, “初期冲刷效应”明显相似.

使用式(4)计算出不同形态氮磷污染物 MFF_{20} 和 MFF_{30} (图 8), 可见各形态氮磷污染物的 MFF_n 均值都大于 1.0, 且 MFF_{20} 值均大于 MFF_{30} 值, 其中 TN、DN、NN、AN、TP、DP 和 PP 的 MFF_{20} 比 MFF_{30} 分别高 22.5%、20.4%、20.2%、35.4%、26.5%、28.7% 和 29.5%, 说明在顺坡沟垄集水区前 20% 地表径流比前 30% 地表径流更容易发生“初期冲刷效应”. MFF_{20} 的计算结果可知, 前期 20% 的地表径流输出了 58.0% 的 TN、57.0% 的 DN、58.5% 的 NN、79.0% 的 AN、62.0% 的 TP、63.5% 的 DP 和 60.0% 的 PP.

3 讨论

径流氮磷流失过程比较复杂, 降雨条件、农事活动、下垫面特征、地表覆盖和土壤理化性质等都会影响地表径流氮磷流失过程、特征^[35,36]. 三峡库区中部春季易出现集中性强降雨, 当与施肥同期时, 将可能造成土壤养分大量流失, 成为径流氮磷高输出期, 流失负荷甚至超过全年的 70%, 蒋锐等^[37]的研究发现紫色土丘陵区农耕地施肥后暴雨径流流失的 TN 负荷占年流失负荷的 58%. 施肥后首场暴雨径流氮磷平均浓度较高, 且氮磷流失以溶解态为主, 分别占总氮和总磷的 80% 和 60% 以上, 与顺坡种植能加快地表产汇流过程和径流冲刷能力^[38], 促进颗粒态氮磷流失迁移的结论^[39]有所不同, 本研究区规模化果园经营者因劳动力投入成本高, 在节省开支情况下一般仅对树盘周围进行人工除草作业, 其他部位杂草往往难以及时清除, 柑橘园常年保持较高的地表覆盖, 增加了地表粗糙度, 减少坡面侵蚀和降低地表径流颗粒态氮和磷的流失, 2018 年的观测发现本集水区全年度仅在 5 月 5 日暴雨事件中测流堰有悬移质泥沙输出(输沙模数仅为 $0.79 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$), 也印证了地表覆盖在降低径流冲刷中的作用.

强降雨时地表径流水平运动强于垂直淋溶, 对地表具有一定的冲刷效应, 相对容易出现“初期冲刷效应”^[28,40]. 虽然强降雨对地表污染物不仅具有

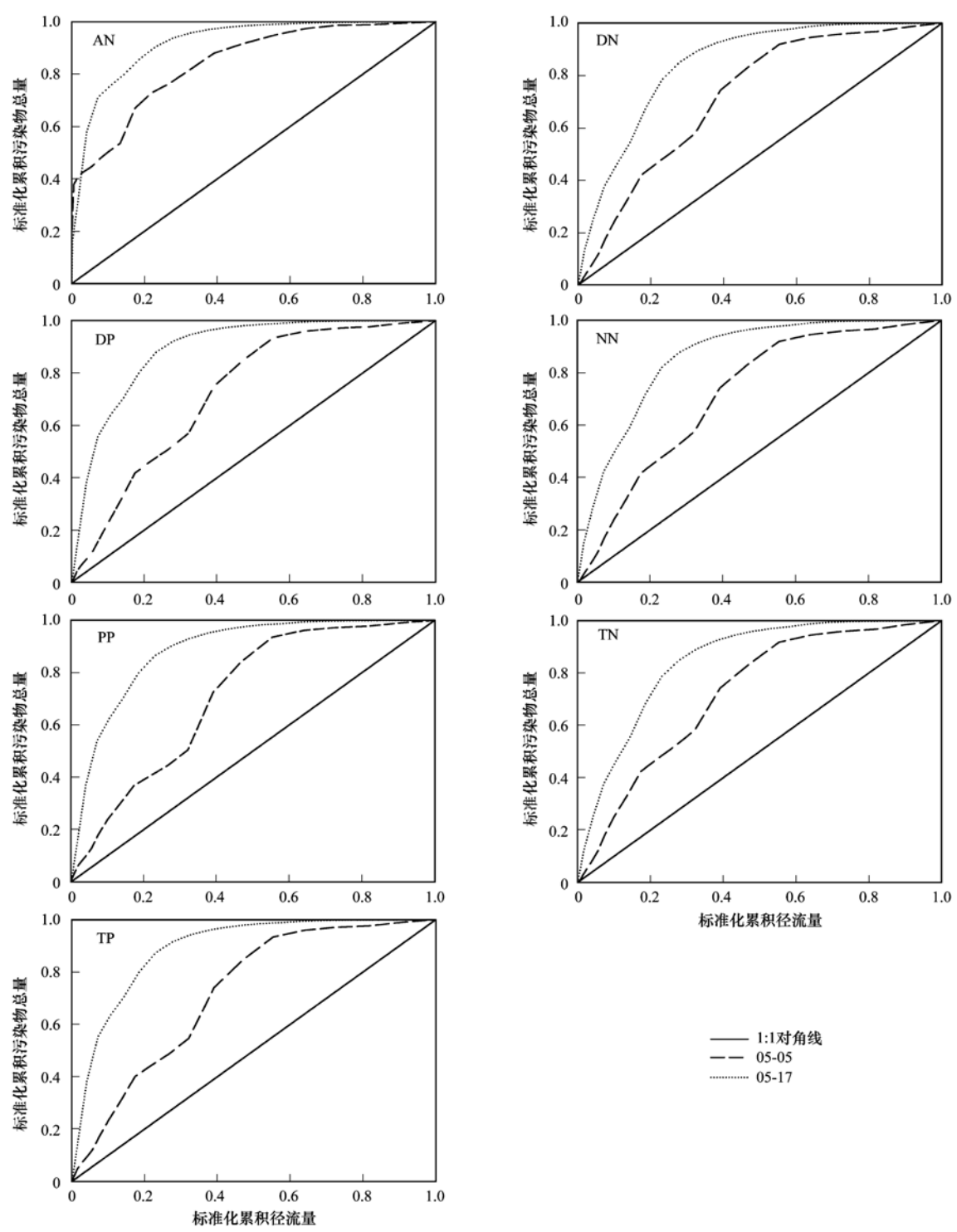


图7 典型降雨事件氮磷污染物 M-V 曲线

Fig. 7 The M-V curves of different pollutants during two typical rainfall events

冲刷作用,同样也具有稀释和溶解作用,但在较小集水面上,雨强越大,污染物“初期冲刷效应”也越显著^[41].本研究两场降雨虽然长历时暴雨降雨量大,然而雨强($I_{60}=11.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)却远低于短历时大雨($I_{60}=32.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$),短历时大雨“初期冲刷效应”更为明显.不同形态氮磷污染物表现出不同“初期冲刷效应”^[42],在顺坡沟垄柑橘集水区,AN是“初期冲刷效应”最强的污染物,其次为各形态磷和氮.

Zeng等^[43]的研究发现城市不透水下垫面AN、TP是径流初期阶段最主要的污染物,但在川中丘陵紫色土小流域径流中后期氮素通过壤中流迁移集中汇流,TN、DN和NN呈现“末期冲刷效应”^[24,44],这可能与降雨径流过程有关,顺坡沟垄集水区强降雨径流过程曲线与城市不透水下垫面较为相似,与具有“平缓退水”的紫色土小流域具有明显的差异.

柑橘园顺坡沟垄坡面构型以及粗放经营管理增

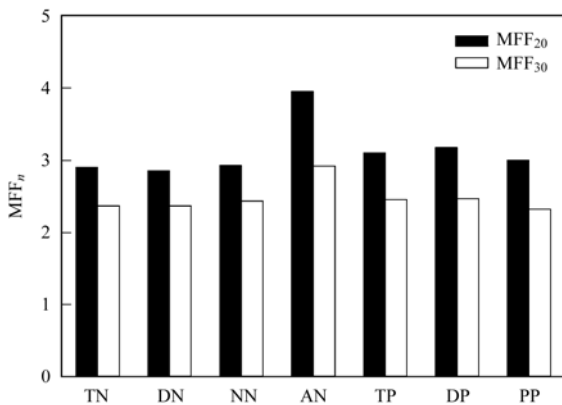


图8 不同形态氮磷污染物 MFF₂₀与 MFF₃₀

Fig. 8 MFF₂₀ and MFF₃₀ for the different N and P pollutants indices

加了面源氮磷流失浓度,地表径流 TN 和 TP 年 EMC 均值高达 $8.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于华玲玲等^[45]对三峡库区农林复合为主的古夫河小流域监测到的氮磷年均排放浓度(总氮年平均浓度 $2.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷年平均浓度 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 也超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类标准的 4.25 倍和 2.2 倍, 且远高于水体富营养化的临界浓度(总氮为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[46]. 特别是春季施肥后的首场暴雨径流中溶解态氮和磷 EMC 甚至高达 $17.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这些溶解态氮和磷在适宜水流流态、光照和水温等条件下能够促进藻类生长繁殖^[47, 48], 从而加剧了三峡库区入库支流水体的富营养化风险。

4 结论

(1) 规模化柑橘园顺坡沟垄的坡面构型加快了地表产汇流, 地表径流控制着集水区水文过程, 这与紫色土区传统自然坡面或农林复合小流域高比例透水下垫面以壤中流为主的汇流过程存在较大的差异. 通过果园林下生草, 增加沟壁和沟道粗糙度, 建立截水沟等措施降低产汇流速度。

(2) 柑橘集水区年径流氮和磷流失负荷高达 $13.43 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $1.26 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 远高于库首柑橘径流小区总氮和总磷流失负荷; 分别为 $1.68 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $0.08 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[49], 规模化顺坡沟垄柑橘园正成为三峡库区中部重要的面源污染输出地类, 将成为该区域种植业面源污染防控重点。

(3) 目前规模化柑橘园因管理粗放, 顺坡沟垄柑橘集水区地表径流 TN 和 TP 年 EMC 分别为 $8.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 特别是春季施肥后的强降雨地表径流氮磷流失浓度达到极值, 是规模化柑橘园面源氮磷控制的关键时期. 可以通过调整施肥时间、优化水肥管理(如采用水肥一体化)等措施降低

规模化柑橘园面源氮磷浓度, 减轻对三峡库区水环境的影响。

(4) 顺坡宽沟窄垄柑橘园集水区具有明显的“初期冲刷效应”, 暴雨和短历时大雨期间前期 20% 的地表径流输出了超过 50% 的污染物负荷. 因此, 在高强度降水期特别是施肥后的强降雨期, 可以利用规模化果园坡面配套的灌溉水塘或新建小型人工湿地等措施, 截留初期径流, 对于降低入库面源氮、磷污染物负荷具有重要的防控效果。

参考文献:

- [1] 徐江. 三峡库区柑桔产业发展的几点经验及启示[J]. 中国南方果树, 2010, 39(6): 78-80.
- [2] 朱波, 况福虹, 高美荣, 等. 土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 735-739.
Zhu B, Kuang F H, Gao M R, et al. Effects of soil thickness on productivity of sloping cropland of purple soil[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(6): 735-739.
- [3] 樊登星, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(2): 24-28.
Fan D X, Yu X X, Jia G D, et al. Characteristics of soil and water loss and its influencing factors on slope scale in rocky mountain area of Beijing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(2): 24-28.
- [4] 王辉, 王全九, 邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 39-44.
Wang H, Wang Q J, Shao M A. Laboratory experiments of soil nutrient transfer in the loess slope with surface runoff during simulated rainfall[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 39-44.
- [5] 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 等. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 67-82.
Wang Q J, Yang T, Liu Y L, et al. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 67-82.
- [6] Dong W C, Cui S, Fu Q, et al. Modelling soil solute release and transport in run-off on a loessial slope with and without surface stones[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(10): 1391-1400.
- [7] 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 2017[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017.
- [8] 朱波, 汪涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. 中国水土保持, 2010, (10): 34-36.
Zhu B, Wang T, Wang J C, et al. Source and load of non-point source nitrous and phosphorus pollution of typical small watersheds in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010, (10): 34-36.
- [9] 刘方谊, 夏颖, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 550-558.
Liu F Y, Xia Y, Huang M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from farmlands through surface runoff under different cropping patterns in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(6): 550-558.
- [10] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2151-

- 2158.
- Chen L, Liu D F, Song L X, *et al.* Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow-brown under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- [11] 何丙辉, 黄巍, 郭甜, 等. 不同施肥处理对紫色土坡耕地地表径流磷素流失的影响[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **29**(3): 42-47, 134-141.
- He B H, Huang W, Guo T, *et al.* Characteristics of N and P loss in the soil of purple sloping farmland at different fertilization levels[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, **29**(3): 42-47, 134-141.
- [12] 江才伦, 彭良志, 曹立, 等. 三峡库区紫色土坡地柑橘园不同耕作方式的水土流失研究[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(4): 26-31, 35.
- Wang C L, Peng L Z, Cao L, *et al.* Correlation between farming methods and soil erosion in the purple soil slope of citrus orchard in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(4): 26-31, 35.
- [13] 廖晓勇, 罗承德, 陈治谏, 等. 三峡库区坡地果园间植草篱的水土保持效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(1): 152-156.
- Liao X Y, Luo C D, Chen Z J, *et al.* Functions of soil and water conservation by grass hedgerow intercropping of slope orchard in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(1): 152-156.
- [14] 栾好安. 三峡库区橘园绿肥的生态效应及其对柑橘产量和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Luan H A. Effects of planting green manure on ecological environment, yield and quality of citrus in citrus orchard at Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [15] 刘月娇, 倪九派, 张洋, 等. 三峡库区新建柑橘园间作的截流保肥效果分析[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(1): 226-230.
- Liu Y J, Nie J P, Zhang Y, *et al.* Analysis of effects on water interception and nutrient conservation from citrus intercropping in hilly area of Chongqing city[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1): 226-230.
- [16] Wickham J D, Jones K B, Wade T G, *et al.* Uncertainty in scaling nutrient export coefficients[A]. In: Wu J G, Jones K B, Li H, *et al.* (Eds.). *Scaling And Uncertainty Analysis in Ecology*[M]. Dordrecht: Springer, 2006.
- [17] 汪楚乔, 陈柔君, 吴磊, 等. 宜兴典型村落不同下垫面降雨径流污染物排放特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(4): 632-638.
- Wang C Q, Chen R J, Wu L, *et al.* Release of pollutants with rainfall-triggered runoff from different underlying surfaces in villages typical of Yixing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(4): 632-638.
- [18] Hathaway J M, Hunt W F. Evaluation of first flush for indicator bacteria and total suspended solids in urban stormwater runoff[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, **217**(1-4): 135-147.
- [19] Ma Z B, Ni H G, Zeng H, *et al.* Function formula for first flush analysis in mixed watersheds: A comparison of power and polynomial methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **402**(3-4): 333-339.
- [20] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- Cao R X, Liu J, Deng K K, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- [21] Cookson W R, Rowarth J S, Cameron K C. The fate of autumn-, late winter- and spring-applied nitrogen fertilizer in a perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) seed crop on a silt loam soil in Canterbury, New Zealand [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, **84**(1): 67-77.
- [22] Perrone J, Enright P, Papineau F, *et al.* Overview of canadian watershed monitoring programs for improved water quality[J]. *Canadian Water Resources Journal*, 1998, **23**(2): 121-134.
- [23] Appels W M, Bogaart P W, van der Zee S E A T M. Surface runoff in flat terrain: how field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **534**: 493-504.
- [24] 杨小林, 朱波, 董玉龙, 等. 紫色土丘陵区小流域非点源氮迁移特征研究[J]. *水利学报*, 2013, **44**(3): 276-283.
- Yang X L, Zhu B, Dong Y L, *et al.* Transport processes of diffuse nitrogen in typical catchments in the hilly area of purple soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(3): 276-283.
- [25] 于兴修, 李振炜, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2644-2651.
- Yu X X, Li Z W, Liu Q J, *et al.* Output characteristics of rainfall runoff phosphorus pollution from a typical small watershed in Yimeng mountainous area [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2644-2651.
- [26] 边锋, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J]. *水土保持通报*, 2016, **36**(1): 11-16.
- Bian F, Zheng F L, Xu X M, *et al.* Comparison of soil erosion process between longitudinal ridge slope and non-ridge slope in mollisol region of northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, **36**(1): 11-16.
- [27] 王宇, 韩兴, 赵占军, 等. 垄沟秸秆覆盖对黑土顺坡耕地氮、磷养分阻控效果[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(1): 137-140.
- Wang Y, Han X, Zhao Z J, *et al.* Controlling effects of furrow straw mulching on N and P nutrient loss on black soil slope farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(1): 137-140.
- [28] 徐亚娟, 高扬, 朱宁华, 等. 紫色土流域次降雨条件下碳、磷非点源输出过程及其流失负荷[J]. *生态学报*, 2014, **34**(17): 5021-5029.
- Xu Y J, Gao Y, Zhu N H, *et al.* The dynamic process of carbon and phosphorus losses by runoff and associated loss load in a farmland-dominated watershed of purple soil region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(17): 5021-5029.
- [29] 唐柄哲. 不同施肥类型及耕作方式下紫色土坡耕地径流氮、磷流失研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- Tang B Z. Study on nitrogen and phosphorus loss process of purple soil under different fertility and tillage[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [30] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1571-1578.
- Wang H, Wang Q J, Shao M A. Effect of antecedent soil moisture on Nitrate-N and Phosphorus loss from loess slope-land and determination of optimal moisture values[J]. *Acta Scientiae*

- Circumstantiae, 2008, **28**(8): 1571-1578.
- [31] 张林, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 792-799.
- Zhang L, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus output in runoff and rainfall runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 792-799.
- [32] Hall M J, Ellis J B. Water quality problems of urban areas[J]. Geojournal, 1985, **11**(3): 265-275.
- [33] Taebi A, Droste R L. First flush pollution load of urban stormwater runoff[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, **3**(4): 301-309.
- [34] Lang M, Li P, Yan X Y. Runoff concentration and load of nitrogen and phosphorus from a residential area in an intensive agricultural watershed[J]. Science of the Total Environment, 2013, **458-460**: 238-245.
- [35] 冯源嵩, 林陶, 杨庆媛. 百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4537-4543.
- Feng Y S, Lin T, Yang Q Y. Temporal and spatial characteristic of nitrogen and phosphorus output in the suburb watershed around the Baihua lake[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4537-4543.
- [36] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1889-1897.
- Chen C L, Gao M, Ni J P, *et al.* Influence of spatial pattern of paddy field on the losses of nitrogen and phosphorus in Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1889-1897.
- [37] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1353-1358.
- Jiang R, Zhu B, Tang J L, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in typical rainfall-runoff events in a small watershed in hilly area of purple soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(4): 1353-1358.
- [38] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(2): 30-38.
- Ren Y Z, Zheng J K, Fu Y, *et al.* Characteristics of runoff and sediment yield in purple soil sloping farmland under different tillage patterns in Suining formation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(2): 30-38.
- [39] 刘宗岸, 杨京平, 杨正超, 等. 茗溪流域茶园不同种植模式下地表径流氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 29-32, 44.
- Liu Z A, Yang J P, Yang Z C, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses with surface runoff in tea field of Tiaoxi watershed under different planting patterns [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(2): 29-32, 44.
- [40] 李振伟, 吴迪, 于兴修, 等. 沂蒙山区典型小流域次暴雨的氮磷输出特征[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(12): 7269-7270, 7312.
- Li Z W, Wu D, Yu X X, *et al.* Output characteristics of non-point nitrogen and phosphorus from a typical small watershed in Yimeng mountainous area during a rainstorm [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, **40**(12): 7269-7270, 7312.
- [41] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [42] Stutter M I, Langan S J, Cooper R J. Spatial contributions of diffuse inputs and within-channel processes to the form of stream water phosphorus over storm events[J]. Journal of Hydrology, 2008, **350**(3-4): 203-214.
- [43] Zeng J J, Huang G R, Luo H W, *et al.* First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community[J]. Scientific Reports, 2019, **9**: 13865.
- [44] 汪涛, 朱波, 罗专溪, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(5): 962-970.
- Wang T, Zhu B, Luo Z X, *et al.* Nitrate loss from sloping cropland of purple soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(5): 962-970.
- [45] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 138-146.
- Hua L L, Li W C, Zhai L M, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu river small watershed of the three Georges reservoir area [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 138-146.
- [46] 罗固源, 卜发平, 许晓毅, 等. 三峡库区临江河回水区总氮和总磷的动态特征[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, **31**(5): 106-111.
- Luo G Y, Bu F P, Xu X Y, *et al.* Dynamics of TN and TP in the backwater region of the Linjiang River in the Three Gorge Reservoir [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2009, **31**(5): 106-111.
- [47] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3038-3045.
- Lei P, Zhang H, Shan B Q. Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3038-3045.
- [48] 高永霞, 朱广伟, 贺冉冉, 等. 天目湖水水质演变及富营养化状况研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 673-679.
- Gao Y X, Zhu G W, He R R, *et al.* Variation of water quality and trophic state of lake Tianmu, China [J]. Environmental Science, 2009, **30**(3): 673-679.
- [49] 曾立雄. 三峡库区兰陵溪小流域养分的分布、迁移与控制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- Zeng L X. Distribution, migration and control of nutrient in Lanlingxi watershed, Three Gorges Reservoir Area [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebirur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)