

目次

2020~2021年新冠疫情期间南京市PM _{2.5} 化学组成与来源变化特征	华楠, 尚玥, 谢鸣捷	(593)
郑州市大气PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及来源解析	张俊美, 陈仕霖, 王乾恒, 姚森, 杨书中	(602)
太原市PM _{2.5} 浓度的气象特征影响分析及预报	李明明, 王雁, 闫世明, 陈玲, 韩照宇	(611)
黄石市大气PM _{2.5} 中碳氮组分的污染特征及来源解析	王赐晔, 邓萌杰, 陈雨, 王祖武, 成海容	(626)
长三角地区典型PM _{2.5} 污染过程和跨区域传输对宁波污染贡献评估模拟	潘勇, 郑捷, 肖航	(634)
长三角地区2017~2020年非极性有机化合物组成特征及来源	吴长流, 曹芳, 贾小芳, 张煜烟, 谢添, 任磊, 章炎麟	(646)
北京城区不同组分PM _{2.5} 散射特性及来源分析	曹阳, 王陈婧, 景宽, 王琴, 刘保献, 安欣欣	(658)
排放和气象对疫情前后武汉不同类型点位大气污染物的影响	熊江荷, 孔少飞, 郑煌, 肖婉, 刘傲, 朱明铭	(670)
2019~2022年成都市春节期间烟花爆竹燃放对空气质量影响分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅	(680)
北京市城区秋季O ₃ 污染过程VOCs污染特征及反应活性	孙雪松, 张蕊, 王裕, 袁滕	(691)
郑州市多站点大气VOCs变化特征及源解析	王冰, 尹沙沙, 黄爱枝, 张栋, 卢轩, 张瑞芹	(699)
加油站油气处理装置VOCs化学组成及二次污染生成贡献	胡玮, 黄玉虎, 梁文俊, 刘明宇, 杨天昇, 任碧琪	(709)
长三角地区2017~2020年臭氧浓度时空分布与人群健康效益评估	程育恺, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 安静宇, 黄成	(719)
典型农药制造企业废气污染物排放特征及风险评估	翟增秀, 肖成德, 孟洁, 王静, 杨伟华, 李伟芳	(730)
黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素	涂春霖, 杨润柏, 马一奇, 令狐昌卫, 赵瑞刚, 和成忠	(740)
高寒干旱区地表水与地下水水化学特征及转换关系:以大通河流域为例	易冰, 刘景涛, 吕晓立, 何伟, 朱亮, 张玉玺, 杨明楠	(752)
黄土高原沟壑区典型城郊流域地表水硝酸盐来源示踪	李欢玮, 赵广举, 李明, 穆兴民, 田鹏	(761)
长江中上游表层沉积物重金属形态分布特征及风险评价	张志永, 万成炎, 胡红青, 杨中华, 袁玉洁, 朱稳	(770)
鄱阳湖典型湿地土壤-植物系统重金属沿湖向富集及迁移转换特征分析	曹欢, 张华, 丁明军, 王鹏, 黄高翔, 彭翔, 秦瑗, 杨越, 邹天娥, 徐欢, 黄鹏	(781)
石期河南南子流域地下水重金属来源解析及健康风险评价	付蓉洁, 辛存林, 于爽, 李笑	(796)
河北省某大型焦化厂地下水中多环芳烃的污染特点、源解析及生态风险评价	张千千, 邢锦兵, 王慧玮, 刘景涛, 陈玺	(807)
鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析	田智慧, 尹传鑫, 王晓蕾	(816)
底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响	张建华, 殷鹏, 张雷, 尹洪斌	(828)
金沙江底栖真核微生物地理分布特征及生态学机制	崔戈, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 张波, 吴程	(839)
西安市景观湖泊水体细菌群落结构分析与代谢功能预测	王敏, 张雨桐, 黄晨, 任杰辉, 万甜, 程文	(847)
三峡水库蓄水对支流浮游植物功能群的影响及与资源利用效率的关系	赵璐, 欧阳添, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴	(857)
施肥和秸秆覆盖对成都平原区农田氮和磷流失的影响	王宏, 姚莉, 张奇, 林超文, 刘海涛, 罗付香, 王谢, 杨璇, 翟丽梅	(868)
O ₃ -SBBR联合工艺深度处理印染工业园生化尾水的效能和机制	罗新浩, 胡勇有, 陈元彩, 程建华, 姚颖, 钱原铭	(878)
低温下磁性载体MBBR系统微生物群落特征和功能预测分析	刘超, 李奇, 宋子洋, 胡鹏, 敬双怡, 李卫平	(889)
基于空间尺度效应的西南地区植被NPP影响因子探测	徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 戴强玉, 李欣怡	(900)
基于MGWR的黄河流域土壤有机碳密度和影响因素分析	南富森, 李宗省, 张小平, 崔乔, 李玉辰, 熊雪婷, 杨雪杰, 杨安乐	(912)
土壤功能与环境因素在海拔梯度上的耦合关系:以梅里雪山为例	赵冬辉, 申聪聪, 张志明, 刘四义, 陈保冬, 孙东丽, 王继琛, 葛源	(924)
洞庭湖南缘农田土壤重金属特征及源解析	肖凯琦, 许安, 郭军, 李毅, 卢永兴, 邢新丽, 董好刚	(932)
南京城郊不同土地利用类型农业土壤多环芳烃污染特征及风险评价	张秀秀, 朱昌达, 王飞, 魏宇宸, 潘剑君	(944)
福州滨海地区菜地和果园土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征	侯宁, 黑杰, 金强, 刘旭阳, 黄佳芳, 林少颖, 黄庄, 谢杨阳, 王维奇	(954)
铁修饰生物炭的制备及在砷污染土壤修复中的应用	韦婧, 刘映吟, 涂晨, 邓绍坡, 郝丹丹, 校亮, 毛萌	(965)
锰铝双氧化物改性生物炭减缓土壤重金属对黑麦草的毒性作用	林鹏程, 尹华, 刘晓菲, 刘航, 晏才雅, 戚鑫	(975)
田间施用锌肥对小麦籽粒镉累积的影响及施用风险	牛硕, 王天齐, 杨阳, 许群, 王美娥, 陈卫平	(984)
不同性质硅肥影响土壤生物有效态镉的主要元素	黄蕊, 魏维, 谢运河, 柳赛花, 陈豪宇, 彭华, 纪雄辉	(991)
不同外源硒在土壤中的有效性变化及其对小麦硒累积的影响	魏玮, 李平, 周志高, 王兴祥, 丁昌峰	(1003)
pH、钙和磷对砷在水稻土中溶解度的影响及表面络合机制解析	邓迎璇, 翁莉萍, 朱桂芬, 李永涛	(1012)
土壤中磺胺二甲嘧啶赋存对水稻生长的影响	章威, 王沛芳, 金秋彤, 胡斌	(1021)
江苏产区大蒜中邻苯二甲酸酯含量检测及溯源分析	王亚, 肖霞霞, 杨云, 冯发运, 宋立晓, 陈小龙, 孙星, 李勇, 曾晓萍, 马金骏, 余向阳	(1029)
河南省部分市售农用化肥中溶解性离子浓度及同位素组成	张东, 薛天, 秦勇, 刘运涛, 陈昊, 高振朋, 黄兴宇, 麻冰涓	(1040)
控氧热解过程中污染稻草生物炭的组分特性及其重金属累积特征	徐智, 郭朝晖, 徐锐, 肖细元, 谢慧民, 胡玉莲	(1051)
长期施肥对农牧交错带旱地土壤微生物多样性及群落结构的影响	高日平, 段玉, 张君, 任永峰, 梁俊梅, 景宇鹏, 赵沛义	(1063)
化肥减量配施有机肥对柠檬根际/非根际土壤细菌群落结构的影响	邓正昕, 高明, 王莹燕, 谢永红, 熊子怡, 王子芳	(1074)
秸秆还田下不同追氮量对麦田土壤真菌群落结构和生态网络的影响	靳海洋, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 岳俊芹, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰	(1085)
粉垄耕作对耕地土壤细菌群落多样性及微生物网络结构的影响	夏皖豫, 陈彦云	(1095)
基于宏基因组学揭示咸水滴灌对棉田土壤微生物的影响	杜思焱, 陈静, 刘佳炜, 郭晓雯, 闵伟	(1104)
双碳约束下煤化工行业节能降碳减排协同	张鸿宇, 王媛, 郝成亮, 卢亚灵, 金玲, 连超, 蒋洪强, 吴立新, 曹东	(1120)
“双碳”目标下:中国CCUS发展现状、存在问题及建议	赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 王小龙	(1128)
粉煤灰用于碳捕集、利用及封存的研究进展	姜龙, 何川, 李金晶	(1139)
中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力	杨传文, 邢帆, 朱建康, 李荣华, 张增强	(1149)
污水处理过程N ₂ O排放:过程机制与控制策略	郝晓地, 杨振理, 于文波, 刘然彬	(1163)
市政污水厂典型A ² O工艺低碳运行的系统性评估	孟红旗, 李红霞, 赵爱平, 原建光, 张东	(1174)
城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较	李哲坤, 张立秋, 杜子文, 封莉, 刘永泽	(1181)
基于群决策和层次分析法的长江中游地区农村污水处理技术评价及优选	刘璐, 张文强, 胡飞超, 庞阔, 郭亚丽, 张婷, 李敏	(1191)
《环境科学》征订启事(815)	《环境科学》征稿简则(846)	信息(856, 899, 1028)

施肥和秸秆覆盖对成都平原区农田氮和磷流失的影响

王宏¹, 姚莉¹, 张奇¹, 林超文^{1*}, 刘海涛¹, 罗付香¹, 王谢¹, 杨璇², 翟丽梅³

(1. 四川省农业科学院农业资源与环境研究所, 成都 610066; 2. 四川省耕地质量与肥料工作总站, 成都 610045; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:近年来由于氮、磷肥料过量施用造成了严重的污染问题和富营养化现象,而且这种污染问题在稻田区域更加明显.因此,采用田间小区试验方法,通过对2018年和2019年田间实地监测,在自然降雨条件下,对成都平原区不同施肥量以及秸秆覆盖对湿沉降和地表径流氮和磷的影响进行研究.结果表明,湿沉降氮养分主要以铵态氮存在,磷养分主要以可溶性总磷存在,氮和磷沉降主要发生在6~8月这3个月.地表径流量与降雨量呈正比,而地表径流氮养分浓度与降雨量呈反比.在2018年和2019年,增氮处理TR3总氮流失量分别为4.75 kg·hm⁻²和2.68 kg·hm⁻²,比常规处理TR1流失量增加26.73%和43.32%,是流失量最高的处理;减氮处理TR4总氮流失量分别为2.91 kg·hm⁻²和1.37 kg·hm⁻²,比常规处理TR1流失量降低了36.33%和26.74%,是流失量最小的处理.优化施肥处理TR2和减氮处理TR4能够有效降低地表径流磷素的流失,集中高强度降雨会降低地表径流总磷中颗粒态磷的含量.氮养分的流失主要集中于7~9月这3个月,而磷养分的流失主要集中在7月之前.因此,成都平原区,通过在施肥初期和雨季使用平衡施肥和减肥措施控制氮和磷的流失,能够有效地降低成都平原地区农田面源污染现象.

关键词:成都平原; 湿沉降; 地表径流; 养分流失; 面源污染

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)02-0868-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203284

Effects of Fertilization and Straw Mulching on Nitrogen and Phosphorus Loss in Chengdu Plain

WANG Hong¹, YAO Li¹, ZHANG Qi¹, LIN Chao-wen^{1*}, LIU Hai-tao¹, LUO Fu-xiang¹, WANG Xie¹, YANG Xuan², ZHAI Li-mei³

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2. General Station of Arable Soil Quality and Fertilizer of Sichuan Province, Chengdu 610045, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, the excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers has caused serious pollution and eutrophication, especially in paddy fields. Accordingly, a two-year (2018-2019) study was conducted at a rice paddy field under different fertilizer application rates and straw mulching in Chengdu Plain. N and P losses through the rainfall and surface runoff in the paddy field were measured under natural rainfall conditions. The results showed that nitrogen mainly existed in the form of ammonium nitrogen, and phosphorus mainly existed in the form of soluble phosphorus in the wet deposition. The wet deposition of nitrogen and phosphorus mainly occurred in June, July, and August. Surface runoff was positively correlated with rainfall, whereas surface runoff nitrogen concentration was inversely correlated with rainfall. The highest runoff losses of TN (4.75 kg·hm⁻² in 2018 and 2.68 kg·hm⁻² in 2019) were produced by TR3 practice and were 26.73% and 43.32% higher than that of the conventional practice. TN runoff loss was significantly decreased by reducing the rate of N fertilizer ($P < 0.05$). Compared with that in the conventional practice TR1, TR4 reduced the N loss by 36.33% in 2018 and 26.74% in 2019, respectively. Optimized fertilizer TR2 and nitrogen reduction practice TR4 decreased P loss from surface runoff, and high intensity rainfall could reduce the content of granular phosphorus in surface runoff. The surface runoff occurring in July, August, and September contributed mostly to the total N loss, whereas the loss of total P mainly occurred before July. Consequently, the use of balanced fertilizer and decreased nitrogen fertilization amount might be effective strategies to attenuate non-point source pollution in the Chengdu Plain in the paddy fields.

Key words: Chengdu Plain; wet deposition; surface runoff; nutrient loss; non-point source pollution

农业面源污染的发生与农业生产活动息息相关,而农田氮磷流失是产生农业面源污染的主要途径之一.据调查,我国氮肥利用率为30%~35%,磷肥利用率仅为10%~20%,每年农田的氮肥损失率在33.3%~73.6%^[1].土壤中氮和磷的流失会受到施肥强度、施肥时间和施肥方式等的影响^[2].大气氮和磷沉降是地球化学循环的重要一部分,与肥料施用、机动车尾气排放以及化石燃料的燃烧等有密切的联系^[3,4].氮和磷等营养元素经大气湿沉降一方面可以补充农田生态系统氮磷需求,另一方面对水体富营养化会产生较大影响^[5,6].大气湿沉降也

是引起面源污染来源之一,但是目前在成都平原地区将大气湿沉降与面源污染相结合的研究较少,更多的是注重时空变异对大气湿沉降的影响.

土壤中的氮和磷养分随着地表径流由陆地向水

收稿日期: 2022-03-30; 修订日期: 2022-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800605); 四川省科技计划项目(20ZDYF1459); 农业资源与环境科技攻关路径研究项目(2022ZZCX017); 四川省科技成果中试熟化与示范转化工程项目(2021ZSSF); 省财政创新能力提升工程专项青年基金项目(2018QNJJ-018); 四川省农业科学院现代农业学科建设推进工程项目(2021XKJS014)

作者简介: 王宏(1988~),男,博士研究生,主要研究方向为农田面源污染防治、土壤污染与修复, E-mail: wang.hongde163@163.com
* 通信作者, E-mail: lcw-11@163.com

体迁移,这不仅造成肥料资源的损失和浪费,而且会加速附近水体富营养化的产生. 焦少俊等^[7]研究太湖地区整个水稻生长季稻田氮和磷的流失总量分别达 38.80 kg·hm⁻²和 0.95 kg·hm⁻²,且主要以田面水径流流失为主;氮素主要以水溶性的铵态氮流失,而磷素主要以颗粒态流失. 因此,从污染的源头入手,减少农田氮和磷的排放和控制水体污染,是控制农田面源污染关键. Cui 等^[8]通过化肥减量和有机肥替代方式,发现相比于传统的施肥措施而言,能够显著地降低氮的流失. 秸秆还田也是一种有效降低农田地表径流氮磷流失的方式^[9~12]. 例如,朱利群等^[10]研究发现秸秆直接还田会使稻田全氮流失减少 20%~28.9%,全磷流失减少 10.3%~22%. Xia 等^[13]在作物收获之后将秸秆全量还田覆盖,搭配氮肥控释,能够将稻田中总氮随地表径流流失降低 21%. 同样,陈琨等^[14]在成都平原区研究地表径流中氮磷的流失发现,随着氮肥用量的增加,氮的流失量也增加,而秸秆覆盖氮流失量最小. 因此,为更好地做好成都平原面源污染防控治理,有必要研究评估氮肥用量和秸秆覆盖对地表径流养分流失的影响.

成都平原水系密布,水文条件复杂,农业生产流

失的氮和磷进入水体的速度快,并且难以控制,对当地及下游水体生态环境影响大. 田若衡等^[15]系统评估了四川省农业化肥过量使用对生态环境的潜在风险危害,表明成都平原经济区氮肥和磷肥的环境风险处于中等风险并成片聚集特征. 同花村位于成都平原区,是典型的稻田种植地区. 因此,本文以同花村稻田为研究对象,通过试验小区连续监测的方法查明湿沉降氮和磷沉降和地表径流氮和磷流失情况,以期在成都平原区农田面源污染治理提供决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于广汉市向阳镇同花村,地理位置为东经 104°06'55",北纬 30°33'42",海拔为 478 m. 气候特征为中亚热带湿润气候,大陆性季风气候显著. 全年四季分明,年平均气温为 16.7℃,日照时数多年平均为 1 130.7 h,年总降雨量历年平均值为 771.2 mm. 该地土壤为水稻土土类、淹育型水稻土亚类、潮土田土属和灰棕潮二泥沙田土种,肥力均匀,种植水平高. 2018 年试验前 0~20 cm 土层土壤的基本理化性状见表 1.

表 1 供试土壤(0~20 cm)基本理化性状

Table 1 Physico-chemical properties of the experimental soil at the depth of 0-20 cm

项目	pH	ω(有机质) /g·kg ⁻¹	ω(全氮) /g·kg ⁻¹	ω(全磷) /g·kg ⁻¹	ω(全钾) /g·kg ⁻¹	ω(铵态氮) /mg·kg ⁻¹	ω(硝态氮) /mg·kg ⁻¹	ω(有效磷) /mg·kg ⁻¹
参数	7.17	29.01	1.73	0.77	14.75	4.06	13.66	14.84

1.2 试验设计

本试验分别在 2018 年和 2019 年连续两个年度进行,试验地点在国家重点面源污染监测点广汉市向阳镇同花村. 本试验共设置 5 个处理,分别为常规施肥处理 TR1(氮肥 180 kg·hm⁻²、磷肥 75 kg·hm⁻²)、优化施肥处理 TR2(氮肥 150 kg·hm⁻²、磷肥 75 kg·hm⁻²、钾肥 75 kg·hm⁻²)、增氮处理 TR3(氮肥 225 kg·hm⁻²、磷肥 75 kg·hm⁻²)、减氮处理 TR4(氮肥 135 kg·hm⁻²、磷肥 75 kg·hm⁻²)和秸秆覆盖处理 TR5(氮肥 150 kg·hm⁻²、磷肥 75 kg·hm⁻²、钾肥 75 kg·hm⁻²;上一季作物收获后全量覆盖). 水稻选用的品种为当地主推品种晶两优 534. 2018 年水稻在 5 月 30 日移栽,在 9 月 7 号收获;2019 年水稻在 5 月 23 日移栽,在 9 月 10 日收获. 其余田间管理措施都相同.

1.3 降雨和径流样品的采集与测定

雨量器放置在试验田旁或距离试验田较近的地方. 前 1 d 降水之后,在次日 09:00 监测降雨量,即前 1 d 09:00 至监测当日 09:00 为 24 h 降雨量. 单

次降雨量超过 5 mm 时,必须单独取降雨水样;单次降雨 5 mm 以下时,取降雨水样组成混合样. 测量降雨量之后,摇匀雨量器内降水,进行样品采集,样品采集之后立即送检或冰冻保存. 每次产生径流记载各径流池水面高度,计算径流量. 在记录径流后采集径流水样. 采样前,先用清洁工具充分搅匀径流池中的径流水,然后利用清洁容器在径流池的不同部位和不同深度多点采样(至少 8 点),置于清洁的塑料桶或塑料盆中. 用清洁量筒从塑料桶(盆)中准确取径流水样,装到预先编好号的矿泉水瓶中,立即进行分析或冷冻保存.

降雨和径流水样测试指标包括总氮、可溶性总氮、硝态氮、铵态氮、总磷和可溶性总磷. 总氮和可溶性总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定(GB 11894-89),硝态氮使用酚二磺酸分光光度法测定(GB 7480-87),铵态氮使用纳氏试剂分光光度法测定(GB 7479-87). 总磷、可溶性总磷采用钼酸铵分光光度法测定(GB 11893-89),总磷与可溶性总磷的差值为颗粒态磷^[16].

1.4 氮和磷流失量计算

氮和磷流失量计算如公式:

$$P = Q_i \times c_i$$

式中, P 为监测时段地表径流氮和磷的排放量(kg), Q_i 为监测时段地表径流量(m^3), c_i 为农田检测水质氮和磷养分浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

1.5 数据处理及分析

使用 Microsoft Excel 2007 软件对数据进行统计和制图,采用 SPSS 19 进行显著性分析,其显著水平为 $P < 0.05$. 图中不同的小写字母表示处理间存在显著性差异,通过 LSD < 0.05 检验.

2 结果与分析

2.1 降雨量及氮、磷沉降变化特征

图 1 是 2018 年和 2019 年降雨分布及湿沉降氮和磷养分浓度变化. 2018 年全年降雨量为 1 233.1 mm,降雨主要集中在 7~9 月这 3 个月,占全年降雨量的 75.18%,而且 7 月的降雨量最高;2019 年全年

的降雨量为 835.9 mm,同样也是集中在 7~9 月这 3 个月,占全年降雨量的 52.53%,分布相对比较均匀. 2018 年和 2019 年湿沉降中总氮、可溶性总氮、硝态氮和铵态氮基本上在初春的 3 月和 4 月降雨量较少的时候浓度最大,随着后期降雨量的增加,不同氮成分的浓度逐渐减少. 这一结果从降雨量 5 mm 以下的混合样中也可以得到,降雨量比较小时,氮和磷养分的浓度都比较大. 而且在 4~7 月的时候,铵态氮浓度始终高于硝态氮浓度,特别是在 2019 年,现象更加明显. 对于磷养分而言,当降雨量小的时候,总磷、可溶性总磷和颗粒态磷的浓度比较大;当降雨量大的时候,总磷、可溶性总磷和颗粒态磷的浓度就会减小. 2018 年,总磷、可溶性总磷和颗粒态磷最大浓度出现在 4 月,最大浓度分别为 0.78、0.63 和 0.14 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;而当 7 月出现最大降雨量时,总磷、可溶性总磷和颗粒态磷浓度仅为 0.11、0.08 和 0.03 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 可以看出,湿沉降中氮和磷养分沉降浓度都比较大,特别是在初春 3 月和 4 月.

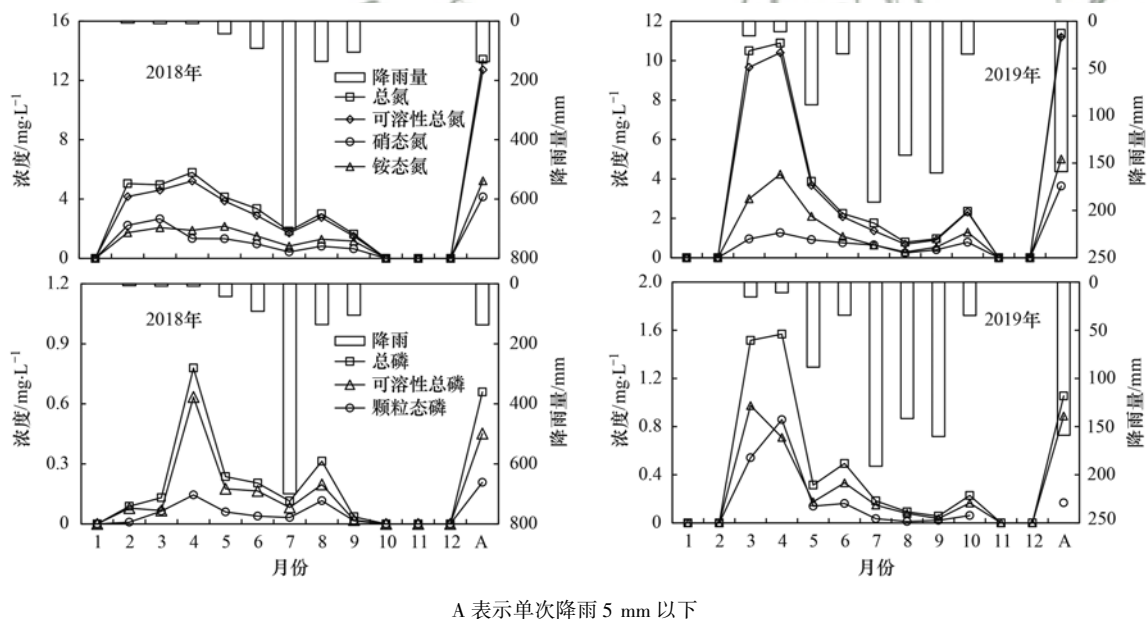


图 1 2018 年和 2019 年同花村降雨量及氮和磷养分浓度变化

Fig. 1 Annual rainfall and nutrient concentrations in rainfall in Tonghua village in 2018 and 2019

表 2 是 2018 年和 2019 年同花村湿沉降中不同氮和磷成分的含量. 2018 年全年总氮沉降量为 43.03 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 7~9 月这 3 个月氮沉降合计为 18.66 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占全年总氮沉降的比例为 43.36%. 2019 年全年总氮沉降量为 31.95 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 7~9 月这 3 个月氮沉降合计为 6.02 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占全年总氮沉降的比例为 18.86%, 大部分的总氮随 5 mm 以下降雨沉降. 2018 年和 2019 年可溶性总氮的沉降量分别为 39.95 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 30.22 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占总氮的比例为 92.85% 和 94.58%, 说明总氮基本上都是以可溶性总氮沉降

为主. 2018 年可溶性总氮中硝态氮和铵态氮沉降分别为 12.41 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 18.60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占可溶性总氮的沉降量为 31.07% 和 46.55%; 2019 年可溶性总氮中硝态氮和铵态氮沉降分别为 9.64 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 14.07 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占可溶性总氮的沉降量为 31.90% 和 46.56%, 说明可溶性总氮的沉降主要形式为铵态氮. 在 2018 年, 总磷沉降量最大出现在 6~8 月这 3 个月, 沉降量分别为 0.19、0.80 和 0.43 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占全年总沉降量的 55.88%; 2018 年全年总磷、可溶性总磷和颗粒态磷沉降量分别为 2.53、1.77 和 0.76 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可

溶性总磷为总磷沉降的主要形式,占比为69.80%.2019年,总磷沉降比较分散,沉降量最大出现在3、5和7月这3个月,沉降量分别为0.23、0.28和0.35 kg·hm⁻²,占全年总沉降量的27.06%,大部分的总磷随5 mm以下降雨发生沉降.2019年全年总磷、可溶性总磷和颗粒态磷沉

降量分别为3.18、2.42和0.76 kg·hm⁻²,可溶性总磷为总磷沉降的主要形式,占比为76.04%.可见,湿沉降总氮养分主要是以铵态氮的形式沉降,而且主要集中在7~9月这3个月;而湿沉降磷养分占比最高的为可溶性总磷,主要分布在7月之前.

表2 2018年和2019年同花村湿沉降氮和磷养分沉降量分布变化¹⁾/kg·hm⁻²

月份	总氮		可溶性总氮		硝态氮		铵态氮		总磷		可溶性总磷		颗粒态磷	
	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年
	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.32	0.00	0.26	0.00	0.14	0.00	0.11	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.40	1.62	0.37	1.49	0.21	0.15	0.17	0.46	0.01	0.23	0.01	0.15	0.01	0.08
4	0.45	1.20	0.41	1.14	0.10	0.14	0.15	0.47	0.06	0.17	0.05	0.08	0.01	0.09
5	1.75	3.42	1.64	3.24	0.56	0.81	0.91	1.85	0.10	0.28	0.07	0.15	0.03	0.12
6	3.08	0.77	2.65	0.72	0.89	0.26	1.38	0.37	0.19	0.17	0.15	0.11	0.04	0.06
7	12.86	3.37	11.90	2.61	3.03	1.23	5.76	1.23	0.80	0.35	0.57	0.28	0.23	0.07
8	4.09	1.12	3.75	0.98	1.11	0.34	1.75	0.41	0.43	0.13	0.27	0.11	0.16	0.02
9	1.71	1.54	1.57	1.44	0.67	0.65	1.22	0.86	0.04	0.09	0.02	0.06	0.02	0.03
10	0.00	0.81	0.00	0.80	0.00	0.27	0.00	0.45	0.00	0.08	0.00	0.06	0.00	0.02
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A	18.38	18.10	17.41	17.79	5.68	5.78	7.16	7.96	0.90	1.68	0.62	1.41	0.28	0.27
合计	43.03	31.95	39.95	30.22	12.41	9.64	18.60	14.07	2.53	3.18	1.77	2.42	0.76	0.76

1) A表示单次降雨5 mm以下

2.2 农田地表径流量及氮流失量

图2是2018年和2019年同花村地表径流量和氮养分的变化.从中可以看出,2018年和2019年初期降雨量比较低的时候,稻田比较干旱,径流量产流比较少.但是,随着降雨量的增加,地表径流产流量也会增加,而且降雨量越大,地表径流产流量增加越快,而当降雨量再次减少的时候,地表径流的产流量也随之下降.2018年在不同降雨时期,不同处理地表径流流失量相差不大,平均流失量为483.8 mm;2019年在不同降雨时期,TR4地表径流流失量是所有处理中最低的,全年流失量为171.7 mm,TR2和TR3在所有处理中地表径流流失量都比较高,全年流失量分别为221.3 mm和219.6 mm.此外,从图2中可以看出,地表径流氮养分流失浓度与降雨量呈反比.其中,2018年氮养分浓度随降雨量的变化为先增加后降低的趋势;而2019年氮养分随降雨量的变化为先降低后增加再降低的趋势,总氮、可溶性总氮、硝态氮和铵态氮这4种氮养分的变化趋势是一致的.2018年氮养分流失浓度最大发生在7月9日,总氮、可溶性总氮、硝态氮和铵态氮这4种氮养分流失浓度最大的处理为TR2,分别为2.46、2.07、1.91和1.54 mg·L⁻¹,流失浓度最小的处理为TR4或者TR5;2019年氮养分流失浓度最大发生在6月22日,总氮、可溶性总氮、硝态氮和铵态

氮这4种氮养分流失浓度最大的处理为TR2,分别为3.17、2.93、2.49和0.21 mg·L⁻¹,流失浓度最小的处理为TR4,分别为1.28、0.94、0.67和0.11 mg·L⁻¹.氮养分的流失浓度都比较高,对附近水体面源污染造成严重威胁.

图3是2018年和2019年地表径流氮养分随地表径流流失量.从中可以看出,2018年共产生两次地表径流,氮养分随地表径流流失主要发生在7月;2019年共产生4次地表径流,氮养分随地表径流流失比较分散,其中8月流失较多.2018年和2019年,总氮、可溶性总氮和硝态氮随地表径流流失量最多的处理为TR3,流失量最小的处理为TR4,而且TR4处理流失量显著低于TR3处理;而铵态氮2018年全年流失量最多的处理为TR2,流失量最少的处理为TR5,2019年全年流失量最多的处理为TR3,流失量最小的处理为TR4.2018年不同处理总氮随地表径流流失量范围为2.91~4.75 kg·hm⁻²,可溶性总氮为总氮的主要流失形式,占比为44.17%~70.13%;2019年不同处理总氮随地表径流流失量为1.37~2.68 kg·hm⁻²,可溶性总氮占总氮的流出比例为76.44%~89.64%.随地表径流流失的可溶性总氮中硝态氮为主要的流失形式,2018年和2019年流失比例分别为51.20%~82.42%和65.57%~81.62%.

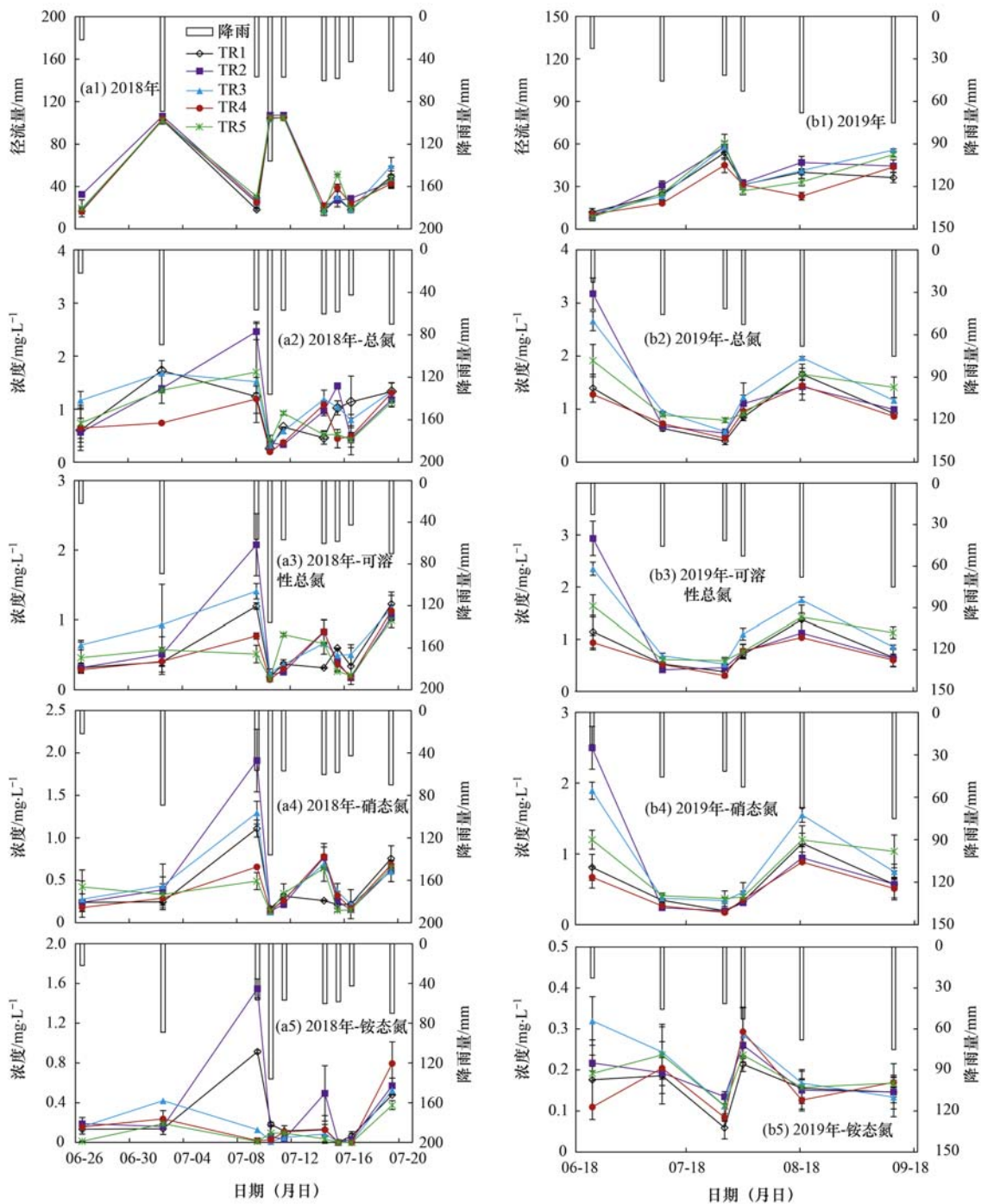


图2 2018年和2019年同花村地表径流氮养分流失浓度

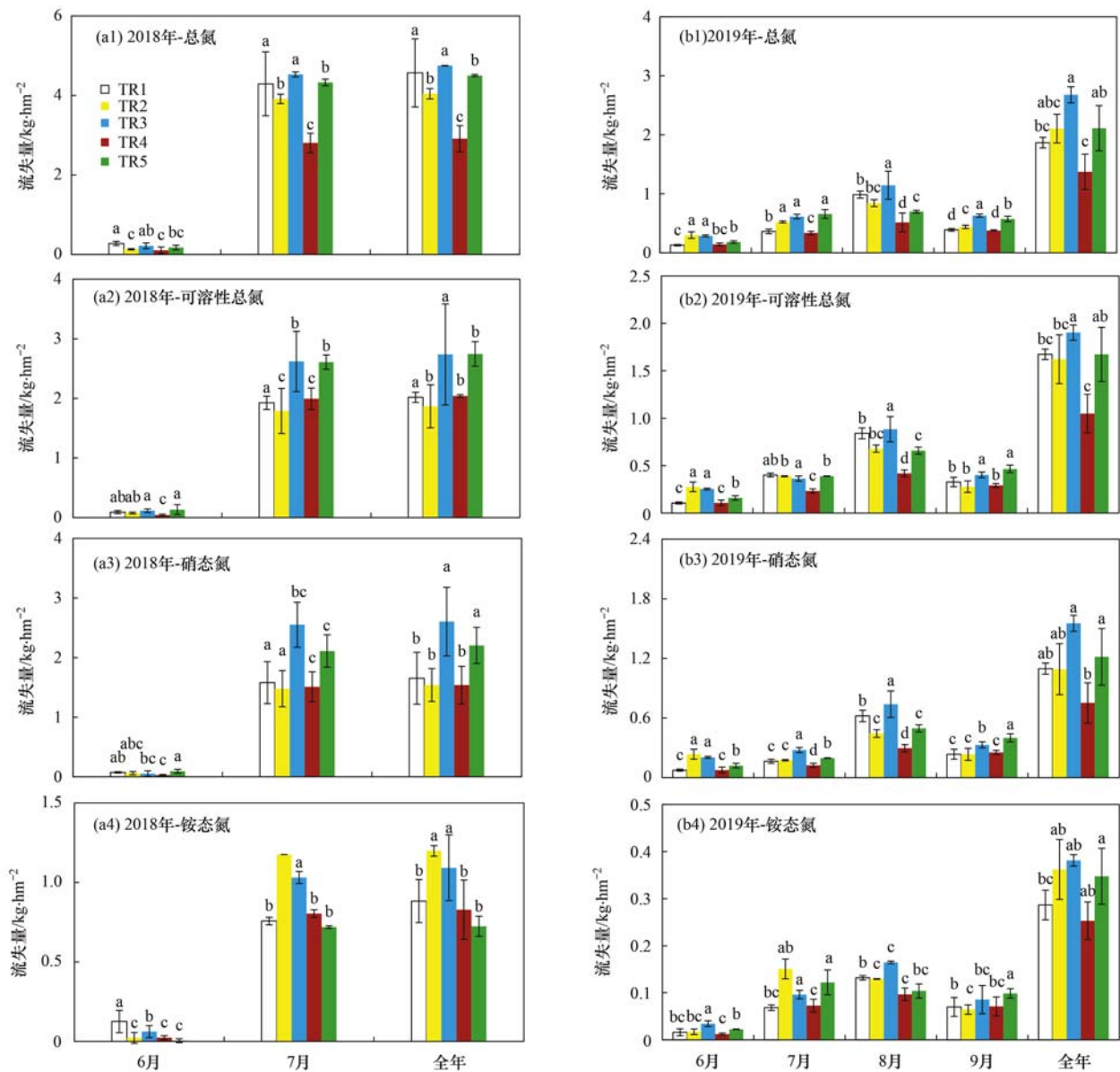
Fig. 2 Surface runoff and nitrogen concentrations in surface runoff from paddy fields in Tonghua village in 2018 and 2019

2.3 农田地表径流磷流失量

图4是同花村农田地表径流磷流失浓度。从中可以看出,初期降雨量比较小也比较少,总磷、可溶性总磷和颗粒态磷浓度的变化趋势比较平缓。当降雨量达到全年最大的时候,农田地表径流中的总磷和可溶性总磷浓度会明显减小,而农田地表径流颗粒态磷的浓度的变化并没有随着降雨出现规律性的变化。2018年总磷流失浓度最大的处理为TR3,流失浓度为 $0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,颗粒态磷流失最大的处理也为TR3,流失浓度为 $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;2019年总磷

流失浓度最大的处理为TR4,流失浓度为 $0.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,颗粒态磷的流失最大的处理也为TR4,流失浓度为 $0.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2018年总磷的变化趋势与可溶性总磷的趋势比较一致,但TR3处理,总磷和颗粒态磷的变化趋势是一致的;2019年总磷的变化趋势与颗粒态磷的变化趋势是一致的,尤其是TR4处理。

图5是2018年和2019年同花村地表径流磷养分流失量。从中可以看出,2018年总磷流失量最大的处理在6月和7月,全年TR2和TR4都较低,



不同小写字母表示存在显著性差异,通过 $\text{LSD} < 0.05$ 检验

图3 2018年和2019年同花村地表径流氮养分流失量

Fig. 3 Nitrogen losses in surface runoff from paddy fields in Tonghua village in 2018 and 2019

TR2 和 TR4 全年流失量分别为 $0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 而流失量最高的处理在6月为 TR1, 流失量为 $0.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在7月和全年流失量最高的处理为 TR3, 流失量分别为 $0.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2018 年颗粒态磷流失量最小的处理在7月, 全年都是 TR4 最低, 全年流失量为 $0.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著低于 TR2、TR3 和 TR5 处理; 流失量最高的处理为 TR3, 全年流失量为 $0.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2018 年同花村农田地表径流总磷流失形式主要是可溶性总磷, 占比为 $70.46\% \sim 92.84\%$. 2019 同花村地表径流总磷流失量在7~9月这3个月, 全年流失量最大的处理都为 TR1, 8月和9月总磷流失量最低的处理为 TR4. TR1 处理全年总磷流失量为 $0.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TR2 和 TR4 流失量都比较小, 分别为

$0.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2019 年颗粒态磷为总磷的主要流失形式, 占比为 $40.98\% \sim 90.44\%$.

3 讨论

3.1 降雨对农田氮和磷湿沉降的影响

持续高通量的氮和磷输入导致水体富营养化的问题已引起广泛关注. 2018 年和 2019 年氮养分浓度在降雨量大的时候会出现降低的现象. 王小治等^[5]研究太湖地区湿沉降中发现, 溶解态氮和颗粒态氮都会随着降雨量的增加而减小. 徐冯迪等^[17]通过研究我国南方地区氮和磷湿沉降的变化, 发现在径流未形成前以及降雨强度达到暴雨级别时, 降雨对氮和磷养分的稀释作用明显. 2018 年4~6月, 湿沉降中铵态氮浓度都高于硝态氮浓度; 2019 年3~

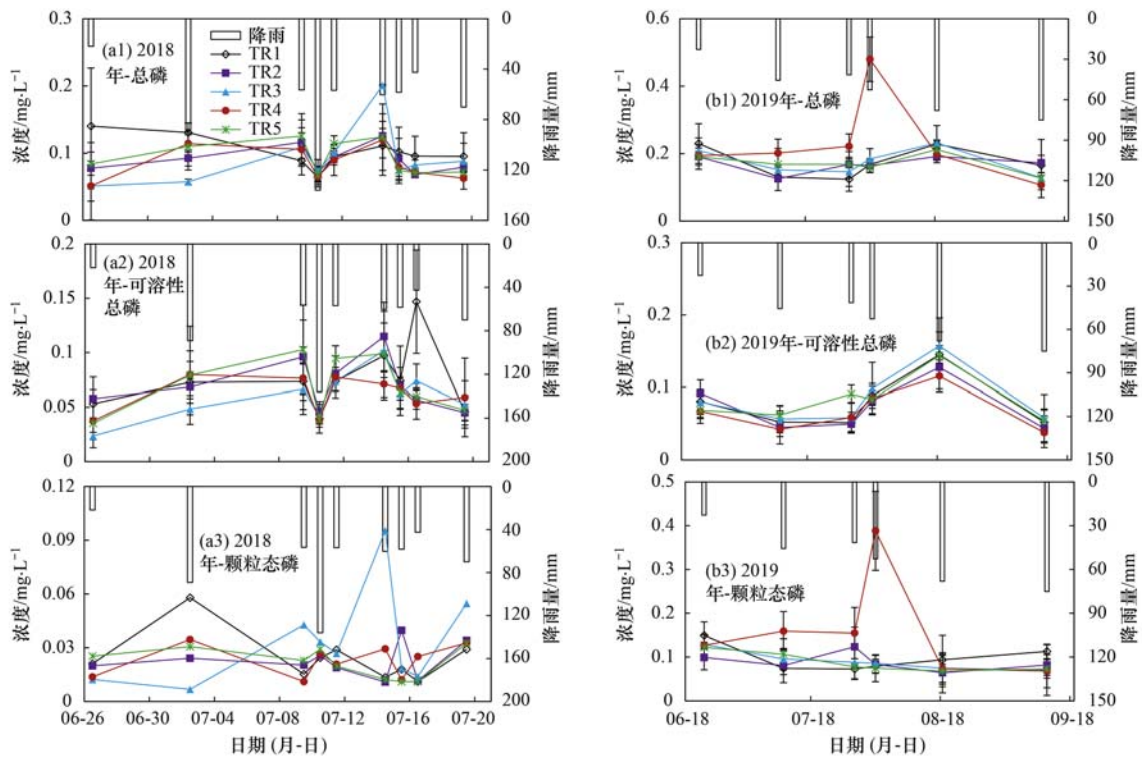


图4 2018年和2019年同花村地表径流磷养分流失浓度

Fig. 4 Phosphorus concentrations in surface runoff from paddy fields in Tonghua village in 2018 and 2019

6月都是铵态氮浓度高于硝态氮浓度.这可能是这段时间种植水稻施肥产生氨挥发所导致的^[17].2018年总氮的沉降量为 $43.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2019年总氮的沉降量为 $31.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.这一研究结果显著小于邓欧平等^[4]在成都平原地区得到的研究结果 $84.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但高于Kuang等^[3]在盐亭地区发现的湿沉降中总氮年均沉降量为 $30.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.鉴于我国南方地区氮年临界负荷为 $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[18],因此同花村有较高的氮通量生态风险.2018年和2019年总磷的沉降量分别为 $2.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $3.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,可溶性总磷占比分别为69.80%和76.04%.这一研究结果小于邓欧平等^[4]在成都温江区的监测结果.王小治等^[5]研究发现湿沉降中可溶性总磷占总磷的比例为53.3%,小于本文的研究结果.此外,2018和2019年可溶性总氮全年的平均浓度为 $3.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可溶性总磷的年平均浓度分别为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,都超过了水体富营养化的阈值(可溶性总氮为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可溶性总磷为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[5,19].由此可见,大气湿沉降输入的氮和磷化合物可能在同花村附近水体富营养化过程中产生重要作用,在研究水体富营养化问题时应该考虑降水的影响.

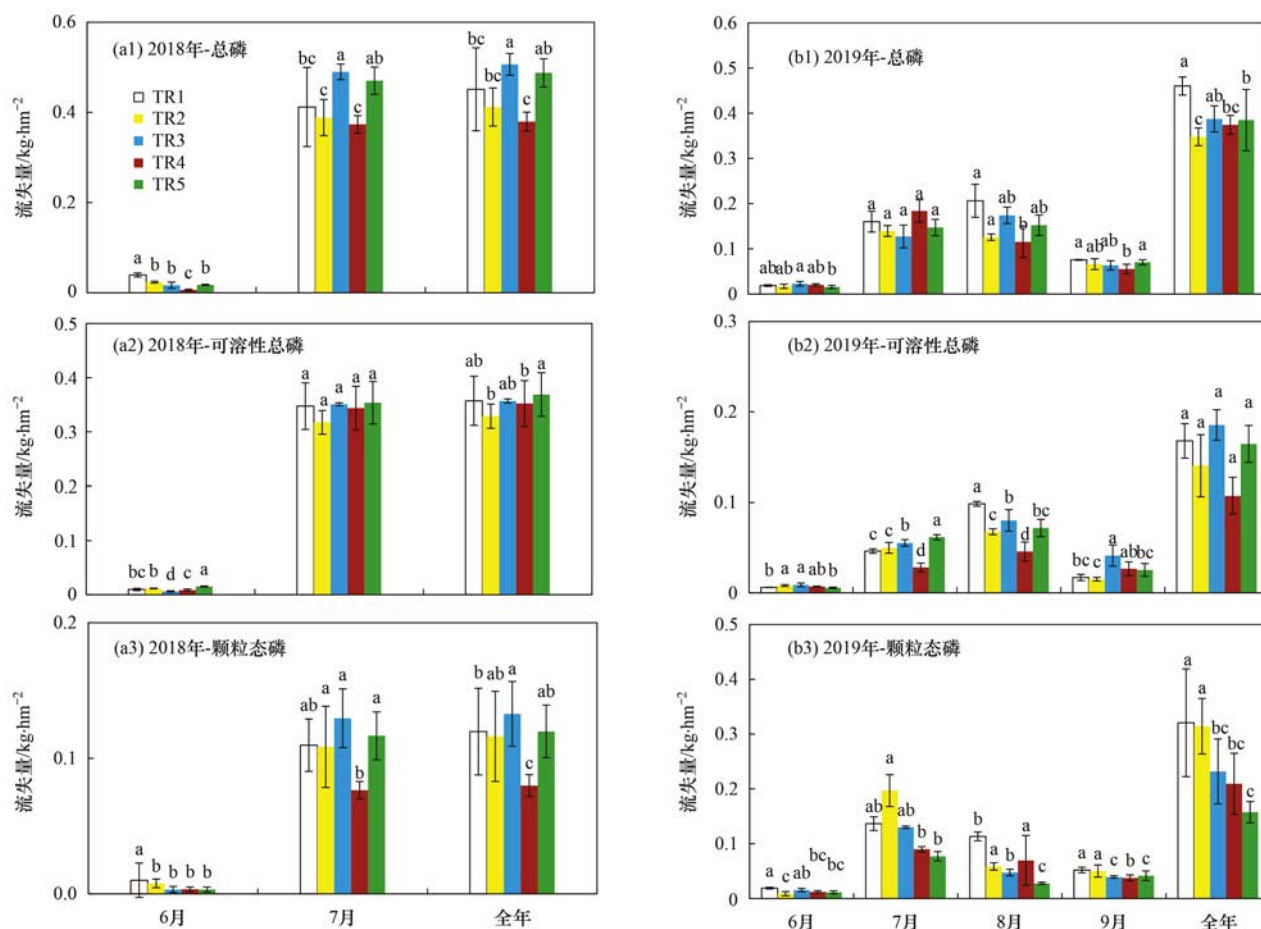
3.2 不同施肥措施对地表径流氮养分流失的影响

2018年和2019年同花村农田地表径流氮养分浓度与降雨量呈反比,氮养分流失浓度最大的处理

为TR2和TR3,而流失浓度比较小的处理为TR4,可能是因为TR2处理水稻长势较差导致氮养分流失较多.焦平金等^[20]通过汛期玉米、棉花、黄豆作物种植模式下地表径流氮磷流失的研究发现,黄豆具有较高的冠层覆盖郁闭度,导致地表径流铵态氮、硝态氮和可溶性总氮流失浓度相对较大.TR5处理对氮养分流失浓度影响并不是很显著,这一研究结果与王静等^[21]的研究结果一致.2018年和2019年不同处理地表径流中总氮的流失量分别为 $2.91 \sim 4.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.37 \sim 2.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硝态氮为总氮的主要流失形式.陈琨等^[14]研究成都平原地区稻麦轮作种植模式条件下,氮流失总量变化范围为 $0.23 \sim 0.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,低于本次研究的结果.不同施肥处理之间,TR3氮养分流失量显著高于其余处理,TR4氮养分流失量显著低于其余处理.有研究表明,耕地氮的损失量与施氮量密切相关,即每增加 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮素,通过径流损失的氮就增加 $0.56 \sim 0.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[14].秸秆覆盖处理施肥量与优化施肥处理相同,但是秸秆覆盖并没有降低氮养分流失,甚至在2018年还增加了氮养分的流失.这可能是因为秸秆分解会释放氮养分,从而增大了氮养分流失的隐患^[22].

3.3 不同施肥措施对地表径流磷养分流失的影响

2018年和2019年磷素初期浓度随降雨的变化并没有像氮素一样灵敏,而是起初缓慢变化,遇到雨



不同小写字母表示存在显著性差异,通过 $LSD < 0.05$ 检验

图5 2018年和2019年同花村地表径流磷养分流失量

Fig. 5 Phosphorus losses in surface runoff from paddy fields in Tonghua village in 2018 and 2019

季的时候才剧烈变化. 这可能是由于产流初期, 径流量较少, 未能将大量的土壤携带进入到径流中去, 相应地径流从土壤获得的磷素量较少, 从而径流中磷素的浓度就比较低^[23,24]. 2018年处理TR2和2019年处理TR4总磷流失浓度最高时, 相应的颗粒态磷流失浓度也最高. 这可能是在一定条件下, 颗粒态磷的流失对总磷的流失影响更大^[24,25]. 2018年总磷的流失量为 $0.38 \sim 0.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TR3流失量最高, TR4流失量最低; 2019年总磷的流失量为 $0.37 \sim 0.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TR2和TR4流失量都比较低. 这可能是因为TR3径流量比较高导致磷素随地表径流的流失增加(如图6), 而TR4地表径流量相对而言都较低, 从而导致磷素的流失也较低^[26]. 2019年TR2处理总磷地表径流流失量比较低可能是因为平衡施肥措施的应用. 徐泰平等^[27]研究指出平衡施肥处理能够降低总磷流失52%~61%. Yan等^[28]同样也发现了氮肥用量少会降低磷的流失, 是因为平衡施肥可以降低磷随地表径流的流失. 2018年地表径流总磷的流出形式主要是可溶性总磷, 占比为70.46%~92.84%; 2019年地表径流总磷的流出主

要是颗粒态磷, 占比为40.98%~90.44%. 这可能是因为2018年降雨大部分集中于7月, 造成了冲刷效应的影响即过量频繁的降雨和干湿交替等过程导致土壤颗粒态磷部分转化为胶体磷, 而胶体磷根据目前的测定方法归属为溶解态的部分, 从而增加了溶解态磷的含量^[25,29,30].

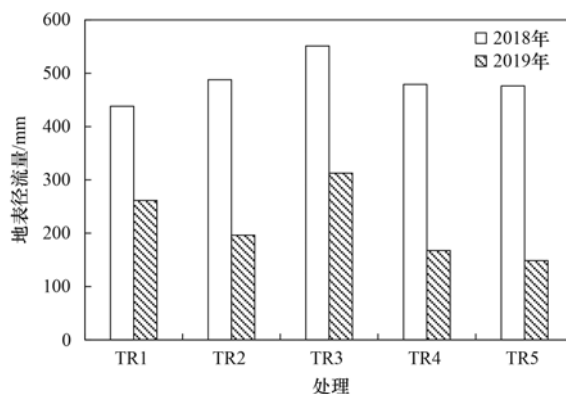


图6 2018年和2019年全年不同处理地表径流量

Fig. 6 Surface runoff of various practices from paddy fields in Tonghua village in 2018 and 2019

4 结论

(1)同花村降雨主要集中在7~9月这3个月,2018年全年总氮沉降量为 $43.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2019年全年总氮沉降量为 $31.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,主要集中在7~9月这3个月,而且铵态氮为总氮的主要沉降形式;2018年总磷的沉降量为 $2.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,主要集中在6~8月这3个月,2019年总磷的沉降量为 $3.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,主要集中在3、5和7月这3个月,可溶性总磷为总磷沉降的主要形式。

(2)同花村地表径流量与降雨量呈正比,而地表径流氮养分流失浓度与降雨量呈反比。2018年和2019年,总氮、可溶性总氮和硝态氮随地表径流流失量最多的处理为TR3,流失量最小的处理为TR4。2018年不同处理总氮随地表径流流失量为 $2.91 \sim 4.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2019年不同处理总氮随地表径流流失量为 $1.37 \sim 2.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硝态氮为主要的流失形式。

(3)降雨初期,降雨量对地表径流总磷、可溶性总磷和颗粒态磷流失浓度影响较小,后期降雨量较大的时候,颗粒态磷的流失对总磷流失的影响更大。受平衡施肥的影响,氮肥减施能够降低地表径流磷的流失。

参考文献:

- [1] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(5): 881-888.
Xue L H, Yang L Z, Shi W M, *et al.* Reduce-retain-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: source reduction technology [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(5): 881-888.
- [2] 段永惠, 张乃明, 张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究[J]. 土壤, 2005, **37**(1): 48-51.
Duan Y H, Zhang N M, Zhang Y J. Effect of fertilizer application on nitrogen and phosphorus loss with farmland runoff [J]. Soils, 2005, **37**(1): 48-51.
- [3] Kuang F H, Liu X J, Zhu B, *et al.* Wet and dry nitrogen deposition in the central Sichuan Basin of China [J]. Atmospheric Environment, 2016, **143**: 39-50.
- [4] 邓欧平, 张春龙, 唐锐, 等. 气象因素对成都平原夏季大气氮、磷连续性沉降的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, **36**(2): 223-232.
Deng O P, Zhang C L, Tang R, *et al.* Effects of meteorological factors on nitrogen and phosphorus deposition of Chengdu Plain during the summer [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, **36**(2): 223-232.
- [5] 王小治, 尹微琴, 单玉华, 等. 太湖地区湿沉降中氮磷输入量——以常熟生态站为例[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(10): 2487-2492.
Wang X Z, Yin W Q, Shan Y H, *et al.* Nitrogen and phosphorus input from wet deposition in Taihu Lake region: a case study in Changshu Agro-ecological Experimental Station [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(10): 2487-2492.
- [6] 宋泽峰, 张君伍, 陆智平, 等. 大气干湿沉降对河北平原农田面源污染的贡献[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(1): 93-98.
Song Z F, Zhang J W, Lu Z P, *et al.* Contribution of the atmospheric dry and wet deposition to the non-point source pollution in Hebei Plain, China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(1): 93-98.
- [7] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(4): 495-500.
Jiao S J, Hu X M, Pan G X, *et al.* Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus run-off loss from Qingzini paddy soil in Taihu Lake region during rice growth season [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, **26**(4): 495-500.
- [8] Cui N X, Cai M, Zhang X, *et al.* Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications [J]. Global Ecology and Conservation, 2020, **22**, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01011.
- [9] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(6): 1031-1036.
Liu H J, Zheng J C, Chen L G, *et al.* Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland [J]. Ecology and Environment Sciences, 2012, **21**(6): 1031-1036.
- [10] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(6): 6-10.
Zhu L Q, Xia X J, Hu Q Y, *et al.* Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(6): 6-10.
- [11] 朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(11): 1626-1634.
Zhu J, Ji X H, Tian F X, *et al.* Effects of straw-returning on double cropping rice yield and runoff loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(11): 1626-1634.
- [12] Bu R Y, Ren T, Lei M J, *et al.* Tillage and straw-returning practices effect on soil dissolved organic matter, aggregate fraction and bacteria community under rice-rice-rapeseed rotation system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **287**, doi: 10.1016/j.agee.2019.106681.
- [13] Xia L L, Lam S K, Wang S W, *et al.* Optimizing nitrogen fertilization rate to enhance soil carbon storage and decrease nitrogen pollution in paddy ecosystems with simultaneous straw incorporation [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **298**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106968.
- [14] 陈琨, 赵小蓉, 王昌全, 等. 成都平原不同施肥水平下稻田地表径流氮、磷流失初探[J]. 西南农业学报, 2009, **22**(3): 685-689.
Chen K, Zhao X R, Wang C Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in different fertilization levels in Chengdu Plain [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, **22**(3): 685-689.
- [15] 田若蓓, 黄成毅, 邓良基, 等. 四川省化肥面源污染环境风险评估及趋势模拟[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(11): 1739-1751.
Tian R H, Huang C Y, Deng L J, *et al.* Environmental risk

- assessment and trend simulation of non-point source pollution of chemical fertilization in Sichuan Province, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(11): 1739-1751.
- [16] 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.
- [17] 徐冯迪, 高扬, 董文渊, 等. 我国南方红壤区氮磷湿沉降对森林流域氮磷输出及水质的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(20): 6409-6419.
- Xu F D, Gao Y, Dong W Y, *et al.* Impact of atmospheric nitrogen and phosphorus wet deposition on nitrogen and phosphorus export and associated water quality: a case study of forest watershed in the red soil area, Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(20): 6409-6419.
- [18] 乔雪, 江丽君, 唐亚, 等. 九寨沟大气氮、磷和硫沉降的通量及水环境意义[J]. *山地学报*, 2014, **32**(5): 633-640.
- Qiao X, Jiang L J, Tang Y, *et al.* The fluxes and possible aquatic impacts of atmospheric nitrogen, sulfur and phosphorus deposition in Jiuzhaigou[J]. *Mountain Research*, 2014, **32**(5): 633-640.
- [19] Thomann R V, Mueller J A. Principles of surface water quality modeling and control[M]. New York: Harper & Row, 1987.
- [20] 焦平金, 许迪, 王少丽. 汛期不同作物种植模式下地表径流氮磷流失研究[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(2): 15-20.
- Jiao P J, Xu D, Wang S L. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland as affected by cropping pattern during flood season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(2): 15-20.
- [21] 王静, 郭熙盛, 王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2010, **18**(3): 492-495.
- Wang J, Guo X S, Wang Y Q. Effect of straw mulch on nitrogen and phosphorus loss from farmlands in Chaohu Lake Region under natural rainfall condition [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(3): 492-495.
- [22] 王桂苓, 马友华, 孙兴旺, 等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(2): 6-10, 29.
- Wang G L, Ma Y H, Sun X W, *et al.* Study of nitrogen and phosphorus runoff in Wheat-Rice rotation farmland in Chao Lake Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(2): 6-10, 29.
- [23] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1763-1769.
- Yang L X, Yang G S, Yuan S F, *et al.* Characteristics of soil phosphorus runoff under different rainfall intensities in the typical vegetable plot of Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(8): 1763-1769.
- [24] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. *水利学报*, 2009, **40**(6): 659-666.
- Jiang R, Zhu B, Tang J L, *et al.* Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soft [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(6): 659-666.
- [25] 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 yellowbrown under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- [26] 王云, 徐昌旭, 汪怀建, 等. 施肥与耕作对红壤坡地养分流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(3): 500-507.
- Wang Y, Xu C X, Wang H J, *et al.* Effect of fertilizer levels and tillage methods on nutrient loss of red soil slopes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(3): 500-507.
- [27] 徐泰平, 朱波, 况福虹, 等. 平衡施肥对紫色土坡耕地磷素径流流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 1055-1059.
- Xu T P, Zhu B, Kuang F H, *et al.* Effects of balanced fertilization on phosphorus loss by runoff from slope cropland in purple soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(4): 1055-1059.
- [28] Yan X, Wei Z Q, Hong Q Q, *et al.* Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources[J]. *Geoderma*, 2017, **295**: 80-85.
- [29] Missong A, Holzmann S, Bol R, *et al.* Leaching of natural colloids from forest topsoils and their relevance for phosphorus mobility[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 305-315.
- [30] 王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4547-4554.
- Wang H, Xu Y L, Zhang Q, *et al.* Emission characteristics of nitrogen and phosphorus in a typical agricultural small watershed in Tuojiang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4547-4554.

CONTENTS

Variations in PM _{2.5} Composition and Sources During 2020-2021 COVID-19 Epidemic Periods in Nanjing	HUA Nan, SHANG Yue, XIE Ming-jie	(593)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou City	ZHANG Jun-mei, CHEN Shi-lin, WANG Qian-heng, <i>et al.</i>	(602)
Meteorological Characteristics, Influence Analysis and Prediction of PM _{2.5} Concentration in Taiyuan City	LI Ming-ming, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(611)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Carbon and Nitrogen Components in Ambient PM _{2.5} in Huangshi City	WANG Ci-mou, DENG Meng-jie, CHEN Yu, <i>et al.</i>	(626)
Simulation Evaluation of the Contribution of Typical PM _{2.5} Pollution and Trans-regional Transport to Ningbo Pollution in the Yangtze River Delta	PAN Yong, ZHENG Jie, XIAO Hang	(634)
Composition Characteristics and Sources of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} in the Background Atmosphere of Yangtze River Delta	WU Chang-liu, CAO Fang, JIA Xiao-fang, <i>et al.</i>	(646)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} and Its Light-scattering Properties with Different Chemical Compositions in Urban Area of Beijing	CAO Yang, WANG Chen-jing, JING Kuan, <i>et al.</i>	(658)
Impacts of Emission and Meteorological Conditions on Air Pollutants at Various Sites Around the COVID-19 Lockdown in Wuhan	XIONG Jiang-he, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(670)
Analysis of the Impact of Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in Chengdu from 2019 to 2022	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i>	(680)
Ambient VOCs Characteristics and Reactivity During O ₃ Pollution in Autumn in Urban Beijing	SUN Xue-song, ZHANG Rui, WANG Yu, <i>et al.</i>	(691)
Variation Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs at Multi-sites in Zhengzhou	WANG Bing, YIN Sha-sha, HUANG Ai-zhi, <i>et al.</i>	(699)
Chemical Composition of VOCs from Service Stations Vapor Processing Device and Associated Contributions to Secondary Pollution	HU Wei, HUANG Yu-hu, LIANG Wen-jun, <i>et al.</i>	(709)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Population Health Benefit Assessment in the Yangtze River Delta Region from 2017 to 2020	CHENG Yu-kai, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i>	(719)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Gas Pollutants in Typical Pesticide Manufacturing Enterprises	ZHAI Zeng-xiu, XIAO Xian-de, MENG Jie, <i>et al.</i>	(730)
Characteristics and Driving Factors of Hydrochemical Evolution in Tuochangjiang River Basin, Western Guizhou Province	TU Chun-lin, YANG Run-bai, MA Yi-qi, <i>et al.</i>	(740)
Hydrochemical and Isotopic Evidence for Groundwater Conversion of Surface Water in Alpine Arid Areas: A Case Study of the Datong River Basin	YI Bing, LIU Jing-tao, LÜ Xiao-li, <i>et al.</i>	(752)
Identification of Nitrate Source of Surface Water in a Typical Peri-urban Watershed in the Tableland of the Loess Plateau, China	LI Huan-wei, ZHAO Guang-ju, LI Ming, <i>et al.</i>	(761)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Middle and Upper Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(770)
Enrichments, Migrations, and Conversions of Heavy Metal in the Soil/Sediment-Plant System Towards the Lake in Typical Poyang Lake Wetland	ZENG Huan, ZHANG Hua, DING Ming-jun, <i>et al.</i>	(781)
Analysis of Heavy Metal Sources in Groundwater and Assessment of Health Risks: An Example from the Southwest Sub-basin of the Shiqi River	FU Rong-jie, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(796)
Analysis on Contamination Characteristics, Pollution Source Identification and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of Groundwater in a Large Coking Plant Site of Province	ZHANG Qian-qian, XING Jin-bing, WANG Hui-wei, <i>et al.</i>	(807)
Dynamic Monitoring and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Poyang Lake Basin	TIAN Zhi-hui, YIN Chuan-xin, WANG Xiao-lei	(816)
Effects of Sediment Dredging on the Reduction in Sediment Internal Loading of Lake Taihu and the Self-recovery Ability of Benthic Organism	ZHANG Jian-hua, YIN Peng, ZHANG Lei, <i>et al.</i>	(828)
Biogeographic Distribution Patterns and Ecological Mechanisms of Benthic Eukaryotic Microorganisms in Jinsha River	CUI Ge, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i>	(839)
Bacterial Community Structure and the Prediction of Metabolic Function in Landscape Lake Water in Xi'an	WANG Min, ZHANG Yu-tong, HUANG Chen, <i>et al.</i>	(847)
Impounding Impacts of the Three Gorges Reservoir on Phytoplankton Function Groups and Its Relationship with Resource Use Efficiency	ZHAO Lu, OUYANG Tian, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(857)
Effects of Fertilization and Straw Mulching on Nitrogen and Phosphorus Loss in Chengdu Plain	WANG Hong, YAO Li, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(868)
Efficiency and Mechanism of O ₃ -SBBR Combined Process for Advanced Treatment of Biochemical Effluent from Printing and Dyeing Industrial Park	LUO Xin-hao, HU Yong-you, CHEN Yuan-cai, <i>et al.</i>	(878)
Analysis of Microbial Community Characteristics and Function Prediction of MBBR with Magnetic Biocarriers at Low Temperature	LIU Chao, LI Qi, SONG Zi-yang, <i>et al.</i>	(889)
Detecting Influencing Factor of Vegetation NPP in Southwest China Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, HUANG Wen-ting, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i>	(900)
Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon Density in Yellow River Basin Based on MGWR Model	NAN Fu-sen, LI Zong-xing, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i>	(912)
Coupling Relationship Between Soil Functions and Environmental Factors Along an Altitudinal Gradient: A Case Study of the Meili Mountain	ZHAO Dong-hui, SHEN Cong-cong, ZHANG Zhi-ming, <i>et al.</i>	(924)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil on the South of Dongting Lake	XIAO Kai-qi, XU An, GUO Jun, <i>et al.</i>	(932)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils of Different Land Use Types in Nanjing Suburbs	ZHANG Xiu-xiu, ZHU Chang-da, WANG Fei, <i>et al.</i>	(944)
Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Ecological Stoichiometry in Vegetable Fields and Orchard in the Coastal Area of Fuzhou	HOU Ning, HEI Jie, JIN Qiang, <i>et al.</i>	(954)
Preparation of Iron-modified Biochar and Its Application in Arsenic Contaminated Soil Remediation	WEI Jing, LIU Yi-han, TU Chen, <i>et al.</i>	(965)
Mn/Al-layered Double Oxide-loaded Biochar Reduced the Toxic Effects of Heavy Metals on Ryegrass in Soil	LIN Peng-cheng, YIN Hua, LIU Xiao-fei, <i>et al.</i>	(975)
Effect of Zinc Fertilizer Application on Cadmium Accumulation in Wheat Grain and Its Application Risk	NIU Shuo, WANG Tian-qi, YANG Yang, <i>et al.</i>	(984)
Primary Factors Affecting Soil Bioavailable Cadmium and Arsenic by Different Properties of Silicon Fertilizer	HUANG Rui, WEI Wei, XIE Yun-he, <i>et al.</i>	(991)
Availability Changes in Different Exogenous Selenium Fertilizers in Soil and Their Effects on Selenium Accumulation in Wheat	WEI Wei, LI Ping, ZHOU Zhi-gao, <i>et al.</i>	(1003)
Effects of pH, Calcium, and Phosphate on the Solubility of Arsenic in Paddy Soil Based on Surface Complexation Modeling	DENG Ying-xuan, WENG Li-ping, ZHU Gui-fen, <i>et al.</i>	(1012)
Effects of Sulfamethazine in Soil on Rice Growth	ZHANG Wei, WANG Pei-fang, JIN Qiu-tong, <i>et al.</i>	(1021)
Determination and Traceability Analysis of Phthalic Acid Esters in Garlic (<i>Allium stipium</i> L.) from Jiangsu Province, China	WANG Ya, XIAO Xia-xia, YANG Yun, <i>et al.</i>	(1029)
Dissolved Ion Concentrations and Isotope Values in Agricultural Fertilizer Locally Applied in Henan Province	ZHANG Dong, XUE Tian, QIN Yong, <i>et al.</i>	(1040)
Component Properties and Heavy Metal Accumulation Characteristics of Contaminated Rice Straw Biochar During Oxygen-controlled Pyrolysis	XU Zhi, GUO Zhao-hui, XU Rui, <i>et al.</i>	(1051)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Microbial Diversity and Community Structure in the Agro-pastoral Ecotone	GAO Ri-ping, DUAN Yu, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(1063)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer Application on Bacterial Community Structure in Rhizosphere/Non-Rhizosphere Soil of Lemon	DENG Zheng-xin, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(1074)
Effects of Different Topdressing Nitrogen Rates on Soil Fungal Community Structure and Ecological Network in Wheat Field Under Crop Residue Retention	JIN Hai-yang, YAN Ya-qian, ZHANG De-qi, <i>et al.</i>	(1085)
Effect of Deep Vertical Rotary Tillage on Soil Bacterial Community Diversity and Microbial Network Structure in Cultivated Land	XIA Wan-yu, CHEN Yan-yun	(1095)
Revealing the Effect of Saline Water Drip Irrigation on Soil Microorganisms in Cotton Fields Based on Metagenomics	DU Si-yao, CHEN Jing, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(1104)
Coal-carbon-pollutant Coordinated Control of Coal Chemical Industry Under Carbon Peak and Carbon Neutrality Constraints	ZHANG Hong-yu, WANG Yuan, HAO Cheng-jiang, <i>et al.</i>	(1120)
Under Goals of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: Status, Problems, and Suggestions of CCUS in China	ZHAO Zhen-yu, YAO Shun, YANG Shuo-peng, <i>et al.</i>	(1128)
Research Progress on CO ₂ Capture, Utilization, and Storage of Fly Ash	JIANG Long, HE Chuan, LI Jin-jing	(1139)
Temporal and Spatial Distribution, Utilization Status, and Carbon Emission Reduction Potential of Straw Resources in China	YANG Chuan-wen, XING Fan, ZHU Jian-chun, <i>et al.</i>	(1149)
N ₂ O Emission from the Processes of Wastewater Treatment: Mechanisms and Control Strategies	HAO Xiao-di, HONG Zhen-li, YU Wen-bo, <i>et al.</i>	(1163)
Systematic Evaluation of Low-carbon Operation of Typical A ² O Processes in Municipal Sewage Plant	MENG Hong-qi, LI Hong-xia, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i>	(1174)
Comparison of Carbon Emissions in Different Treatment and Disposal Process Routes of Municipal Sludge	LI Zhe-kun, ZHANG Li-qiu, DU Zi-wen, <i>et al.</i>	(1181)
Evaluation and Optimization of Rural Sewage Treatment Technologies in the Middle Reaches of the Yangtze River Based on Group Decision Making and Analytic Hierarchy Process	LIU Lu, ZHANG Wen-qiang, HU Fei-chao, <i>et al.</i>	(1191)