ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第5期
2017年5月15日

目 次

南京工业区夏冬季节二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 …… 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭(1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 …… 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇(1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 …… 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡(1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃 …… 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华(1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 …… 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合(1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 …… 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邬晓东(1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 …… 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗(1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 …… 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧(1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 …… 武媛媛, 李如梅, 彭林,端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲(1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 …… 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺(1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 …… 董小芳, 邓黄月,张峦,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 …… 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远(1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 …… 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟(1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 …… 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南(1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 …… 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼(1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 …… 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇(1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 …… 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业(1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 …… 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超(1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 …… 陈成龙, 高明,倪九派, 谢德体,邓华(1889)
NO_3^--N负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 …… 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌(1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 …… 李薛晓,程思超,方舟,李先宁(1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 …… 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安(1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 …… 刘海龙,付晶淼,郭雪峰,柴建恬,张忠民(1918)
紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 …… 徐丽梅,张崇淼,王晓昌,吉铮,周进宏(1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化锆对水中磷酸盐的吸附作用 …… 王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣(1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 …… 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华(1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 …… 朱培颖,李大鹏,于胜楠(1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 …… 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康(1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 …… 周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华(1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 …… 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉(1982)
$Fe^{(0)}$-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 …… 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊(1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 …… 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨(1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 …… 闾刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷,Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 …… 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙(2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 …… 杨波,徐辉, 冯修平,李方,田晴,马春燕(2021)
喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 …… 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣(2030)
锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 …… 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰(2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 …… 周同,于德爽,李津,吴国栋,王骁静(2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 …… 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波(2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 …… 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易(2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 …… 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓(2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 …… 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊(2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N_2O 排放的影响 …… 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇(2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N_2O 的排放特征 …… 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 …… 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛(2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 …… 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静(2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 …… 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周(2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 …… 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强(2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 …… 李秋言,赵秀兰(2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 …… 吴志娟,毕二平(2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 …… 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌(2161)
牛粪源蚓粪及其生物炭对 Pb^{2+}、Cd^{2+} 的吸附特性 …… 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐, 坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖(2172)
C_3N_4/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 …… 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥(2182)
《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响

陈成龙[1], 高明[1,2,3*], 倪九派[1,2,3], 谢德体[1,2,3], 邓华[1]

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400715; 3. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 选取三峡库区涪陵段封闭性较好的王家沟小流域, 分别利用 2014 ~ 2015 年采集的 3 个稻田坡面 12 次自然降雨地表径流样品和 2 次自然降雨过程地表径流样品以及 2010、2015 年两个子流域日径流样品, 对比分析坡面稻田空间格局差异和子流域稻田空间格局变化对地表径流氮磷流失浓度影响. 结果表明, 坡底布设的稻田对 TN、NO_3^--N和 TP 去除率高于坡腰, 坡底稻田田块越大 TP 去除效果越好; 次降雨过程中, 3 种空间格局稻田 TN、NO_3^--N和 TP 流失浓度在大雨事件降雨前期差异最明显, 而中雨事件则为降雨后期; 与 2010 年相比, 2015 年两个子流域稻田空间格局变化削弱了稻田对子流域氮磷流失拦截净化能力, 主要表现为小到中雨事件和基流时期 TN 流失浓度明显升高, 中到大雨事件 TP 流失浓度极易呈现跳跃性浮动. 因此, 合理增加流域稻田数量, 优化稻田空间格局是三峡库区农业面源污染控制的有效措施.

关键词: 小流域; 稻田; 空间格局; 面源污染; 削减

中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)05-1889-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201606042

Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area

CHEN Cheng-long[1], GAO Ming[1,2,3*], NI Jiu-pai[1,2,3], XIE De-ti[1,2,3], DENG Hua[1]

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400715, China; 3. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: This paper used three plots of paddy field in Wangjiagou small catchment in Fuling District, Chongqing Municipality as a case study. Wangjiagou, located in Three Gorges Reservoir Area, provided a good case in terms of its closeness of surface runoff. The samples of individual rainfall of twelve times and process of two typical individual rainfalls on three plots of sloping paddy field were collected from 2014 to 2015. These samples were used to analyze the influence of spatial pattern of sloping paddy field on the concentration of nitrogen and phosphorus in the surface runoff. The samples of daily runoff in subcatchments in 2010 and 2015 were used to analyze the influence of spatial pattern change of subcatchments' paddy field on the concentration of nitrogen and phosphorus in the surface runoff. The results indicated that the removal rates of TN, NO_3^--N and TP of paddy field at the valley bottom were higher than those in the mid-slopes. The removal rate of TP would be higher if plot size of paddy field at the bottom got bigger. During individual rainfall event, the losses concentration of TN, NO_3^--N and TP in the paddy fields was significantly different among three different spatial patterns during the previous period of heavy rain event, but it became different during the next period of moderate rain event. The two subcatchments'spatial pattern change of paddy field had weakened the intercepting purification ability of nitrogen and phosphorus losses of paddy field in 2015, compared with that in 2010. TN's losses concentration increased significantly during the periods of light and moderate rain event and base flow. TP's losses concentration fluctuated during the event from moderate rain to heavy rain. Hence, increasing the area of paddy field of catchment and optimizing its spatial pattern reasonably were found as effective measures to control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Region.

Key words: small catchment; paddy field; spatial pattern; non-point source pollution; reduce

随着点源污染控制和治理的加强, 面源污染已成为水体污染的主要原因, 越来越受到人们的广泛关注[1~3]. 面源污染治理的方式也由过去从湖泊、河流等单一的末端治理转变为与源头控制、过程阻截相结合[4]. 人工湿地、植被缓冲带、生态沟渠等[5~7]生态工程技术可以有效地滞缓径流、沉降泥沙, 减缓农田地表和地下径流带来的面源污染. 稻田系统作为一种环境友好、生态健康、可持续利用的人工湿地生态系统, 已被大量的研究成果和生产实践所证实[8~10]. 稻田在吸纳、降解不同来源的氮、磷和有机物等污染的同时也能维持本身土壤质量的健康.

三峡库区人均耕地少、土地垦殖率高, 化肥、

收稿日期: 2016-06-08; **修订日期**: 2016-11-28

基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAD14B18); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015D020)

作者简介: 陈成龙(1979 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为面源污染、土地利用与生态环境, E-mail: swccl@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

农药等农用化学品大量使用,水土肥流失严重[11,12]. 有研究表明,降雨径流过程是影响三峡库区干流氮磷浓度的主要因素[13,14],因此,利用稻田拦截净化降雨径流过程中携带氮磷污染物是三峡库区面源污染行之有效措施. 目前针对稻田的研究,多侧重在自然或人工降雨条件下相对封闭的田块环境中氮磷污染物迁移转化过程研究[15,16],而三峡库区稻田在空间分布上多与旱地、园地等组合而成复合型汇水坡面,水系连通,在降雨地表径流过程中,稻田作为受纳水体,其空间格局影响地表径流在稻田滞留时间、泥沙沉降和对污染物消纳能力. 因此,本文利用三峡库区王家沟小流域自然降雨条件下多年田间监测数据,研究了稻田坡面空间格局差异和子流域稻田空间格局变化对地表径流氮磷流失拦截净化能力影响,以期为三峡库区优化稻田空间格局,充分发挥稻田对农业面源污染拦截净化作用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市涪陵区珍溪镇东部王家沟小流域(E107°30′,N29°54′),系长江一级支流. 流域内以低山丘陵为主,多年平均气温 22.1℃,平均降雨量1 011 mm,降雨主要集中在 4 ~ 10 月,水稻主要生育期(5 ~ 7 月)降雨量约占全年降雨量的 45%. 土壤类型主要是由侏罗系蓬莱镇组紫色砂泥岩发育形成的紫泥土. 流域封闭性较好,整个流域又由自然地貌分割成两个独立的子流域,子流域集水线分别修筑水泥干渠,出口设有自动采样仪和流量计(图 5). 研究区域基础资料完善,有实测的 1∶1 000 地形图和土地利用现状图(2010 ~ 2015 年),气象资料来源于流域西侧 3 km 处重庆市气象局建立的标准气象观测站. 流域内农作物种植模式较为单一,春季以玉米、水稻为主,秋季轮种榨菜,桑园春季套种玉米秋季套种榨菜. 流域内同一农作物施肥量基本相同:玉米氮肥施用量约 180 $kg\cdot hm^{-2}$(玉米复合肥,N∶P_2O_5∶K_2O = 11∶9∶5);榨菜氮肥施用量约 220 $kg\cdot hm^{-2}$(榨菜复合肥,N∶P_2O_5∶K_2O = 12∶6∶7);在水稻榨菜轮作体系中,由于榨菜季施肥量较高,水稻氮肥施用量一般只有 40 ~ 60 $kg\cdot hm^{-2}$(主要为玉米复合肥).

1.2 稻田坡面空间格局特征

选取集水区相对独立、稻田空间格局有明显差异的 3 个坡面(图 1),利用 ArcGIS 10.2 软件统计各个坡面不同地类的面积和坡度. 坡面 S1、S2 稻田分布于坡腰和坡底,S3 稻田分布在坡腰. 受地形影响,坡腰稻田多沿等高线分布,田块窄长,而坡底地势较平坦,稻田田块大. 坡面 S1、S2 降雨径流汇入坡底稻田后直接排入干渠,而坡面 S3 流经坡底旱地后再排入干渠.

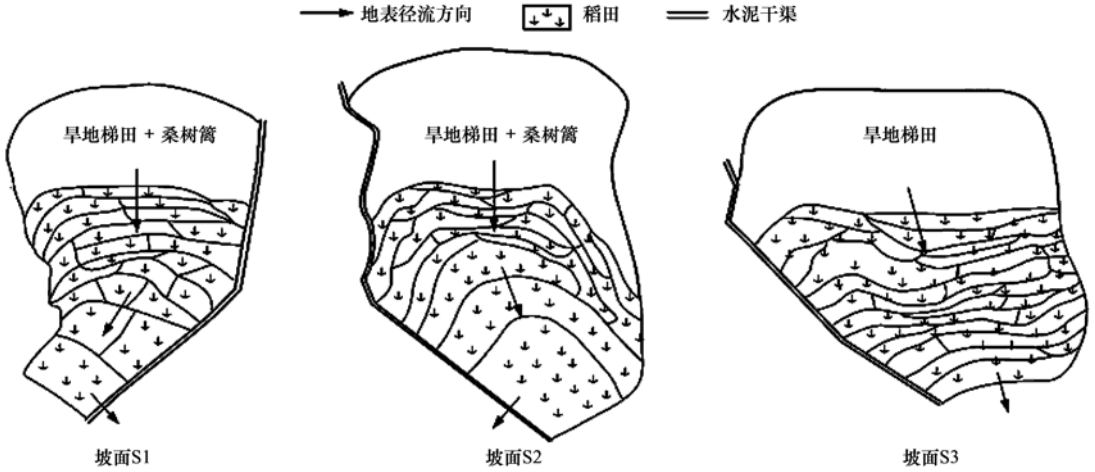

图 1 3 个坡面稻田田块空间格局示意

Fig. 1 Indicative map of spatial pattern of three plots of sloping paddy fields

坡面 S1、S2 面积分别为 2.35 hm^2、3.41 hm^2,稻田面积比分别为 59.57%、57.77%;坡面 S3 坡腰稻田和上坡旱地面积为 3.32 hm^2,稻田占 55.82%. 3 个坡面平均坡度在 8° ~ 9°间,坡面稻田平均坡度在 6° ~ 7°间,彼此差异较小. 3 个坡面 S1、S2、S3 旱地土壤全氮和全磷平均含量分别为 1.38、1.41、1.46 $g\cdot kg^{-1}$和 0.98、0.94、0.89 $g\cdot kg^{-1}$;水田土壤全氮和全磷平均含量分别为 1.49、1.52、1.56 $g\cdot kg^{-1}$和 0.79、0.81、0.76 $g\cdot kg^{-1}$.

景观指数是指能够高度概括景观格局信息,

反映结构组成和空间配置等特征的简单定量指标，这些定量指标信息含量高、说明功能强，目前正被广泛应用于的土地利用研究中[17]. 因此，本研究引入景观指数中田块边界密度(ED)、最大斑块指数(LPI)和面积加权平均田块大小(AREA-AM)3 项指标来定量描述 3 个坡面稻田空间格局特征的差异. 边界密度是反映某种土地利用类型被分割程度的重要指标之一，边界密度值越大，表明坡面稻田田块被分割程度越高；最大斑块指数为某一土地利用类型的最大斑块占该土地利用类型面积的比例，以此表征稻田最大田块优势度；以面积加权的方法计算稻田平均田块大小比简单的算数平均方法能更加准确地表征 3 个坡面稻田田块大小的差异. 3 个指标计算公式分别为：

$$ED = E/A \quad (1)$$

式中，E 为坡面稻田田块总周长(m)；A 为坡面稻田总面积(hm^2).

$$LPI = [\max(a_i)/A] \times 100 \quad (2)$$

式中，a_i 坡面第 i 个稻田田块面积(m^2)；A 为坡面稻田总面积(m^2).

$$AM = \sum_{i=1}^{n} x_i a_i \quad (3)$$

式中，x_i 为坡面第 i 个田块权重值；a_i 为坡面第 i 个稻田田块面积(m^2).

利用 ArcGIS 10.2 和 Fragstats 4.2 软件对 3 个坡面稻田田块各项指标进行统计分析，其结果如表 1 所示.

表 1　3 个坡面稻田田块空间格局特征指标统计

Table 1　Index statistics of spatial pattern of three plots of sloping paddy fields

类型	田块总面积/m^2	最大田块面积/m^2	最小田块面积/m^2	田块数/个	最大田块指数/%	田块总周长/m	边界密度/$m \cdot hm^{-2}$	面积加权平均田块大小/m^2
S1	13 998	1 856	36	27	13.26	3 037	2 170	901
S2	19 699	4 469	157	22	22.69	3 431	1 742	1 984
S3	18 532	1 872	34	31	10.11	4 585	2 474	833

1.3　样品采集与测定方法

1.3.1　监测点布设和样品采集方法

坡面监测点布设方法：3 个坡面旱地与水田分界处均由田间道将其分割，旱地地表径流经田间道汇集后通过主排水口排入水田，旱地流入水田前的 3 个监测点均布设在田间道的主排水口处；坡面 S1、S2 坡底水田约有 3 ~ 5 个平行排水口直接排入干渠，分别选取中间 2 个排水口布设水田排水口监测点，坡面 S3 水田中间有一条主排水沟，水田排水口监测点即布设在主排水沟上.

坡面地表径流样品采集：地表径流水样采集频率同时考虑两次采样时间间隔和降雨量变化. 当降雨量较为集中时，依据两次样品采集累计降雨量间隔(50 ~ 60 mm)采集下一次样品；当降雨量较少时，依据时间间隔(15 d 左右)采集下一次样品. 根据每场降雨历时，分别采集地表产流后 0.5、1、2、4、8 h 和降雨结束后 1 h 地表径流水样 4 ~ 6 个，每个样品 200 mL，再将这些样品混合后取 250 mL 作为本次降雨采样点测试水样. 2014 ~ 2015 年 12 次自然降雨事件共采集水田入口处地表径流水样 36 个，出口处地表径流水样 60 个.

2010 ~ 2015 年期间，两个子流域土地利用结构及其空间格局的变化主要表现为水田面积逐渐地减少和旱地面积逐渐的增加. 由此，本研究选取此期间两个子流域水田面积比最高的时期(2010 年)和最低时期(2015 年)，比较水田数量和空间格局变化对子流域日径流氮磷流失浓度影响. 子流域日地表径流监测样品采集方法为：在两个子流域出口分别安装自动采水仪(ISCO6712 型，美国)，设置每日 04:00、12:00 和 20:00 自动采径流水并混合成一个样品作为当日的水样. 自动采水仪的隔热基座内放置 10 kg 冰袋并定期更换，每隔 20 d 左右(最大采集时长为 24 d)取回一次样品，以此循环采集每日子流域地表径流样品.

次降雨过程样品采集：择机选取 2015 年水稻季大雨和中雨事件，地表产流后依据一定时间间隔(15 min/0 ~ 2 h；30 min/2 ~ 3 h；60 min/3 ~ 5 h)采集次降雨过程中 3 个稻田排水出口径流样品，每场降雨共采集 12 次地表径流样品.

1.3.2　样品测定方法

采集的水样 4℃ 保存，并在 48 h 内完成测试. 水样原液一部分用来测定总氮(total nitrogen，TN)、总磷(total phosphorus，TP)，另一部分水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后，测定铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N). 水样中 TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894-89)测定；TP 采用钼蓝比色法

(GB 11893-89)测定;NH_4^+-N、NO_3^--N使用 DX-120 型离子色谱仪(Dionex 公司,美国)测定.

2 结果与讨论

2.1 坡面稻田空间格局对地表径流氮磷流失拦截净化力的影响

本研究所选 3 个坡面稻田的面积比相近,均在 57% 左右,而坡面旱地由于土地利用方式不同,其汇入稻田的地表径流氮磷流失浓度的差异相对较大(表 2). 因此,以坡面稻田地表径流入口和出口氮磷流失浓度减少的比例(去除率)来表征坡面稻田对地表径流氮磷流失的拦截能力,即:

$$\text{坡面稻田对地表径流氮磷去除率} = \frac{\text{入口处氮磷流失浓度} - \text{出口处氮磷流失浓度}}{\text{入口处氮磷流失浓度}} \times 100\%$$

从 3 个坡面稻田对地表径流不同形态氮磷污染物去除率总体变化来看(图 2),降雨类型对 3 个坡面稻田 TN、NO_3^--N 和 TP 的拦截去除能力影响较大,且降雨量的大小与 TN、NO_3^--N去除率均呈显著负相关关系($P < 0.05$, $n = 36$);而在不同雨型条件下,3 种空间格局的稻田对不同形态氮磷去除能力差异也不同.

当降雨为小雨时,3 个坡面稻田对 TN 去除率大致相同,均在 70% 左右,NO_3^--N去除率多在 80% ~ 90% 间;当降雨为中雨时,坡面 S1、S2 稻田对 TN 去除率升高到 80% 左右,而 S3 却略有下降. 这表明,在稻田坡面面积比相当条件下,坡腰分布的稻田由于其田块加权面积小、水力坡降高,随着降雨量增加,地表径流在稻田滞留时间变短,其对 TN 拦截净化能力低于坡底布局的稻田[18];同样,当降雨为大雨或暴雨时,虽然 3 个坡面稻田对 TN 去除率迅速下降到 40% 以下,但坡面 S1、S2 对 TN 去除率仍要高出坡面 S3 约 10% ~20%. 3 个坡面稻田对 TP 去除率在 12 场次降雨中呈大致相同的变化规律,但当降雨量从小雨增大为中雨时,TP 去除率最高;当降雨为中雨时,3 个坡面稻田对 TP 去除率差异最明显;当降雨为大雨或暴雨时,3 个坡面稻田对 TP 去

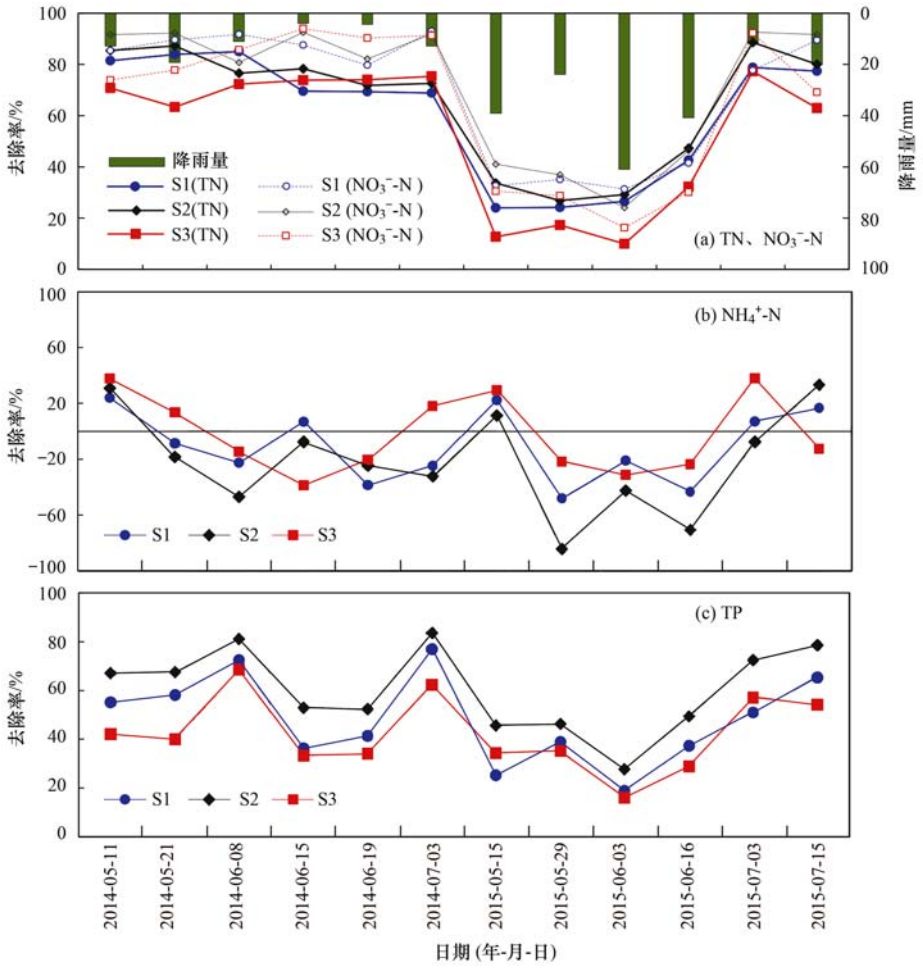

图 2 2014 ~ 2015 年 3 个坡面稻田对不同形态氮磷去除率变化

Fig. 2 Change of removal rate of nitrogen and phosphorus in surface runoff of three plots of sloping paddy field in 2014-2015

除率同时下降，但在坡底大田块拦截作用下，坡面 S2 稻田对 TP 去除率仍高出 S1、S3 约 10%. 3 个坡面稻田对 NH_4^+-N 影响无明显变化规律，但由于 NH_4^+-N地表径流流失浓度变化与施肥间隔相关[19]，施肥初期稻田对其有一定拦截净化作用，之后 NH_4^+-N去除率多为负值.

从 12 场降雨 3 个坡面稻田对不同形态氮磷平均去除率来看(图 3)，3 个坡面稻田对 TN 和 NO_3^--N平均去除率均高于 TP，而NH_4^+-N的去除率均为负值. 就不同坡面而言，坡面 S2 稻田对 TN、NO_3^--N和 TP 平均去除率均高于坡面 S1 和 S3，特别是对 TP 去除率分别高出坡面 S1、S3 约 13%、18%. 这主要是因为坡面 S2 稻田的加权平均田块大小和最大田块指数均为最高，而稻田田块越大其对坡面地表径流流速的滞缓效果越好，这也就相应地延长了地表径流中颗粒态污染物在稻田中沉降的时间，提升了稻田对面源污染物拦截净化能力，加之坡面 S2 稻田最大田块紧邻干渠，坡面地表径流经其拦截净化后能够直接排入干渠；坡面 S1 与 S3 相比，两者面积加权平均田块大小差异并不是很大，但中雨和大雨事件中坡面 S1 稻田对 TN、NO_3^--N平均去除率高出 S3 约 12%、10%，TP 去除率中雨事件平均高出约 14%，这可能主要是受两个坡面稻田的空间位置和稻田田块分割程度(边界密度)的影响.

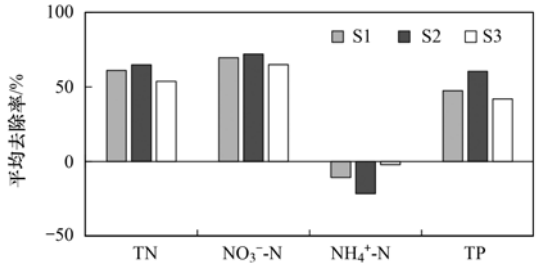

图 3　3 个坡面稻田对地表径流不同形态氮磷平均去除率

Fig. 3　Average removal rates of nitrogen and phosphorus in surface runoff of three plots of sloping paddy field

从 12 场降雨 3 个坡面稻田入口和出口氮磷流失平均浓度变化来看(表 2)，由于稻田入口集水区域内的土地利用方式不同(S1、S2 为“玉米 + 桑树篱”；S3 为玉米)，坡面 S3 稻田入口和出口氮磷流失平均浓度均高于 S1 和 S2. 因此，在稻田与氮磷排放浓度高的地类组成的复合型坡面中，应适当增加坡面稻田面积比，坡底尽可能多的布设水田，才能充分发挥稻田的拦截净化能力，降低坡面排入干渠地表径流氮磷流失浓度. 坡面 S1 与 S2 相比，入口处地表径流氮磷的平均流失浓度水平相当，但 S2 出口处 TN、NO_3^--N平均流失浓度比 S1 分别减少 0.62 $mg\cdot L^{-1}$、0.73 $mg\cdot L^{-1}$，TP 减少0.039 $mg\cdot L^{-1}$，降幅为 36%；而坡面 S2 稻田最大田块指数、田块面积加权平均田块大小分别是坡面 S1 的 1.7 倍、2.2 倍. 由此，保持稻田田块整体性，特别是坡底大田块，可以有效的降低稻田出口氮磷排放浓度.

表 2　3 个坡面稻田入口、出口地表径流不同形态氮磷平均流失浓度/$mg\cdot L^{-1}$

Table 2　Average concentrations of nitrogen and phosphorus losses in surface runoff at the export and entry points in three plots of sloping paddy field/$mg\cdot L^{-1}$

坡面	TN		NO_3^--N		NH_4^+-N		TP	
	入口	出口	入口	出口	入口	出口	入口	出口
S1	14.84	7.13	11.43	5.31	0.33	0.36	0.261	0.147
S2	15.12	6.51	11.32	4.52	0.31	0.41	0.262	0.108
S3	19.62	10.01	16.03	7.44	0.47	0.53	0.327	0.196

2.2　不同空间格局稻田在次降雨过程中氮磷流失浓度的动态变化

分析 2014 年水稻季 6 场降雨事件可知，在降雨为小雨时 3 种格局的坡面稻田响应不明显. 因此，本研究分别选取 2015 年 5 月 15 日大雨(38.9 mm/24 h)、6 月 30 日中雨(19.1 mm/24 h)事件采集样品，对比分析次降雨过程不同空间格局稻田地表径流氮磷输出浓度动态变化. 由于农作物施肥间隔时间增长、地面覆盖度增加以及降雨量影响[20~22]，两次降雨过程采集样品氮磷流失浓度差异较大(图 4). 其中：5 月 15 日采集样品中 TN、NO_3^--N流失浓度在 0.23 ~ 21.04 $mg\cdot L^{-1}$，NH_4^+-N、TP 流失浓度分别在 0.02 ~ 2.44 $mg\cdot L^{-1}$、0.01 ~ 0.47 $mg\cdot L^{-1}$；6 月 30 日采集样品中 TN 流失浓度在 1.15 ~ 5.19 $mg\cdot L^{-1}$，NO_3^--N流失浓度均低于1 $mg\cdot L^{-1}$，NH_4^+-N流失浓度在 0.08 ~ 0.55 $mg\cdot L^{-1}$，TP 流失浓度均低于 0.2 $mg\cdot L^{-1}$.

比较来看：在 5 月 15 日大雨事件中，坡面 S3 稻田监测点 TN 流失浓度在地表产流后 1 h 最先出现上升趋势，在历时 1 ~ 2 h 内由 6.84 $mg\cdot L^{-1}$快速上升到 16.69 $mg\cdot L^{-1}$，之后升速变缓，3 h 达到高峰值 21.04 $mg\cdot L^{-1}$；坡面 S1、S2 稻田监测点 TN 流失浓

度基本都在地表产流后 1.5 ~ 1.8 h 开始呈升高态势,之后 S1 开始迅速升高,在历时 3 h 达到高峰值 17.74 mg·L^{-1},S2 上升缓慢,在历时 4 h 到达峰值 15.23 mg·L^{-1}. 在 6 月 30 日中雨事件中,3 个坡面稻田 TN 向上浮动时间滞后 1 h 左右,且 TN 流失浓度较 5 月 15 日大幅减小. 两场降雨 3 个坡面稻田 TN 流失浓度在产流后 3 ~ 4 h 达到峰值,而梁斐斐等[23]在该流域利用径流场观测发现,中雨和大雨事件过程中旱地产流 10 ~ 20 min 后 TN 流失浓度就已接近高峰值. 这也表明,3 个坡面稻田对旱地地表径流起到明显的滞缓作用. 两场降雨历时 5 h 后,大雨事件中受稻田入口 TN 流失浓度影响,坡面 S3 稻田 TN 流失浓度分别比 S1、S2 高出 3.51 mg·L^{-1}、4.31 mg·L^{-1},S1、S2 差异较小,而中雨事件中 S1、S2 差异较为明显. 在 5 月 15 日大雨事件中,NO_3^--N的流失浓度变化规律明与 TN 大致相同,但 6 月 30 日降雨事件中,3 个坡面稻田NO_3^--N的流失浓度均在1 mg·L^{-1}以下,相对稳定,这也例证了小雨、中雨事件中NO_3^--N去除率高于 TN.

两场降雨过程中 3 个坡面稻田NH_4^+-N流失浓度的波动均出现在降雨历时 2.5 h 以内,之后都相对稳定. 5 月 15 日次降雨过程中,由于距农作物追肥结束间隔时间较短,旱地地表径流NH_4^+-N流失浓度较高,坡面 S3 波动最明显,3 个坡面稻田对NH_4^+-N也都表现一定的拦截净化能力;而在 6 月 30 日次降雨过程中,3 个坡面稻田NH_4^+-N流失浓度却略有下降,特别是 S1、S2,这表明地表径流中NH_4^+-N浓度低于稻田田面水.

降雨地表径流中 TP 流失多以颗粒态磷为主[24]. 5 月 15 日大雨事件中,坡面 S3 稻田 TP 流失浓度 1 h 内从 0.08 mg·L^{-1}迅速上升到高峰值 0.47 mg·L^{-1},此时,坡面 S1、S2 开始向上浮动;6 月 15 日中雨事件中,S1、S3 在 1.5 h 左右 TP 流失浓度均开始呈现上浮态势,但 S2 未出现明显浮动. 两种雨型条件下,坡面 S3 浮动最大,S2 最浮动最小. 在 TP 流失浓度基本稳定后,中雨事件 3 个坡面差异较大雨事件更明显,这与前面 12 场次降雨 TP 去除率研究结果相吻合. 徐亚娟等[25]在对川中一个由稻田为出口的紫色土农业小流域暴雨、大雨和中雨这 3 种雨型次降雨过程中 TP 流失浓度观测也发现,大雨或暴雨过程中 TP 流失浓度高峰值出现时间比中雨事件提前,且浮动幅度变大.

2.3 子流域稻田空间格局变化对氮磷流失浓度影响

近几年,由于外出务工收入增加,流域内农户青

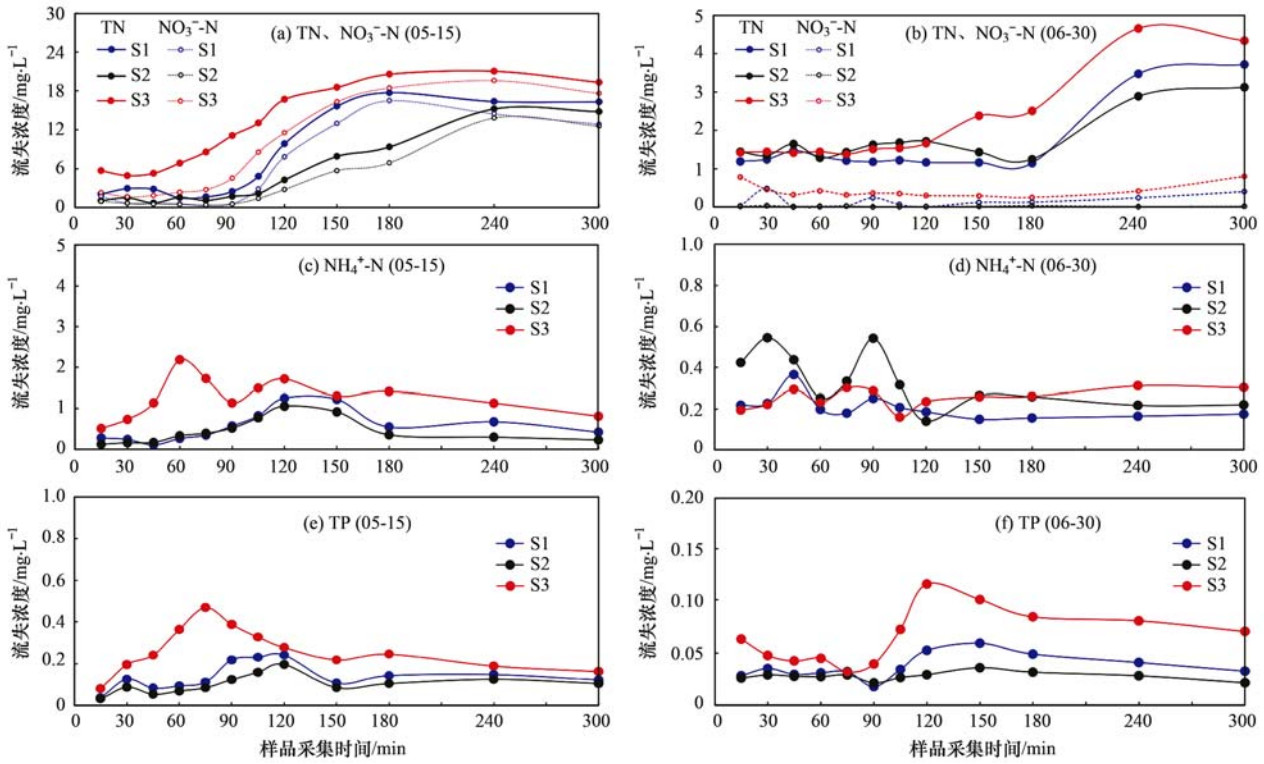

图 4 3 个坡面稻田次降雨过程出口氮磷流失浓度变化

Fig. 4 Change of concentrations of nitrogen and phosphorus losses at the export points of three plots of sloping paddy field in the event of individual rainfall

壮年劳动力逐年减少，而稻田既对水源要求较高，又不易收割，劳动力投入较大，在经济收益相差不大情况下，农户更愿意将稻田改旱地. 部分稻田改旱地后影响了原有稻田水系协调性，一些农户又不得不从水源角度考虑将稻田改种旱地. 利用 ArcGIS 10.2 软件，以王家沟流域 2015 年土地利用现状图为底图，与 2010 年土地利用现状图叠加，对比分析两个子流域稻田变化（图 5）. A、B 两个子流域 2015 年稻田面积分别为 3.84 hm^2 和 3.28 hm^2，较 2010 年分别减少 2.82 hm^2 和 2.51 hm^2，其他地类无明显变化. 从空间上看，子流域 A 稻田减少区域多分布在坡底，子流域 B 多分布在坡腰.

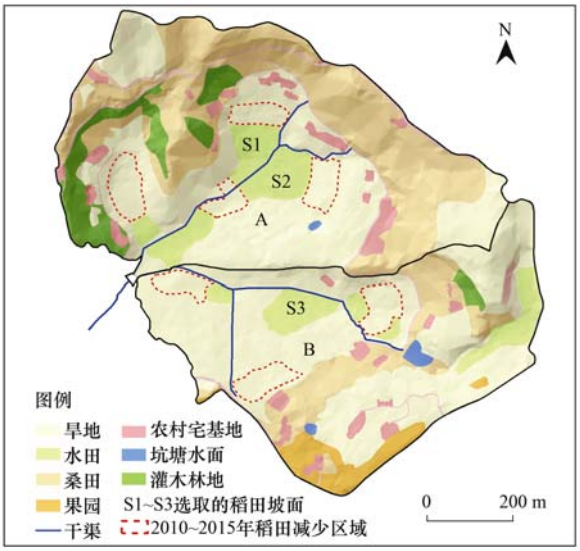

图 5　2010～2015 年王家沟流域稻田变化

Fig. 5　Change of paddy field in Wangjiagou catchment from 2010 to 2015

从两个子流域 2010 年与 2015 年日监测 TN、TP 流失浓度变化来看（图 6），无论是降雨径流时期还是基流时期，两子流域 TN 流失浓度 2015 年均高于 2010 年；TP 受降雨扰动影响出现跳跃性波动次数增多. 这表明，稻田数量的减少，一方面削弱了降雨径流中稻田的拦截净化能力，特别是泥沙沉降；另一方面，稻田蓄水调节能力减弱，干渠基流以地下水渗出为主，经消纳后的稻田田面水排放量减少，基流 TN 浓度升高. 从 A、B 两个子流域比较来看，无论是 2010 年还是 2015 年，子流域 A 日监测地表径流 TN、TP 流失浓度多低于子流域 B，这可能主要受子流域土地利用结构和空间布局影响，而稻田的空间格局，特别是坡底布设的稻田，对减小坡面排入干渠地表径流氮磷流失浓度发挥了重要作用[26,27].

与 2010 年相比，2015 年 A、B 两个子流域稻田面积分别减少 42.17%、43.26%（图 5），而水稻季（5～7 月）TN 平均流失浓度分别增加 52.93%（由 4.78 $mg·L^{-1}$ 增加到 7.32 $mg·L^{-1}$）、31.54%（由 6.65 $mg·L^{-1}$ 增加到 8.75 $mg·L^{-1}$）；TP 平均流失浓度分别增加 41.77%（由 0.079 $mg·L^{-1}$ 增加到 0.112 $mg·L^{-1}$）、37.14%（由 0.105 $mg·L^{-1}$ 增加到 0.144 $mg·L^{-1}$）. 由于流域内农作物种植种类和管理方式多年不变，两个年度子流域日地表径流氮磷流失浓度的增加主要是因为稻田改作旱地后流域内的稻田数量减少，致使稻田在不同降雨事件和基流时期所发挥的氮磷流失拦截净化能力不同程度减弱. 从图 6 来看，与 2010 年相比，2015 年两个子流域 TN 流失浓度升高主要表现在小到中雨和基流时期，而 TP 流失浓度升高则为中到大雨时期. 其原因：在小到

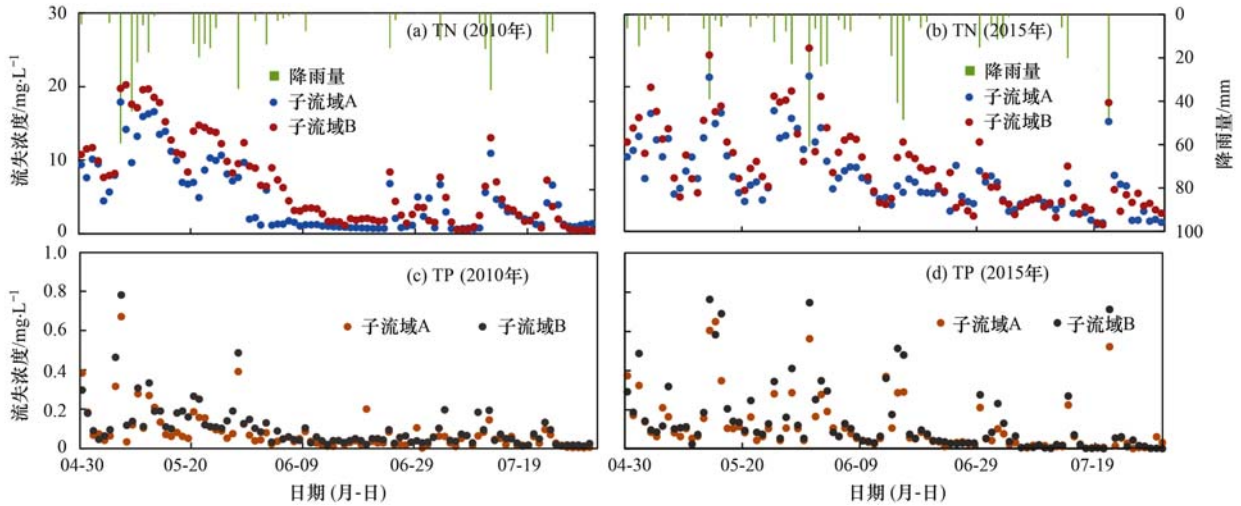

图 6　两个子流域 2010 与 2015 年 5～7 月 TN、TP 地表径流流失浓度变化

Fig. 6　Change of concentrations of TN and TP losses of surface runoff in the subcatchments A and B during May and July in 2010 and 2015

中雨和基流时期,径流在稻田滞留时间相对较长,经过一段时间消纳后 TN 浓度会迅速降低[28,29],而稻田面积较少后,径流在稻田滞留时间变短,稻田的消纳能力减弱;中到大雨事件中 TP 流失多以颗粒态为主,稻田面积减少,特别是布局于坡底稻田改旱地后,大大削弱了子流域稻田对地表径流泥沙沉淀的能力,TP 流失浓度极易随降雨事件呈跳跃性浮动. 这也表明,2010 年两个子流域的稻田数量结构和空间布局能够在中到大雨事件中对 TP 发挥较好的拦截作用,在小到中雨事件和基流时期也能有效拦截和消纳地表径流氮素;而到 2015 年,两个子流域稻田的面积比减少了约 6% ~7%,稻田对子流域氮磷流失拦截净化的效果已不明显,整个水稻季(5 ~7 月)子流域出口 TN、TP 平均流失浓度增加了约 31% ~53%(图 7).

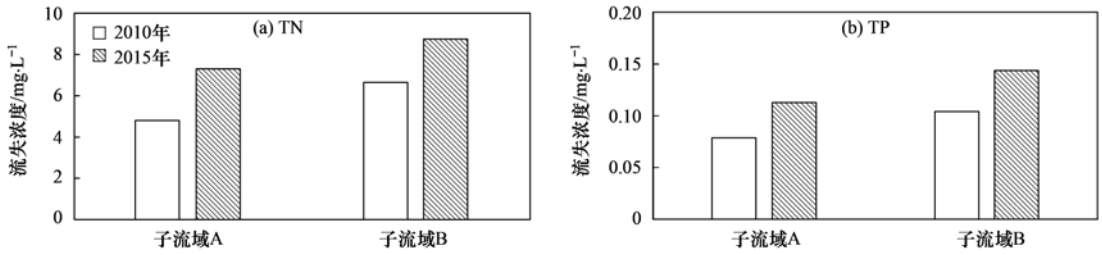

图 7 A、B 两个子流域 2010 年与 2015 年水稻季 TN、TP 地表径流平均流失浓度

Fig. 7 Average concentrations of TN and TP losses of surface runoff in the subcatchments A and B during rice-cultivating season in 2010 and 2015

三峡库区春季作物主要生育期多与雨季同步,因此,合理地增加流域稻田面积,优化稻田空间布局,可有效地减少春季作物时期氮磷排放负荷. 曹志洪等[30]在对太湖流域稻田连续 5 a 的研究表明,稻田是控制面源污染重要的生态单元,建议最大限度地保护稻田.

3 结论

(1)布局于坡底、田块整体性保持较好且最大田块优势度较高的稻田在不同的雨型条件下对地表径流 TN、NO_3^--N和 TP 平均去除率最高,坡腰布局的稻田最低;3 个坡面稻田对地表径流氮磷去除效果的差异在中雨和大雨事件中较为明显.

(2) 3 种空间格局稻田 TN、NO_3^--N和 TP 流失浓度在大雨事件过程前期(3 h 左右)差异最明显,而中雨事件中其差异主要表现在降雨后期;NH_4^+-N 流失浓度在两次降雨事件前期易波动,后期差异较小.

(3)子流域稻田数量的减少对氮磷流失浓度的影响主要表现为:小到中雨事件和基流时期 TN 流失浓度明显升高,中到大雨事件 TP 流失浓度极易呈现跳跃性浮动.

参考文献:

[1] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1159-1168.

[2] Naramngam S, Tong S T Y. Environmental and economic implications of various conservative agricultural practices in the Upper Little Miami River basin [J]. Agricultural Water Management, 2013, **119**: 65-79.

[3] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, **37**(7): 1008-1017.
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, *et al*. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategiesI. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, **37**(7): 1008-1017.

[4] Giles J. Nitrogen study fertilizes fears of pollution[J]. Nature, 2005, **433**(7028): 791.

[5] Yao J T, Ding H M, Xu J. Study on intercepting method for nitrogen and phosphorus in ecological ditches and pond[J]. Meteorological and Environmental Research, 2012, **3**(11): 58-60, 70.

[6] Blanche S B, Shaw D R, Massey J H, *et al*. Fluometuron adsorption to vegetative filter strip components [J]. Weed Science, 2003, **51**(1): 125-129.

[7] 彭世彰, 高焕芝, 张正良. 灌区沟塘湿地对稻田排水中氮磷的原位削减效果及机理研究[J]. 水利学报, 2010, **41**(4): 406-411.
Peng S Z, Gao H Z, Zhang Z L. Effect of pond wetland on N and P removal in drainage water from paddy field and its mechanism [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(4): 406-411.

[8] 徐琪, 杨林章, 董元华, 等. 中国稻田生态系统[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Xu Q, Yang L Z, Dong Y H, *et al*. Rice field ecosystem in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.

[9] Greenland D J. The sustainability of rice farming[M]. London: CAB International Publication in Association with the International Rice Research Institute, 1998. 110-113.

[10] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论"稻田圈"在保护城乡生态环境中的功能Ⅱ. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报, 2006, **43**(2): 256-260.
Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, *et al*. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment II. Characteristics of nitrogen accumulation, movement in paddy field

ecosystem and its relation to environmental protection[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, **43**(2): 256-260.

[11] 阎建忠, 卓仁贵, 谢德体, 等. 不同生计类型农户的土地利用——三峡库区典型村的实证研究[J]. 地理学报, 2010, **65**(11): 1401-1410.
Yan J Z, Zhuo R G, Xie D T, *et al*. Land use characters of farmers of different livelihood strategies: cases in three gorges reservoir area[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, **65**(11): 1401-1410.

[12] 谢德体, 倪九派, 丁恩俊, 等. 三峡库区农业面源污染防控技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[13] 林彬, 冯明磊, 胡荣桂, 等. 三峡库区小流域农户氮循环和排放特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 632-638.
Lin B, Feng M L, Hu G R, *et al*. Characteristics of nitrogen cycling in farm systems in a small watershed of Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Environmental Science, 2010, **31**(3): 632-638.

[14] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1266-1272.
Guo S, Li C M, Guo J S, *et al*. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1266-1272.

[15] Nakasone H, Abbas M A, Kuroda H. Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields[J]. Paddy and Water Environment, 2004, **2**(3): 115-124.

[16] 殷国玺, 张展羽, 郭相平, 等. 地表控制排水对氮质量浓度和排放量影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, **34**(1): 21-24.
Yin G X, Zhang Z Y, Guo X P, *et al*. Experimental study on effect of controlled drainage from ground surface on concentration and discharge of nitrogen[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, **34**(1): 21-24.

[17] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 64-72.
Huang J L, Li Q S, Hong H S, *et al*. Preliminary study on linking land use & landscape pattern and water quality in the Jiulong river watershed[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 64-72.

[18] House C H, Broome S W, Hoover M T. Treatment of nitrogen and phosphorus by a constructed upland-wetland wastewater treatment system[J]. Water Science and Technology, 1994, **29**(4): 177-184.

[19] Chen C L, Gao M, Xie D T, *et al*. Spatial and temporal variations in non-point source losses of nitrogen and phosphorus in a small agricultural catchment in the Three Gorges Region[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, **188**(4): 257.

[20] 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.

[21] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1707-1716.
Chen C L, Gao M, Ni J P, *et al*. Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges Region[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1707-1716.

[22] Franklin D, Truman C, Potter T, *et al*. Nitrogen and phosphorus runoff losses from variable and constant intensity rainfall simulations on loamy sand under conventional and strip tillage systems[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, **36**(3): 846-854.

[23] 梁斐斐, 蒋先军, 袁俊吉, 等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(4): 81-85.
Ling F F, Jiang X J, Yuan J J, *et al*. Main features of the loss of nitrogen and phosphorus and rainfall intensity influence in the slope farmland of the Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(4): 81-85.

[24] 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]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2644-2651.

[25] 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.

[26] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, *et al*. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries[J]. Environmental Management, 1999, **23**(4): 539-549.

[27] 沈珍瑶, 刘瑞民, 叶闽, 等. 长江上游非点源污染特征及其变化规律[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[28] 袁俊吉. 稻田生态系统对外源氮、磷的消纳[D]. 重庆: 西南大学, 2011. 15-18.

[29] 何军, 崔远来, 王建鹏, 等. 不同尺度稻田氮磷排放规律试验[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(10): 56-62.
He J, Cui Y L, Wang J P, *et al*. Experiments on nitrogen and phosphorus losses from paddy fields under different scales[J]. Transactions of the CSAE, 2010, **26**(10): 56-62.

[30] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论"稻田圈"在保护城乡生态环境中的功能Ⅰ. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. 土壤学报, 2005, **42**(5): 799-804.
Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, *et al*. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment Ⅰ. Characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(5): 799-804.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 5

May 15, 2017

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District ····· LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, *et al.* (1733)

Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing ····· LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, *et al.* (1743)

Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province ····· GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, *et al.* (1753)

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhu, Shennongjia, China ····· JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, *et al.* (1760)

Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City ····· DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, *et al.* (1769)

Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing ····· LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, *et al.* (1775)

Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant ····· SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, *et al.* (1783)

Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma ····· JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, *et al.* (1792)

Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng ····· WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, *et al.* (1799)

Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road: A Case Study in Changzhou ····· YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, *et al.* (1807)

Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai ····· DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, *et al.* (1817)

Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle ····· ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, *et al.* (1828)

Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China ····· ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, *et al.* (1835)

Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method ····· WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, *et al.* (1842)

Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China ····· ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, *et al.* (1852)

Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas ····· SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, *et al.* (1863)

Complexation Between Copper(Ⅱ) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill ····· XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, *et al.* (1873)

Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater ····· LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, *et al.* (1881)

Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area ····· CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, *et al.* (1889)

Effects of NO_3^--N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ··· JIANG Ying-he, LI Yao, ZHANG Ying, *et al.* (1898)

Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production ····· LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, *et al.* (1904)

Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells ····· DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, *et al.* (1911)

Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters ····· LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, *et al.* (1918)

Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on *Escherichia coli* and Poliovirus ····· XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, *et al.* (1928)

Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values ····· WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1936)

Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water ····· CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, *et al.* (1947)

Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms ····· ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)

Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network ····· SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, *et al.* (1965)

Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System ····· ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, *et al.* (1972)

Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process ····· JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, *et al.* (1982)

Enhanced Short-cut Denitrification by $Fe^{(0)}$-activated Carbon and Its Influencing Factors ····· LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, *et al.* (1991)

Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies ····· LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, *et al.* (1997)

Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR ····· LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, *et al.* (2006)

Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe ····· FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, *et al.* (2012)

Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater ····· YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, *et al.* (2021)

Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain *Ochrobactrum* sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater ····· XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, *et al.* (2030)

Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium *Arthrobacter* sp. HW-16 ····· WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, *et al.* (2036)

Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria ····· ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (2044)

Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization ····· XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, *et al.* (2052)

Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge ····· CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, *et al.* (2059)

Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region ····· QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, *et al.* (2065)

Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin ····· TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, *et al.* (2074)

Effect of Dicyandiamide on N_2O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping ····· WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, *et al.* (2084)

Characteristics of Biochar-mediated N_2O Emissions from Soils of Different Surface Conditions ····· ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, *et al.* (2093)

Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China ····· XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, *et al.* (2102)

Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China ····· SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, *et al.* (2111)

Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake ····· ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, *et al.* (2125)

Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil ····· WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, *et al.* (2136)

Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil ····· LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)

Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar ····· WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)

Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch ····· WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, *et al.* (2161)

Adsorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar ····· DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, *et al.* (2172)

Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C_3N_4/BiOBr Composite Photocatalyst ····· BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, *et al.* (2182)