ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第10期
2016年10月15日

目 次

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征

焦平金[1,2],许迪[1,2],朱建强[3],于颖多[1,2]

(1. 国家节水灌溉工程技术研究中心,北京 100048; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038; 3. 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心,荆州 434025)

摘要: 排水循环灌溉具有提高降水资源利用率和减少农田面源污染的潜力,为缓解我国南方地区降雨分布与水稻作物需水时间不匹配和农田磷流失污染的问题,开展了排水循环灌溉条件下稻田磷素时空分布规律研究. 采用田间试验的方法,监测藕塘水和鱼塘水循环灌溉下水稻田面水和渗漏水中总磷、可溶性磷和可溶性反应磷的质量浓度,及土壤剖面总磷与 Olsen-P 含量的变化. 结果表明,排水循环灌溉下水稻田面水和渗漏水中不同形态磷素质量浓度沿程降低,尤其渗漏水磷质量浓度的减少趋势更为显著,排水循环灌溉水源中磷质量浓度在一定范围内的变化不会增加田面水和渗漏水中的磷质量浓度. 田面水和渗漏水中不同形态磷质量浓度在不同灌溉时期的变化较大,8 月田面水和渗漏水的磷质量浓度明显低于其它时期. 表土 Olsen-P 含量随距进水口的距离的增加而减少,并随排水循环灌溉水中磷质量浓度的增加而增加; 土壤剖面 TP 含量受排水循环灌溉的影响不明显. 在 8 月水稻需肥高峰期进行排水循环灌溉或延长灌溉水的流程,可明显改善排水循环灌溉下稻田的磷素去除效率.

关键词: 循环灌溉; 磷流失; 稻田; 渗漏; 排水; 田面水

中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)10-3842-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.10.023

Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water

JIAO Ping-jin[1,2], XU Di[1,2], ZHU Jian-qiang[3], YU Ying-duo[1,2]

(1. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: Considering the potential of cyclic irrigation to increase rainfall use efficiency and reduce agricultural non-point pollution, the experiment of phosphorus transport in paddy fields under cyclic irrigation of drainage water was conducted to address the problem of phosphorus loss pollution and the mismatch between rainfall temporal distribution and crop requirement in the south of China. Lotus pond water and fishpond water were used to irrigate paddy fields for monitoring concentrations of total phosphorus (TP), dissolved phosphorus (DP), and dissolved reactive phosphorus (DRP) in surface water and leachate, and soil profile total phosphorus and Olsen-P concentrations. The results showed that the concentrations of TP, DP and DRP in surface water and leachate decreased along the field under cyclic irrigation of drainage water, especially the phosphorus concentrations of leachate dropped more obviously. As the phosphorus content of cyclic irrigation water sources varied within a certain range, phosphorus concentrations of surface water and leachate did not increased. The concentrations of TP, DP and DRP in surface water and leachate varied with cyclic irrigation time, and the least phosphorus concentrations were observed in August. Top soil Olsen-P concentration decreased along the field and increased with phosphorus content of cyclic irrigation water sources, and soil profile TP concentration was not influenced by cyclic irrigation. Phosphorus removal ratio of paddy field could be increased by extending field length or cyclic irrigation in August.

Key words: cyclic irrigation; phosphorus loss; paddy; leaching; drainage; surface water

我国水资源相对丰富的南方地区近年也由局部的季节型干旱逐渐演变成区域性干旱,导致占全国 40% 种植面积和粮食产量的水稻作物的灌溉需水量显著提高[1]. 水稻作物的频繁灌溉排水加速了氮磷等营养物质向地表水体的排放,尤其水稻泡田期或施肥后,排水中的磷素含量显著提高[2,3]. 包括灌溉或降雨排水造成的氮磷流失在内的农业面源污染已成为地表水体富营养化的主要污染源之一[4,5]. 排水中的磷素质量浓度是地表受纳水体富营养化的限制性因子,由于它不像氮素可被水生植物从空气中固持,减少磷素向地表水体的流失成为控制河湖等水体环境富营养化的关键[6,7]. 因此,合理调配降水资源和控制农田磷素流失不仅可以缓解旱情,

收稿日期: 2016-01-28; **修订日期**: 2016-03-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51409273); 中国水利水电科学研究院青年科研专项(节集 1507); "十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAD08B05)
作者简介: 焦平金(1980 ~),男,博士,高级工程师,主要研究方向为农业水管理与面源污染,E-mail: jiaopj@iwhr.com

还可以防控农业面源污染.

在日本水稻种植区的大量研究发现，排水循环灌溉可提高降水资源利用率和减少磷素流失. Hama 等[8]在排水干沟设置控制闸门蓄水再灌溉，发现排水循环灌溉能提供 85% 的年灌溉水量，Zulu 等[9]发现采用上游排水灌溉下游水田的方式补充了下游农田 15% 的年灌溉水量. 基于田块或区域尺度的试验监测分析发现，排水循环灌溉输入区块的磷素总量高于流出量，表明稻田具有净化磷素的作用[10, 11]. 究其原因，排水循环灌溉补充灌溉的同时，延长了磷素在水田的停留时间，增强了颗粒态磷的沉淀作用和溶解性磷的土壤吸附与作物吸收利用作用，从而提高了水田的磷素净化效率[8, 12, 13]. 也有研究表明排水循环灌溉下水田对磷素的净化作用还受循环灌溉水中总磷质量浓度等因素的影响[11].

上述研究主要集中在排水循环灌溉的节水效益和减少磷素流失量上，却鲜见报道其效应机制，尤其是稻田尺度磷素迁移的排水循环灌溉响应机制的研究. 田面水和渗漏水分别是磷素通过地表和地下排水途径流失的来源，且两者磷素质量浓度的变化直接受排水循环灌溉水源的影响. 故本研究通过监测稻田田面水、渗漏水和土壤中不同形态磷素含量，讨论排水循环灌溉对稻田磷素迁移过程的影响规律，以期为推行合理的排水循环灌溉模式来缓解农田磷素流失的水环境污染危害提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试区地处四湖流域西南，临近长湖，具体位于湖北省荆州市北 10 km. 该区由一系列河间洼地组成，形成江汉平原腹地的地势低洼区，汛期洪涝灾害频繁，夏季适宜种植水稻作物. 水稻等作物的频繁灌溉排水造成长湖总磷和总氮的含量超标，使长湖水质长期处于劣Ⅳ类及其以下水平. 然而水稻作物的高需水量仍需通过取水灌溉的方式来保障其正常生长. 因此，该区具有利用排水循环灌溉来补充灌溉和减少稻田磷素向长湖排放的必要性与可行性.

试区属于亚热带季风气候区，多年平均气温 16.5℃，多年平均降水量1 120 mm，试验期间的年降雨量 995 mm，其中水稻生长期(6 ~9 月)的降雨量为 412 mm. 试验前耕作层(0 ~20 cm)土壤化学性状为：全磷 0.66 $g\cdot kg^{-1}$，速效磷 20.68 $mg\cdot kg^{-1}$，全氮 0.97 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮 139.85 $mg\cdot kg^{-1}$，全钾 2.34 $g\cdot kg^{-1}$，速效钾 151.89 $mg\cdot kg^{-1}$，有机质 32.73 $g\cdot kg^{-1}$.

1.2 试验设计

塘堰作为南方水稻种植区的常规滞洪蓄涝工程，亦或兼作种藕或养鱼，可作为排水循环灌溉的蓄水池. 两类塘堰均承接来自降雨或灌溉排水，藕塘直接种植莲藕且不施肥，鱼塘内大都混养青鱼、草鱼或鲢鱼等，并不定期向塘内投放鱼食，致使后者塘水中氮磷含量较高. 水稻生长期的藕塘和鱼塘水中 TP 含量分别为 0.1 ~ 1.0 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.2 ~ 1.5 $mg\cdot L^{-1}$. 故本试验选取这 2 种塘水灌溉来考察排水循环灌溉水源对农田尺度磷素动态变化的影响. 本试验过程中，每种水源各灌溉 3 个水稻种植重复小区，共 6 个 8 m×40 m 规格的小区随机布置到试验区块上. 为了防止试区内外及小区间发生水分交换，试区四周设置宽 8 m 左右的保护区，在试区内的小区间设置 10 cm 高的田埂并用塑料薄膜(薄膜埋深 40 cm)包被.

试区藕塘和鱼塘都位于水稻种植区下游，通过排水沟承接部分稻田排水，稻田需要灌溉时利用水泵把塘水经硬塑料管输送到田块进行排水循环灌溉. 各小区的进水口和排水口分别位于小区短边上. 6 月 6 日翻耕泡田，基肥撒施后用铁耙混入约 5 cm 深表土中，其中施氮量 101.7 $kg\cdot hm^{-2}$、施磷量 48.0 $kg\cdot hm^{-2}$和施钾量 45.7 $kg\cdot hm^{-2}$；次日移栽于 4 月 29 日育苗的品种为两优 6326 的秧苗. 6 月 19 日通过撒施的方式追施氯化钾和尿素肥料，折算追施氮量 23.2 $kg\cdot hm^{-2}$和追施钾量 60 $kg\cdot hm^{-2}$. 所有小区的施药、除草、灌水量与灌水时间、排水和晒田等田间管理措施均采用当地常规做法.

1.3 试验观测与测试方法

在水稻生育期内，田面水和渗漏水水样于灌水 2 d 后沿着小区长边分段取样用于分析化验不同形态磷的质量浓度. 试验过程中共有 6 次灌水，其中全部取得田面水和渗漏水水样的仅有 4 次. 田面水水样使用容积 500 mL 的塑料瓶沿试验小区长边 0(田块进水口)、10、20、30 与 40 m(田块排水处)处采集. 渗漏水水样使用埋深 30 cm 的陶土头分别沿小区长边 10、20 和 30 m 处抽取. 水稻收割后，距进水口 10、20 和 30 m 距离处分别沿土壤剖面 5、10、20、30 和 50 cm 埋深处取土样用于化验全磷(TP)和有效磷(Olsen-P)含量. 每个水样均需测定总磷(TP)、可溶性磷(DP)和可溶性反应磷(DRP)的质量浓度. 采用过硫酸钾消解-钼氨酸分光光度法测定水样的 TP 质量浓度；水样经 0.45 μm 滤膜

过滤后同样用过硫酸钾消解-钼氨酸分光光度法测定 DP 质量浓度; DRP 质量浓度由钼氨酸分光光度法直接测定滤膜过滤后的水样获得,无需过硫酸钾消解. 土壤 TP 含量采用酸溶-钼锑抗比色法,用 0.5 $mol \cdot L^{-1}$碳酸氢钠溶液浸提后采用该方法测定土壤 Olsen-P 含量.

1.4 数据分析

对试验监测数据,采用统计软件 SPSS 进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并借助最小显著差异法(LSD)检验不同灌溉水源处理间的差异显著性,界定 $P<0.01$ 为显著水平.

2 结果与分析

2.1 田面水中不同形态磷素的变化

藕塘水和鱼塘水灌溉下田面水 DRP 质量浓度随田面距离和时间的变化由图 1 给出. 从中可见,除了 6 月 28 日的鱼塘水灌溉处理外,田面水中 DRP 质量浓度随着距进水口距离的增加呈现减少的趋势. 排水回灌到田块后质量浓度削减量随时间的变化较大,7 月与 8 月的田面水 DRP 质量浓度明显低于 6 月的相应值,以 8 月 5 日田块末端(40 m 处)为例,与藕塘水和鱼塘水的灌溉水源相比,DRP 质量浓度削减率分别为 67.1% 和 22.0%. 除了 8 月鱼塘水灌溉的田面水质量浓度高于藕塘水外,田面水中 DRP 含量在两种灌溉水源间的差异不显著. 这表明水稻田面系统对通过循环灌溉输入水源的 DRP 质量浓度变化具有一定的缓冲作用,循环灌溉水源中 DRP 质量浓度一定范围的变化不会改变再排水中 DRP 质量浓度.

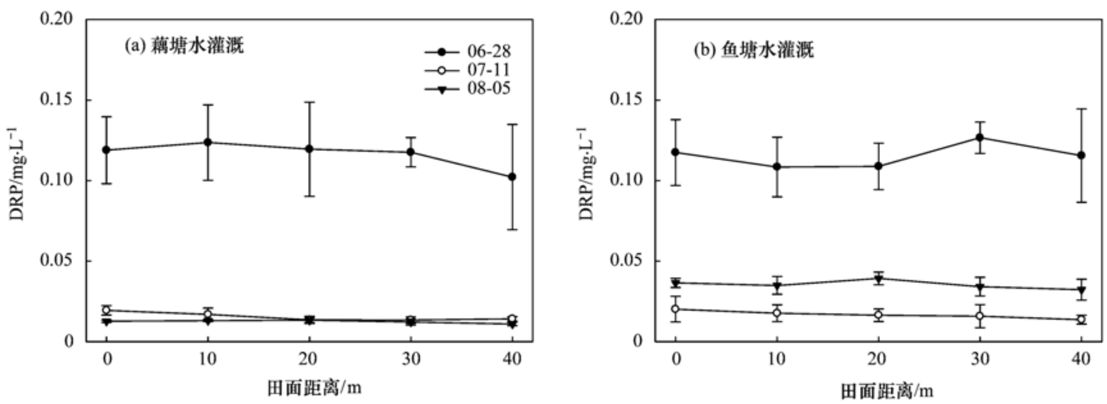

图 1 藕塘水和鱼塘水灌溉下田面水 DRP 质量浓度沿田面距离的变化

Fig. 1 Dissolved reactive phosphorus (DRP) concentration of surface water along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

由图 2 可见,除了 6 月 28 日的鱼塘水灌溉外,随着距进水口距离的增加田面水中 DP 质量浓度均有减少的趋势. 排水被回灌到田块后田面水 DP 质量浓度随时间的变化较大,田面水 DP 质量浓度的大小为 7 月 > 6 月 > 8 月,且 8 月田面水中 DP 质量浓度均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) Ⅲ类水中规定的可溶性磷浓度阈值 0.2 $mg \cdot L^{-1}$ [14]. 以 8 月 5 日田块末端(40 m 处)

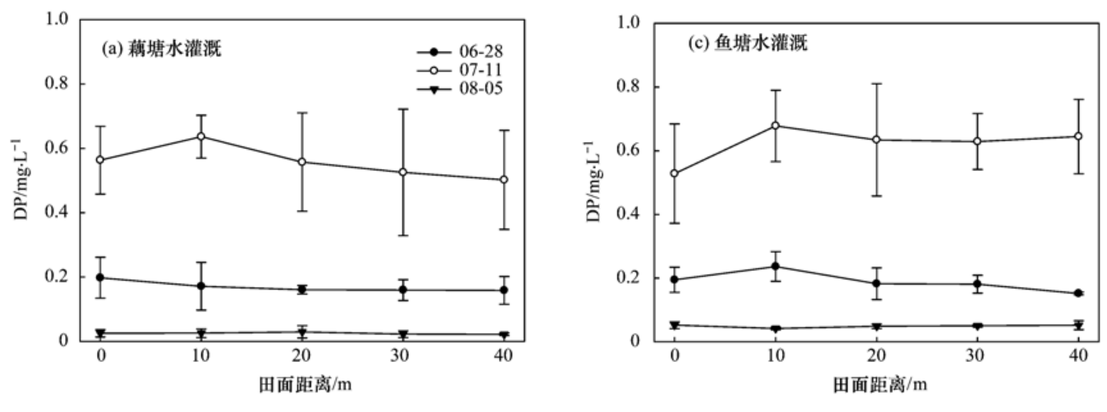

图 2 藕塘水和鱼塘水灌溉下田面水 DP 质量浓度沿田面距离的变化

Fig. 2 Dissolved phosphorus (DP) concentration of surface water along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

为例，与藕塘水和鱼塘水的灌溉水源相比，DP 质量浓度削减率分别为 85.9% 和 79.2%. 田面水中 DP 质量浓度在 2 种灌溉水源处理间的差异不显著. 这表明水稻田面系统对通过循环灌溉输入水源的 DP 质量浓度变化具有缓冲作用，循环灌溉水源中 DP 质量浓度的变化未改变再排水中 DP 质量浓度.

由图 3 可见，除了 6 月 28 日的鱼塘水灌溉外，田面水中 TP 质量浓度沿田块距离呈减少的趋势. 排水回灌到田块后 TP 质量浓度削减量随时间的变化较大，呈现出田面水 TP 质量浓度的大小为 7 月 > 6 月 > 8 月的规律，以 8 月 5 日田块末端(40 m 处)为例，与藕塘水和鱼塘水的灌溉水源相比，田面水 TP 质量浓度削减率分别为 57.4% 和 64.2%. 除了 8 月鱼塘水灌溉的田面水 TP 质量浓度略高于藕塘水外，田面水中 TP 含量在 2 种灌溉水源处理间的差异不显著. 这表明水稻田面系统对通过循环灌溉输入水源的 TP 质量浓度变化具有一定的缓冲作用，循环灌溉水源中 TP 质量浓度在一定范围内变化不会改变再排水中 TP 质量浓度.

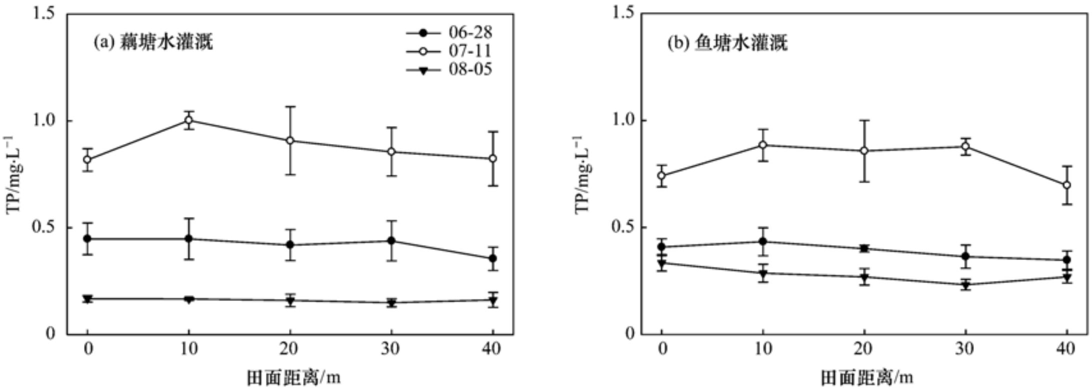

图 3　藕塘水和鱼塘水灌溉下田面水 TP 质量浓度沿田面距离的变化

Fig. 3　Total phosphorus (TP) concentration of surface water along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

2.2　渗漏水中不同形态磷素的变化

藕塘水和鱼塘水灌溉下渗漏水 DRP 质量浓度随田面距离和时间的变化由图 4 给出. 从中可见，渗漏水中 DRP 质量浓度在不同灌溉时期的差异比较明显，8 月渗漏水中 DRP 质量浓度明显低于 7 月的相应值. 渗漏水中 DRP 质量浓度沿着田面距离递减，尤其 7 月浓度较高时的减少量更明显. 与前述的相应田面水中 DRP 质量浓度相比，渗漏水中 DRP 质量浓度略高. 除了 8 月 3 日鱼塘水灌溉的渗漏水中 DRP 质量浓度显著高于藕塘水灌溉的相应值外，渗漏水中 DRP 质量浓度在不同灌溉水源间的差异不显著.

由图 5 可见，渗漏水中 DP 质量浓度在不同灌溉时期的差异比较明显，8 月渗漏水中 DP 质量浓度明显低于 7 月的相应值. 渗漏水中 DP 质量浓度沿着田面距离降低，尤其 7 月质量浓度较高时的降低量更为明显. 与前述的相应田面水中 DP 质量浓度相比，渗漏水中 DP 质量浓度略高，而 8 月的浓度也

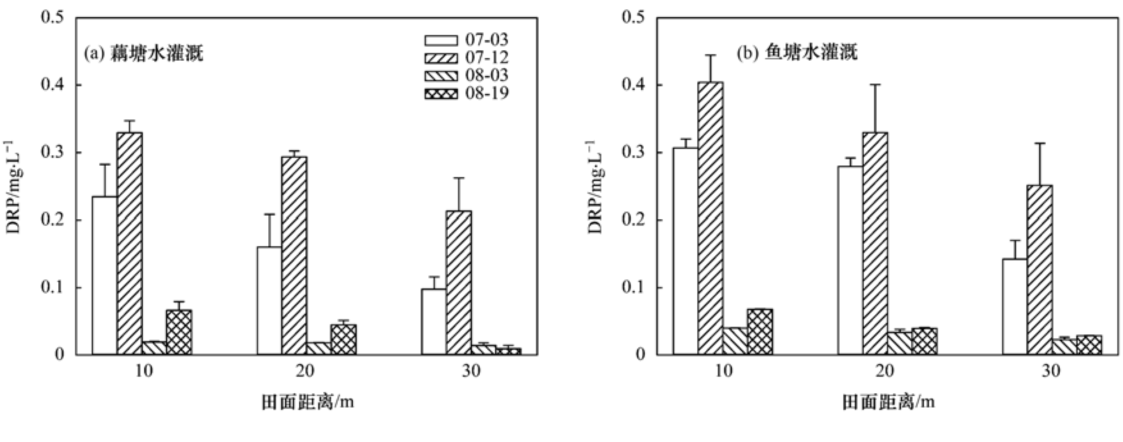

图 4　藕塘水和鱼塘水灌溉下渗漏水 DRP 质量浓度沿田面距离的变化

Fig. 4　Dissolved reactive phosphorus (DRP) concentration of leachate along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

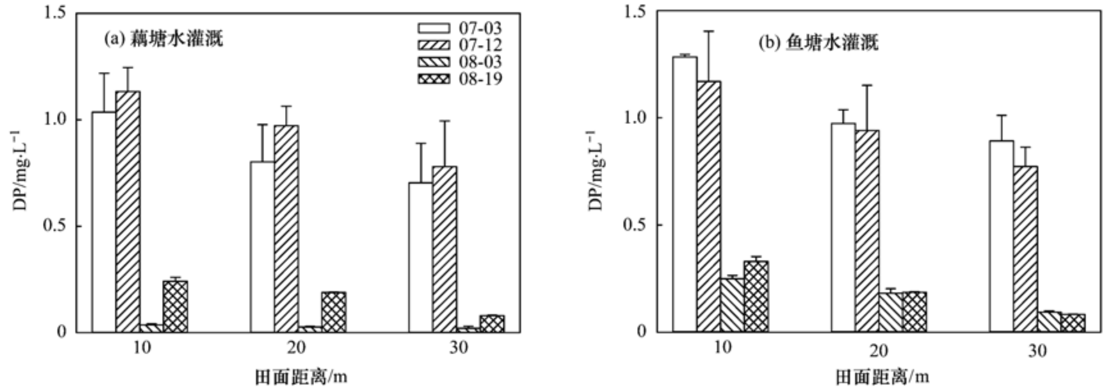

图 5 藕塘水和鱼塘水灌溉下渗漏水 DP 质量浓度沿田面距离的变化

Fig. 5 Dissolved phosphorus (DP) concentration of leachate along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

大都低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) Ⅲ类水中规定的可溶性磷浓度阈值 0.2 $mg \cdot L^{-1}$[14]. 除了 8 月 3 日鱼塘水灌溉下渗漏水中 DP 质量浓度显著高于藕塘水灌溉的相应值外,渗漏水中 DP 质量浓度在不同灌溉水源间的差异不显著.

由图 6 可见,渗漏水中 TP 质量浓度在不同灌溉时期的差异比较明显,8 月渗漏水中 TP 质量浓度明显低于 7 月的相应值. 渗漏水中 TP 质量浓度沿着田面距离降低,在 7 月质量浓度较高时的降低量更明显. 与前述的相应田面水中 TP 质量浓度相比,渗漏水中 TP 质量浓度大都略高. 除了 8 月 3 日鱼塘水灌溉的渗漏水中 TP 质量浓度显著高于藕塘水灌溉的相应值外,渗漏水中 TP 质量浓度在不同灌溉水源间的差异不显著.

2.3 土壤剖面不同形态磷素的变化

水稻收割后,藕塘水和鱼塘水灌溉下土壤 Olsen-P 含量随田面距离和剖面深度的变化见图 7. 从中可见,土壤 Olsen-P 含量随着剖面深度的增加逐渐减少,表现出表层土壤含量明显高于下层土壤的特点; 由于受排水循环灌溉的影响较小,下层土壤 Olsen-P 含量受不同灌溉水源的影响不明显. 对于表层土壤,鱼塘水灌溉下的土壤 Olsen-P 含量高于藕塘水灌溉的相应值,且距离进水口 30 m 处表土 Olsen-P 含量低于 10 m 和 20 m 处的相应值. 这表明,经由排水循环灌溉引入田间磷的表土吸附量随距进水口距离的增加而减少,并随灌溉水源磷质量浓度的增加而增加.

水稻收割后,藕塘水和鱼塘水灌溉下土壤 TP 含量随田面距离和剖面深度的变化由图 8 给出. 从中可见,土壤 TP 含量随着剖面深度的增加逐渐减少,表现出表层土壤 TP 含量明显高于下层土壤的特点. 土壤剖面 TP 含量不随灌溉水源和田面距离的变化而变化. 这表明,通过排水循环灌溉引入稻田的磷量不足以引起土壤总磷含量的变化.

3 讨论

提高稻田的磷素净化效率或减少磷流失是实行排水循环灌溉的主要目的之一. 把排水循环灌溉到田块使作物再次利用排水中的磷素成为可能,延长

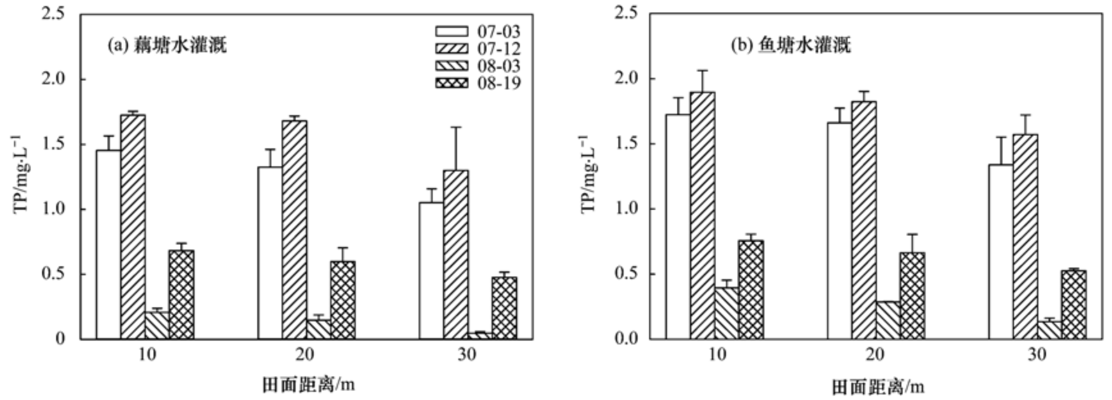

图 6 藕塘水和鱼塘水灌溉下渗漏水 TP 质量浓度沿田面距离的变化

Fig. 6 Total phosphorus (TP) concentration of leachate along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

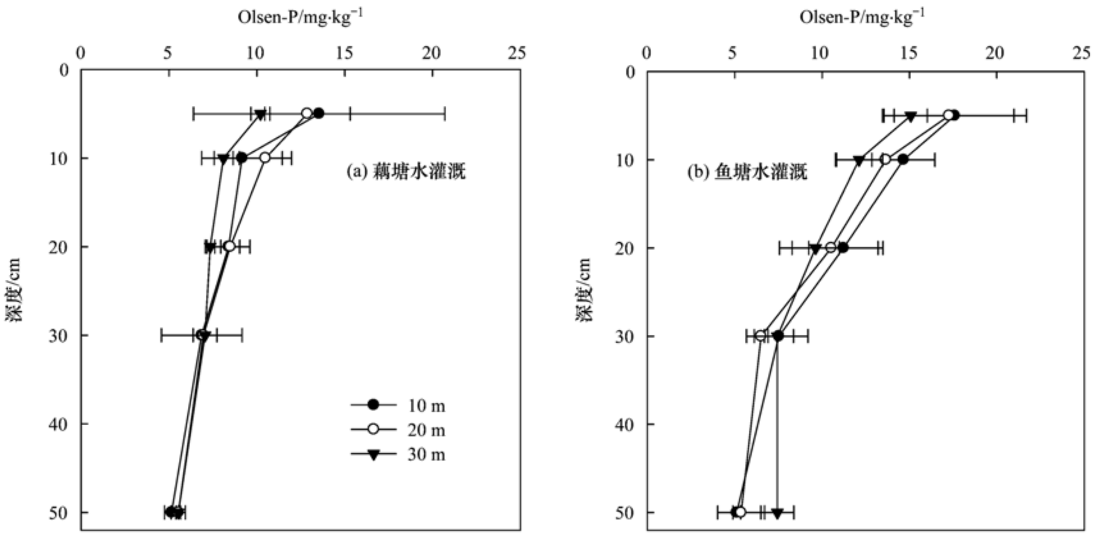

图 7　藕塘水和鱼塘水灌溉下土壤剖面 Olsen-P 含量沿田面距离的变化

Fig. 7　Olsen-P concentration of soil profile along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

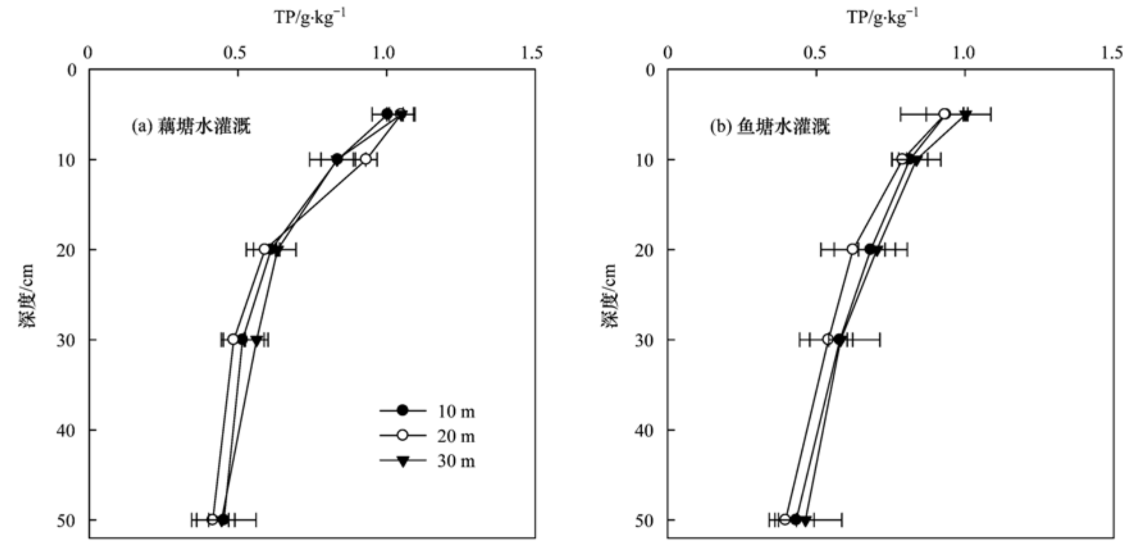

图 8　藕塘水和鱼塘水灌溉下土壤剖面 TP 含量沿田面距离的变化

Fig. 8　Total phosphorus（TP）concentration of soil profile along paddy field under the irrigation of lotus and fishpond water

水力停留时间或循环灌溉次数均能提高颗粒态磷的沉淀作用和溶解性磷的土壤吸附作用，从而提高水田的磷素净化效率[8, 13, 15]. 然而这 2 种方式有时与水稻作物需水规律和田间管理不协调，可调控的空间有限. 通过延长单个田块的长度或多个田块串联灌溉的方式，可延长循环灌溉水与土壤和作物的作用时间和作用路径，更易实现. 本文及相关研究[16]均发现稻田田面水和渗漏水中不同形态磷素质量浓度沿程降低，均支撑了延长循环灌溉水的流程能改善稻田磷素净化效率的结论.

之所以形成田面水磷质量浓度的沿程减少趋势弱于渗漏水磷质量浓度的减少程度，是由于本研究的田面水和渗漏水均于灌水后 2 ~ 4 d 后取样. 由于磷素在田面水中的扩散作用，排水循环灌溉后田面水中磷素质量浓度的沿程差异量随着时间推移而逐渐减少；而渗漏水中磷素的扩散作用受土体阻隔使其沿程差异保持更长时间. 渗漏水中的磷质量浓度高于田面水可能与渗漏水中磷质量浓度一部分来自于刚灌溉的田面水，另一部分来自于土壤剖面磷的释放有关；渗漏水磷质量浓度的沿程差异主要是由刚灌水后田面水磷质量浓度的差异造成的.

灌溉时机是影响排水循环灌溉下水田磷素净化效率的关键因子. 田面水中磷素质量浓度较高的泡田期和施肥期不宜进行排水循环灌溉，因为该时期

较高的田面磷素质量浓度再加上循环水本身的磷素质量浓度极易造成大量农田磷素的再排水流失[2, 17, 18]. 水稻生长后期随着所施肥料的消耗和作物磷需求高峰期的到来,使田面和土壤水中的磷质量浓度均达到较稳定的低水平,宜实行排水循环灌溉,这与本研究发现的 8 月田面水和渗漏水中不同形态磷质量浓度较低一致,常规清水灌溉试验研究也得到类似的结果[19, 20]. 之所以形成 7 月较高的田面水与渗漏水中磷质量浓度还与该时期的水稻晒田改善了土壤的通气条件与结构有关. 7 月的晒田使土壤从还原状态向氧化状态转化,促进了土壤磷的释放以提高了土壤水溶液和田面水中的磷质量浓度; 8 月的持续淹水还原状态促进了土壤的固磷作用,降低了磷素的释放能力和土壤水溶液中的磷含量[21, 22]. 另外当水稻土由饱和向干燥转换过程中易于形成裂隙以充当磷素渗漏通道,也使大量的土壤磷沿着这种临时形成的优先流而淋失[23, 24]. 此外,DRP 为 DP 中易于被生物利用的部分,6 月相对较低的温度及作物和水中微生物的较低生物量使其吸收利用的 DRP 量相对较少从而形成 6 月 DRP 质量浓度较高的现象[25, 26]. 因此在规划排水循环灌溉制度或工程时,应考虑利用适宜的沟塘蓄存 6 ~7 月的汛期排水,8 月再利用蓄积的排水进行补充灌溉,既能从时间尺度上调配水资源来满足作物生长需求,又可减少农田磷素排放造成的农业面源污染.

田面水与渗漏水中的磷质量浓度未随循环灌溉水源中磷质量浓度的增加而明显提高,而鱼塘水灌溉的表土 Olsen-P 含量高于藕塘水灌溉的相应值,这说明稻田土壤的磷吸附作用可起到抑制再排水中磷含量随灌溉水源磷质量浓度的增加而升高. 循环灌溉水源中的磷素在地表和土壤剖面的沉淀、吸附作用及作物的吸收利用作用是水田系统对再排水磷质量浓度变化的缓冲机制[8, 12, 13],当循环灌溉水源的磷质量浓度超过某个阈值后才会造成再排水的磷质量浓度提高. 这与常规灌溉下当磷肥施用量增加到一定程度时才会明显提高渗漏水中总磷质量浓度的结论相一致[17].

4 结论

基于藕塘水和鱼塘水循环灌溉下的稻田监测试验结果表明,排水循环灌溉下水稻田面水和渗漏水中不同形态磷素质量浓度沿程降低,尤其渗漏水的磷质量浓度减少趋势更为显著,排水循环灌溉水中磷质量浓度的一定范围变化不会增加田面水和渗漏水的磷质量浓度. 田面水和渗漏水中不同形态磷质量浓度受灌溉时期的影响明显,8 月田面水和渗漏水的磷质量浓度明显低于其它时段. 表土 Olsen-P 含量随距进水口距离的增加而减少,并随排水循环灌溉水中磷含量的增加而增加. 土壤剖面 TP 含量受排水循环灌溉的影响不明显. 延长循环灌溉水的田面流程或在 8 月的水稻需肥高峰期进行排水循环灌溉,可明显提高四湖流域的稻田磷素去除效率.

参考文献:

[1] 单真莹, 董斌, 李新建, 等. 水稻灌区非点源污染治理新方法初探[J]. 中国农村水利水电, 2008, (3): 62-65.

[2] Somura H, Takeda I, Mori Y. Influence of puddling procedures on the quality of rice paddy drainage water[J]. Agricultural Water Management, 2009, **96**(6): 1052-1058.

[3] 李学平, 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 434-439.

[4] Forster D L, Rausch J N. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution programs in two Lake Erie tributaries[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(1): 24-31.

[5] 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.

[6] 张慧敏, 章明奎. 稻田土壤磷淋失潜力与磷积累的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2008, **24**(1): 59-62.

[7] Hart M R, Quin B F, Nguyen M L. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: a review[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(6): 1954-1972.

[8] Hama T, Nakamura K, Kawashima S. Effectiveness of cyclic irrigation in reducing suspended solids load from a paddy-field district[J]. Agricultural Water Management, 2010, **97**(3): 483-489.

[9] Zulu G, Toyota M, Misawa S I. Characteristics of water reuse and its effects on paddy irrigation system water balance and the riceland ecosystem[J]. Agricultural Water Management, 1996, **31**(3): 269-283.

[10] Feng Y W, Yoshinaga I, Shiratani E, *et al*. Nutrient balance in a paddy field with a recycling irrigation system[J]. Water Science and Technology, 2005, **51**(3-4): 151-157.

[11] Takeda I, Fukushima A. Long-term changes in pollutant load outflows and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system[J]. Water Research, 2006, **40**(3): 569-578.

[12] Shiratani E, Yoshinaga I, Feng Y, *et al*. Scenario analysis for reduction of effluent load from an agricultural area by recycling the run-off water[J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(3): 55-62.

[13] Takeda I, Fukushima A, Tanaka R. Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system[J]. Water Research, 1997, **31**(11): 2685-2692.

[14] GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].

[15] Shiratani E, Munakata Y, Yoshinaga I, *et al*. Scenario analysis for reduction of pollutant load discharged from a watershed by recycling of treated water for irrigation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(6): 878-884.

[16] 谢菲，朱建强. 鱼塘-稻田复合系统中稻田规格的确定[J]. 长江大学学报(自然科学版)，2013，**10**(23)：72-75.

[17] 颜晓，王德建，张刚，等. 长期施磷稻田土壤磷素累积及其潜在环境风险[J]. 中国生态农业学报，2013，**21**(4)：393-400.

[18] 周静雯，苏保林，黄宁波，等. 不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究[J]. 环境科学，2016，**37**(3)：963-969.

[19] 彭世彰，黄万勇，杨士红，等. 田间渗漏强度对稻田磷素淋溶损失的影响[J]. 节水灌溉，2013，(9)：36-39.

[20] 叶玉适，梁新强，李亮，等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. 环境科学学报，2015，**35**(4)：1125-1135.

[21] 高超，张桃林，吴蔚东. 氧化还原条件对土壤磷素固定与释放的影响[J]. 土壤学报，2002，**39**(4)：542-549.

[22] Prem M，Hansen H C B，Wenzel W，*et al*. High spatial and fast changes of iron redox state and phosphorus solubility in a seasonally flooded temperate wetland soil[J]. Wetlands，2015，**35**(2)：237-246.

[23] Peron H，Hueckel T，Laloui L，*et al*. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils：experimental characterisation and mechanisms identification[J]. Canadian Geotechnical Journal，2009，**46**(10)：1177-1201.

[24] Simard R R，Beauchemin S，Haygarth P M. Potential for preferential pathways of phosphorus transport[J]. Journal of Environmental Quality，2000，**29**(1)：97-104.

[25] 裴婷婷，李如忠，高苏蒂，等. 合肥城郊典型农田溪流水系统沉积物磷形态及释放风险分析[J]. 环境科学，2016，**37**(2)：548-557.

[26] 汪明，武晓飞，李大鹏，等. 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究[J]. 环境科学，2015，**36**(1)：80-86.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 10

Oct. 15, 2016

CONTENTS

环境科学

（HUANJING KEXUE）
（月刊　1976 年 8 月创刊）
2016 年 10 月 15 日　第 37 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE
（Monthly　Started in 1976）
Vol. 37　No. 10　Oct. 15, 2016

主　管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343；Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订购处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司（北京 399 信箱）	Foreign		China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：120. 00 元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行