doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.035

稻田总磷迁移规律与最佳灌排模式研究

郝树荣[1]　王子欣[1]　潘永春[1]　吴蕴玉[1]　郑成鑫[1]　陈文猛[2]
(1.河海大学农业工程学院,南京 210098;2.江苏省水利科学研究院,南京 210017)

摘要:以超级稻为试验对象,采用随机试验设计,利用测桶试验,研究浅水勤灌、控制灌溉、浅湿调控、覆秸秆旱作灌排模式下地下排水及不同深度土壤渗漏液的总磷迁移规律。结果表明,与浅水勤灌和浅湿调控相比,控制灌溉和覆秸秆旱作显著降低了灌水量、灌水次数、地下排水量、总磷浓度和总磷流失负荷,有明显的节水省工减排效果。不同灌排模式地下排水总磷质量浓度波动下降,最大为 0.450 mg/L;不同灌排模式、不同深度土壤渗漏液中,总磷浓度表现不同,除分蘖后期外均为表层最高,且随土壤剖面深度的增加而降低。浅湿调控和覆秸秆旱作的土壤渗漏液总磷浓度高于浅水勤灌和控制灌溉。控制灌溉、覆秸秆旱作两年灌溉水分生产率均显著高于浅湿调控、浅水勤灌。与浅水勤灌相比,控制灌溉显著增产 10.45%,覆秸秆旱作显著减产 14.69%。综合灌排水量、灌水次数、磷素流失负荷、产量和灌溉水分生产率,控制灌溉是节水、省工、减排、高产的最佳灌排模式。

关键词:超级稻;灌排模式;总磷;土壤渗漏液;迁移规律
中图分类号:S274.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)10-0306-09

Migration Rule of Total Phosphorus in Paddy Fields and Election of Optimal Irrigation and Drainage Mode

HAO Shurong[1]　WANG Zixin[1]　PAN Yongchun[1]　WU Yunyu[1]　ZHENG Chengxin[1]　CHEN Wenmeng[2]
(1. *College of Agricultural Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*
2. *Jiangsu Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210017, *China*)

Abstract: Taking super rice as test material, the randomized block design method and barrel experiment were conducted to investigate the effects of four treatments with migration of total phosphorus (TP) in underground drainage and soil leakage loss risks and movement of phosphorus and rice yield. Four treatments were: frequent shallow irrigation (FSI), controlled irrigation (CI) wet-shallow irrigation (WSI) and drought planting with straw mulching (DPS). The results showed that compared with FSI and WSI, CI and DPS could significantly reduce irrigation amount and irrigation frequency, the concentration of TP in underground drainage and underground drainage, and effectively promote water saving and emission reduction. Under different irrigation and drainage modes, there were many fluctuations in the whole growth period, and the maximum concentration of TP in underground drainage was 0.450 mg/L. The TP concentration in soil seepage at different depths was different in different irrigation and drainage modes. Except for the late tillering period, the TP concentration was the highest on the surface and decreased with the increase of soil profile depth. The TP concentration of soil seepage in WSI and DPS was higher than that in FSI and CI. Compared with the FSI, the yield of CI was increased by 10.45% and the DPS was decreased by 14.69%. The productivity of irrigation water in two years of CI and DPS was significantly higher than that of WSI and FSI. Comprehensively considering the irrigation and drainage, irrigation frequency and phosphorus loss, yield and irrigation water productivity, CI was the best mode for water saving, labor saving, emission reduction and high yield.

Key words: super rice; irrigation and drainage mode; total phosphorus; soil leakage fluid; migration patterns

收稿日期:2019-03-24　修回日期:2019-04-15
基金项目:江苏省水利科技项目(2016007)、江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX17_0444)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017B629X14)和国家自然科学基金项目(51579069)
作者简介:郝树荣(1971—),女,副教授,主要从事节水灌排理论与技术研究,E-mail:srhao@hhu.edu.cn

0　引言

水体富营养化是当今世界水环境污染的治理难题，我国不少水体均面临富营养化问题，其与农田氮磷养分流失有密切关系[1-4]，磷是内陆水体富营养化的限制因素[5-6]。稻田是水网地区一种范围较大的土地利用方式，其管理方式直接影响着周围水体的环境状况，过量施用化肥和不合理灌排加剧了农田磷素流失[7-8]，目前我国磷肥当季利用效率仅为20%左右[9-10]，造成农业面源污染问题日益严重[11-16]。因此，稻田灌排模式下磷素的流失规律研究一直是关注的热点问题。

磷肥是植物生长发育过程中不可或缺的肥料，其重要性不亚于氮。磷是植物中核酸和蛋白质的主要组成部分，在物质的形成、代谢及运转等方面都起着非常重要的作用。同时，磷还可以促进作物根系发育，加强土壤水分利用，提高水分利用效率，其丰缺直接影响光合产物的合成和最终产量的构成。水稻是对缺磷比较敏感的作物之一，缺磷时水稻生长受到抑制，磷素含量是影响水稻精米率的重要因素之一[17]。

近年来的研究表明，除了通过地表径流进入水体的方式外，渗漏淋失也是磷向水体迁移的重要途径[18-19]。国内外研究主要集中在不同施肥方式[4,20-22]及施肥量[23]对土壤磷素淋失的影响方面，而不同灌排模式稻田磷素的迁移流失规律及环境效应报道较少。土壤剖面养分迁移转化规律的研究为采取适当措施减缓淋失提供了一定理论依据，故探讨不同灌排模式下土壤渗漏液中磷素迁移转化规律尤为重要。

本文在现有节水灌溉研究的基础上，通过测桶试验，探究不同灌排模式下稻田各生育期内地下水及不同深度土壤渗漏液磷素淋失的迁移变化特征，并选择最优灌排模式，以提高粮食产量、降低环境污染，为我国水稻节水减排、高产控污提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2017、2018 年的 5—10 月在河海大学江宁校区节水园区(31°86′N，118°60′E)进行。试验区属于亚热带湿润气候，年均降雨量 1 021.30 mm，年平均气温 15.7℃。2017 年水稻生育期内降雨量为 534.25 mm，2018 年为 470.70 mm。试验土壤取自节水园区耕作层黏壤土，土壤容重为 1.31 g/cm^3，总孔隙率 44.90%，田间持水率 25.28%，饱和含水率 38.70%，pH 值 7.2，有机质质量分数 2.40%，全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾含量(质量比)分别为 0.91 g/kg、0.32 g/kg、47.40 mg/kg、10.37 mg/kg、90.00 mg/kg。

2017 年水稻供试品种为“南粳 5055”，6 月 17 日移栽，10 月 27 日收获。2018 年水稻试验品种为“南粳 9108”，6 月 22 日移栽，10 月 21 日收获。两年施肥量一致，纯氮总施入量为 244 kg/hm^2，N、P_2O_5、K_2O 比例为 1∶0.45∶0.8。肥料采用尿素(含 N 质量分数 46%)，过磷酸钙(含 P_2O_5 质量分数 15%)，氯化钾(含 K_2O 质量分数 63%)。氮肥分 3 次施用(基肥、分蘖肥、穗肥比例为 4∶2∶4)，磷肥作基肥一次性施入，钾肥分两次施入(基肥、分蘖肥比例为 6∶4)。2017 年 6 月 16 日施基肥，6 月 27 日施分蘖肥，8 月 16 日施穗肥。2018 年 6 月 21 日施基肥，6 月 28 日施分蘖肥，8 月 10 日施穗肥。

1.2　试验设计

试验设浅水勤灌(Frequent and shallow irrigation，FSI)、浅湿调控(Wet-shallow irrigation，WSI)、控制灌溉(Controlled irrigation，CI)和覆秸秆旱作(Drought planting with straw mulching，DPS) 4 个处理，5 个重复，灌排指标见表 1，表中数据为田面水深或 30 cm 处土壤含水率所占饱和含水率 θ_s 的百分比。土壤水分达到下限时，灌水至上限，田面水深超过蓄雨上限时，排水至蓄雨上限。除灌排措施外，其他农技措施均相同。试验前将生稻草剪碎至每根长度为 5 cm，浸泡 3 d 捞起并用塑料薄膜覆盖，堆制 10 d 取出，覆盖在 DPS 处理土壤表面，用草量为6 000 kg/hm^2(折干物质质量)。

采用测桶试验，测桶尺寸 40 cm×40 cm×100 cm(长×宽×高)，底部铺设 20 cm 砂石反滤层，土表距桶顶 20 cm，土层深 60 cm，土样经晒干、打碎、过筛后分层压实装入桶中，土壤容重 1.31 g/cm^3。每桶 4 穴，每穴 3 株。测桶底部安装排水阀，可进行地下排水和采集水样。距桶顶 50 cm 处设土壤水分监测孔，用 TDR 探头测定距土表 30 cm 处土壤含水率。距土表 20、40、60 cm 处设置 3 层水样取水口。测桶外壁安装地下水位观测管，用于读取地下水位。

1.3　测定内容及方法

自分蘖期每 3 d 进行一次地下排水，将砂石反滤层中的重力水全部排空，记录排水量。地下排水水样于施基肥后 1、3、5 d，分蘖肥和穗肥前 1 d，施肥后 1、3、5、7 d 采集，之后每 6 d 采集一次，遇降雨和灌水增加取样；20、40、60 cm 深土壤渗漏液于水稻分蘖前期、分蘖后期、拔节孕穗期和抽穗开花期取样。水样采集后立即放入冰箱冷藏(4℃)，24 h 内完成水质分析。主要观测稻田地下排水及不同深度土壤渗漏液中总磷(Total phosphorus，TP)的浓度。

表 1 不同灌排模式的灌排控制指标

Tab. 1 Control indicators of irrigation and drainage of different irrigation and drainage modes

灌排模式	控制指标	返青期	分蘖前期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
FSI	灌水上限	30 mm	30 mm	0	40 mm	40 mm	40 mm	0
	灌水下限	10 mm	10 mm	60% θ_s	10 mm	10 mm	10 mm	自然落干
	蓄雨上限	40 mm	100 mm	0	150 mm	200 mm	200 mm	0
WSI	灌水上限	30 mm	20 mm	0	30 mm	30	30 mm	0
	灌水下限	10 mm	90% θ_s	60% θ_s	90% θ_s	100% θ_s	80% θ_s	自然落干
	蓄雨上限	40 mm	60 mm	0	100 mm	100 mm	80 mm	0
CI	灌水上限	30 mm	100% θ_s	0	100% θ_s	100% θ_s	100% θ_s	80% θ_s
	灌水下限	10 mm	70% θ_s	60% θ_s	70% ~80% θ_s	80% θ_s	70% θ_s	自然落干
	蓄雨上限	40 mm	60 mm	0	80 mm	80 mm	80 mm	0
DPS	灌水上限	100% θ_s	100% θ_s	0	100% θ_s	100% θ_s	100% θ_s	80% θ_s
	灌水下限	80% θ_s	60% θ_s	50% θ_s	60% θ_s	60% θ_s	50% θ_s	自然落干
	蓄雨上限	40 mm	60 mm	0	80 mm	80 mm	80 mm	0

采用钼锑抗分光光度法分析水中 TP 浓度。灌溉水和降雨带入的磷可以忽略不计。

总磷流失负荷计算公式为

$$P = ma/100$$

式中 P——总磷流失负荷,kg/hm^2

m——排水量,mm

a——总磷质量浓度,mg/L

考种与测产:于收获日测定每桶有效穗数,各处理选择有代表性的 5 穴植株测定每穗粒数、每穗实粒数并计算结实率,各处理选择 5 个 1 000 实粒测定千粒质量,测定每桶单打单收实际产量。

1.4 数据统计分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行分析,采用 Origin 2017 绘制图表,用 SPSS 18.0 进行方差分析和相关性分析。差异显著性检验方法为 Duncan 新复极差法($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同灌排模式地下排水量变化特征

稻田排水量与降雨量、灌排控制指标有直接关系,不同灌排模式各生育期地下排水量见表 2。全生育期地下排水量由大到小依次为 FSI 处理、WSI 处理、CI 处理、DPS 处理,各处理差异显著。2017 年全生育期 DPS 处理的地下排水总量为 110.19 mm,比 FSI、WSI 和 CI 处理显著减少 65.93%、58.48% 和 43.43%;CI 处理的地下排水总量为 194.80 mm,较 FSI 处理和 WSI 处理显著减少 39.77% 和 26.61%。2018 年全生育期 DPS 处理的地下排水总量为 125.35 mm,比 FSI、WSI 和 CI 处理显著减少 55.22%、44.82% 和 29.05%;CI 处理的地下排水总量为 176.66 mm,较 FSI 处理和 WSI 处理显著减少 36.89% 和 22.23%。其原因是返青期后 DPS 处理和 CI 处理除降雨后保留小于 80 mm 水层外,其余时间田面均保持无水层状态,有效减少了田间入渗量和地下排水量,合理调控了土壤水分,这与罗纨等[24]、彭世彰等[25]研究一致。

表 2 不同灌排模式各生育期地下排水量

Tab. 2 Underground drainage at different growth stages of different irrigation and drainage modes mm

年份	灌排模式	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期
2017	FSI	98.91^a	83.36^a	65.04^a	39.90^a	36.21^a	323.42^a
	WSI	80.00^b	66.64^b	55.39^b	33.55^b	29.84^b	265.42^b
	CI	58.47^c	48.97^c	40.91^c	24.52^c	21.93^c	194.80^c
	DPS	37.82^d	33.44^d	21.27^d	9.59^d	8.07^d	110.19^d
2018	FSI	104.16^a	102.35^a	47.44^a	21.12^a	4.85^a	279.92^a
	WSI	80.61^b	90.44^b	32.20^b	19.04^b	4.85^b	227.15^b
	CI	56.93^c	77.49^c	22.51^c	14.89^c	4.85^c	176.66^c
	DPS	31.93^d	74.72^d	7.27^d	6.58^d	4.85^d	125.35^d

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

由表 2 可知,各处理在水稻不同生育期的排水量不同,分蘖期和拔节孕穗期排水量较大,两个生育期排水量和占全生育期排水量的 50% 以上,原因是降雨主要集中在水稻生育前期,桶内蓄雨后水层深

度较大，排水量增大，生育后期降雨减少，地下排水量随之减少。2017 年分蘖期 CI 处理、DPS 处理排水量分别较 FSI 处理减少 40.89%、61.76%，2018 年分蘖期 CI 处理、DPS 处理排水量分别较 FSI 处理减少 45.34%、69.35%，原因是 CI 处理、DPS 处理分蘖期除降雨后保留 60 mm 水层外田面不保留水层，灌水上限、下限和雨后蓄水深度均低于 FSI 处理，CI 处理和 DPS 处理的土壤含水率低，增加了土壤水库蓄水能力，减少了降雨后稻田排水量。

2.2　不同生育期地下排水 TP 浓度动态变化

2017、2018 年各生育期地下排水 TP 浓度变化见图 1、2。两年地下排水中 TP 质量浓度变化一致。施入基肥后移栽水稻，第 2 天测得各处理地下水 TP 质量浓度达到 0.400 mg/L 以上，这可能是水稻移栽前，进行表土疏松，产生一定的土壤孔隙，田面水易沿这些大孔隙（优先流）迅速向土壤下层淋溶，10 d 后降到 0.200 mg/L。施分蘖肥和穗肥后，稻田地下排水中 TP 浓度逐渐增加，各处理 TP 浓度第 1 次峰值出现在分蘖肥施入后第 10 天，WSI、FSI、CI、DPS 处理 2017 年峰值为 0.169、0.166、0.137、0.120 mg/L，CI 处理较 FSI、WSI 处理显著降低 16.97%、18.93%，DPS 处理较 FSI、WSI 处理显著减小 27.27%、28.99%；FSI、WSI、CI、DPS 处理 2018 年峰值分别为 0.176、0.149、0.132、0.115 mg/L，CI 处理较 FSI 处理显著降低 25.00%、较 WSI 处理降低 11.41%，DPS 处理较 FSI、WSI 处理显著减小 34.66%、22.82%。第 2 次峰值出现在穗肥施入后第 5 天，WSI、FSI、CI、DPS 处理 2017 年峰值分别为 0.188、0.170、0.164、0.120 mg/L，CI 处理的峰值较 FSI 处理减少 3.53%、较 WSI 处理显著减少 12.77%，DPS 处理较 FSI、WSI 处理显著减少 29.41%、36.17%；FSI、WSI、CI、DPS 处理 2018 年峰值分别为 0.178、0.155、0.135、0.129 mg/L，CI 处理较 FSI、WSI 处理显著降低 24.24%、12.90%，DPS 处理较 FSI、WSI 处理显著减小 27.61%、16.77%。由此可见，DPS、CI 处理降污减排效果明显。

由图 1、2 可知，稻田排水中 TP 浓度在生育前期多次涨落，这与磷肥的特性有关，磷肥虽在基肥中一次性施入，但施入土壤中的磷大部分转化为难溶性磷酸盐，少部分转化成可为水稻利用的速效磷，只有极少数进入土壤渗漏液，在后期灌水和降雨的冲刷下，磷以颗粒态形式进入地下排水中，引起地下排水磷素浓度升高，因此控制灌溉水量和雨后排水是减少农田磷素流失的重要途径[26]。生育后期地下水中 TP 浓度变化幅度不大，且较前期浓度明显降低，水稻生长对磷的吸收和土壤对磷的吸附固定是磷浓度降低的主要原因。8 月施入穗肥，虽然穗肥中不含有磷素，但施入穗肥时会扰动水层，且氮肥的施入促进土壤中磷的释放，因而增大了地下排水中 TP 的流失，加大水体富营养化的可能。对比不同灌排模式下 TP 浓度可知：地下排水中的 TP 浓度在施肥后第 20 天左右降为正常值，因此，施肥后 20 d 内是磷素流失的高风险期。

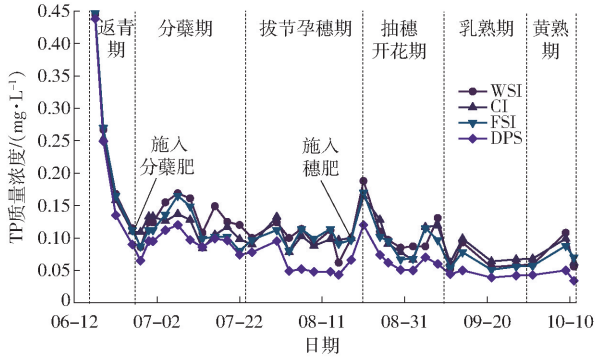

图 1　不同生育期地下排水 TP 浓度变化（2017 年）

Fig. 1　Changes of TP concentration in underground drainage at different growth stages (2017)

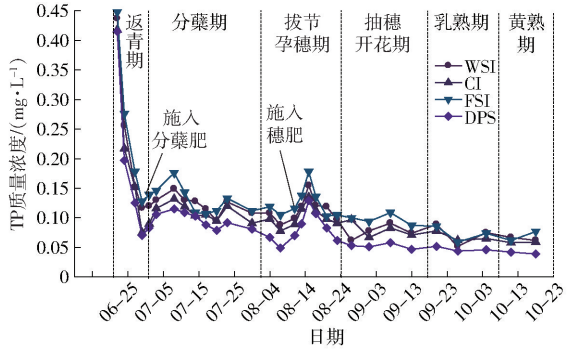

图 2　不同生育期地下排水 TP 浓度变化（2018 年）

Fig. 2　Changes of TP concentration in underground drainage at different growth stages (2018)

2.3　不同灌排模式地下排水 TP 流失负荷

不同灌排模式各生育期地下排水 TP 流失负荷见表 3。不同灌排模式各生育期 TP 淋失量保持在 0.002 ~ 0.130 kg/hm^2 范围内。全生育期 FSI 处理稻田 TP 流失负荷最大，原因是 FSI 处理稻田地下排水量最大、地下排水中 TP 浓度也比较大。2017、2018 年 WSI 处理较 FSI 处理 TP 流失负荷减少 18.06%、26.37%。CI 处理 2017 年稻田全生育期 TP 流失负荷为 0.199 kg/hm^2，较 FSI 处理显著减少 44.80%，较 WSI 处理显著减少 32.30%，排放峰值 0.011 kg/hm^2，较 FSI 处理减少 51.56%，较 WSI 处理减少 37.42%；2018 年全生育期 TP 流失负荷为 0.164 kg/hm^2，较 FSI 处理显著减少 48.53%，较 WSI 处理显著减少 30.04%，排放峰值为 0.013 kg/hm^2，较 FSI 处理减少 48.00%，较 WSI 处理减少 35.00%。CI 处理在节水减排和降污方面有显著效果。2017

年 DPS 处理下水稻全生育期 TP 流失负荷为 0.078 kg/hm^2,较 FSI 处理显著减少 78.33%,较 WSI 处理显著减少 73.56%,较 CI 处理显著减少 60.80%;排放峰值为 0.006 kg/hm^2,较 FSI 处理减少 72.23%,较 WSI 处理减少 62.52%,较 CI 处理减少 45.57%。2018 年 DPS 处理下水稻全生育期 TP 流失负荷为 0.089 kg/hm^2,较 FSI 处理显著减少 71.98%,较 WSI 处理显著减少 61.92%,较 CI 处理显著减少 45.51%;排放峰值为 0.008 kg/hm^2,较 FSI 处理减少 68.00%,较 WSI 处理减少 60.00%,较 CI 处理减少 38.46%。DPS 处理有减少排水、减少 TP 淋失的作用,减排控污效果最好。由表 3 可见,分蘖期和拔节孕穗期磷素淋失量是全生育期的 60% 左右,分蘖期和拔节孕穗期是稻田施肥量和降雨量最多的时期,因而稻田磷素淋失量较大。

表 3 不同灌排模式各生育期地下排水 TP 流失负荷

Tab. 3 TP losses load during growth period of different irrigation and drainage modes kg/hm^2

年份	灌排模式	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期
2017	FSI	0.130^a	0.095^a	0.077^a	0.027^a	0.031^a	0.360^a
	WSI	0.111^a	0.069^b	0.066^a	0.023^a	0.026^a	0.295^a
	CI	0.067^b	0.049^b	0.046^b	0.018^b	0.018^b	0.199^b
	DPS	0.036^c	0.019^c	0.015^c	0.004^c	0.004^c	0.078^c
2018	FSI	0.141^a	0.110^a	0.046^a	0.017^a	0.003^a	0.318^a
	WSI	0.102^a	0.087^a	0.026^a	0.015^a	0.003^a	0.234^a
	CI	0.064^b	0.067^b	0.018^b	0.011^b	0.003^b	0.164^b
	DPS	0.033^c	0.047^c	0.004^c	0.003^c	0.002^c	0.089^c

2.4 不同深度土壤渗漏液 TP 浓度动态变化

2017 年各生育期不同深度土壤渗漏液 TP 浓度动态变化见图 3。土壤渗漏液 TP 质量浓度与灌排模式、土层深度有密切关系。分蘖后期根系主要分布在 20 cm 处,由于根对磷素的吸收,所以 20 cm 处 TP 浓度最低,随着水稻生长发育,拔节孕穗期和抽穗开花期根长较分蘖期增加,40 cm 处土壤渗漏液 TP 浓度减小。60 cm 处土壤渗漏液 TP 质量浓度分蘖前期最大,各处理在 0.097 ~ 0.145 mg/L 之间,分蘖后期减少,拔节孕穗期及抽穗开花期 60 cm 处土壤渗漏液 TP 质量浓度小于 0.060 mg/L,可能是分蘖前期水稻植株小,需肥量不大,根吸收磷肥少,表施的磷肥会随优先流向下迁移,导致该时期土壤渗漏液 TP 质量浓度较高,随着土壤对磷的固定及水稻对磷的吸收,分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期各深度土壤渗漏液 TP 浓度大大降低[23]。

2018 年各生育期不同深度土壤渗漏液 TP 浓度动态变化见图 4。分蘖期不同深度土壤渗漏液的 TP 质量浓度最大值为 0.143 mg/L,分蘖前期由浅到深土壤渗漏液 TP 浓度减少,分蘖后期 60 cm 处 TP 浓

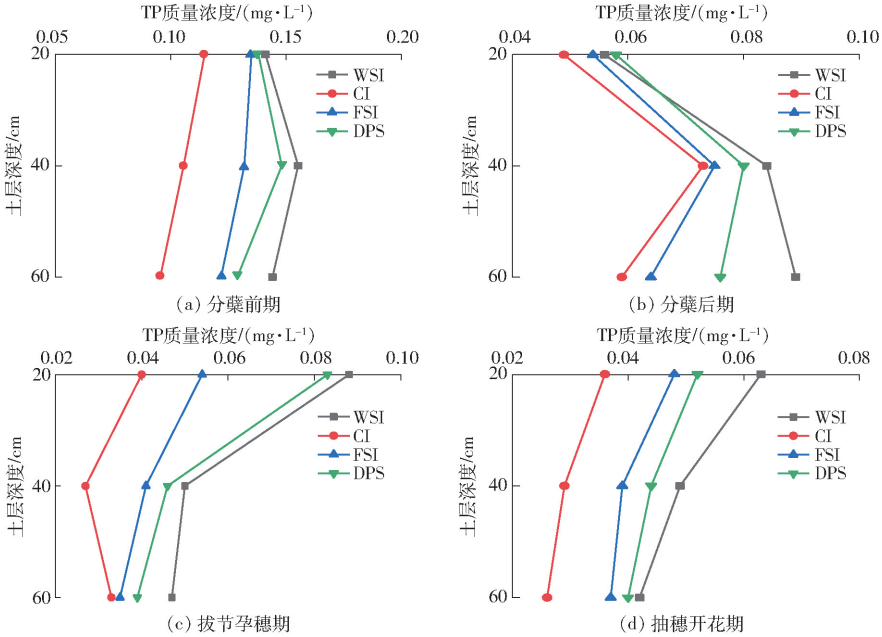

图 3 各生育期不同深度土壤渗漏液 TP 浓度(2017 年)

Fig. 3 TP concentration of soil leachate at different growth stages and depths (2017)

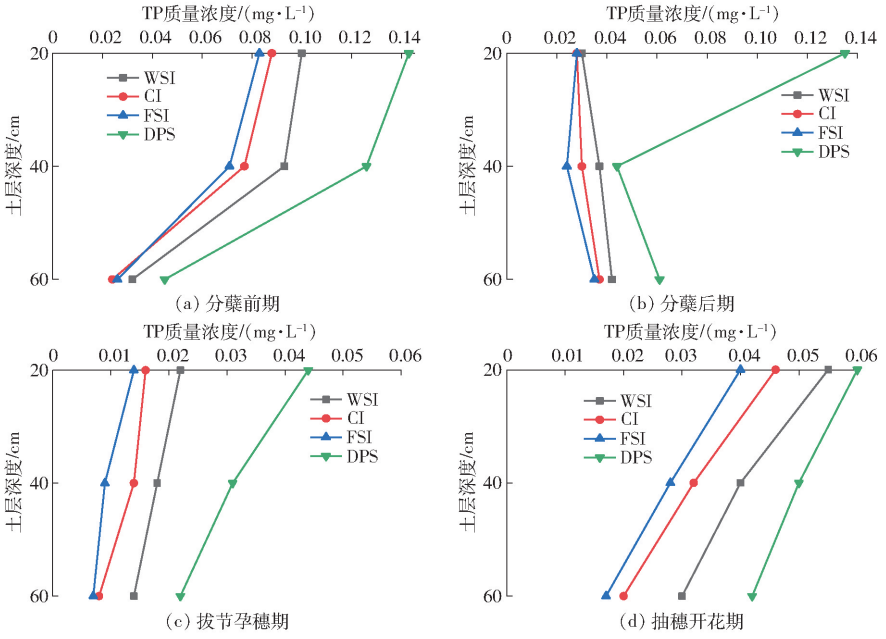

图 4　各生育期不同深度土壤渗漏液 TP 浓度(2018 年)

Fig. 4　TP concentration of soil leachate at different growth stages and depths (2018)

度与分蘖前期相差不大,20 cm 和 40 cm 处 TP 浓度降低,以 20 cm 处 TP 质量浓度降低最大,可能是分蘖后期水稻进入生长旺季,对磷素需求量增加,根系对表层土壤的总磷吸收比较快,利用率比较高。值得注意的是,分蘖后期 DPS 处理 20 cm 处土壤渗漏液 TP 浓度降低不明显,可能是水分胁迫抑制根系活力,影响根系对磷素的吸收。拔节孕穗期和抽穗开花期各处理除 DPS 处理由浅到深 TP 浓度逐渐减小,不同深度土壤 TP 质量浓度最大不超过 0.06 mg/L,WSI、CI、FSI 处理的质量浓度在 0.010 ~ 0.050 mg/L 内变化,DPS 处理显著高于其他处理。DPS 处理灌水较少,自移栽后田面不留水层,施肥后磷素富集于上层土壤,所以 20 cm 处 TP 浓度一直高于其他处理。抽穗开花期不同深度渗漏液总磷浓度均高于拔节孕穗期,原因可能是拔节孕穗期取样前一天有较大降雨,降雨引起磷素的淋失,从而使得 TP 浓度较抽穗开花期降低。

同一生育期内,2017 年与 2018 年不同灌排模式下沿剖面 TP 浓度变化趋势大体一致,2017 年由大到小依次为 WSI 处理、DPS 处理、FSI 处理、CI 处理,2018 年由大到小依次为 DPS 处理、WSI 处理、CI 处理、FSI 处理,但总体是 WSI 处理和 DPS 处理的 TP 浓度高于 FSI 处理和 CI 处理。DPS 处理土壤渗漏液 TP 浓度较大可能是因为施肥与秸秆配合施用可以促进 0.5 ~ 5 mm 水稳性团聚体的形成和提高土壤团聚体的稳定性,并且能够降低土壤容重和土粒密度[27-28],提高孔隙度,更加有利于土壤中优势流的形成,促进磷素流失,再加上由于水分控制,DPS 处理土壤含水率较其他处理小,在施入等量肥的情况下,土壤渗漏液 TP 浓度较高;WSI 处理土壤渗漏液 TP 浓度较 CI 处理、FSI 处理大的原因可能是 WSI 处理灌水量、排水量较 CI 处理大,吸附在土壤颗粒表面的难溶于水的磷酸盐比 CI 处理少,故土壤渗漏液 TP 浓度较 CI 处理大,FSI 处理由于灌水下限、蓄雨上限比 WSI 处理大,土壤含水率高,TP 浓度较 WSI 处理低。

2.5　不同灌排模式对水稻灌水和产量指标的影响

表 4 为两年试验稻田灌水次数、灌水量、产量及产量构成要素。由表 4 可知,不同灌排模式下水稻全生育期灌水量差异较大。与 WSI 处理和 FSI 处理相比,CI 处理和 DPS 处理的灌水量和灌水次数明显减少,CI 处理两年平均灌水量比 FSI 处理和 WSI 处理分别减少 24.36%、11.88%,灌水次数减少 3 ~ 4 次、1 ~ 2 次;DPS 处理两年平均灌水量比 FSI、WSI、CI 处理减少 44.47%、35.31%、26.59%,灌水次数减少 9、7、5 次。DPS 处理和 CI 处理达到了节水省工的效果。

由表 4 可知,两年试验不同灌排模式下每桶实际产量均为 CI 处理最大,WSI 处理和 FSI 处理居中,DPS 处理产量最小。与 WSI 处理相比,CI 处理 2017 年显著增产 5.89%、2018 年增产 1.03%,DPS 处理 2017 年显著减产 23.19%、2018 年减产 17.62%。与 FSI 处理相比,CI 处理 2017 年显著增产 12.91%、2018 年显著增产 8.29%,DPS 处理 2017 年显著减产 18.10%、2018 年减产 11.69%。2017 年各个处理的每穗实粒数无显著差异,2018 年

表 4 不同灌排模式下水稻灌水及产量指标

Tab. 4 Rice irrigation and yield components under different irrigation and drainage modes

年份	灌排模式	灌水次数	灌水量/mm	有效穗数/(个·桶$^{-1}$)	每穗实粒数/个	结实率/%	千粒质量/g	实际产量/(g·桶$^{-1}$)	灌溉水分生产率/(kg·m^{-3})
2017	FSI	13	808.17	64.80^{ab}	151.00^{a}	84.23^{a}	24.75^{b}	210.12^{b}	1.80^{c}
	WSI	12	682.13	69.96^{a}	142.20^{a}	87.81^{a}	25.27^{a}	224.04^{b}	2.27^{b}
	CI	10	579.64	70.56^{a}	145.40^{a}	86.88^{a}	24.87^{b}	237.24^{a}	2.83^{a}
	DPS	5	408.59	59.04^{b}	143.80^{a}	87.36^{a}	24.71^{b}	172.08^{c}	2.92^{a}
2018	FSI	17	837.95	67.20^{b}	142.31^{b}	93.67^{a}	25.50^{b}	240.12^{b}	1.98^{c}
	WSI	14	730.96	67.68^{b}	152.00^{ab}	94.02^{a}	25.64^{b}	257.40^{ab}	2.44^{b}
	CI	13	665.51	75.48^{ab}	160.50^{a}	94.26^{a}	26.11^{a}	260.04^{a}	2.71^{a}
	DPS	7	505.54	74.28^{a}	125.75^{c}	92.39^{a}	24.69^{c}	212.04^{b}	2.90^{a}

CI 处理显著高于 FSI、DPS 处理;两年 4 个处理的结实率差异均不显著。CI 处理两年的每桶有效穗数相较其他处理最大。DPS 处理、CI 处理两年灌溉水分生产率均显著高于 WSI、FSI 处理;DPS 处理高于 CI 处理,但差异性不显著,虽然 DPS 处理灌溉水量最低,但因为其水分的节省幅度高于产量下降的幅度,所以其灌溉水分生产率较高。可见 CI、DPS 处理显著提高了灌溉水的利用率。

3 讨论

本研究通过两年的测桶试验,揭示不同灌排模式下稻田磷素流失规律及水稻产量的差异,旨在探索超级稻对不同灌排模式及磷素流失负荷的响应,评价灌排模式的环境效应,为水稻生产的节水减排提供有益的技术依据。

试验结果表明,不同灌排模式稻田全生育期地下排水量由大到小依次为浅水勤灌、浅湿调控、控制灌溉、覆秸秆旱作,各处理间差异显著,且生育前期较大,后期逐渐减小,这同乔欣等[29]研究结果相近。与浅水勤灌和浅湿调控相比,控制灌溉和覆秸秆旱作有效调控了土壤含水率,减少深层渗漏,降低了灌水次数,节约灌水量。

各处理施入基肥后地下排水中总磷质量浓度达到 0.400 mg/L 以上,然后迅速降低。施入分蘖肥和穗肥,各处理地下水总磷浓度逐渐升高,在施入分蘖肥后 10 d、穗肥后 5 d 出现峰值,20 d 左右降为正常值,这同文献[19,30-31]的研究结果不一致,如陆欣欣等[30]研究表明,施肥后 30 d 内是磷素渗漏流失的主要阶段,主要原因可能是由于土壤类型、施肥种类及用量、田间水分管理以及监测深度等方面的差异所致。控制灌溉和覆秸秆旱作的两年平均总磷流失负荷分别为 0.182、0.084 kg/hm^2,均显著低于浅水勤灌(0.339 kg/hm^2)和浅湿调控(0.265 kg/hm^2),可有效减少环境污染。总磷的流失量随排水量的减少而减少,控制排水对减少稻田磷素流失具有明显效果。

水是土壤中磷素向下迁移的载体,不同深度土壤渗漏液中磷素的含量可以反映土壤磷素的动态分布与变化。土壤渗漏液总磷浓度除分蘖后期外均为表层最高,且随剖面深度的增加而减少,说明 TP 的深层富集现象不严重。这与文献[4,29,32]的研究结果相近。分蘖后期 20 cm 处土壤渗漏液总磷浓度最低,可能是由于该阶段根系主要分布在此深度,根对磷素的吸收使得 TP 浓度较小。2017 年土壤渗漏液总磷浓度由大到小依次为浅湿调控、覆秸秆旱作、浅水勤灌、控制灌溉,2018 年为覆秸秆旱作、浅湿调控、控制灌溉、浅水勤灌,总体是浅湿调控和覆秸秆旱作的总磷浓度高于浅水勤灌和控制灌溉。就土壤剖面总磷浓度而言,浅水勤灌和控制灌溉对减少水体污染有一定的效果。

不同灌排模式下每桶实际产量两年均为控制灌溉最大,平均为 248.64 g/桶,浅湿调控、浅水勤灌居中,分别为 240.72、225.12 g/桶,覆秸秆旱作产量最小,为 192.06 g/桶。覆秸秆旱作由于水稻长期处于水分亏缺状态,根冠生长受到抑制,导致千粒质量低,是造成产量低的主要原因。覆秸秆旱作和控制灌溉两年灌溉水分生产率平均为 2.91、2.77 kg/m^3,均显著高于浅湿调控(2.36 kg/m^3)和浅水勤灌(1.89 kg/m^3)。覆秸秆旱作灌溉水分生产率虽然有所增高,但水稻产量明显降低。

4 结论

(1)覆秸秆旱作和控制灌溉较浅水勤灌和浅湿调控明显减少了灌水量和灌水次数,覆秸秆旱作、控制灌溉两年平均灌水量比浅水勤灌减少 44.47%、24.36%,灌水次数减少 9 次、3 ~ 4 次。覆秸秆旱作、控制灌溉全生育期两年平均地下排水量为 117.77、185.73 mm,较浅水勤灌显著减少 60.96%、52.18%。覆秸秆旱作和控制灌溉有效控制了土壤含水率,减少了深层渗漏,有明显的节水省工减排

作用。

(2)不同灌排模式全生育期稻田地下水中总磷浓度波动下降,最大为 0.450 mg/L,在施入分蘖肥第 10 天、穗肥第 5 天出现峰值,施肥后 20 d 降为正常值。控制灌溉模式下水稻全生育期两年平均总磷流失量为 0.182 kg/hm^2,较浅水勤灌、浅湿调控显著减少 46.48%、31.40%,减少了环境污染;覆秸秆旱作水稻全生育期总磷流失量为 0.084 kg/hm^2,较浅水勤灌、浅湿调控显著减少 75.33%、68.37%。覆秸秆旱作和控制灌溉可有效降低稻田磷素流失风险,减少农业面源污染。土壤渗漏液总磷浓度除分蘖后期外均为表层最高,随土壤剖面深度的增加而降低。浅水勤灌和控制灌溉的土壤渗漏液总磷浓度低于浅湿调控和覆秸秆旱作,有减排控污的效果。

(3)控制灌溉产量最高,浅湿调控和浅水勤灌居中,覆秸秆旱作产量最低。与浅水勤灌相比,控制灌溉显著增产 10.45%,覆秸秆旱作显著减产 14.69%。覆秸秆旱作、控制灌溉的平均灌溉水分生产率分别为 2.91、2.77 kg/m^3,显著高于浅湿调控(2.36 kg/m^3)和浅水勤灌(1.89 kg/m^3)。控制灌溉显著提高水稻产量,从而大幅提高水稻水分利用率,达到高产高效的目的。

(4)综合灌排水量、磷素流失负荷、产量及灌溉水分生产率,控制灌溉最佳,是一种可节约用水、提高水稻产量、减少磷流失的高效灌排模式,适宜大面积推广。

参 考 文 献

[1] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5917): 1014 - 1015.

[2] SCHELSKE C L. Eutrophication: focus on phosphorus[J]. Science, 2009, 324(5928): 722.

[3] VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. Science, 2009, 324(5934): 1519 - 1520.

[4] 张田, 许浩, 茹淑华, 等. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5247 - 5255.
ZHANG Tian, XU Hao, RU Shuhua, et al. Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5247 - 5255. (in Chinese)

[5] 颜廷梅, 杨林章, 单艳红. 稻田土壤养分的迁移规律及其环境风险[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1189 - 1193.
YAN Tingmei, YANG Linzhang, SHAN Yanhong. Movement of soil nutrients in paddy field and it's environmental risk [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(6): 1189 - 1193. (in Chinese)

[6] ONGLEY E D, XIAOLAN Z, TAO Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1159 - 1168.

[7] 岳玉波, 沙之敏, 赵峥, 等. 不同水稻种植模式对氮磷流失特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12): 1424 - 1432.
YUE Yubo, SHA Zhimin, ZHAO Zheng, et al. Effects of rice cultivation patterns on nitrogen and phosphorus leaching and runoff losses[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(12): 1424 - 1432. (in Chinese)

[8] 郑恩楠, 杨桦, 陈鹏, 等. 水氮管理模式下水稻碳氮吸收、土壤呼吸与产量效应[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 287 - 295.
ZHENG Ennan, YANG Hua, CHEN Peng, et al. Effects of carbon-nitrogen absorption, soil respiration and yield of rice under water and fertilizer management modes [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 287 - 295. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180634&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.034. (in Chinese)

[9] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915 - 924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficient of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915 - 924. (in Chinese)

[10] 胡宁, 袁红, 蓝家程, 等. 岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7393 - 7402.
HU Ning, YUAN Hong, LAN Jiacheng, et al. Factors influencing the distribution of inorganic phosphorus fractions in different vegetation restoration areas in karst rocky desertification areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7393 - 7402. (in Chinese)

[11] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259 - 273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259 - 273. (in Chinese)

[12] 毛战坡, 杨素珍, 王亮, 等. 磷素在河流生态系统中滞留的研究进展[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 515 - 524.
MAO Zhanpo, YANG Suzhen, WANG Liang, et al. A review of phosphorus retention in river ecosystems [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 515 - 524. (in Chinese)

[13] 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.
YE Yushi, LIANG Xinqiang, LI Liang, et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(4): 1125 - 1135. (in Chinese)

[14] 徐红娇, 包立, 张乃明, 等. 滇池流域不同利用方式红壤渗滤液的磷素形态变化[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 267 - 271.

XU Hongjiao, BAO Li, ZHANG Naiming, et al. Changes of phosphorus fractions in leachate from red soil under different land use types in Dianchi basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 267 - 271. (in Chinese)
[15] 胡冰涛, 张龙江, 杨士红, 等. 稻田氮、磷损失与过程监测方法研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(9): 788 - 796.
HU Bingtao, ZHANG Longjiang, YANG Shihong, et al. Research advances on process and monitoring methods of nitrogen and phosphorus loss in paddy fields[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(9): 788 - 796. (in Chinese)
[16] 韩梅, 李东坡, 武志杰, 等. 持续六年施用不同磷肥对稻田土壤磷库的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 929 - 935.
HAN Mei, LI Dongpo, WU Zhijie, et al. Response of soil phosphorus pool after 6 years application of different phosphorus fertilizers in a paddy field [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 929 - 935. (in Chinese)
[17] 李亚龙, 崔远来, 吕国安, 等. 不同水分条件下旱稻磷效应及水分生产率[J]. 节水灌溉, 2005(6): 1 - 4,7.
LI Yalong, CUI Yuanlai, LÜ Guoan, et al. Phosphorus efficiency and water productivity of aerobic rice under different water regimes [J]. Water Saving Irrigation, 2005(6): 1 - 4,7. (in Chinese)
[18] 刘娟, 包立, 张乃明, 等. 我国 4 种土壤磷素淋溶流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 64 - 70.
LIU Juan, BAO Li, ZHANG Naiming, et al. Characteristics of phosphorus leaching losses in four soils in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 64 - 70. (in Chinese)
[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.
PENG Shizhang, HUANG Wanyong, YANG Shihong, et al. Effect of field seepage rate on phosphorus leaching losses in paddy fields [J]. Water Saving Irrigation, 2013(9): 36 - 39. (in Chinese)
[20] 张翼, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥方式下稻田氮磷流失特征[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2015, 33(1): 1 - 7.
ZHANG Yi, YUE Yubo, ZHAO Zheng, et al. Nitrogen and phosphorus lss in paddy field with different fertilizer application [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2015, 33(1): 1 - 7. (in Chinese)
[21] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤有效磷累积与淋溶的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1195 - 1200.
XIAO Hui, PAN Jie, CHENG Wenjuan, et al. Effect of different organic manures on accumulation and leaching of Olsen-P in greenhouse soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1195 - 1200. (in Chinese)
[22] 闻轶, 张翰林, 谢剑炜, 等. 不同施肥处理对稻田系统氮素流失的影响[J]. 科技通报, 2011, 27(4): 549 - 553.
WEN Yi, ZHANG Hanlin, XIE Jianwei, et al. Studies on the nitrogen loss from rice field with different fertilizer treatments [J]. Bulletin of Science and Technology, 2011, 27 (4): 549 - 553. (in Chinese)
[23] 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.
YAN Xiao, WANG Dejian, ZHANG Gang, et al. Soil phosphorous accumulation in long-term P fertilization paddy field and its environmental effects [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(4): 393 - 400. (in Chinese)
[24] 罗纨, 贾忠华, 方树星, 等. 灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 608 - 612,618.
LUO Wan, JIA Zhonghua, FANG Shuxing, et al. Effect of drainage control on salt and water balance in rice field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 608 - 612,618. (in Chinese)
[25] 彭世彰, 郝树荣, 刘庆, 等. 节水灌溉水稻高产优质成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2000,19(3): 3 - 7.
PENG Shizhang, HAO Shurong, LIU Qing, et al. Study on the mechanisms of yield-raising and quality-improving for paddy rice under water-saving irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2000, 19(3): 3 - 7. (in Chinese)
[26] 孙亚亚, 俞双恩, 陈军, 等. 暴雨条件下不同灌排模式稻田排水中氮磷变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014,42(5): 455 - 459.
SUN Yaya, YU Shuang'en, CHEN Jun, et al. Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(5): 455 - 459. (in Chinese)
[27] 聂军, 郑圣先, 杨曾平, 等. 长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(7): 1404 - 1413.
NIE Jun, ZHENG Shengxian, YANG Zengping, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizer, pig manure and rice straw on physical properties of a reddish paddy soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(7): 1404 - 1413. (in Chinese)
[28] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3525 - 3532.
HAN Xiaofei, XIE Deti, GAO Ming, et al. Effects of reduced-phosphorus fertilizer and combinations of organic fertilizers on phosphorus leaching in purple paddy soil with conventional paddy-upland rotation tillage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3525 - 3532. (in Chinese)
[29] 乔欣, 邵东国, 刘欢欢, 等. 节灌控排条件下氮磷迁移转化规律研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 862 - 868.
QIAO Xin, SHAO Dongguo, LIU Huahuan, et al. Study on the moving and transforming law of N and P under water-saving irrigation and controlled drainage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 862 - 868. (in Chinese)
[30] 陆欣欣, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 394 - 400.
LU Xinxin, YUE Yubo, ZHAO Zheng, et al. Phosphorus loss and migration characteristics in paddy fields under different fertilization treatments[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(4): 394 - 400. (in Chinese)
[31] 李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1832 - 1838.
LI Xueping, SUN Yan, SHI Xiaojun. Characteristics of phosphorus leaching and its impact on groundwater in purple paddy soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008,28(9):1832 - 1838. (in Chinese)
[32] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 湖南典型土壤磷素剖面分布特征及其流失风险[J]. 中国农学通报, 2012, 28(8): 223 - 227.
QIU Yaqun, GAN Guojuan, LIU Wei, et al. The study of distribution characteristics of phosphorus of typical soils in Hunan and it's loss risk [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(8):223 - 227. (in Chinese)