

张立进,巢思琴,鲁梦珍,等.优化施肥对油菜-水稻复种系统作物产量及氮磷流失的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(6):27-34.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.003

优化施肥对油菜-水稻复种系统作物产量及氮磷流失的影响

张立进^{1,2},巢思琴^{1,2},鲁梦珍³,黄国勤¹,钱国明²,夏立明²,盛金科²

1. 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西农业大学生态科学研究中心,南昌 330045;

2. 江西省红壤及种质资源研究所,南昌 331717;

3. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125

摘要 为探究优化施肥对作物产量和稻田径流水中氮磷流失动态变化的影响,通过定位监测试验,研究了主因子优化处理、综合优化处理和常规处理3种施肥模式下油菜-水稻轮作田中氮磷浓度变化、径流水中氮磷累积流失量以及作物产量。结果显示:整个生育期径流水中全氮、硝态氮、总磷和可溶性磷含量呈先增加后下降然后趋于稳定的趋势,而油菜生长期铵态氮含量一直处于较低状态。与常规处理相比,主因子优化处理径流水中全氮、铵态氮、硝态氮的平均含量分别下降31.44%、45.45%、28.84%。常规处理全氮、铵态氮、硝态氮累积流失量分别为10.92、0.37、9.16 kg/hm²,主因子优化处理和综合优化处理全氮累积流失量较常规处理分别降低了31.41%、22.99%,铵态氮累积流失量较常规处理分别降低了2.71%、43.24%,硝态氮累积流失量较常规处理分别降低了31.01%、29.81%。油菜综合优化处理产量为1 954.6 kg/hm²,比主因子优化处理和常规处理产量分别增加4.60%和4.79%,水稻综合优化处理产量为6 375.5 kg/hm²,比主因子优化处理和常规处理分别增加3.76%和0.81%。研究结果表明,与常规施肥相比,综合优化处理既可显著提高作物产量,又能有效降低稻田氮磷流失风险。

关键词 油菜-水稻复种系统;减量施肥;氮磷流失;肥料利用率;面源污染

中图分类号 S153;S344.1+3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0027-08

不同地区、不同作物以及不同的施肥习惯导致我国化肥的施用量严重超标^[1]。据统计,我国是世界上化肥施用量最大的国家,稻田单季平均氮肥用量为180 kg/hm²,平均施磷量为90 kg/hm²^[2],并且氮肥的利用率低至27%~35%^[3],磷肥的利用率更低,只有10%~20%^[4],大部分氮磷滞留在表层土壤中不能被植物所吸收,这意味着超过一半以上的氮磷通过地表径流及渗漏、淋溶等途径流失到环境之中^[5-6],导致土壤与地下水体污染造成水体富营养化、地下水硝酸盐超标进而对环境造成污染。因此,如何科学管控稻田氮磷输入,减少稻田中氮磷肥的损失,降低农业面源污染是一项重要而紧迫的任务。

有机肥能提高土壤的透气性,改善土壤保水、保肥性能,减少养分损失。研究表明,有机肥能够提高

土壤肥力和肥料利用率,实现养分高效利用,从而达到增产效果^[7]。水稻秸秆是一种含碳丰富的能源物质,含有大量的有机质和氮、磷、钾等水稻必需的养分,是保持和提高土壤肥力的重要物质基础;谷壳灰也是有机肥的一种,属于不完全燃烧时产生的混合物,含有大量的磷钾等养分物质,施用后可减少化肥用量、减轻污染、增强作物抗寒性,同时一定程度上提高作物产量,但当前我国对水稻秸秆有机肥资源化利用程度并不高^[8]。本研究通过设置减量施氮和有机肥部分替代无机肥施肥模式下,探讨不同处理对稻田径流水中氮磷流失的动态变化和对作物产量的影响,以期作为作物合理施肥、提高氮素利用率、提高作物产量和农业面源污染的防控提供科学依据。

收稿日期:2022-04-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300208);国家自然科学基金项目(41661070);中国工程院咨询研究项目(2017-XY-28);江西农业大学作物学“一流学科”建设项目

张立进, E-mail: 570208044@qq.com

通信作者:黄国勤, E-mail: hgqjxes@sina.com

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试品种

试验于2019年11月—2020年11月在江西省余江县邓家埠水稻原种场进行。试验田地东经116°41′~117°09′,北纬28°04′~28°37′,属于亚热带湿润季风气候,气候温和,雨水充沛,日照充足,年均气温17.6℃,年均降水量1788.8 mm,其中4—6月份平均降水量844.8 mm,7—9月份平均降水量降低至350.9 mm。年均日照时数1739.4 h,无霜期258 d。试验地地平整,多为泥沙淤积土,少数为红壤土,土质肥沃,偏微酸性,试验前土壤基本的农化性状为:pH 5.67,有机质33.56 g/kg,全氮1.72 g/kg,全磷0.56 g/kg,全钾21.96 g/kg,碱解氮85.21 mg/kg,速效磷47.38 mg/kg,速效钾147.36 mg/kg。试验油菜品种为丰油730,水稻品种为籼型常规水稻美香占2号。

1.2 试验设计与田间管理

试验设置常规、主因子优化、综合优化3个处理。3次重复,共9个小区。每个小区长10 m,宽3 m,单向排列。试验区四周设置保护行,保护行宽度为3 m。常规处理:油菜和水稻均采用当地常规田间管理方法和施肥量;主因子优化处理:在常规施肥基础上采用化肥减量施肥方法,其他措施均同常规处理;综合优化处理:水稻采用减量施肥和秸秆还田,油菜采用减量施肥和追施谷壳灰,其他措施同常规处理。处理中施用的氮肥为尿素(N 46%)、磷肥为钙镁磷肥(P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(K₂O 60%),具体施肥情况见表1。

水稻磷肥和钾肥全部作基肥施用:氮钾肥按6:4作基肥和追肥施用(30%做蘖肥,10%做穗肥)。基肥于移栽前最后一次耙田时施下,移栽后寸水反青,浅水分蘖,够苗80%时及时断水搁田。并采取2~3次轻搁田,齐穗后以湿润灌溉为主到成熟。油菜施肥方法:磷肥和磷肥全部作基肥施用,氮钾肥按3:7做基肥和追肥施用(40%做苗肥,30%做穗肥),基肥在移栽前施入行间(移栽线沟),移栽后做好开沟排水工作及及时中耕除草、培土,追施苗肥。

油菜2019年11月25日施苗肥,12月23日施基肥,2020年5月4日油菜收割;6月15日水稻秸秆还田,6月22日施基肥,6月24日移栽,6月30日施追肥,9月9日施穗肥,10月9日水稻收割。试验小区除人工整地外,其他管理措施完全按照当地种植习惯实施,种植小区之间用水泥加固好,防止雨天小区间雨水串灌。

表1 不同处理油菜-水稻田间施肥情况

作物 Corp	处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
油菜 Rapeseed	主因子优化处理 Principal factor optimization	120	90	150
	综合优化处理 Integrated optimization treatment	120	—	—
	常规处理 Conventional treatment	135	105	150
水稻 Rice	主因子优化处理 Principal factor optimization	180	90	150
	综合优化处理 Integrated optimization treatment	150	82.5	150
	常规处理 Conventional treatment	207	112.5	180

注:油菜主因子优化处理:施谷壳灰替代磷钾肥,施谷壳灰7500 kg/hm²,作基肥一次性施入;水稻主因子优化处理:施水稻秸秆200%。Note: Principal factor optimization treatment of rapeseed-seed: replacing P and K fertilizer with rice husk ash: 7500 kg/hm² rice husk ash was applied once as base fertilizer; Rice main factor optimization: applying 200% rice straw.

1.3 样品采集与测定

2019年11月至2020年10月,统计全年降雨过程发生径流次数,降雨后通过集流池内水位刻度的变化利用体积法求得径流量,将径流池内水搅匀后用500 mL的取样瓶取样。为保证测试结果的准确度,水样采集后立即置于4℃冷藏保存,在48 h内完成测试;油菜和水稻收割后计算每个小区的实际产量。

全氮含量采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定;铵态氮、硝态氮含量采用0.45 μm滤膜过滤-流动分析仪测定;全磷含量采用过硫酸钾消煮-钼酸铵分光光度法测定;水溶性磷采用0.45 μm滤膜抽滤-过硫酸钾消煮-钼酸铵分光光度法测定。

1.4 相关指标计算方法

降雨产生径流后,田间的氮、磷流失量的计算公式为:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n (C_i \times V_i)$$

式中:Q_i为产流后氮、磷流失量,kg/hm²;C_i为第i次径流水中氮、磷的质量浓度,mg/L;V_i为第i次径

流小区径流量, L; n 是 1 个完整的监测期(油菜+水稻季)的径流事件总数。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行统计分析。用 SPSS 26.0 软件进行数据处理和统计分析, 采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan's 法进行方差分析和多重比较, 利用 Origin 2021 软件作图。

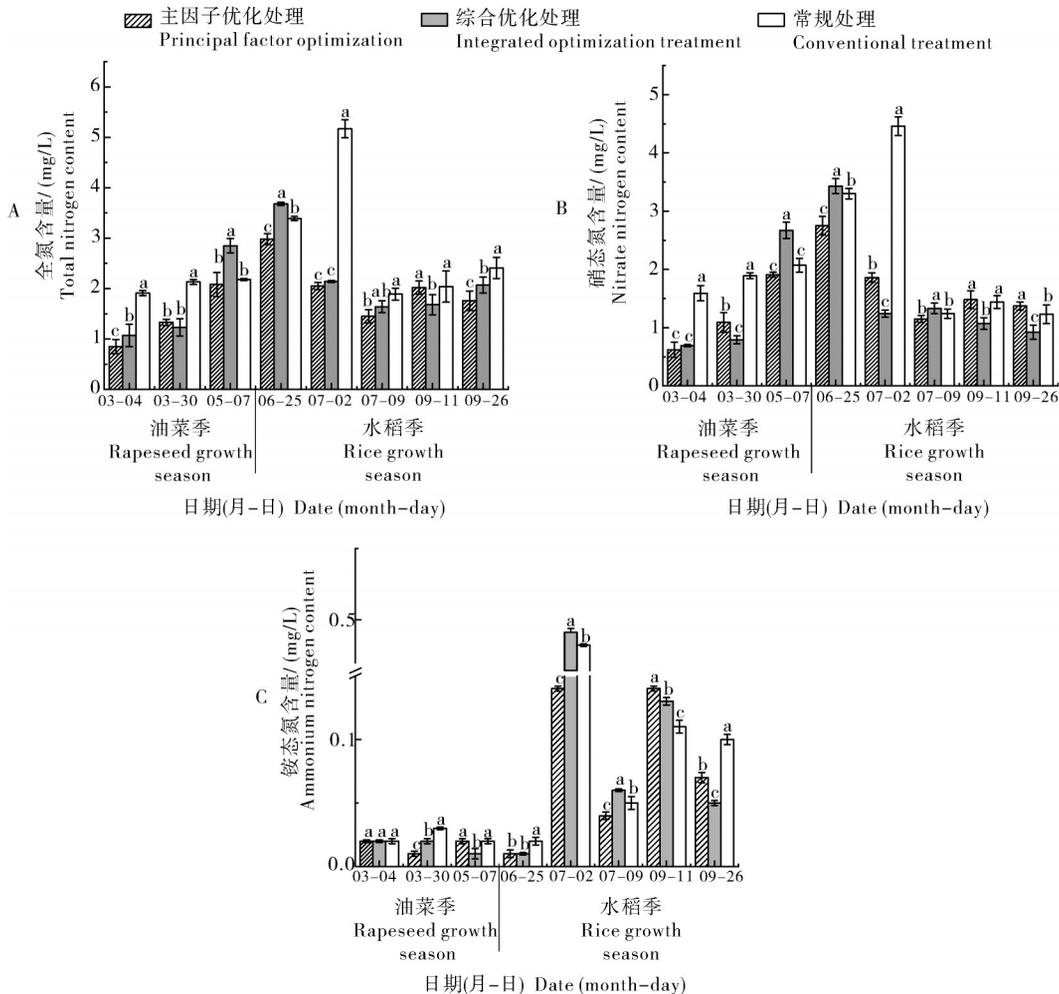
2 结果与分析

2.1 不同施肥模式下水体中氮素流失量的变化

整个油菜季不同处理径流水中全氮和硝态氮含量呈缓慢上升趋势。水稻季, 施入基肥 3 d 后主因子优化处理和综合优化处理含量达到最大值随后下降, 而常规处理全氮和硝态氮含量在施入追肥 2 d 后继续增大到 5.17 mg/L 和 4.46 mg/L, 随后下降保持

相对稳定(图 1 A 和图 1B)。在油菜花期常规处理的全氮和硝态氮含量都显著高于其他处理, 从油菜成熟到空闲田地综合优化处理全氮和硝态氮含量增幅明显。在水稻季, 主因子优化处理和综合优化处理的全氮和硝态氮含量低于常规处理, 原因可能是单施尿素在水稻田中分解速度快, 而尿素配合有机肥(谷壳灰/水稻秸秆)施用水稻田的分解速度会下降。

在油菜季, 铵态氮含量水平整体偏低, 没有太大变化; 在水稻季, 施入追肥 2 d 后铵态氮含量变化明显(图 1 C), 达到第 1 次顶峰, 其中综合优化处理最为明显。施入追肥 3 d 后达到第 2 次顶峰, 随后慢慢下降, 综合优化处理含量下降速率较快, 说明谷壳灰和水稻秸秆的分解对氮含量的排放有一定影响。



同一日期柱状图上的不同小写字母表示处理之间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters in the same column (the same date) indicate significant differences between treatments at 0.05 level. The same as follows.

图 1 径流水中全氮、硝态氮和铵态氮含量的变化(2020年)

Fig.1 Changes of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents in runoff water in 2020

2.2 不同施肥模式下水体中磷素流失量的变化

由图2可以看出:在油菜和水稻生长季中,径流水中总磷和可溶性磷含量主因子优化处理和综合优化处理均大于对照,其中水稻季磷素的含量整体上高于油菜季。水稻施入追肥(6月30日)和穗肥(9月9日)后,3个处理的总磷和可溶性磷持续大幅上升,存在显著差异,第7次径流在施入穗肥2 d后磷素含

量达到顶峰,此时主因子优化处理、综合优化处理径流水中总磷含量和可溶性磷比常规处理分别提高42.86%、10.87%和43.24%、18.92%。整体来看,总磷含量和可溶性磷含量的变化趋势基本一致,只是个别小幅度差异,可见,稻田中磷素的主要流失形态也一直处于变化之中。

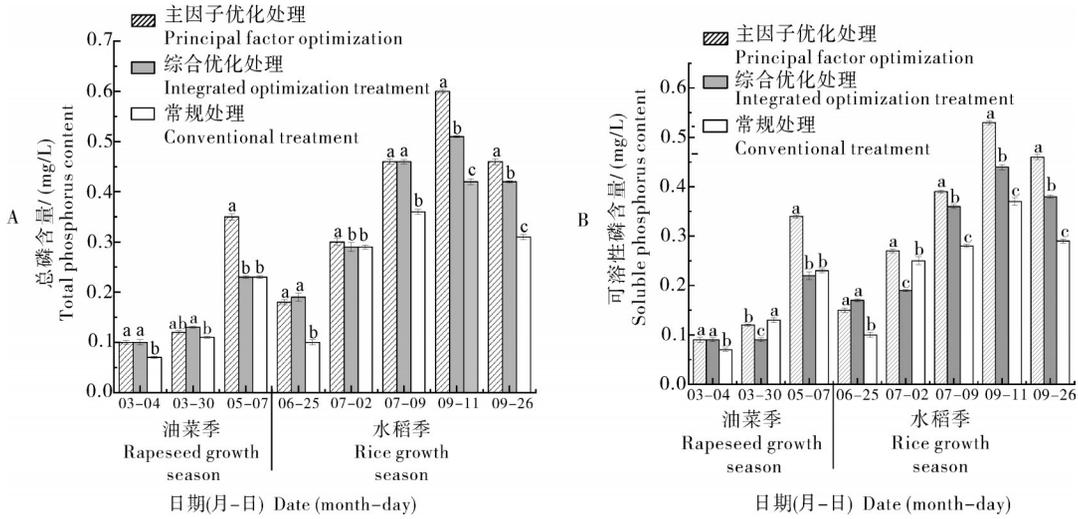


图2 径流水中全磷和水溶性磷含量的变化(2020年)

Fig.2 Changes of total phosphorus and water-soluble phosphorus contents in runoff water in 2020

2.3 不同施肥模式下水体中氮磷的平均含量

从表2可以看出,常规处理全氮、铵态氮和硝态氮的平均含量分别为2.64、0.11、2.15 mg/L,显著高于其他处理,说明有机无机肥配施下径流水中全氮、铵态氮和硝态氮的流失量减少,其中主因子优化处理效果最为明显,与常规处理相比,径流水中全氮、铵态氮和硝态氮平均含量分别下降31.44%、45.45%、28.84%。常规处理全磷和可溶性磷的平均含量均低于其他处理,但差异不明显,原因可能是主

因子优化处理和综合优化处理有机肥做基肥一次性施入,而对常规处理做追肥施用,降低了磷素流失风险。这说明径流水中磷素含量与施入时间也有关系。综上得出,减氮施肥和有机无机肥配施能够降低氮素流失风险,尤其是主因子优化处理。

2.4 不同施肥模式下田间径流量和全年降雨量对氮磷流失的影响

由图3可知,整个油菜-水稻季(2019年11月—2020年10月)共降雨24次:油菜期10次,空闲期3次,水稻期11次,最高降雨量达到215.6 mm,总降雨量为2 095.6 mm。共发生8次径流(表3),分别在油菜花期、成熟期、水稻苗期、分蘖期、灌浆期以及蜡熟期,这8次径流中6次暴雨2次大雨,平均降雨量达到165.3 mm,平均径流量为1 583.9 L,可以看出降雨量与径流量呈正相关,降雨量大径流量也越大。

2.5 不同施肥模式下各处理对径流氮磷流失的影响

由表4可见,稻田径流中全氮、铵态氮、硝态氮的累积流失量表现为常规处理>综合优化处理>主因子优化处理,而全磷和可溶性磷结果相反。全氮和硝态氮累积流失量表现常规处理显著高于其他处理,主因子优化处理和综合优化处理全氮累积流失

表2 径流水中氮磷平均含量

Table 2 Average content of N and P in runoff water

处理 Treatment	N in runoff water			P in runoff water	
	全氮 Total N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	全磷 Total P	可溶性磷 Dissolved P
主因子优化处理 Principal factor optimization	1.81c	0.06c	1.53b	0.32a	0.29a
综合优化处理 Integrated optimization treatment	2.05b	0.09b	1.52b	0.29a	0.24ab
常规处理 Conventional treatment	2.64a	0.11a	2.15a	0.24ab	0.21b

表3 油菜-水稻生育期径流情况(2020年)

Table 3 Runoff during rice-rapeseed growth period in 2020

作物 Crop	降雨时间/h Rainfall time	生育阶段 Growth stage	降雨量/mm Rainfall	降雨类型 Rainfall patterns	径流量/L Volume of runoff
油菜 Rapeseed	3月4—5日(38) March 4th to 5th	花期 Flowering stage	215.6	暴雨 Rainstorm	2 305.1±55.8
	3月30—31日(34) March 30th to 31th	花期 Flowering stage	201.2	暴雨 Rainstorm	2 075.6±41.2
	5月7—8日(25) May 7th to 8th	成熟期 Maturation stage	120.7	大雨 Heavy rain	1 028.2±20.3
	6月25—26日(32) June 25th to 26th	幼苗期 Seedling stage	193.4	暴雨 Rainstorm	2 118.4±35.9
水稻 Rice	7月2—3日(30) July 2nd to 3rd	分蘖期 Tillering stage	162.5	暴雨 Rainstorm	1 268.6±19.4
	7月9—10日(35) July 9th to 10th	分蘖期 Tillering stage	180.6	暴雨 Rainstorm	1 601.7±20.7
	9月11—12日(26) September 11th to 12th	灌浆期 Pustulation stage	175.8	暴雨 Rainstorm	1 524.8±26.7
	9月18日(21) September 18	蜡熟期 Dough stage	80.8	大雨 Heavy rain	748.4±12.4

注：根据气象部门规定的降雨强度标准(按12h计,小雨≤5.0mm,中雨5.0~14.9mm,大雨15.0~29.9mm,暴雨≥30mm)。Note: According to the rainfall intensity standard stipulated by the meteorological department (12 h, light rain≤5.0 mm, moderate rain 5.0–14.9 mm, heavy rain 15.0–29.9 mm, rainstorm ≥ 30 mm).

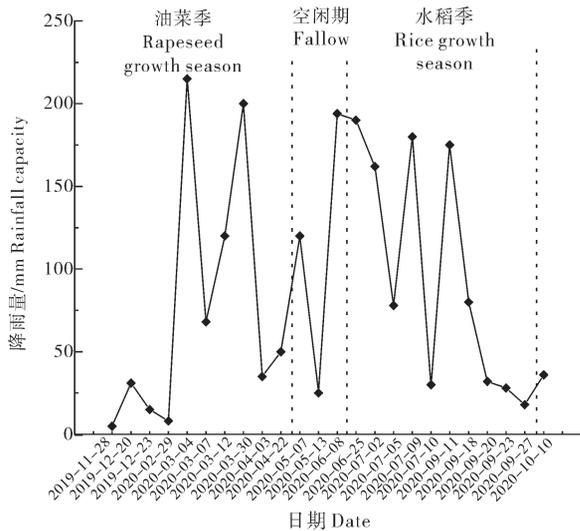


图3 2019年11月—2020年10月降雨量情况

Fig.3 Rainfall collection from November 2019 to October 2020

量较常规处理分别降低了31.41%、22.99%，铵态氮累积流失量较常规处理分别降低了43.24%、2.71%，硝态氮累积流失量较常规处理分别降低了31.01%、29.81%，这表明减氮施肥和有机无机肥配施对径流水中不同形态的氮流失有降低作用，其中减氮施肥效果更佳。常规处理全磷和可溶性磷累积流失量略低于其他处理，这表明减氮施肥和有机无机肥配

表4 径流水中氮磷累积流失量

Table 4 Cumulative loss of N and P in runoff water

处理 Treatment	kg/hm ²				
	全氮 Total N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	全磷 Total P	可溶性磷 Dissolved P
主因子优化处理 Principal factor optimization	7.49c	0.21b	6.32b	1.19a	1.08a
综合优化处理 Integrated optimization treatment	8.41b	0.36a	6.43b	1.09ab	0.92ab
常规处理 Conventional treatment	10.92a	0.37a	9.16a	0.89b	0.81b

施对径流水中不同形态的磷流失有增加风险,但效果不明显。

2.6 不同施肥模式下油菜-水稻轮作产量

从表5可以看出,油菜综合优化处理产量(1 954.6 kg/hm²)显著高于其他处理,比主因子优化处理和常规处理产量分别增加4.60%和4.79%;水稻综合优化处理产量为6 375.5 kg/hm²,比主因子优化处理和常规处理分别增加3.76%和0.81%。说明减氮施肥对油菜产量没有影响,但水稻产量下

降,有机无机肥配施能提高油菜和水稻的产量,说明谷壳灰和水稻秸秆替代无机肥对作物有增产效果。

表5 各处理油-稻产量对比

Table 5 Comparison of rapeseed-rice yield under different treatments

作物 Crop	品种 Cultivar	处理 Treatment	产量 Yield kg/hm ²
油菜 Rapeseed	丰油 730 Fengyou 730	主因子优化处理 Principal factor optimization	1 868.5± 26.25b
		综合优化处理 Integrated optimization treatment	1 954.6± 19.05a
		常规处理 Conventional treatment	1 865.2± 23.25b
		主因子优化处理 Principal factor optimization	6 135.8± 53.71b
水稻 Rice	美香占 2号 Meixiangzhan 2	综合优化处理 Integrated optimization treatment	6 375.5± 39.15a
		常规处理 Conventional treatment	6 323.9± 46.25a
		主因子优化处理 Principal factor optimization	6 135.8± 53.71b

3 讨论

3.1 不同施肥模式水体中氮磷浓度的变化特征

氮素和磷素流失指由于作物生长季土壤中的氮磷肥随水向下移动导致作物根系无法吸收造成的氮磷素损失的现象,尤其是水稻需水量大,在雨季或灌溉期更容易发生氮磷流失导致环境污染。

全氮和硝态氮含量在油菜季的变化趋势基本相同,随生育期缓慢增加(图1)。在水稻季基肥施入3d后稻田全氮和硝态氮含量第1次达到峰值随后1周内趋于稳定;施追肥后2d,CK处理全氮和硝态氮含量显著增加,也在1周内趋于稳定,可以看出施肥后1周内是控制氮素流失的关键时期,这与前人研究结果^[9-10]一致,此时最好避免田间灌水,防止氮素流失。在整个水稻生长季,有机无机肥配施全氮和硝态氮含量均低于常规处理,说明通过有机肥部分替代无机肥施用,能有效降低径流水中全氮和硝态氮的含量,进而降低氮素流失的风险,原因可能是有机肥部分替代无机肥施用能够改善土壤环境^[11],同时有机肥在被作物吸收利用之前,需要微生物的降解过程使氮素分解后更有利于作物吸收^[12]。铵态氮含量在油菜季保持稳定,在水稻季施追肥2d后铵态氮含量第1次达到峰值,施入穗肥2d后铵态氮含量达到第2次峰值,在7~15d内慢慢下降到稳定水平,

可能原因是水稻季处于高温期,施入穗肥后尿素会迅速转化为铵态氮,之后随时间的变化,转化为氨气或者被作物吸收利用^[10],而铵态氮通过转化、迁移损失,呈现施肥后迅速上升随后慢慢下降的现象。综合优化处理铵态氮含量下降的速度要快于常规处理和主因子优化处理,这说明配合有机肥施用能够缩短铵态氮的流失风险期。在水稻季铵态氮含量明显高于油菜季,原因可能是稻田处于湿-干-湿不断交替状态,有机无机肥配施改善了土壤结构,提高了作物对养分的吸收效率^[13]。

径流水中总磷和可溶性磷含量变化趋势基本一致,只是幅度相对较小。在油菜收割后3d达到第1次顶峰,而后呈下降趋势,施追肥3d后全磷和可溶性含量持续升高,施穗肥2d后达到第2次顶峰,说明施用追肥会激发磷素的释放,加速促进磷素的流失^[14]。相比油菜季,水稻生育期综合优化处理总磷和可溶性磷浓度一直保持在较高水平并不断出现无规律的波峰,原因可能是综合优化处理在水稻移栽前施入水稻秸秆,由于水稻秸秆腐解缓慢,使得水稻生育期磷素保持在较高的浓度,这与前人研究中施用有机肥能增加稻田中磷素流失风险的结论^[16-17]一致。

3.2 不同施肥模式对水体中磷素流失及水稻产量的影响

有机肥含有植物必需的大量元素、微量元素和丰富的有机养分,能够有效地改善土壤理化状况和生物特性,提高肥料的利用率,有利于作物吸收^[5]。本试验进行减量施氮(主因子优化处理)、无机有机肥配合施用(综合优化处理)和常规施肥(常规处理)试验,发现主因子优化处理和综合优化处理径流水中全氮、铵态氮和硝态氮累积流失量较常规处理分别降低了31.41%、43.24%、31.01%和22.99%、2.71%、29.81%,而磷素流失却高于常规处理。可见,作物对磷肥的利用率较低,尤其是在水稻季大量的磷积累在土壤,随降雨大量流失。所以减量施肥、有机无机肥配施有增加稻田磷素流失的风险。

综合优化处理下油菜和水稻产量比常规处理分别增产4.79%和0.81%,表明有机肥部分替代无机肥施用能提高作物产量。研究表明有机肥可以通过缓控释肥来降低氮素流失^[18]。本试验主因子优化处理相比常规对照处理未达到增产效果,在油菜季减量施氮与常规施氮相比,产量没有减少反而小幅度增加,这与前人研究结果^[18]相似。有研究表明施用有机肥对稻田磷素累积流失量具有显著影响,且有机肥施用量越大,氮磷累积流失量越大^[17-19]。本研

究中主因子优化处理和综合优化处理总磷和可溶性磷累积流失量高于常规处理,与前人研究结果^[17]类似。有机物矿化产生的磷易溶于水造成磷素流失,主因子优化处理和综合优化处理谷壳灰替代磷钾肥作为基肥一次性施入,常规处理将磷肥分多次追施,同时降雨产生径流量也会造成磷素流失风险。因此,减量施肥和有机无机肥配比的比例和施用量还需作进一步调整和优化,以期达到既能使作物增产又能降低氮磷流失的效果。

本研究结果表明,稻田养分的流失与施肥量(类型、时间)、降雨量(大小)、地表径流量和径流发生时间等因素有关。降雨是自然因素,降雨越大对地表的冲刷越大,增加养分流失风险,应尽量避免下雨天气施肥以降低稻田氮磷素流失。

参考文献 References

- [1] 刘汝亮,李友宏,张爱平,等. 育秧箱全量施肥对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1853-1860. LIU R L, LI Y H, ZHANG A P, et al. Effects of total fertilization in seedling box on rice yield and nitrogen loss [J]. Chinese journal of applied ecology, 2012, 23(7): 1853-1860 (in Chinese with English abstract).
- [2] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103. PENG S B, HUANG J L, HUANG X H, et al. Research strategies for improving nitrogen use efficiency of rice field in China [J]. Scientia agricultura sinica, 2002, 35(9): 1095-1103 (in Chinese with English abstract).
- [3] 庄振东,李絮花,张健,等. 冬小麦-夏玉米轮作制度下腐植酸氮肥去向与平衡[J]. 腐植酸, 2017(1): 53. ZHUAN Z D, LI X H, ZHANG J, et al. Whereabouts and balance of humic acid nitrogen fertilizer in winter wheat-summer maize rotation system [J]. Humic acid, 2017(1): 53 (in Chinese).
- [4] ZHANG D, WANG H Y PAN J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China [J]. Agriculture ecosystems & environment, 2018, 265: 8-14.
- [5] 周伟,吕腾飞,杨志平,等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3051-3058. ZHOU W, LU T F, YANG Z P, et al. Effects of nitrogen fertilizer on soil nitrogen loss [J]. Chinese journal of applied ecology, 2016, 27(9): 3051-3058 (in Chinese with English abstract).
- [6] KOPACEK J, HEJZLAR J, POSCH M. Factors controlling the export of nitrogen from agricultural land in a large central european catchment during 1900-2010 [J]. Environmental science & technology, 2013, 47(12): 6400-6407.
- [7] 鲁洪娟,周德林,叶文玲,等. 生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展[J]. 环境与污染防治, 2019, 41(11): 1378-1383. LU H J, ZHOU D L, YE W L, et al. Research progress of bio-organic fertilizer in soil remediation of heavy metal pollution [J]. Environment and pollution control, 2019, 41(11): 1378-1383 (in Chinese with English abstract).
- [8] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等. 有机肥替代化肥提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934-3943. XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, et al. Substitution of organic fertilizer nitrogen for chemical fertilizer nitrogen to improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency [J]. Scientia agricultura sinica, 2016, 49(20): 3934-3943 (in Chinese with English abstract).
- [9] 郑小龙,吴家森,陈裴裴,等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 39-48. ZHENG X L, WU J S, CHEN P P, et al. Effects of different fertilization and biochar application on nitrogen and phosphorus loss and yield in paddy water [J]. Journal of soil and water conservation, 2013, 27(4): 39-48 (in Chinese with English abstract).
- [10] 吴俊,樊剑波,何园球,等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1561-1566. WU J, FANG J B, HE Y Q, et al. Dynamic change of nitrogen in surface water and runoff loss in paddy field under different fertilization reduction [J]. Journal of ecology and environment, 2012, 21(9): 1561-1566 (in Chinese with English abstract).
- [11] ZHOU M, BUTTERBACH-BAHL K. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems [J]. Plant and soil, 2014, 374(1/2): 977-991.
- [12] LI H, HOU J, LIU X M, et al. Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment [J]. SSSAJ, 2011, 75(6): 2128-2135.
- [13] 马东,杜志勇,吴娟,等. 崂山水库流域不同土地利用类型地表径流的氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 31-33, 39. MA D, DU Z Y, WU J, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff of different land use types in Laoshan Reservoir Basin [J]. Journal of soil and water conservation, 2011, 25(6): 31-33, 39 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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 Y S, LIANG X Q, LI L, et al. Effects of different water and fertilizer management on phosphorus runoff and leakage loss in paddy fields in Taihu Lake Basin [J]. Acta scientiae environmental sinica, 2015, 35(4): 1125-1135 (in Chinese with English abstract).
- [15] 纪雄辉,郑圣先,刘强,等. 施用有机肥对长江中游地区双季稻田磷素径流损失及水稻产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006, 32(3): 283-287. JI X H, ZHENG S X, LIU Q, et al. Effects of organic fertilizer application on phosphorus runoff loss and rice yield in double cropping rice field in the middle reaches of Yangtze River [J]. Journal of Hunan Agricultural University (natural science edition), 2006, 32(3): 283-287 (in Chinese with English abstract).
- [16] 田玉华,贺发云,尹斌,等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 727-733. TIAN Y H, HE F Y, YIN B, et al. Dynamics of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field under different nitrogen and phosphorus combinations [J]. Soils, 2006, 38(6): 727-733 (in Chinese).
- [17] 邓佳,胡梦坤,赵秀兰,等. 不同有机物料中的磷形态特征研究[J]. 环境科学, 2015(3): 1098-1104. DENG J, HU M K, ZHAO

- X L, et al. Study on the morphological characteristics of phosphorus in different organic materials[J]. *Environmental Science*, 2015 (3):1098-1104 (in Chinese with English abstract).
- [18] 章辉. 控释肥对单季稻生长发育、产量及效益的影响研究[J]. *安徽农学通报*, 2013, 19(14):80-81. ZHANG H. Effects of controlled loss fertilizer on growth, yield and benefit of single cropping rice[J]. *Anhui agricultural science bulletin*, 2013, 19 (14): 80-81 (in Chinese).
- [19] CHEROBIM V F, HUANG C H, FAVARETTO N. Tillage system and time post-liquid dairy manure: effects on runoff, sediment and nutrients losses [J]. *Agricultural water management*, 2017, 174:96-103.
- [20] 金熠, 梁新强, 刘于, 等. 增施有机肥对稻田田面水体磷素形态和径流流失量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4):42-47. JIN Y, LIANG X Q, LIU Y, et al. Effects of increasing organic fertilizer application on phosphorus speciation and runoff loss in paddy field[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2015, 29 (4):42-47 (in Chinese with English abstract).

Effects of optimized fertilization on yield of crops and loss of nitrogen and phosphorus in multiple cropping system of rapeseed-rice

ZHANG Lijin^{1,2}, CHAO Siqin^{1,2}, LU Mengzhen³, HUANG Guoqin¹,
QIAN Guoming², XIA Liming², SHENG Jinke²

1. *Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Center for Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;*

2. *Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China;*

3. *Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*

Abstract The changes of the concentration of nitrogen and phosphorus in the multiple cropping system of rapeseed-rice, the cumulative loss of nitrogen and phosphorus in the runoff water and the yield of crops were studied through the positioning monitoring test under three different modes of fertilization including the optimization of principal factor, the integrated optimization and the conventional treatment to investigate the effects of optimized fertilization on the yield of crops and the dynamic changes of the loss of nitrogen and phosphorus in the runoff water of paddy field. The results showed that the content of total nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus and soluble phosphorus in the runoff water during the whole growth period increased first, then decreased, and then tended to be stable, while the content of ammonium nitrogen in rapeseed was always low. Compared with the conventional treatment, the average content of total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in the runoff water under the principal factor optimization decreased by 31.44%, 45.45% and 28.84%, respectively. The accumulative loss of total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen under conventional treatment were 10.92 kg/hm², 0.37 kg/hm² and 9.16 kg/hm², respectively. Under the principal factor optimization and the integrated optimization, the cumulative loss of the total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen decreased by 31.41% and 22.99%, 2.71% and 43.24%, 31.01% and 29.81%, respectively. The yield of rapeseedseed under the integrated optimization was 1 954.6 kg/hm², which was 4.60% and 4.79% higher than that under the principal factor optimization and conventional treatment, respectively. The yield of rice under integrated optimization was 6 375.5 kg/hm², which was 3.76% and 0.81% higher than that under the principal factor optimization and conventional treatment, respectively. It is indicated that the integrated optimization can not only significantly improve the yield of crops, but also effectively reduce the risk of the loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields compared with conventional fertilization, which is of great significance for protecting the environment and controlling the pollution of non-point source.

Keywords multiple cropping system of rapeseed-rice; fertilization reduction; loss of nitrogen and phosphorus; fertilizer utilization efficiency; non-point pollution

(责任编辑:张志钰)