

不同减量氮肥配施紫云英对田面水氮磷流失及水稻生长的影响

吕永强¹, 郑铭洁², 吴家森¹, 吴鹏超³, 劳洁玉¹, 傅伟军¹

(1.浙江农林大学环境与资源学院,浙江 临安 311300;

2.建德市农业技术推广中心植保土肥服务站,浙江 建德 311600;3.建德市新水建设有限公司,浙江 建德 311600)

摘要: 为指导水稻田合理施肥,防治稻田面源污染,试验开展了不同氮肥减施比例对紫云英—水稻轮作体系下稻田田面水氮磷流失的影响研究。2020 年在浙江建德开展田间小区试验,设置冬闲(CK)和冬种紫云英(CT)2 个处理,并在冬种紫云英基础上设置 4 个减氮比例,分别为 0(CT0),10%(CT1),20%(CT2),30%(CT3),共 5 个处理,每个处理重复 3 次。在水稻移栽施肥后开始稻田田面水样品采集(包括施肥 2 周内的连续采样以及 2 周后相隔 7,14,28 天的间隔采样),测定田面水氮磷浓度;于水稻成熟后采集土壤和植物样品,测定土壤理化性状以及水稻生长性状和产量。各处理田面水总氮、可溶性氮、铵态氮以及总磷、可溶性磷均在施肥后第 1 天达到峰值,总氮在基肥后 4 天内降幅明显,为最大值的 4.2%~9.1%,可溶性磷在施基肥 5 天内降至最大值的 4.7%~13.7%。采样期内,CK 处理田面水总氮、可溶性氮、总磷和可溶性磷的平均浓度分别为 48.87,36.82,0.82,0.64 mg/L,CT0、CT1、CT2、CT3 的总氮平均浓度分别为 CK 的 93.9%,78.1%,79.7%,69.7%;可溶性氮平均浓度分别为 CK 的 95.1%,84.1%,85.7%,73.2%;总磷平均浓度分别为 CK 的 90.9%,76.9%,96.2%,81.3%;可溶性磷平均浓度分别为 CK 的 79.4%,73.8%,87.3%,68.7%。与 CK 相比,CT2、CT3 显著提高土壤有效磷含量,增加幅度分别为 61.7%和 37.0%。比较冬闲处理,翻压紫云英使水稻株高增高 0.7%~3.5%,有效穗数增加 7.0%~15.2%,水稻增产 0.4%~4.9%。与冬闲处理相比,冬种紫云英配合不同比例氮肥减施均能降低稻田田面水氮磷流失风险,其中以 30%氮肥减量效果最好;紫云英配合减氮施肥措施能够提升土壤有效磷、全氮含量和水稻产量,其中均以紫云英配合 20%减氮施肥效果最好。综合稻田田面水氮磷流失风险、土壤肥力以及水稻产量,紫云英配合 20%减氮施肥是较为适合该地区的种植方式。

关键词: 紫云英; 田面水; 氮磷流失; 水稻产量; 土壤肥力

中图分类号: S157;X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0148-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.06.019

Effects of Different Nitrogen Reduction Fertilizer Combined with Milk Vetch (*Astragalus sinicus* L.) on the Loss of Nitrogen and Phosphorus in Field Water and Rice Growth

LÜ Yongqiang¹, ZHENG Mingjie², WU Jiasen¹, WU Pengchao³, LAO Jieyu¹, FU Weijun¹

(1.College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300;

2.Plant Protection Soil and Fertilizer Service Station, Jiande Agricultural Technology Promotion

Center, Jiande, Zhejiang 311600; 3.Jiande Xinshui Construction Co., Ltd., Jiande, Zhejiang 311600)

Abstract: In order to guide the rational fertilization of paddy fields and prevent non-point source pollution of paddy fields, we studied the effects of different nitrogen fertilizer reduction ratios on the nitrogen and phosphorus loss in the surface water of paddy fields under the milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) -rice rotation system. In 2020, field plot experiment was conducted on Jiande, Zhejiang. Two treatments of winter idle and winter milk vetch were set up, and four nitrogen reduction ratios of 0 (CT0), 10% (CT1), 20% (CT2) and 30% (CT3) on the basis of winter planted milk vetch. There were 5 treatments in total, each treatment was repeated three times. After paddy transplanting and fertilization, surface water samples of

收稿日期:2022-03-18
资助项目:世界银行浙江千岛湖及新安江水资源与生态保护项目(H20210012)
第一作者:吕永强(1998—),男,硕士研究生,主要从事农业面源污染控制研究。E-mail:lyyongqiang@stu.zafu.edu.cn
通信作者:傅伟军(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事亚热带森林土壤有机碳空间异质性、土壤—植物系统重金属时空变异及风险评估等研究。E-mail:fuweijun@zafu.edu.cn

paddy field were collected (including continuous sampling within two weeks of fertilization and sampling at intervals of 7, 14, and 28 days after two weeks), and the concentration of nitrogen and phosphorus in the field water was measured. After the rice matured, soil and plant samples were collected and soil physicochemical properties, rice growth properties and yield were determined. The total nitrogen, soluble nitrogen, ammonium nitrogen, total phosphorus and soluble phosphorus in the field surface water of each treatment reached their peaks on the first day after fertilization. The total nitrogen decreased significantly within four days after basal fertilizer application, which was 4.2%~9.1% of the maximum value, and the soluble phosphorus decreased to 4.7%~13.7% of the maximum value within five days of basal fertilizer application. During the sampling period, the average concentration of total nitrogen, soluble nitrogen, total phosphorus and soluble phosphorus in the CK was 48.87, 36.82, 0.82 and 0.64 mg/L, respectively. The average concentration of total nitrogen in CT0, CT1, CT2 and CT3 was 93.9%, 78.1%, 79.7% and 69.7% of CK, respectively. The average concentration of soluble nitrogen was 95.1%, 84.1%, 85.7% and 73.2% of CK, respectively. The average concentration of total phosphorus was 90.9%, 76.9%, 96.2 and 81.3% of CK, respectively. The average concentration of soluble phosphorus was 79.4%, 73.8%, 87.3% and 68.7% of CK, respectively. Compared with CK, CT2 and CT3 significantly increased soil available phosphorus content by 61.7% and 37.0%, respectively. Compared with winter fallow treatment, turning over and pressing milk vetch increased rice plant height by 0.7%~3.5%, effective panicle number by 7.0%~15.2% and rice yield by 0.4%~4.9%. Compared with the treatment of winter fallow, the combination of winter planting of milk vetch and different proportions of nitrogen fertilizer reduction could reduce the risk of nitrogen and phosphorus loss in paddy field surface water, of which 30% nitrogen fertilizer reduction was the best. Milk vetch combined with nitrogen reduction fertilization measures improved content of soil available phosphorus and total nitrogen and rice yield. In these treatments, milk vetch combined with 20% nitrogen reduction fertilization had the best effect. Considering the rice yield, soil fertility and risk of loss of nitrogen and phosphorus in paddy field surface water, the combination of milk vetch and 20% nitrogen fertilizer reduction was a more suitable planting method for this area.

Keywords: milk vetch; field surface water; nitrogen and phosphorus loss; rice yield; soil fertility

农业面源污染造成的水环境恶化越来越引起人们的重视^[1-2]。在中国,农业面源污染已成为主要污染源之一,2020 年发布的《第二次全国污染源普查公报》^[3]显示,农业源的总氮、总磷排放量分别占总排放量的 46.5%和 67.2%,其中,种植业总氮排放量占农业源排放量的 1/2 以上。目前,水稻种植面积约占我国粮食种植面积的 30%^[4],而作为我国主要粮食作物,水稻的氮肥利用率仅达 30%^[5],大量氮磷通过地表径流、淋溶等途径进入水体,造成环境污染,而稻田田面水氮磷浓度是影响氮磷径流损失的直接因素^[6],因此如何降低田面水氮磷浓度是减少氮磷损失的关键问题。

有研究^[7]表明,生物有机肥及控释肥等新型肥料可有效代替常规复合肥,起到减少化肥施用、提高氮肥利用率以及水稻产量等作用。其中,绿肥作为一种清洁且成本较低的有机肥被广泛利用,近年来,关于稻田绿肥应用的研究^[8-10]多有报道,绿肥在改善土壤结构、提高土壤肥力、丰富土壤菌群、减少环境污染方面发挥了重要

作用^[11-13]。紫云英是我国南方稻区种植的主要绿肥之一,氮素含量丰富且养分释放率高^[14],紫云英—水稻轮作的模式得到广泛推广。对于紫云英—水稻轮作模式的应用虽已有研究,但多集中在紫云英翻压量对土壤肥力和水稻产量的影响上。聂鑫等^[15]研究表明,氮钾减施 20%条件下,紫云英的翻压量达 30 t/hm²时,早稻产量以及土壤全氮含量有显著提高;刘小粉等^[16]研究指出,化肥紫云英配施可有效提升土壤物理性质,且在肥料减施 40%条件下,紫云英用量在 15~30 t/hm²效果最好。此外,在多年定位试验^[17]中,紫云英长期施用可提升水稻产量及其稳定性。

关于稻田田面水氮磷浓度变化也有研究,陈静蕊等^[6]指出,在不同土壤类型和不同稻作制度下,田面水的氮磷浓度变化有较大差异。因此,明确建德区域田面水氮磷动态变化对减少当地稻田氮磷流失至关重要。本研究设置不同处理,在浙江建德开展大田试验,研究紫云英与水稻轮作模式下,减氮施肥对稻田田面水氮磷流失的影响,兼顾不同氮肥减施比例下土

壤肥力与水稻生长性状及产量的变化,以此为指导当地合理施肥、促进水稻稳产高产和防治农田面源污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 9 月在浙江省建德市航头镇珏塘村粮食生长功能区(29°12′43″N, 119°10′56″E)开展。当地属亚热带季风气候,全年平均气温在 13~21℃,年平均降水量 1 706 mm,年平均降水天数为 135 天,土壤类型为潴育水稻土,种植水稻品种为“甬优 15”。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置 5 个处理:(1)冬闲+常规施肥(CK);(2)冬种紫云英+常规施肥(CT0);(3)冬种紫云英+常规减氮 10%施肥(CT1);(4)冬种紫云英+常规减氮 20%施肥(CT2);(5)冬种紫云英+常规减氮 30%施肥(CT3)。每个处理 3 次重复。常规施肥处理化肥总用量为 N 225 kg/hm², P₂O₅ 105 kg/hm², K₂O 150 kg/hm²,各处理化肥分基肥和分蘖肥施用,基肥为氮磷钾(18-12-16)复合肥,追肥为尿素和氯化钾。各处理基肥施用量相同,施肥比例均为 157.5:105:140,在追肥时进行减氮施肥, N:K₂O 分别为 67.5:10, 67.5:10, 45.0:10, 22.5:10, 0:10。

紫云英于 2021 年 4 月 12 日就地翻压,翻压量控制在 50.0 t/hm²,不足的补充,多余的移除,紫云英养分含量为 N 28.5 g/kg, P 4.4 g/kg, K 27.2 g/kg,全碳含量为 384.7 g/kg,含水率为 88.5%。小区长 15 m,宽 8 m,小区间筑埂防止串水串肥,区组间设置排水沟。水稻于 6 月 9 日移栽同时施入基肥,6 月 16 日追肥,10 月 9 日收获。

1.3 样品采集与处理

田面水的采集包括基肥施入前的原田面水采样、基肥施入后持续 2 周的连续采样(第 1~14 天)以及 2 周后相隔 7, 14, 28 天的间隔采样(第 21, 35, 63 天),整个水稻生育期共取水样 18 次。在每天早晨 7:00 采集田面水样,在水面无扰动的条件下,用 100 mL 医用注射器按各小区对角线抽取 5 处田面水表层水样,混合注入 300 mL 塑料瓶中,测定 TN、DTN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 和 DTP。

水样 TN 的测定:碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法;DTN 的测定:水样经 0.45 μm 孔径滤纸过滤,用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定^[18];NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的测定:水样经滤纸过滤后通过 Smart-Chem™ 200 全自动化学分析仪测定;水样 TP 的测定:钼酸铵分光光度法;DTP 的测定:水样经 0.45 μm 孔径

滤膜过滤后,用钼酸铵分光光度法测定^[6]。

水稻成熟后,在每个小区按照对角线随机采集 9 穴的样株,测定各小区有效穗数、穗粒数、结实率及千粒重等指标,各小区单打单收计算实际产量^[13]。样株分离为稻粒和秸秆,测定 N、P、K 含量。每个小区按“S”形采取土样,测定土壤 pH,分析土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾及全氮含量,测定方法按照《土壤农化分析》^[19]进行。

1.4 数据处理

试验数据处理和统计分析采用 SPSS 26.0 软件,图形绘制采用 Origin 2018 软件,所有数据均为平均值±标准差,采用 one-way ANOVA 进行单因素方差分析,基于 SSR 中的 Duncan 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 田面水氮、磷变化特征

2.1.1 田面水氮素动态变化特征 各处理在基肥期均施用等量化肥,因此在该段时间内各处理氮素变化相似,差异不明显(图 1)。CK、CT0、CT1、CT2、CT3 处理基肥期 TN 浓度变化范围分别为 37.8~152.4, 34.0~133.6, 24.6~129.7, 32.2~133.8, 37.8~135.1 mg/L。施基肥后的第 1 天,各处理 TN 浓度达到峰值,且 CK 显著高于其他处理,随后基肥期各处理 TN 浓度逐渐降低,第 7 天各处理 TN 浓度分别降至峰值的 24.8%, 24.5%, 19.0%, 24.1%, 28.0%(CK、CT0、CT1、CT2、CT3)。第 7 天施加分蘖肥,第 8 天 CT3 处理的 TN 浓度继续降低,其他处理 TN 浓度不同程度升高达到峰值,分别为 82.6, 95.1, 77.1, 46.0 mg/L(CK、CT0、CT1、CT2),其中 CK、CT0 处理 TN 浓度显著高于 CT1、CT2、CT3。第 12 天由于暴雨影响,各处理 TN 浓度较前 1 日有较大幅度降低,在第 13 天略微回升,后保持低水平,在第 63 天各处理 TN 浓度降至 0.54~0.77 mg/L。

基肥期(1~7 天)各处理田面水 DTN 浓度变化相似,其中 CK 处理变化范围为 29.5~123.7 mg/L。施基肥后第 1 天各处理 DTN 浓度迅速上升达到峰值后逐渐下降,在第 7 天各处理 DTN 浓度降至峰值的 16.9%~26.9%。第 7 天追肥后,除 CT3 处理外,其余处理 DTN 浓度迅速上升到达峰值,此时田面水 DTN 浓度差异表现为 CK、CT0 显著高于 CT1、CT2,而 CT1、CT2 又显著高于 CT3,随后逐渐降低,在第 12 天各处理田面水 DTN 浓度降至 2.14~5.53 mg/L。基肥期各处理田面水 NH₄⁺-N 的浓度变化趋势与 DTN 表现相似,施肥后第 1 天 CK 处理 NH₄⁺-N 浓度达到峰值 87.2 mg/L,第 7 天降至峰值的 32.3%。追肥后,除第 11 天 CT2 处理

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度高于 CT1,其他时间段 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均呈现为 $\text{CK} > \text{CT}_0 > \text{CT}_1 > \text{CT}_2 > \text{CT}_3$ 。

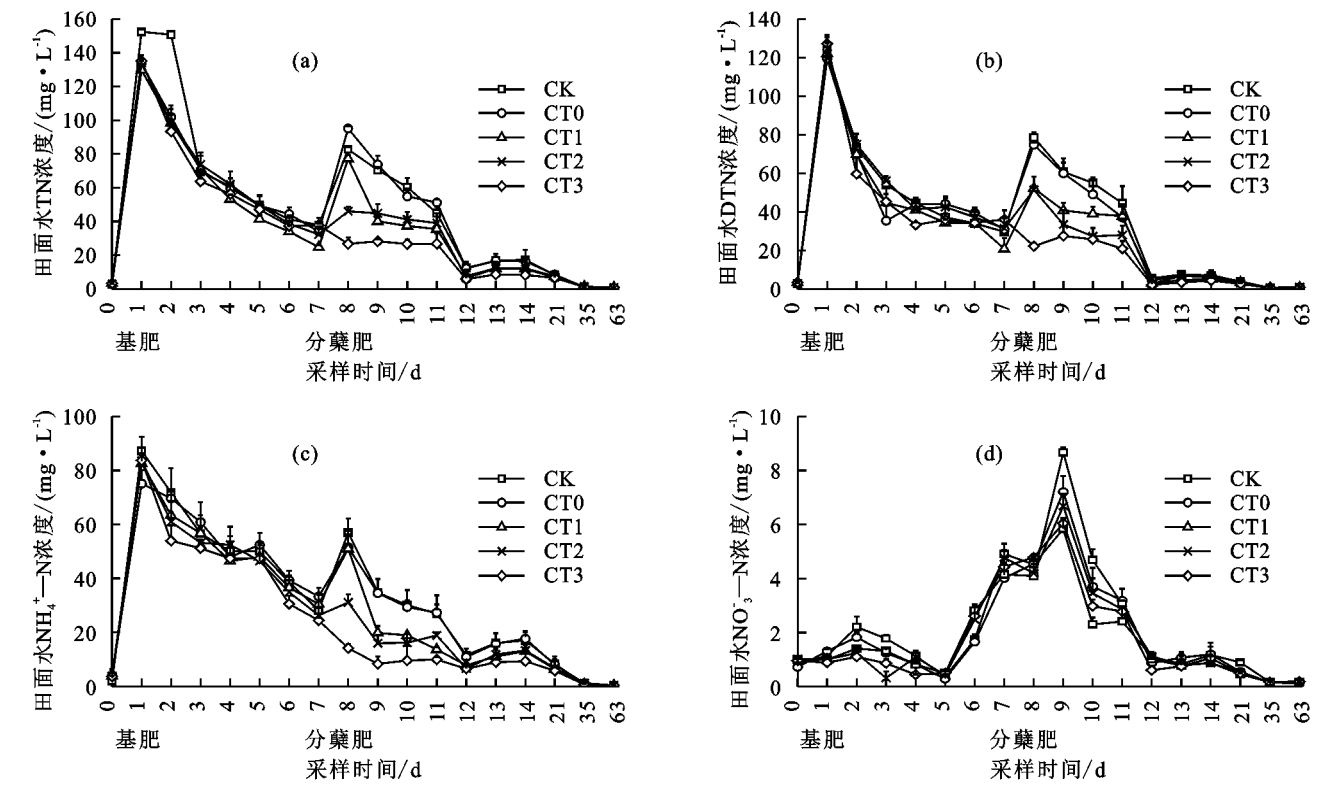


图 1 不同处理田面水氮素浓度随时间的动态变化

整个试验期内各处理田面水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均保持在较低浓度,CK、CT0、CT1、CT2、CT3 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化范围分别为 0.14~5.83,0.12~7.21,0.15~8.67,0.10~6.67,0.16~6.04 mg/L,且各处理基肥期与分蘖肥期(8~14 天) $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的最大值均出现在施肥后第 2 天。

2.1.2 田面水磷素动态变化特征 田面水磷素浓度

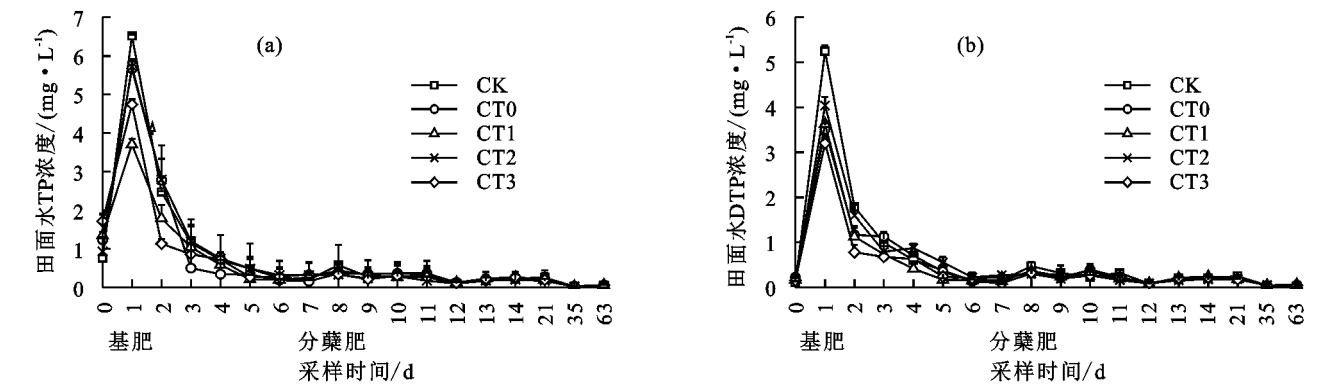


图 2 不同处理田面水磷素浓度随时间的动态变化

2.1.3 不同时期各处理田面水氮磷平均浓度 基肥期 CK 处理的 TN 平均浓度最高,为 80.33 mg/L(图 3)。与 CK 相比,翻压紫云英且等量施肥处理(CT0~CT3)的 TN 平均浓度均有降低,降幅为 12.2%~19.5%。在 DTN 平均浓度方面,除 CT2 外,基肥期其他处理(CT0,CT1,CT3)的 DTN 平均浓度也比 CK 处理低,降幅分别为 3.3%,7.4%,6.3%。分蘖肥期各处理田面水 TN 和 DTN 平均浓度随着施氮量的减少

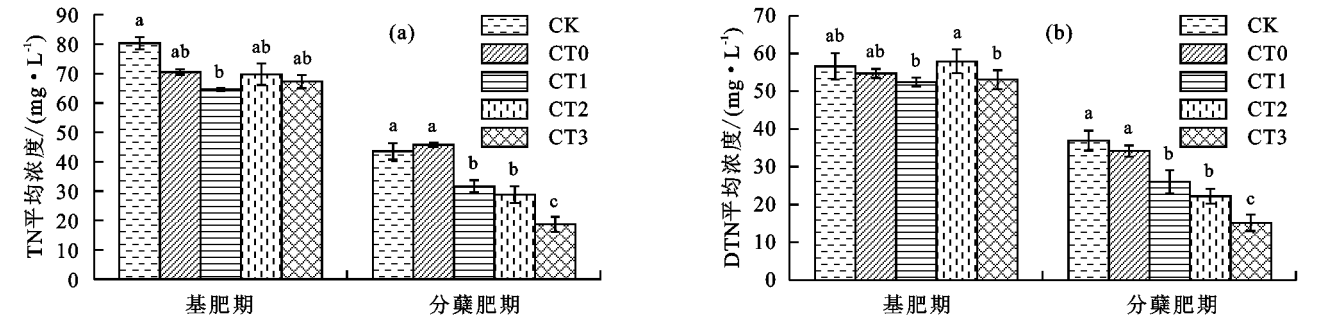
变化见图 2。TP 和 DTP 变化趋势相似,各处理 TP 和 DTP 在施基肥第 1 天达到最大浓度,在 TP 上表现为 $\text{CK} > \text{CT}_2 > \text{CT}_0 > \text{CT}_3 > \text{CT}_1$,在 DTP 上则为 $\text{CK} > \text{CT}_2 > \text{CT}_1 > \text{CT}_0 > \text{CT}_3$,随后 TP 和 DTP 浓度迅速下降,保持在较低水平。第 7 天追肥后,在氮肥和钾肥的施用下,各处理 TP 和 DTP 浓度有小幅上升,保持了 3 天的波动状态后逐渐降低。

而降低,均表现为 $\text{CK}、\text{CT}_0 > \text{CT}_1 > \text{CT}_2 > \text{CT}_3$,在相同施肥量下,CT0 的 DTN 平均浓度较 CK 降低 7.5%,差异不显著。在翻压紫云英处理中,CT1、CT2、CT3 的 TN 平均浓度较 CT0 分别降低 30.7%,37.2%,59.1%,DTN 平均浓度分别降低 23.8%,35.0%,55.7%,上述 2 组差异均达到显著水平。

由表 1 可知,基肥期 CK 处理的 TP 和 DTP 平均浓度均高于其他处理,翻压紫云英处理(CT0~

CT3)的 TP 平均浓度较 CK 降低 1.7%~33.9%, DTP 平均浓度降低 10.5%~36.1%,且上述处理中,除 CT2 的 TP 平均浓度与 CK 差异不显著外,其他数据均为显著差异。分蘖肥期,各处理的 TP、DTP 平

均浓度较基肥期大幅下降,相同施肥量下,CT0 的 DTP 平均浓度较 CK 下降 12.5%,翻压紫云英处理中,CT2、CT3 的 TP 平均浓度较 CT0 分别降低 24.4%, 13.9%,DTP 浓度分别降低 16.3%,1.2%。



注:基肥期和分蘖肥期各表示施肥后的 1~7 天;不同字母表示处理间差异达显著水平($p<0.05$)。

图 3 不同时期各处理田面水 TN 和 DTN 平均浓度

表 1 不同时期各处理田面水 TP 和 DTP 平均浓度

单位:mg/L

处理	TP		DTP	
	基肥期	分蘖肥期	基肥期	分蘖肥期
CK	1.68±0.03a	0.27±0.01a	1.33±0.05a	0.26±0.04a
CT0	1.43±0.10b	0.28±0.06a	1.01±0.05c	0.23±0.04a
CT1	1.11±0.04c	0.28±0.03a	0.91±0.06d	0.24±0.03a
CT2	1.65±0.14a	0.21±0.02a	1.19±0.07b	0.19±0.04a
CT3	1.19±0.03c	0.24±0.01a	0.85±0.02d	0.22±0.04a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示处理间差异达显著水平($p<0.05$)。下同。

2.2 土壤理化性质分析

由表 2 可知,各处理在土壤有机质、碱解氮、速效钾和全氮含量均无显著差异。各处理土壤有机质为 24.55~25.98 g/kg,全氮含量为 1.15~1.44 g/kg。与 CK 相比,翻压紫云英+常规施肥(CT0)土壤碱解氮含量提高 2.4%,而在翻压紫云英处理中,减氮 10%~

30%处理(CT1、CT2、CT3)的土壤碱解氮含量较 CT0 分别降低 6.8%,5.2%,8.9%,土壤速效钾含量分别降低 6.9%,5.2%,15.6%。在土壤有效磷含量上,翻压紫云英处理较 CK 均有不同程度提高,其中 CT2、CT3 处理提升显著,增幅分别为 61.7%和 37.0%。

2.3 水稻生长性状与产量分析

不同处理对水稻性状及产量的影响见表 3。不同处理对水稻穗长、有效穗数、穗粒数、千粒重、结实率以及实际产量没有显著影响。与 CK 相比,紫云英与氮肥减量配施有利于增加水稻株高、有效穗数和实际产量,其中 CT0 处理的水稻株高最高、穗长最长、有效穗数最多,较 CK 分别提高 3.5% ($p<0.05$),1.1%,14.2%。紫云英与氮肥减量配施处理较 CK 在水稻实际产量上虽然差异未达显著水平,但提升 0.4%~4.9%,其中紫云英配施 30%减氮处理效果最好。

表 2 不同处理土壤理化性质

处理	pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)
CK	5.31±0.08a	25.61±3.88a	160.29±18.32a	39.67±5.00a	10.90±1.79b	1.31±0.23a
CT0	5.29±0.14a	24.97±3.46a	164.18±25.16a	38.33±2.90a	10.95±1.21b	1.42±0.25a
CT1	5.34±0.08a	24.55±3.54a	153.07±16.83a	35.67±3.10a	12.03±2.23b	1.15±0.14a
CT2	5.22±0.11a	25.98±1.65a	155.60±15.30a	36.33±6.70a	17.63±1.49a	1.44±0.23a
CT3	5.36±0.10a	25.61±2.11a	149.58±11.00a	32.33±2.90a	14.94±0.69a	1.37±0.11a

表 3 不同处理水稻生长性状与产量

处理	株高/cm	有效穗数/ (×10 ⁴ 穗 · hm ⁻²)	每穗 粒数/粒	千粒重/g	结实率/%	实际产量/ (t · hm ⁻²)
CK	141.5±1.4b	219.8±6.6a	156.4±7.2a	28.1±0.92a	88.29±2.48a	8.46±0.44a
CT0	146.5±3.5a	251.1±48.8a	155.6±19.6a	27.8±1.06a	85.56±1.93a	8.50±0.47a
CT1	144.8±1.6ab	246.4±15.5a	166.6±5.7a	27.5±0.48a	88.12±0.94a	8.54±0.28a
CT2	142.5±2.3ab	235.3±15.5a	161.6±8.3a	27.8±0.49a	88.74±2.34a	8.88±0.46a
CT3	145.7±2.2ab	253.3±24.4a	178.2±10.3a	27.9±0.49a	89.06±1.54a	8.61±0.43a

3 讨论

3.1 田面水氮、磷变化规律与防控关键期

关于田面水 TN 动态变化趋势,大多研究^[7,18,20]的前期结论一致,即 TN 浓度在施基肥和追肥 1 天后达到峰值,然后逐渐降低。但关于 TN 浓度的降低速度,不同研究的结果不同。陈静蕊等^[6]在江西双季稻的研究中发现,田面水 TN 浓度降低趋势持续到施肥后第 9 天;张富林等^[18]在江汉平原地区的研究结果显示,TN 在施基肥和分蘖肥后 5 天降至与不施氮肥趋同。而在太湖地区以及巢湖流域,有研究^[7,21]表明,TN 浓度在 1 周内降至较稳定水平,施肥后 7 天内是控制稻田氮素流失的关键时期。本研究各处理的田面水氮素变化趋势基本一致,其中 TN、DTN 以及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化特征相似,均在施基肥的第 1 天快速上升达到峰值,在第 2 天大幅度下降,施肥 7 天后浓度明显降低,之后在追肥第 1 天达到峰值然后逐渐下降,且在 4 天后明显降低。田面水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量较低,全过程占比不超过 10%。结合施肥后氮素的变化规律和氮素的存在形式来看,施基肥后的 7 天内和追肥后的 4 天内是控制氮素流失的关键时期,这也与以往的一些研究^[20,22]结果相似。

本研究中磷肥作为基肥一次性施入,在施入的第 1 天达到最大值后迅速降低,这与许多研究结论相一致。陈静蕊等^[6]的研究发现,TP 浓度在分蘖肥施入的第 5 天降至与空白相近水平,而在分蘖肥施入第 1 天浓度仅为最大值的 10%,因此认为基肥施入的前 9 天为控制磷流失的最佳时期;张富林等^[18]的研究发现,在施入磷肥 3 天后,田面水中 TP 和 DTP 浓度有明显降低,施肥后 3 天内是控制磷流失的关键时期。本研究中,TP 与 DTP 在施基肥 4 天内快速下降至较低水平,为峰值的 10%左右,因此本试验中施肥后前 4 天是控制磷流失的最佳时期。

3.2 紫云英配合化肥减量对稻田田面水氮、磷流失的影响

施氮量是稻田田面水氮素浓度的主要影响因子,田面水氮素浓度随着施氮量的增加而升高^[23]。周春火等^[24]研究表明,冬种紫云英可以促进水稻对氮素的吸收,且主要体现在水稻分蘖期及抽穗期,氮素的吸收总量较冬闲提高 17%以上。本研究中,基肥期各处理施氮量相同,配施紫云英是影响田面水氮素浓度的主要因素,冬种紫云英处理较冬闲处理田面水 TN 浓度降低 12.3%~19.6%,两者结果相似。有研究^[6]指出,有机肥与化肥配施不仅固定碳同化时自身含有的氮,同时还增加土壤对化肥氮的固定。紫云英

在腐解后释放的氮被土壤固定后也增加土壤的氮储备能力,从而降低田面水氮素浓度。追肥期采用减氮施肥,各处理氮素浓度有明显差异,其中 0 氮肥施入处理(CT3)的 TN 平均浓度较 CT0 减少近 60%,而在整个采样时期内 CT3 的 TN 浓度较 CT0 也减少 30%以上,这说明减少氮肥施用量对稻田田面水氮素浓度影响显著。赵冬等^[22]的研究也指出,随着施氮量的增加,田面水中各形态氮素的质量浓度会逐渐增加,氮肥农学效率不断下降,且径流损失不断增大。

本研究中,基肥期内,冬种紫云英处理较冬闲处理 DTP 平均浓度下降 10%~23%,丁炳红^[25]研究指出,采用紫云英还田减少稻田氮、磷损失,其中减少径流水中溶解态磷损失 13%~36%,这与本研究结果相似。有研究^[26]表明,土壤细颗粒吸附大量的磷,土壤细粒的流失导致土壤有效磷减少,而翻压紫云英改善土壤物理性质^[16],可以减轻降雨、径流以及人工活动对土壤的影响,减少土壤细颗粒受到的扰动,进而减少从土壤进入水体的有效磷。

3.3 紫云英配合化肥减量对土壤养分的影响

有研究^[13,27]指出,紫云英与化肥配施能够有效提高土壤肥力,改善土壤理化性状。本研究中,各处理土壤 pH 为 5.22~5.34,吕玉虎等^[28]、张成兰等^[29]的研究结果显示,配施紫云英后,pH 在 6.5 左右的土壤其酸性进一步增强,这主要是因为紫云英在腐解过程中释放有机酸,以及有机肥促进水稻根系分泌有机酸,降低土壤 pH。连续长期定位试验结果显示,配施紫云英能够提高土壤有机质和全氮含量^[30-31],本研究中,配施紫云英对土壤有机质含量没有较大影响,可能是因为试验年限过短,差异显现不明显,除氮肥减量 10%外,其余处理的土壤全氮含量均高于冬闲常规施肥。土壤碱解氮以及速效钾含量随着施氮量的减少而减少,这可能是水稻从土壤中带走较多的氮、钾后,紫云英腐解释放的氮、钾弥补不足造成的。配施紫云英处理的土壤有效磷含量均高于冬闲常规施肥处理,可能的原因是紫云英的翻压减少土壤细粒的流失,保持土壤中的有效磷,并且这也与翻压紫云英处理的田面水 DTP 平均浓度低于 CK 处理的结果相符。此外,有研究^[32]表明,有机无机肥配施能够增加土壤磷库,促进土壤无效态磷向有效态磷转化;张成兰等^[29]也指出,减量化肥配施紫云英的土壤无机磷含量低于单施化肥,也与无机磷转化为有效态磷有关。

3.4 紫云英配合化肥减量对水稻性状与产量的影响

较多研究^[13,33-34]表明,紫云英的施用能够代替部分化肥以保持水稻稳产增产,翻压 15.0~45.0 t/hm²

紫云英可以代替 20%~40% 的化肥。张颖睿等^[35]研究表明,不施化肥仅翻压紫云英导致水稻产量显著降低,但翻压 27.0 t/hm² 的紫云英可代替 30% 的化肥保证水稻的生长和产量;程会丹等^[36]的研究结果显示,翻压 22.5 t/hm² 的紫云英可代替 40% 化肥施用,翻压量为 30.0 t/hm² 时,水稻产量还会进一步提高,但翻压量继续增大后,水稻产量呈现下降趋势。显然,在不同的土壤类型、气候条件以及种植方式下,紫云英代替化肥的效果不同。吕玉虎等^[28]研究表明,翻压紫云英可显著提高水稻株高、有效穗数和产量,对水稻实粒数和千粒重无明显影响,这与王建红等^[37]的研究结果类似。

本研究中翻压紫云英显著增加水稻株高,对水稻有效穗数的提升也十分明显,而对千粒重、每穗粒数以及结实率影响不大,同时翻压紫云英配合减氮施肥促进水稻增产,CT3 处理的水稻产量比常规施肥处理提高 1.7%,说明翻压 50.0 t/hm² 紫云英可以代替 30% 的氮肥施用,CT0、CT1 处理的水稻产量虽然仍较常规施肥高,但是不及 CT2 处理,这可能是因为这 2 个处理的氮肥过剩,影响水稻的生长,这也与前人^[33-34]的研究结果一致。

4 结论

(1)稻田田面水中 TN、DTN、NH₄⁺-N 在施肥第 1 天达到峰值,在第 12 天内降至较低水平,TP、DTP 在施肥的第 1 天达到峰值,在施肥后 4 天内降至较低水平。施基肥后的 12 天内是控制氮素流失的关键时期,施基肥后的 4 天内是控制磷素流失的关键时期。配施紫云英处理(CT0、CT1、CT2、CT3)在各氮磷流失关键期内均能降低田面水 TN 和 TP 浓度,降幅分别为 6.3%~29.4%,12.8%~38.6%,其中均以紫云英配合 30% 氮肥减量处理效果最好。

(2)配施紫云英处理较 CK 处理提高土壤有效磷和全氮含量,而土壤碱解氮和速效钾含量略微降低,但不显著;与 CK 比较,配施紫云英处理促进水稻株高和有效穗数的增长,且在水稻产量上均有提升,效果以 CT2 处理最好。综合稻田田面水氮磷流失风险、土壤肥力以及水稻产量,紫云英配合 20% 减氮施肥是较为适合该地区的方案。由于本试验是大田试验,受自然因素影响较大,且试验年限较短,因此还需进行长期定位试验,对研究结论作进一步论证。

参考文献:

[1] Srinivas R, Singh A P, Dhadse K, et al. An evidence based integrated watershed modelling system to assess the impact

of non-point source pollution in the riverine ecosystem[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: e118963.

[2] Wang J L, Lu J Z, Zhan Z, et al. Agricultural nonpoint sources and their effects on chlorophyll-a in a eutrophic lake over three decades (1985—2020)[J/OL]. Environmental Science and Pollution Research, 2022. doi: 10.1007/s11356-022-19220-z.

[3] 中华人民共和国生态环境部,国家统计局,中华人民共和国农业农村部.第二次全国污染源普查公报[R/OL]. (2020-06-16)[2022-03-01]. https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.

[4] 张悦琦,李荣平,穆西哈,等.基于多时相 GF-6 遥感影像的水稻种植面积提取[J].农业工程学报, 2021, 37(17): 189-196.

[5] Li L, Zhang Z, Tian H, et al. Nitrogen deep placement combined with straw mulch cultivation enhances physiological traits, grain yield and nitrogen use efficiency in mechanical pot-seedling transplanting rice[J]. Rice Science, 2022, 29(1): 89-100.

[6] 陈静蕊,陈晓芬,秦文婧,等.紫云英还田对江西早稻季田面水氮磷动态的影响[J].生态环境学报, 2020, 29(7): 1352-1358.

[7] 缪杰杰,刘运峰,胡宏祥,等.不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报, 2020, 34(5): 87-93.

[8] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461.

[9] 颜志雷,方宇,陈济琛,等.连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响[J].植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1151-1160.

[10] 方林发,谢军,孔萌,等.豆科绿肥替代化学氮肥促进柑橘幼苗生长和氮素吸收[J].植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 1959-1970.

[11] 杨静,林祎,杨文浩,等.不同施肥水稻土可溶性有机氮变化速率及对细菌的响应[J].农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1509-1518.

[12] 高嵩涓,曹卫东,白金顺,等.长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J].土壤学报, 2015, 52(4): 902-910.

[13] 聂良鹏,郭利伟,郑春风,等.种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤理化性状和水稻产量的影响[J].中国农学通报, 2021, 37(27): 65-69.

[14] 黄晶,高菊生,张杨珠,等.紫云英还田后不同施肥下的腐解及土壤供钾特征[J].中国土壤与肥料, 2016(1): 83-88.

[15] 聂鑫,鲁艳红,廖育林,等.氮钾减施下紫云英翻压量对双季稻产量及氮素利用的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 684-691.

[16] 刘小粉,刘春增,贾萌萌,等.化肥减施条件下紫云英翻压量对土壤物理特性和水稻产量的影响[J].江苏农业

科学,2021,49(16):67-73.

[17] 唐杉,王允青,赵决建,等.紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J].生态学杂志,2015,34(11):3086-3093.

[18] 张富林,吴茂前,夏颖,等.江汉平原稻田田面水氮磷变化特征研究[J].土壤学报,2019,56(5):1191-1199.

[19] 鲍士旦.土壤农业化学分析方法[M].3 版.北京:中国农业科技出版社,2000.

[20] 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):39-43,48.

[21] 夏小江,胡清宇,朱利群,等.太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J].水土保持学报,2011,25(4):21-25.

[22] 赵冬,颜廷梅,乔俊,等.稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J].生态环境学报,2011,20(4):743-749.

[23] 田昌,周旋,杨俊彦,等.化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响[J].土壤,2020,52(5):311-319.

[24] 周春火,潘晓华,吴建富,等.不同复种方式对早稻产量和氮素吸收利用的影响[J].江西农业大学学报,2013,35(1):13-17.

[25] 丁炳红.紫云英等有机物料还田对稻田氮磷损失及重金属活性的影响[D].杭州:浙江农林大学,2012.

[26] Han W Y, LI Y, Yin H. The influence of mechanical composition and mineral composition of calcareous soil on slope farmland on phosphorus fixation[J].Applied Sciences,2021,11(9):e3731.

[27] 王慧,唐杉,王云青,等.紫云英翻压对稻田土壤肥力和双季稻产量的影响[J].土壤通报,2019,50(6):1385-1389.

[28] 吕玉虎,郭晓彦,李本银,等.翻压不同量紫云英配施减量化肥对土壤肥力和水稻产量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(5):94-98.

[29] 张成兰,刘春增,吕玉虎,等.减量化肥配施不同量紫云英对土壤磷素形态及水稻产量的影响[J].中国土壤与肥料,2020(1):101-106.

[30] 王赞,徐昌旭,周国朋,等.连续种植翻压紫云英减施化肥对江西早稻产量、品质及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(10):1735-1745.

[31] 张璐,黄晶,高菊生,等.长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J].农业工程学报,2020,36(5):106-112.

[32] 周宝库,张喜林.长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(2):143-147.

[33] 陈静蕊,秦文婧,王少先,等.化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):281-287.

[34] 张成兰,吕玉虎,刘春增,等.减量化肥配施紫云英对水稻产量稳定性的影响[J].中国土壤与肥料,2021,35(3):704-713.

[35] 张颖睿,杨滨娟,黄国勤.紫云英翻压量与不同施氮量对水稻生长和氮素吸收利用的影响[J].生态学杂志,2018,37(2):430-437.

[36] 程会丹,鲁艳红,聂军,等.化肥减施下紫云英不同翻压量对双季稻产量及养分利用效率的影响[J].华北农学报,2020,35(3):143-152.

[37] 王建红,曹凯,张贤.紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响[J].土壤学报,2014,51(4):888-896.

(上接第 147 页)

[18] 陈旭飞,刘通,程炯,等.华南地区草被过滤带对菜地径流、泥沙和磷阻控效果及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(2):377-383.

[19] 陈倩,傅瑜,余冬立,等.坡面产流产沙过程对植被过滤带响应的试验研究[J].水土保持学报,2017,31(6):104-109.

[20] 吴建强,黄沈发,黄宇弛,等.污染负荷及植被生物量变化对缓冲带污染物净化效果的影响[J].环境工程学报,2008,2(10):1425-1429.

[21] Fernandez-Ugalde O, Virto I, Bescansa P, et al. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils [J]. Soil and Tillage Research,2009,106(1):29-35.

[22] 李晓娜,张国芳,武美军,等.不同植被过滤带对农田径流泥沙和氮磷拦截效果与途径[J].水土保持学报,2017,31(3):39-44.

[23] 何聪,刘璐嘉,王苏胜,等.不同宽度草皮缓冲带对农田径流氮去除效果研究[J].水土保持研究,2014,21(4):55-58.

[24] Lambrechts T, François S, Lutts S, et al. Impact of plant growth and morphology and of sediment concentration on sediment retention efficiency of vegetative filter strips: Flume experiments and VFSSMOD modeling[J].Journal of Hydrology,2014,511:800-810.

[25] Wu J Q, Xiong L J, Sha C Y. Removal of N, P from seepage and runoff by different vegetated and slope buffer strips[J].Water Science and Technology,2020,82(2):351-363.