

万 辰,马瑛骏,陈思玮,等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻氮磷利用率和稻田氮磷平衡的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(1):93-98.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.01.013

# 不同比例有机肥替代化肥对水稻氮磷利用率和稻田氮磷平衡的影响

万 辰<sup>1,2,3</sup>, 马瑛骏<sup>1,2,4</sup>, 陈思玮<sup>1,2,3</sup>, 张克强<sup>1,2</sup>, 王 风<sup>1,2</sup>, 沈仕洲<sup>1,2</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 云南大理农田生态系统国家野外观测研究站, 云南大理 671004;  
3. 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201; 4. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

**摘要:**为了探究不同比例有机肥替代化肥条件下稻田氮磷养分利用特征,为肥料利用率提高和氮磷减排提供理论技术支撑,在云南省洱海流域进行田间试验,试验设置不施肥(CK)、单施化肥(CF)、30%有机肥替代(T1)、50%有机肥替代(T2)、70%有机肥替代(T3)、100%有机肥(T4)共6个处理。结果表明,T1~T4处理水稻总产量与CF相比分别下降9.74%、22.30%、27.26%和36.47%,施用有机肥水稻有效穗数下降趋势明显;随着有机肥替代比例增加,氮素农学利用率呈先下降后上升趋势,单施有机肥处理达到最大值14.63 kg/kg,磷素农学利用率呈持续下降趋势,氮素及磷素生理利用率均呈上升趋势,水稻氮素偏生产力呈先上升后下降的趋势,在50%有机肥替代下达到最大值39.24 kg/kg,磷素偏生产力呈不断下降趋势;单施化肥水稻氮素及磷素吸收利用率均达到最大值(43.63%和24.75%);氮素携出量随着有机肥配比增加而提高,与CF处理相比T1~T4提高16.21%~61.74%,而磷素携出量降低19.84%~23.80%,氮表观损失呈下降趋势,而磷表观损失呈上升趋势,单施化肥处理土壤氮素盈余达到最大值93.74 kg/hm<sup>2</sup>,单施有机肥处理土壤磷素盈余达到最大值167.63 kg/hm<sup>2</sup>。不同比例有机肥替代施肥均导致水稻减产和土壤氮素磷素养分盈余,水稻氮素利用率上升,磷素利用率下降;推荐施肥量下,30%有机肥替代化肥为最佳施肥方案。

**关键词:**有机肥;水稻产量;氮素利用率;磷素利用率;氮磷平衡

**中图分类号:**S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)01-0093-06

水稻是我国重要的粮食作物,2021年种植面积为 $2.99 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,总产量为 $2.13 \times 10^8$  t,达到我国粮食总产量近1/3<sup>[1]</sup>,因此,维持水稻高产、稳产对保障我国粮食安全具有重要意义。施肥在水稻生产中具有重要作用,但盲目过量施用化肥会造成作物减产和环境污染等问题<sup>[2-4]</sup>,研究表明,农田过量化肥投入,不仅会造成水稻贪青晚熟,稻米品质下降<sup>[5]</sup>,还会导致化肥利用率降低<sup>[6]</sup>。我国为世界上最大的化肥消耗国,据统计,2020年我国化肥施用量达到 $5.25 \times 10^7$  t,但目前我国氮肥当季利用率仅有30%~35%<sup>[7]</sup>,磷肥当季利用率仅有10%~20%<sup>[8]</sup>,远低于世界平均水平<sup>[9]</sup>,过量的养分盈余

会造成土壤酸化板结<sup>[10]</sup>,引起土壤结构退化<sup>[11]</sup>,严重影响农田生态系统可持续发展。此外,氮、磷是水体富营养化的主要限制因子<sup>[12]</sup>,而农田是水体氮磷养分的主要来源<sup>[13]</sup>,速效氮磷化肥极易通过径流淋溶等方式进入自然水体<sup>[14]</sup>,研究表明,洱海流域氮磷流失量分别为6.82、1.31 kg/hm<sup>2</sup>,占到施肥总量的8.92%和16.27%<sup>[15]</sup>。因此,减少化肥施用,提高作物氮磷利用率对我国农业发展和生态环境安全具有重要作用。

通过合理施肥,平衡土壤养分的输入和输出,减少养分的积累与流失,是提高作物养分利用率、维持作物产量及综合治理农业面源污染的重要技术措施<sup>[16]</sup>。有机肥的有机质含量高,养分全面<sup>[6]</sup>,施用有机肥能改善土壤微生物群落结构和数量<sup>[17]</sup>,培肥土壤,提高作物品质<sup>[18]</sup>。李燕青等研究发现,在推荐施肥量下,猪粪或鸡粪单独施用或配施少量尿素,牛粪配施75%左右尿素作物可实现与化肥相当的氮素利用率,同时提升土壤肥力<sup>[19]</sup>。杜白等通过有机肥配施磷钾肥处理发现,水稻比单施化肥增产9.45%,同时垩白米率降低,直链淀粉和蛋白质

收稿日期:2023-03-22

基金项目:云南省专家工作站项目(编号:202005AF150204);云南省重大科技专项计划(编号:202102AE090011);云南省基础研究青年基金(编号:2019FD120);国家重点研发计划(编号:2021YFD1700400)。

作者简介:万 辰(1997—),男,河北唐山人,硕士,研究方向为农业面源污染防治。E-mail:cenwan97@163.com。

通信作者:沈仕洲,博士,助理研究员,主要研究方向为农业面源污染防治。E-mail:shenshizhou@126.com。

含量提高,稻米外观品质和营养品质有所改善<sup>[20]</sup>。刘红江等通过有机无机肥配施研究发现,在满足作物需氮条件下,控制无机氮与有机氮配比为 1∶1 时,既可以提高水稻增产潜力,又降低了稻田氮素流失风险<sup>[21]</sup>。目前研究大多集中在施氮量对肥料利用率以及农田生产力的影响方面<sup>[22]</sup>,对不同有机肥配施比例及氮磷养分利用状况研究较少,适宜比例的有机肥替代化肥对提高肥料利用率以及减少农田氮磷流失具有重要意义。本研究设置不同比例有机肥替代化肥处理,通过田间定位试验探究不同比例有机肥替代化肥对水稻产量、氮磷利用率以及土壤养分平衡的影响,为提高肥料利用率和减少

氮磷排放提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省大理白族自治州喜洲镇,云南大理农田生态系统国家野外观测研究站(100°10′27″E, 25°53′34″N),地处典型西南高原湖泊流域——洱海流域,气候为低纬度高原中亚热带西南季风气候,平均海拔 1 980 m,年平均气温 14.6 ℃,年平均日照时数 2 277 h,多年平均降水量为 1 048 mm,且多集中在 6—10 月<sup>[23]</sup>。供试土壤为暗棕壤,试前试验地 0~20 cm 土层土壤理化性质见表 1。

表 1 试验前土壤基本理化性质

耕层土壤 (cm)	pH 值	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	铵态氮含量 (mg/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)
0~20	7.16	0.91	57.34	3.26	0.91	14.22	21.58	25.27

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理:CK,空白,不施用肥料;CF,单施化肥;T1,70% 化肥 + 30% 牛粪有机肥;T2,50% 化肥 + 50% 牛粪有机肥;T3,30% 化肥 + 70% 牛粪有机肥;T4,100% 牛粪有机肥。以传统化肥施肥量(施 N 195 kg/hm<sup>2</sup>)氮素折纯计算各处理施肥量,施肥量见表 2。每个处理设 3 组重复,共 18 个小区,各小区面积为 30 m<sup>2</sup>(5 m×6 m)。试验时间为 2021 年 6 月 10 日至 10 月 10 日,供试水稻品种为云粳 25。供试化肥包括尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%)和硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 50%),有机肥为牛粪有机肥(精制商品有机肥),氮含量为 2.3%,磷含量为 2.4%,钾含量为 5.7%;施肥方式为有机肥用作基肥,在翻耕前一次性施入,磷钾肥在分蘖期一次性施入,单施化肥处理和有机无机配施处理的尿素分 2 次施入,在分蘖期(6 月 30 日)施入 70%,在穗肥期(7 月 30 日)施入 30%。

1.3 样品采集与测定

水稻种植前及试验结束后用 5 点法采集各小区 0~20 cm 土样,混合后测定土壤养分含量,包括土壤全氮、全磷、铵态氮、硝态氮、有效磷含量。水稻收获前 3 d,在每小区随机采样 5 株水稻用于考种,调查株高、有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量,收获时按小区分别测定籽粒与秸秆产量,并测定籽粒和秸秆全氮和全磷含量。样品测定方法参考《土壤农业化学分析方法》<sup>[24]</sup>。

表 2 各处理水稻施肥量和养分折纯 kg/hm<sup>2</sup>

处理	牛粪 有机肥	化肥			合计折纯		
		尿素	过磷酸钙	氯化钾	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	0	0	0	0	0	0	0
CF	0	424	450	150	195	72	90
T1	2 544	298	315	105	195	111	250
T2	4 261	213	225	75	195	138	288
T3	5 957	128	135	45	195	165	367
T4	8 478	0	0	0	195	204	483

1.4 计算方法与数据处理

肥料农学利用率(kg/kg) = (施肥区籽粒产量 - 空白区籽粒产量)/施肥养分含量;

肥料吸收利用率 = (施肥区水稻养分吸收量 - 空白区水稻养分吸收量)/施肥养分含量 × 100%;

肥料生理利用率(kg/kg) = (施肥区籽粒产量 - 空白区籽粒产量)/(施肥区水稻养分吸收量 - 空白区水稻养分吸收量);

肥料偏生产力(kg/kg) = 水稻产量/施肥养分含量;

养分表观损失量(kg/hm<sup>2</sup>) = 施肥养分含量 + 土壤起始无机养分量 + 土壤矿化养分量 - 作物携出养分量 - 土壤残留无机养分量<sup>[25]</sup>。

计算公式中养分为氮素和磷素。

用 SPSS 25 对数据进行方差分析及显著性差异分析,用 Origin 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻产量及其构成因素的影响

不同比例有机肥替代处理下水稻产量及其构成因子差异较大。由表 3 可知,随着有机肥替代比例增加,水稻总产量呈下降趋势,T1 ~ T4 处理水稻总产量与 CF 相比分别下降 9.74%、22.30%、27.26% 和 36.47%,水稻籽粒产量不同处理间差异

显著,T1 ~ T4 处理水稻籽粒产量与 CF 相比分别下降 8.09%、19.90%、17.62% 和 28.30%,T4 处理与 CK 相比,水稻总产量与籽粒产量差距较小,仅增产 6.63% 和 12.92%,单施化肥处理,株高显著大于其他施肥处理,达到 97.58 cm,有效穗数受施肥影响较大,随着有机肥施用比例增加有效穗数下降趋势明显,与 CF 相比 T2、T4 处理千粒质量提升显著,分别增加 12.11% 和 12.23%,结实率受施肥影响较小。

表 3 不同施肥处理水稻产量构成比较

处理	株高 (cm)	有效穗数 (个/株)	每穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	小区总产量 (kg/30 m <sup>2</sup> )	小区籽粒产量 (kg/30 m <sup>2</sup> )
CK	85.38d	13.00e	105.33de	97.22d	29.75bc	71.48e	22.53e
CF	97.58a	21.33a	132.21ab	97.71c	31.66b	119.99a	35.48a
T1	94.12b	19.33ab	94.65e	96.94e	27.77c	108.30b	32.61b
T2	85.99d	17.67bc	116.81cd	98.37a	36.02a	93.24c	28.42c
T3	90.97c	16.00cd	145.33a	98.04b	30.46b	87.28d	29.23c
T4	90.53c	14.67de	120.67bc	94.26f	36.07a	76.22e	25.44d

注:同列数值后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著,下表同。

2.2 不同施肥处理对水稻氮素及磷素利用率特征的影响

不同比例有机肥替代处理下水稻氮素磷素利用率如表 4 所示。在不施有机肥处理下,氮素农学利用率最低,而磷素农学利用率最高,随着有机肥施用量的增加,水稻氮素及磷素农学利用率具有不同变化趋势,氮素农学利用率呈先下降后上升趋势,在单施有机肥的处理下达到最大值 14.63 kg/kg,而磷素农学利用率呈不断下降趋势;单施化肥处理下,水稻氮素及磷素吸收率均达到最大,分别为 43.63% 和 24.75%,分别比单施有机肥高 2.40、4.37 百分点,说明无机养分较易被作物吸收;水稻氮素、磷素生理利用率变化趋势均随有机肥施加量的增加而上升,在单施有机肥处理下达到最大,水稻磷素生理利用率提升显著,与单施化肥相比提升 41.08%,说明施加有机肥有利于水稻籽粒增产;随着有机肥施用比例的增加,水稻氮素偏生产力呈先上升后下降的趋势,在 50% 有机肥替代下达到最大,而磷素偏生产力呈不断下降趋势;总体来看,不同比例有机肥替代施肥水稻氮素利用率无明确规律,不同有机肥替代比例具有不同效果,而水稻磷素利用率变化趋势明显且处理间差异极显著,可能与增施有机肥施磷量上升有关。

2.3 不同施肥处理对水稻田土壤氮素磷素平衡变化的影响

不同比例有机肥替代处理下稻田土壤氮素平

表 4 不同施肥处理水稻肥料氮素磷素利用率

肥料养分	处理	农学利用率 (kg/kg)	吸收利用率 (%)	生理利用率 (kg/kg)	偏生产力 (kg/kg)
氮素	CF	12.13e	43.63a	32.42e	36.45e
	T1	14.23b	41.47b	34.83d	38.23c
	T2	13.77d	38.41e	35.54c	39.24a
	T3	13.81c	40.24d	35.76b	38.67b
	T4	14.63a	41.23c	36.47a	37.45d
磷素	CF	14.92a	24.75a	54.46e	67.35a
	T1	13.24b	24.12b	67.54d	62.47b
	T2	11.45c	22.47d	68.21c	57.68c
	T3	10.87d	23.14c	74.69b	55.47d
	T4	9.14e	20.38e	76.93a	50.63e

衡结果如表 5 所示。在氮素输入项中,施肥起主要作用,占到总输入项的 57.05%;而在氮素输出项中,在相同施氮水平下,作物携出量不同,而是随着有机肥使用比例的增加而提高,与 CF 相比 T1 ~ T4 提高 16.21% ~ 61.74%;除 CK 土壤残留矿质氮较试前土壤起始氮下降 30.07% 外,各施肥处理土壤残留矿质氮较试前土壤起始氮均有所上升,CF ~ T4 处理分别上升 76.20%、78.25%、85.17%、103.62% 和 116.54%;氮素表观损失在单施化肥处理下达到最大值 103.92 kg/hm<sup>2</sup>,随着有机肥替代比例的增加,氮素表观损失呈逐渐下降趋势,T1 ~ T4 处理与 CF 相比,分别下降 17.32%、44.25%、65.15% 和 90.27%,各施肥处理均造成土壤氮素盈余,在相同

表 5 不同施肥处理稻田土壤氮素平衡变化

kg/hm<sup>2</sup>

处理	氮输入			氮输出			氮素盈亏
	施氮量	起始氮	净矿化氮	作物携出	残留矿质氮	氮表观损失	
CK	0	77.55	69.27	92.59	54.23	0	-92.59
CF	195	77.55	69.27	101.26	136.64	103.92	93.74
T1	195	77.55	69.27	117.67	138.23	85.92	77.33
T2	195	77.55	69.27	140.28	143.60	57.94	54.72
T3	195	77.55	69.27	147.69	157.91	36.22	47.31
T4	195	77.55	69.27	163.78	167.93	10.11	31.22

施氮量条件下,随着有机肥替代比例的增加作物携出量逐渐增加,因此土壤氮素盈余随有机肥替代比例的增加而减少。

不同比例有机肥替代处理下稻田土壤磷素平衡结果如表 6 所示。在磷素输入项中,因试验中有有机肥为等氮替代,导致随有机肥配比增加施磷量也随之增加,T1 ~ T4 处理磷输入量与 CF 相比分别提升 48.77%、91.67%、129.17% 和 183.33%;施磷量

提高并没有增加作物磷素携出量,CF 作物携出量最高,达到 47.73 kg/hm<sup>2</sup>,有机肥替代处理作物携出量随有机肥替代比例的增加而降低;有机肥配比增加导致施磷量大幅上升,导致土壤磷素大量盈余,与 CF 相比,T1 ~ T4 处理磷表观损失分别提升 113.83%、156.51%、183.93% 和 226.89%,T1 ~ T4 处理土壤磷素盈余分别提升 199.71%、314.22%、428.14% 和 590.69%。

表 6 不同施肥处理稻田土壤磷素平衡变化

kg/hm<sup>2</sup>

处理	磷输入			磷输出			磷素盈亏
	施磷量	起始磷	净矿化磷	作物携出	残留矿质磷	磷表观损失	
CK	0	21.13	14.98	27.76	8.35	0	-27.76
CF	72	21.13	14.98	47.73	35.87	24.51	24.27
T1	111	21.13	14.98	38.26	56.44	52.41	72.74
T2	138	21.13	14.98	37.47	73.77	62.87	100.53
T3	165	21.13	14.98	36.82	94.70	69.59	128.18
T4	204	21.13	14.98	36.37	123.62	80.12	167.63

3 讨论

3.1 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量及养分利用率的影响

水稻各产量构成因素协调决定了作物产量,施肥类型对水稻构成因素有显著影响<sup>[26-27]</sup>。王秋菊等研究发现,相同施氮量条件下 5 种处理间水稻穗数差异和每穗粒数差异均达到极显著水平<sup>[28]</sup>。本研究中除 T3 处理和 T4 处理外,其余处理间水稻穗数存在显著性差异,因此施肥类型是影响水稻穗数的主要原因。本研究发现,随着有机肥替代比例的增加,水稻产量与有效穗数呈下降趋势,而千粒质量呈上升趋势,原因可能是有机肥在水稻分蘖期养分供应不足,鲁耀雄等研究发现,有机肥配施化肥处理较单施有机肥处理均显著提高水稻株高、有效

穗数、秸秆和籽粒产量,原因是有机肥氮素矿化养分释放缓慢使水稻发育前期缺氮,而配施化肥为水稻提供了发育所需的速效养分<sup>[29]</sup>。因此在实际生产中应配施一定量的化肥,以保障水稻稳产,虽然有机肥施用造成作物一定程度的减产,但考虑到有机肥对土壤养分具有长期改善作用,后续可通过长期定位试验,阐明施用有机肥对作物产量的长期影响。

肥料利用率常用的定量指标有吸收利用率、生理利用率、农学利用率和偏生产力,这些指标从不同角度描述了作物对肥料养分的利用率<sup>[30]</sup>。水稻氮素利用率与施氮水平直接相关,一般认为,随着施氮量增加氮素利用率呈下降趋势<sup>[31-32]</sup>,这是由于高施氮量超出了作物的需氮量,造成作物氮素浪费甚至会使作物减产。本研究通过等氮条件下不同

比例有机肥替代化肥发现,有机无机配施处理的氮素生理利用率和偏生产力均大于单施有机肥处理,即有机肥的施用对水稻籽粒增产有促进作用,而有机肥养分释放缓慢在一定程度上影响了水稻氮素吸收利用率和农学利用率,整体来看,30% 有机肥替代化肥水稻氮素利用率较高。

由于磷在土壤液相中的迁移速率仅为  $1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-12} \text{ m/s}^{[33]}$ ,土壤液相中的磷主要通过扩散作用被作物根系吸收,因此作物的总根干质量、总根长和根表面积与作物对磷的吸收利用密切相关<sup>[34]</sup>。马琴等研究发现,与不施磷处理相比,施有机磷处理玉米的根干质量、总根长和根表面积均增加,提高根系吸收和利用土壤磷的能力,从而促进作物磷素养分的积累和产量的提高<sup>[35]</sup>。本研究发现,随着磷素施加量递增,作物磷素生理利用率也不断提高,与上述研究结果相同,因有机肥磷素含量较高,施用大量有机肥也带来磷素农学利用率、吸收利用率和偏生产力下降等问题。

### 3.2 不同比例有机肥替代化肥对水稻田土壤养分平衡的影响

土壤养分平衡主要受肥料投入量和作物吸收量的影响,土壤养分输出项主要为作物携出,在不施肥条件下,由于作物连年携出,土壤养分长期处于亏缺状态,因此作物产量较低<sup>[36]</sup>。研究表明,当氮肥供应超过作物养分需求时,会导致土壤中大量氮素盈余<sup>[37]</sup>,部分氮素留在土壤中,可被后期作物吸收利用,另一部分氮素通过硝态氮淋溶、反硝化作用和氨挥发流失,对环境造成污染<sup>[38-39]</sup>。因此判断施肥是否合理,关注土壤中氮素残留及损失量十分重要。本研究中,在相同施氮水平下,随着有机肥配施比例的提高,作物携出氮素量增高,同时氮素流失减少,说明施用有机肥对促进作物养分吸收、减少农田氮素流失有积极作用,单施化肥处理土壤氮素基本保持平衡,但施用有机肥的处理土壤有机氮素残留量上升,由此可见,施入土壤中有机氮素不可避免会产生一定数量积累,因此,在短期的实际生产中,在满足作物对氮素需求的前提下,减少有机肥施用量有利于维持土壤氮素平衡。

土壤磷素表观损失反映当季土壤磷素盈余或亏缺状态。由于磷肥施入土壤后流失途径和流失量较少,所以土壤磷素的盈亏决定了土壤磷素含量的发展方向<sup>[40]</sup>,当土壤磷素输入量等于或稍大于作物磷素输出量时,农田磷素养分平衡才得以维持。

本研究发现,随着有机肥替代比例的增加,土壤中磷素的盈余也增多,但作物携出量却在减少,原因是供试有机肥中磷素含量与氮素含量相近,作物需磷量远小于施氮量,有机肥等氮替代化肥施肥不可避免导致过量施磷,且有机肥磷素矿化释放缓慢,更容易造成土壤磷素累积,这与杨军等和樊红柱等的研究结果<sup>[41-42]</sup>相似。因此在实际生产中,尽量根据作物对养分的需求比例选择有机肥,可避免由于有机肥养分不均衡导致过量磷素残留在土壤中,有利于提高作物磷素利用率,减少农田土壤磷素流失风险。

## 4 结论

有机肥等氮替代化肥施肥均导致水稻减产,随有机肥替代比例的增加,水稻减产程度随之增加,施用有机肥同时导致水稻有效穗数显著下降。有机肥配施化肥可降低有机肥养分释放缓慢带来的不利影响,维持水稻产量。

随着有机肥替代比例的增加,氮素农学利用率呈先下降后上升趋势,在单施有机肥的处理下达到最大值,氮素磷素生理利用率均呈上升趋势,氮素偏生产力呈先上升后下降的趋势,在 50% 有机肥替代下达到最大,磷素农学利用率、吸收利用率以及偏生产力下降显著。综合来看,施用有机肥可提高水稻氮素利用率,降低水稻磷素利用率。

施用有机肥均造成土壤氮素磷素养分盈余,其中土壤磷素盈余量过大;随着有机肥替代比例的增加,土壤氮表观损失逐渐下降,而磷表观损失逐渐上升。因此选择养分比例合理的有机肥对维持土壤养分平衡具有重要意义。

综合考虑水稻产量、氮磷素利用率和土壤氮磷素盈余等因素,在推荐施肥量下,30% 有机肥等氮替代化肥,是能在维持水稻产量的前提下提高水稻养分利用率同时降低土壤养分盈余的施肥方式。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 36.
- [2] 廖萍, 汤军, 黄山, 等. 等养分条件下生物有机肥与化肥配施对双季稻产量和土壤性状的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(2): 16-20.
- [3] 孟凡非, 付雨, 杨成, 等. 施用不同肥料对土壤氮形态的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(5): 1159-1165.
- [4] Liu R H, Kang Y H, Pei L A, et al. Use of a new controlled-loss-fertilizer to reduce nitrogen losses during winter wheat cultivation in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Communications in Soil

- Science and Plant Analysis, 2016, 47(9): 1137–1147.
- [5] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Challenge and opportunity in improving fertilizer – nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. Agricultural Science in China, 2002, 1(7): 776–785.
- [6] Guo C, Li P F, Lu J W, et al. Application of controlled – release urea in rice: reducing environmental risk while increasing grain yield and improving nitrogen use efficiency [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(9): 1176–1183.
- [7] 张 刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 877–885.
- [8] 郭 智, 刘红江, 陈留根, 等. 有机肥施用对菜地磷素径流流失及磷素表观利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 181–186.
- [9] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China [J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3–8.
- [10] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1389–1393.
- [11] 刘学彤, 郑春莲, 曹 薇, 等. 长期定位施肥对土壤有机质、不同形态氮含量及作物产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(4): 130–135.
- [12] 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.
- [13] 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 等. 不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3083–3090.
- [14] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, et al. Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice – wheat rotation system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 195: 61–67.
- [15] 姚金玲, 张克强, 郭海刚, 等. 不同施肥方式下洱河流域水稻—大蒜轮作体系氮磷径流损失研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2287–2296.
- [16] 杜思婕, 张艺磊, 张志勇, 等. 冬小麦—夏玉米轮作体系不同新型尿素的氮素利用率及去向[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1): 24–34.
- [17] Singh N, Pal N, Mahajan G, et al. Rice grain and starch properties: effects of nitrogen fertilizer application [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(1): 219–225.
- [18] 陈 贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 59–65.
- [19] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1669–1678.
- [20] 杜 白, 谢桐洲, 胡贤巧, 等. 有机氮素肥料对水稻植株生长及产量和品质的影响[J]. 农学报, 2020, 10(9): 1–6.
- [21] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥 – 无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 405–412.
- [22] 耿 维, 胡 林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 171–179, 295.
- [23] 沈仕洲, 杨 艳, 王瑞琦, 等. 施肥对云南洱河流域蒜田土壤氮挥发和大蒜产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 470–479.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 22–36.
- [25] 胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 12–22.
- [26] Zhang W S, Liang Z Y, He X M, et al. The effects of controlled release urea on maize productivity and reactive nitrogen losses: a meta – analysis [J]. Environmental Pollution, 2019, 246: 559–565.
- [27] 石鑫蕊, 任彬彬, 江琳琳, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 154–162.
- [28] 王秋菊, 焦 峰, 刘 峰, 等. 草甸白浆土稻秆氮利用效率及氮素调控对水稻产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 86–94.
- [29] 鲁耀雄, 崔新卫, 范海珊, 等. 有机无机肥配施对湖南省晚稻生长、产量及土壤生物学特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(5): 50–55.
- [30] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production [J]. Plant and Soil, 1981, 58(1): 177–204.
- [31] 廖育林, 鲁艳红, 谢 坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 190–195, 201.
- [32] Fageria N K. Green manuring in crop production [J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(5): 691–719.
- [33] Schachtman D P, Reid R J, Ayling S M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell [J]. Plant Physiology, 1998, 116(2): 447–453.
- [34] Lynch J P. Roots of the second green revolution [J]. Australian Journal of Botany, 2007, 55(5): 493.
- [35] 马 琴, 刘小雨, 冉瑾怡, 等. 磷肥减量结合硫酸铵配施提高西北地区旱地春玉米磷素利用效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1047–1058.
- [36] Sikora L J, Enkiri N K. Efficiency of compost – fertilizer blends compared with fertilizer alone [J]. Soil Science, 2000, 165(5): 444–451.
- [37] 韩晓飞, 高 明, 谢德体, 等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2770–2778.
- [38] 马保国, 杨太新, 郭凤台, 等. 麦稻轮作体系中磷素平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 371–374.
- [39] 纪耀坤. 化肥与有机肥及土壤改良基质配施对土壤质量和小麦生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(21): 221–227.
- [40] 栗 丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1358–1365.
- [41] 杨 军, 高 伟, 任顺荣. 长期施肥条件下潮土土壤磷素对磷盈亏的响应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4738–4747.
- [42] 樊红柱, 陈庆瑞, 郭 松, 等. 长期不同施肥紫色水稻土磷的盈亏及有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 154–162.