

无机有机肥配施对水稻产量及氮肥利用率的影响

王站付¹, 石磊², 杨业凤², 陆利民², 黄璐璐¹, 林天杰^{1*}

(1. 上海市农业技术推广服务中心, 上海 201103; 2. 上海市浦东新区农业技术推广中心, 上海 201201)

摘要 [目的] 研究水稻生长中有机肥与化肥配施对水稻产量及氮肥利用率的影响。[方法] 选用秀水为供试品种开展1季大田试验, 设置常规及缺氮区(CK、T1)、减肥20%及缺氮区(T2、T3)、减肥20%有机肥配施区(T4~T7)和减肥20%缺氮有机肥配施区(T8~T11)共4组12个肥料运筹处理。测定水稻长势及植株养分吸收情况, 分析不同施肥处理下水稻生长性状、产量与氮肥利用率。[结果] 常规施肥条件下水稻生长情况和产量均最高, 但氮肥利用率较低; 在常规施肥减量20%的基础上, 适当增施有机肥, 利于植株氮养分含量的积累, 可提高氮肥利用率; 完全不施氮肥, 磷钾减肥20%的基础上, 配施有机肥, 对水稻生长和氮养分积累较为不利, 产量明显偏低。[结论] 综合考虑投入产出, 当常规施肥减肥20%, 有机肥配施量为3 750 kg/hm²时, 水稻产量与常规施肥差异不显著($P < 0.05$), 为最优无机有机肥配施方案。

关键词 无机有机肥配施; 水稻; 产量; 氮肥利用率

中图分类号 S511 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)01-0163-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.01.049



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Influence of Organic-inorganic Compound Fertilizers on Yield and Nitrogen Use Efficiency in Rice

WANG Zhan-fu¹, SHI Lei², YANG Ye-feng² et al (1. Extension Service Center of Agricultural Technology of Shanghai, Shanghai 201103; 2. Pudong New District of Shanghai Agro-Technology Extension Service Center, Shanghai 201201)

Abstract [Objective] To study the effects of application of organic fertilizer and chemical fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency in rice growth. [Method] Xiushui was selected as the tested variety for one season field trial. A total of four groups of 12 fertilizers combined were used for treatment, including conventional (excluding nitrogen) fertilization block, weight loss 20% conventional (excluding nitrogen) fertilizer block, weight loss 20% fertilizer + organic fertilizer combined application block, loss 20% fertilizer excluding nitrogen weight + organic fertilizer combined application block. The growth of the rice and the nutrient uptake of the plants were measured. The growth traits, nutrient absorption and accumulation and nitrogen use efficiency under different fertilization treatments were analyzed. [Result] The growth and yield of rice were highest under normal fertilization conditions, but the nitrogen recovery efficiency was lower. On the basis of 20% reduction of conventional fertilization, appropriate application of organic fertilizer was beneficial to the accumulation of nitrogen in plants, which could improve the recovery rate of nitrogen fertilizer. No nitrogen fertilizer, on the basis of 20% reduction of phosphorus and potassium, organic fertilizer applied, which was unfavorable for wheat growth and nitrogen nutrient accumulation, and the yield was significantly lower. [Conclusion] Considering input and output comprehensively, when conventional fertilization loses 20% and organic fertilizer application rate was 3 750 kg/hm², the rice yield was not significant ($P < 0.05$) with conventional fertilization treatment, which was the optimal fertilizer application mode.

Key words Organic and chemical fertilizer combined; Rice; Yield; Nitrogen use efficiency

有机肥富含有机质和有效养分含量, 是农业生产中的重要肥料。有机肥的施用是提高土壤有机质含量的有效手段^[1], 还可以增加土壤腐殖质含量^[2]。我国传统农业生产就是通过施用有机肥来培肥地力和提高农作物产量^[3]。随着国内农业集约化程度的不断提高, 化肥用量大幅度增加, 农作物产量显著提高。氮磷钾是限制水稻生产最主要的大量元素, 其中, 氮肥是水稻生产过程中需求量最大、增产效果最显著、产生经济效益最高的肥料类型, 适当的氮肥用量可以有效改善群体结构, 促进物质积累与转移, 提高产量水平^[4-6]。但氮肥的不合理投入已成为制约水稻生产的重要限制因素, 氮肥的过量施用导致氮肥利用率较低, 氮素流失严重, 研究发现, 太湖流域稻麦农田氮素径流失量约为30.6 kg/hm², 占氮素投入量的6.2%, 且稻季氮素的径流失量远大于麦季^[7-8]。

虽然上海市近年来水稻种植中有机肥施用量有所增加,

但仍存在偏施氮肥, 有机肥料较少施, 造成化肥施用量较高的问题, 这对改善土壤结构和培肥地力较为不利^[9-10]。研究表明^[11-12], 长期单施化肥或长期大量单施有机肥料均不利于土壤的健康发展, 化肥有机肥配合施用能显著降低土壤剖面的硝态氮含量, 能够有效提高土壤缓冲性能, 增加土壤有机质含量, 增强土壤功能, 作物持续增产稳产。有机无机配施对促进水稻对氮磷钾养分的吸收、提高产量、改善土壤地力环境、提高肥料利用率具有重要影响^[13-14]。因此, 笔者通过水稻田间试验, 研究有机无机肥配施条件下水稻植株养分吸收和作物产量及养分利用效率, 旨在为指导水稻合理施肥、化肥减施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于2018年6—11月在上海市浦东新区曹路镇粮食生产基地进行。供试土壤为水稻土, 试验前耕层0~20 cm土壤理化性质: pH 7.5, 有机质39.4 g/kg, 水解氮257 mg/kg, 有效磷287.2 mg/kg, 速效钾126 mg/kg。

1.2 试验材料 供试水稻品种为秀水(直播), 试验施用的有机肥为本地生产。

1.3 试验设计 试验共设4组12个处理。常规区: 常规施肥(CK)、常规施肥缺氮(T1); 减肥区: 氮磷钾均减肥20%

基金项目 上海市农业农村委科技兴农项目(沪农科推字[2017]第1-2号)。

作者简介 王站付(1985—), 男, 河南周口人, 农艺师, 硕士, 从事土壤肥料与生态农业技术推广工作。*通信作者, 推广研究员, 硕士, 从事土壤肥料与生态农业推广。

收稿日期 2019-04-30

(T2)、磷钾减肥 20% 缺氮 (T3); 减肥 20% 有机肥配施区: 在氮、磷、钾减肥 20% 的基础上增施有机肥, 有机肥施用量: 3 750 kg/hm² (T4)、7 500 kg/hm² (T5)、11 250 kg/hm² (T6)、15 000 kg/hm² (T7); 缺氮减肥 20% 有机肥配施区: 不施氮肥, 在磷、钾减肥 20% 的基础上增施商品有机肥, 有机肥施用量: 3 750 kg/hm² (T8)、7 500 kg/hm² (T9)、11 250 kg/hm² (T10)、15 000 kg/hm² (T11)。

各处理重复 3 次, 随机区组排列, 小区面积 120 m²。小区间设置小田埂, 田埂宽 30 cm, 高出大田 30 cm; 田埂内侧嵌 HDPE 防渗膜, 嵌入土体深度不低于 30 cm, 高出田埂 30 cm, 防止相互窜肥。在各小区两头开通灌水沟和排水沟, 灌排分开, 沟宽约 0.3 m, 深约 0.2 m。

当地常规施肥量折纯 433.5 kg/hm², 其中氮肥 321.0 kg/hm², 磷肥 75.0 kg/hm², 钾肥 37.5 kg/hm², 按照基肥(碳酸氢铵 750.0 kg/hm²、过磷酸钙 375.0 kg/hm²)、分蘖肥 1(尿素 112.5 kg/hm²)、分蘖肥 2(复混肥(24-8-10) 375.0 kg/hm²)、穗肥(尿素 112.5 kg/hm²) 4 个时期进行施肥。有机肥全部基施, 市售有机肥鲜基含水量 30%, 烘干基养分含量为 N 1.5%, P₂O₅ 2.0%, K₂O 1.5%。为获得的数据与实际生产情况相一致, 试验田的管理与大田常规模式保持一致。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤理化性质。试验开始前采集 0~20 cm 土层基础土样, 测定基本理化性状。

1.4.2 茎叶株高。分蘖后期, 采集有代表性的植株 5 株, 测量主茎长度取最大值, 株高用钢卷尺测量, 测量植株从露出土壤根部至顶端的距离。

1.4.3 叶绿素相对含量 (SPAD)。分蘖后期, 用 SPAD-502 plus 叶绿素仪测量水稻剑叶的叶尖、中部和基部 SPAD 值, 以其平均值作为叶片的 SPAD 值。

1.4.4 植株养分含量。在分蘖及成熟期分别取 5 株长势均匀一致的植株, 分蘖期为地上植株, 成熟期分植株和籽粒两部分, 在 105 °C 下迅速杀青 30 min, 然后在 75 °C 下烘干至恒重, 称重后, 测定全氮含量。

1.4.5 考种及测产。水稻成熟后, 每处理取 30 株进行室内穗粒结构考种, 进行理论测产, 其中称重, 折算成含水量 13.5% 条件下的重量。土壤和植株样品均采用常规分析方法^[15]。

1.5 数据处理 数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 7.5 数据处理系统。

氮吸收量 (kg/hm²) = (籽粒产量 × 籽粒养分含量 + 秸秆量 × 秸秆养分含量) / 1 000

氮肥利用率 (NRE) = (施氮区地上部氮素吸收量 - 缺氮区地上部氮素吸收量) / 施氮量 × 100%

氮素吸收效率 (NUP) = 施氮区地上部氮吸收量 / 施氮量 × 100%

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻分蘖期生长性状的影响 由表 1 可知, 不同施肥处理对水稻分蘖期生长性状有一定的影响。

分蘖期常规施肥 (CK) 各性状均较高, 其中叶绿素含量 SPAD 值常规减肥 20% (T2) 最高为 36.97, 其次是常规施肥 (CK), 减肥 20% 有机肥配施区和缺氮减肥 20% 有机肥配施区均高于缺氮处理 (T2、T3), 减肥 20% 有机肥配施区 (T4~T7) 和缺氮减肥 20% 有机肥配施区 (T8~T11) 水稻 SPAD 值差异不显著。株高最大为 T4 (76.97 cm), 其次是 CK, 缺氮区 (T1、T3) 株高较小, 减肥 20% 有机肥配施区 (T4~T7) 株高整体高于缺氮减肥 20% 有机肥配施区 (T8~T11)。各处理株重差异不显著, 减肥 20% 有机肥配施区 (T4~T7) 株高略高于缺氮减肥 20% 有机肥配施区 (T8~T11)。

在分蘖期除 SPAD 值外, 株高和株重减肥 20% 有机肥配施区 (T4~T7) 均高于缺氮减肥 20% 有机肥配施区 (T8~T11), 株高上表现更为显著。这可能是由于小麦生长早期, 相比有机肥, 化肥无机氮更利于小麦吸收, 促进植株生长。

表 1 不同处理水稻分蘖期生长性状

Table 1 Growth character of rice in tiller period under different treatments

处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value	株高 Plant height//cm	株重 Plant weight//g/株
CK	36.90 ab	75.90 ab	6.10 abc
T1	32.20 e	69.60 efg	6.48 ab
T2	36.97 a	73.57 bc	5.40 cd
T3	33.10 de	68.27 g	5.55 abcd
T4	36.67 ab	76.97 a	6.59 a
T5	35.50 abc	73.63 bc	5.54 bcd
T6	33.33 cde	73.07 cd	5.38 cd
T7	34.60 abcde	75.63 ab	6.44 ab
T8	34.50 bcde	70.73 defg	6.16 abc
T9	34.77 abcd	69.00 fg	5.90 abcd
T10	35.90 ab	71.27 cdef	4.86 d
T11	35.90 ab	71.73 cde	5.91 abc

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$)

2.2 不同施肥处理对水稻主要生育期全氮含量的影响 由表 2 可知, 水稻分蘖期植株全氮含量高于成熟期秸秆、籽粒, 成熟期籽粒全氮含量高于秸秆, 水稻后期植株中全氮向籽粒转移。水稻分蘖期所有有机肥配施处理茎叶氮含量均较高,

表 2 不同处理水稻主要生育期全氮含量

Table 2 Total nitrogen content in main growth stage of rice under different treatments g/kg

处理 Treatment	分蘖期植株氮含量 Plant nitrogen content in tillering stage	成熟期 Mature stage	
		秸秆氮含量 Straw nitrogen content	籽粒氮含量 Grain nitrogen content
CK	16.66 bcd	7.64 ab	12.36 b
T1	14.03 de	6.95 ab	11.35 c
T2	11.35 e	5.75 c	11.71 bc
T3	15.16 cde	4.44 d	11.21 cd
T4	19.91 ab	6.14 c	9.94 ef
T5	21.17 a	7.42 b	9.86 f
T6	20.31 ab	4.43 d	11.84 bc
T7	18.16 abcd	8.20 a	10.59 de
T8	20.98 ab	5.68 c	13.60 a
T9	15.08 cde	4.15 d	10.25 ef
T10	17.23 abcd	4.13 d	9.69 f
T11	19.21 abc	3.87 d	9.83 f

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$)

与常规缺氮、减肥缺氮差异显著 ($P < 0.05$), 不同有机肥配施处理全氮含量无显著差异 ($P < 0.05$)。水稻成熟期秸秆全氮含量 CK、T7 较高, 减肥 20% 缺氮配施有机肥 (T8~T11) 较低。籽粒全氮含量 T8 最高, CK 次之, T5、T10、T11 较低, 总的趋势是减氮或缺氮后, 成熟期秸秆及籽粒中氮含量与常规施肥相比均有所下降。

2.3 不同施肥处理对水稻产量及产量构成因素的影响 由表 3 可知, 所有处理中, CK 处理穗长 (18.37 cm)、产量 (10 739.01 kg/hm²) 均最高, 穗粒数 T9 最高 (155.94 粒/穗), 千粒重 T8 最高 (30.27 g), 有效穗数 T7 最高

(389.86 万穗/hm²), 且与其他处理的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。产量方面, 减肥 20% 有机肥配施区处理整体高于减肥 20% 缺氮有机肥配施区处理, T7 与 T8 处理产量达显著差异 ($P < 0.05$), 产量整体随有机肥施肥量的增加而增加, 减肥 20% 有机肥配施区表现为 T7>T5>T6>T4, 减肥 20% 缺氮有机肥配施区表现为 T10>T11>T9>T8。氮肥显著影响水稻产量, 施氮区产量显著高于缺氮区, 常规施肥略高于减肥 20%, 表现为 CK > T2 > T1 > T3。CK (10 739.01 kg/hm²) 与 T7 (10 638.20 kg/hm²) 水稻产量基本持平, 可见, 减肥 20% 后, 配施有机肥 15 000 kg/hm², 可与常规施肥产量基本相当。

表 3 不同处理水稻产量及产量构成因素

Table 3 Yields and yield component factors of rice under different treatments

处理 Treatment	穗长 Spike length cm	穗粒数 Grains per panicle 粒/穗	结实率 Seed-setting rate/%	千粒重 Grain weight g	有效穗数 Spikes number ×10 ⁴ /hm ²	产量 Yield kg/hm ²
CK	18.37 a	146.44 ab	93.72 a	29.80 ab	262.85 bcd	10 739.01 a
T1	15.71 c	117.36 cd	90.54 d	26.03 d	238.50 de	6 358.51 cd
T2	16.10 bc	124.81 bc	91.59 cd	29.25 ab	308.98 bc	10 349.40 bc
T3	15.12 cd	108.64 d	90.06 cd	26.91 cd	226.63 e	6 007.50 d
T4	16.71 b	123.23 bc	92.74 bc	29.29 ab	307.34 bc	10 307.86 bc
T5	16.50 b	132.48 bc	90.69 d	28.96 bc	292.68 bc	10 195.25 bc
T6	14.97 cd	118.09 c	93.96 a	29.49 ab	307.70 bc	10 048.72 bc
T7	14.53 d	109.89 d	89.43 d	27.72 cd	389.86 a	10 638.20 a
T8	16.76 b	135.63 abc	92.16 bc	30.27 a	257.18 cd	9 702.71 c
T9	17.00 b	155.94 a	92.22 bc	29.76 ab	236.88 de	10 061.17 bc
T10	16.03 bc	135.22 abc	93.63 a	28.15 bc	288.37 bc	10 256.99 bc
T11	14.45 d	120.67 c	93.13 ab	30.05 a	301.17 bc	10 174.63 bc

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$)

2.4 不同施肥处理对水稻氮素吸收利用的影响 由表 4 可知, 各施肥处理之间的水稻秸秆吸氮量、籽粒吸氮量和地上部总吸氮量之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 秸秆吸氮量 T7 最高 (121.29 kg/hm²), 籽粒吸氮量 CK 最高 (113.51 kg/hm²), 总吸氮量 T7 最高 (217.69 kg/hm²)。减肥 20% 有机肥配施区秸秆吸氮量高于籽粒吸氮量, 其他处理为籽粒吸氮量高于秸秆吸氮量, 缺氮处理 (T1、T3)、减肥 20% 缺氮处理 (T8~T11) 总吸氮量较低, 总吸氮量最低的为 T3 (102.35 kg/hm²)。T6、T7 总吸氮量均超过 CK, 其中 T7 比 CK 处理增加了 2.58%。

由于有机肥肥效缓慢, 当季养分释放率较低, 该研究在计算施氮量时有机肥氮未计算入内。因此, 缺氮区 (T1、T3) 及缺氮减肥 20% 有机肥配施区 (T8~T11) 不计算氮肥利用率和氮素吸收效率。该试验以 T1 (常规施肥缺氮处理) 总吸氮量作为对照, 计算氮肥利用率。CK 处理氮肥利用率为 32.94%, 减肥 20% 后氮肥利用率增加了 2.53%, 减肥 20% 后配施不同梯度有机肥后氮肥利用率均有所提高, 氮肥利用率在 37.54%~43.30%。在减肥和配施有机肥后氮素吸收效率明显提高, CK 氮素吸收效率为 66.11%, 减肥 20% 后提高至 76.93%, 减肥 20% 配施有机肥后, 氮素吸收效率最高为 84.77%。说明减肥 20% 后配施一定有机肥不仅能够保证水稻对氮素的吸收利用, 还能提高氮肥利用率和氮素吸收

效率。

表 4 不同处理水稻氮素积累及利用情况

Table 4 Nitrogen accumulation and utilization in rice under different treatments

处理 Treatment	秸秆吸氮量 Straw nitrogen uptake kg/hm ²	籽粒吸氮量 Grain nitrogen uptake kg/hm ²	总吸氮量 Total nitrogen uptake kg/hm ²	氮肥利用率 氮肥利用率 NUE %	氮素吸收效率 氮素吸收效率 NUP %
CK	98.71 c	113.51 a	212.22 ab	32.94 d	66.11 d
T1	44.45 g	62.03 e	106.48 e	—	—
T2	93.34 cd	104.23 b	197.56 c	35.47 cd	76.93 c
T3	44.45 g	57.90 e	102.35 e	—	—
T4	115.25 ab	87.63 d	202.87 c	37.54 c	79.01 c
T5	119.43 ab	85.96 d	205.39 bc	38.51 bc	79.98 bc
T6	112.88 b	101.74 b	214.63 a	42.11 ab	83.58 ab
T7	121.29 a	96.40 c	217.69 a	43.30 a	84.77 a
T8	91.08 d	112.83 a	203.91 bc	—	—
T9	74.29 f	100.69 bc	174.98 d	—	—
T10	83.51 e	90.19 d	173.70 d	—	—
T11	86.09 de	85.51 d	171.60 d	—	—

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$)

3 结论与讨论

该研究结果表明, 与不施氮肥相比, 常规施肥处理水稻

分蘖期和成熟期干物质中全氮含量均较高,减肥 20%处理水稻干物质全氮含量显著低于常规施肥。成熟期水稻氮吸收积累总量上,也是常规施肥(CK)保持较高氮积累总量,而缺氮及减肥 20%处理氮积累总量均显著下降。这可能是由于常规施肥情况下,较高的施氮量提高了水稻的光合速率和根系活力,促进了水稻干物质的积累和养分的吸收^[16-17]。研究表明,水稻在吸收氮、磷、钾营养元素时具有显著的正向相关性^[18]。因此常规施肥减肥 20%,氮磷钾同时降低,也间接影响了水稻对氮的吸收。化肥减施 20%(或缺氮)配施不同梯度的有机肥,在分蘖期植株氮含量与常规施肥相比略有提高,但在生育后期,减肥 20%缺氮有机肥配施区水稻植株、秸秆氮含量均显著低于常规施肥。说明在水稻生长前期,有机肥中的氮养分尚能满足水稻养分需求,但在水稻生长后期,完全不施氮肥仅靠有机肥中的氮已不能满足水稻的养分需求。

化肥有机肥配施有利于土壤有机质积累和土壤肥力的提高。与常规施肥相比,化肥减少 20%配施有机肥,可以保证水稻产量不下降,当有机肥配施量为 15 000 kg/hm²时,水稻产量为 10 638.20 kg/hm²,与常规施肥无显著差异($P < 0.05$)。与完全不施氮肥(T1、T3)相比,无机有机肥配施(T4~T11)水稻产量及氮吸收量均有所提高,说明氮素在水稻生长中起着重要作用。化肥有机肥配施后水稻氮吸收量较高,一方面通过有机肥直接补充了稻田系统中的土壤养分,另外由于有机肥肥效缓慢可以调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,使水稻各生育阶段得到更为均衡的矿质营养,从而提高了水稻产量及养分的积累^[19-20]。

养分吸收是物质生产的基础,而物质生产又是稻谷产量形成的基础^[13]。在常规施肥情况下,氮肥利用率为 32.94%,减少 20%施肥量后,氮肥利用率提高至 35.47%,减肥 20%配施有机肥后氮肥利用率有所提高,这与有机肥中的氮释放后被作物吸收利用有关。氮肥利用率的高低取决于试验缺氮区地上部养分积累量和施肥量,该研究常规施肥氮肥利用率较低,这可能与试验地块基础肥力较高、现有施肥量较大有关。在肥力较高地块,肥料施用越多损失越大,氮肥利用率也越低,因此根据土壤养分情况合理施肥、测土配方施肥、平衡施肥是提高肥料利用率的关键措施^[21]。

该试验结果看,常规施肥条件下水稻产量最高,但氮肥利用率较低。常规缺氮施肥或减肥 20%缺氮的基础上,仅以有机肥配施,对水稻生长和氮养分积累较为不利,各有机肥配施梯度下产量均较低,不具有推广意义。常规施肥减肥

20%的基础上配施不同梯度的有机肥处理中,当有机肥配施量为 15 000 kg/hm²时,水稻产量最高,且氮肥利用率和氮素吸收效率最高,而有机肥配施量为 3 750 kg/hm²,产量及氮肥利用率和氮素吸收效率均略有下降。但综合考虑投入产出,在常规施肥减肥 20%,有机肥配施量为 3 750 kg/hm²时,虽与常规施肥相比产量略有下降,但差异不显著($P < 0.05$),投入有机肥量也较少,推广应用价值较高,因此可作为上海市水稻种植上最优化有机肥配施方案。

参考文献

- [1] 汪红霞,廖文华,孙伊辰,等.长期施用有机肥和磷肥对潮褐土土壤有机质及腐殖质组成的影响[J].中国土壤与肥料,2014(6):39-43.
- [2] 魏宇轩,蔡红光,张秀芝,等.不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):258-263.
- [3] 刘立荣.中国古代有机肥制用及其启示[J].西北大学学报(自然科学版),2015,45(4):675-679.
- [4] 金芝辉,王起,柴有忠.氮肥用量和移栽密度对水稻甬优 1540 产量和经济性状的影响[J].安徽农业科学,2019,47(8):39-41.
- [5] 唐利忠,石泉,王晓玉,等.氮肥用量和运筹方式对湘南早稻产量和氮素利用效率的影响[J].中国农学通报,2019,35(11):72-81.
- [6] 陈海飞,冯洋,蔡红梅,等.氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1319-1328.
- [7] 刘红江,郭智,郑建初,等.不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J].江苏农业学报,2018,34(4):783-789.
- [8] 杨和川,樊继伟,任立凯,等.种植密度与施氮量对稻麦轮作体系作物产量及地表径流氮素流失的影响[J].江西农业学报,2018,30(7):13-18,23.
- [9] 杨业凤,陆利民.2014年浦东新区主要作物投肥分析[J].上海农业科技,2016(1):101-102,139.
- [10] 邵爱明.2011年奉贤区四团镇主要作物投肥调查[J].安徽农学通报,2012,18(4):112-113.
- [11] 吕家珑,张一平,王旭东,等.长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J].应用生态学报,2001,12(4):569-572.
- [12] 尹岩,梁成华,杜立宇,等.有机肥对稻田土壤磷素潜在环境风险的影响[J].中国土壤与肥料,2013(2):11-16.
- [13] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2008,41(10):3133-3139.
- [14] 周卫军,王凯荣,张光远,等.有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2002,35(9):1109-1113.
- [15] 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,1999.
- [16] 邹长明,秦道珠,徐明岗,等.水稻的氮磷钾养分吸收特性及其与产量的关系[J].南京农业大学学报,2002,25(4):6-10.
- [17] 李勇.氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究[D].南京:南京农业大学,2011.
- [18] 王伟妮,鲁剑巍,何予卿,等.氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J].中国水稻科学,2011,25(6):645-653.
- [19] 吕真真,吴向东,侯红乾,等.有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):904-913.
- [20] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2003, 66(2):165-180.
- [21] 袁丽敏,吴息正,程雅梅.提高水稻肥料利用率的试验研究[J].安徽农学通报,2013,19(7):108,114.
- [22] 蔡德龙.中国硅营养研究与硅肥应用[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [23] 梁永超,张永春,马同生.植物的硅素营养[J].土壤学进展,1993,21(3):7-14.
- [24] 曹逼力,徐坤,石健,等.硅对番茄生长及光合作用与蒸腾作用的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):354-360.

(上接第 162 页)

- [19] 张国芹,徐坤,工兴翠,等.硅对生姜叶片水、二氧化碳交换特性的影响[J].应用生态学报,2008,19(8):1702-1707.
- [20] 何念祖,孟赐福.植物营养原理[M].上海:上海科学技术出版社,1985:315-317.