

水生植物堆肥替代部分氮肥提高水稻产量与稻田土壤肥力

陶玥玥^{1,2}, 金梅娟^{1,2}, 汤云龙³, 朱兴连^{1,2}, 陆长婴^{1,2},
王海候^{1,2}, 施林林^{1,2}, 周新伟^{1,2}, 沈明星^{1,2*}

(1. 江苏太湖地区农业科学研究所/苏州市农业科学院, 苏州 215155;

2. 农业部苏州水稻土生态环境重点野外科学观测试验站, 苏州 215155; 3. 扬州大学农学院, 扬州 225009)

摘要:为评价太湖流域水生植物堆肥对水稻产量及稻田土壤肥力效应,在太湖流域典型稻田连续进行4a的田间定位试验,比较在等氮条件下不同比例的水生植物有机堆肥替代处理(有机氮替代率分别为0%、20%、40%、60%、80%和100%)引起的水稻籽粒产量、产量构成因子、氮磷钾吸收量以及土壤碳氮含量和pH值变化。结果表明:与单施尿素相比,水生植物有机堆肥与尿素配施利于水稻产量的提高,并随着有机肥替代率增加,水稻产量呈先增后降;当有机肥替代率达40%和60%时产量最高。单施有机肥和单施尿素处理水稻籽粒产量相当。单施有机肥显著降低了有效穗数,有机肥和尿素配合施用则可减轻甚至消除这一效应;有机肥替代率在40%和60%时,有效穗数、穗粒数和结实率均较高。随着有机肥施用量增加,水稻秸秆氮浓度降低,籽粒氮浓度无影响;水稻磷浓度和吸收量均无显著差异;有机肥与尿素配施均显著提高了秸秆钾吸收量,有机肥替代率在80%时可显著提高籽粒钾吸收量。表层土壤全氮和有机碳含量及土壤pH值均与有机肥替代率呈显著正相关关系。有机肥-尿素配施处理下土壤全氮和有机碳均较4a前显著提高。有机肥替代率为80%和100%,土壤pH值较试验前土壤分别显著升高。由此可见,水生植物有机肥与尿素配施可以提高太湖稻作区水稻产量,增加土壤有机质含量和减缓土壤酸化程度,可作为太湖稻作区一项环保型施肥技术。

关键词:氮;土壤;肥料;太湖地区;水稻产量;养分吸收

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.18.026

中图分类号: S141; S153.6⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-18-0196-07

陶玥玥, 金梅娟, 汤云龙, 朱兴连, 陆长婴, 王海候, 施林林, 周新伟, 沈明星. 水生植物堆肥替代部分氮肥提高水稻产量与稻田土壤肥力[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 196-202. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.18.026
<http://www.tcsae.org>

Tao Yueyue, Jin Meijuan, Tang Yunlong, Zhu Xinglian, Lu Changying, Wang Haihou, Shi Linlin, Zhou Xinwei, Shen Mingxing. Partial nitrogen fertilizer substitution by aquatic plant compost to improve rice yield and paddy soil fertility[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 196-202. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.18.026
<http://www.tcsae.org>

0 引言

太湖稻作区是中国水稻高产稳产地区之一,同时也是氮肥施用量较高地区。据调查,太湖流域水稻季平均施氮量为352 kg/hm²,过量施氮(360~450 kg/hm²)和极端过量施氮(超过450 kg/hm²)占39.9%^[1-2]。施用化肥是保证水稻产量的主要途径,化肥氮对粮食增产的贡献达到30%~50%^[3]。然而过量施用化学氮肥不仅浪费资源,还是引起大气氮沉降和土壤酸化的重要因素之一^[4-5]。太湖稻作区持续过量的化学氮肥施用造成该地区肥效过低、地下水污染和地表水富营养化等,导致一系列的生态、经济和社会问题。在农业生产中减少化肥施用对农业土壤可持续发展及生态环境的保护具有重要意义。农业部在《全国农业可持续发展规划(2015-2030年)》中明确提出了“十三五”规划内化肥施用量零增长的目标。

配合施用有机肥利于作物氮肥利用率的提高,是化学氮肥减量技术之一。有机肥施用对水稻生长特征、产量形成和养分吸收等前人已做了大量研究,基本明确了有机无机肥配施结合了化肥速效性和有机肥持久性的优点,有利于作物氮肥利用率的提高;在保持作物稳产、增产的同时,还能明显改善土壤生产力^[6-7]。已有研究主要集中于以畜禽粪便类有机肥为研究对象,而碳氮型完全不同的植物物料有机肥研究鲜有报道。此外,在太湖流域水体净化技术集成体系中,水生植物原位净化技术具有经济、简便和景观等优势,取得了明显生态-经济-环境效益,已成为具有前景的富营养化水体养分有效拦截与净化技术之一^[8]。但是,水生植物残体含有丰富氮磷钾养分,若后期处理不当易造成二次污染^[9]。采用高温好氧堆肥的方法,可回收利用水体净化植物残体养分^[9],减少农田化学氮肥施用。然而,有关水生植物有机肥对水稻籽粒产量与土壤养分的影响尚不明确。

收稿日期: 2017-04-07 修订日期: 2017-08-07

基金项目: 国家重点研发计划子课题任务(2016YFD0300207-03); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(16)-1003-11); 江苏省自然科学基金(BK20170325)

作者简介: 陶玥玥,江苏大丰人,江苏太湖地区农业科学研究所助理研究员,博士,主要从事生态农业与水稻营养生理方面的研究。

Email: twhhlyy@163.com

*通信作者: 沈明星,江苏苏州人,江苏太湖地区农业科学研究所研究员,主要从事循环农业方面的研究。Email: smxwjw@163.com

本文主要以水生植物堆制有机肥为研究对象, 在太湖稻作区实施了 4 a 田间定位试验, 解析水生植物有机肥与尿素的不同配比比例对水稻产量形成、养分利用和土壤性质的影响。为减少太湖稻作区化学肥料施用, 强化太湖流域水体净化植物循环利用技术, 促进农田-水体生态系统养分高效循环, 提供必要的理论依据; 对太湖地区提升农田生产力也具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于 2012-2015 年在江苏省苏州市望亭镇顶路村农业示范园内 (31°25'N, 120°26'E) 进行, 试验地点位于长江三角洲太湖平原, 属于北亚热带季风气候区, 年降水量约 1 100 mm, 年平均温度约 15.7 °C, 年日照时数在 2 000 h 以上, 年无霜期在 230 d 以上, 种植制度为水稻、小麦复种轮作。供试土壤为黄泥土, 试验前土壤基础理化性质请见表 1。

表 1 试验地点土壤基本性质 (2012, 0~20 cm)

Table 1 Basal properties of experimental site (2012, 0-20 cm)

结果 Results	土壤有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	速效磷 Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾 Available-K/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值 pH value
平均值 Average	30.6	1.76	6.43	84.8	6.27
标准误差 S.E.	0.75	0.01	0.30	0.33	0.02

1.2 试验设计

按有机肥 (简称为“M”) 和尿素 (简称为“U”) 配比比例, 田间试验共设 6 个处理, 稻季总施氮 (N) 量均为 270 kg/hm²。按施入纯氮量计算, 有机肥替代率分别为 0、20%、40%、60%、80% 和 100%, 每个处理 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积为 21 m² (7 m×3 m), 各小区以埂隔开, 用农膜包埂。

供试水稻品种为当地常规品种“苏 1331” (2012—2014 年) 和“武运粳 23” (2015 年), 根据当年气象条件一般在 4 月底至 5 月初育秧, 在 4.5~5 叶龄时移栽, 移栽规格为 14.0 cm×30.0 cm, 水稻大田生育期为 6 月中下旬至 11 月上旬。水生植物有机肥采用项目组自行堆制的伊乐藻有机肥, 将脱水伊乐藻渣与含水率约 20% 的粉碎水稻秸秆 (长度约 3 cm) 按质量比 4:1 混匀后, 经高温好氧发酵堆制 50 d, 发酵过程中最高温度达 65 °C, 并且 50 °C 以上高温持续约 21 d, 符合无害化要求。根据常规农化分析方法, 2012—2015 年试验用水生植物有机肥的氮、磷、钾和有机质质量分数分别为 (23.3±0.9)、(9.5±0.5)、(31.4±2.7) 和 (253±18) g/kg。水生植物有机肥作基肥一次性施用。化学氮肥采用尿素, 在水稻生育期分 3 次施用, 50% 作基肥, 25% 作分蘖肥, 25% 作穗肥。单施尿素处理, 磷钾肥施用方法如下: 磷肥为过磷酸钙, 施用量 P₂O₅ 6 kg/hm², 均作基肥; 钾肥为氯化钾, 施用量 K₂O 150 kg/hm², 其中 50% 为基肥, 50% 为穗肥。施用有机肥处理, 不再施用化学磷肥与钾肥。各试验处理 2012—2015 年平均肥料施入量详见表 2。试验期

间均在水稻在分蘖末期至幼穗分化始期进行搁田, 视水稻生长情况搁田期约持续半个月, 基本在 7 月 29 日至 8 月 17 日, 其余时期保持浅水层约 3 cm, 至收割前 10 d 停止灌水。病虫草害防治等其他田间管理措施均相同。

表 2 各试验处理下每年稻季平均养分投入量 (2012—2015)

Table 2 Annual nutrient input of rice growing season with different treatment (2012—2015)

处理 Treatment	养分 Nutrient					
	氮 N/(kg·hm ⁻²)		磷 P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)		钾 K ₂ O/(kg·hm ⁻²)	
	化肥 Mineral fertilizer	有机肥 Organic fertilizer	化肥 Mineral fertilizer	有机肥 Organic fertilizer	化肥 Mineral fertilizer	有机肥 Organic fertilizer
M0U100	270	0	60	0	150	0
M20U80	216	54	0	11	0	36
M40U60	162	108	0	22	0	73
M60U40	108	162	0	33	0	109
M80U20	54	216	0	44	0	146
M100U0	0	270	0	55	0	182

注: M-有机肥, U-尿素, 数字表示相应施氮量占总施氮量百分比。

Note: M-aquatic plant compost, U-urea, the number indicates the percentage of corresponding fertilizer accounted for the total N.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒产量与产量构成因子测定

在水稻成熟期, 各小区随机调查 50 穴植株的穗数, 根据调查的平均穗数取代表性植株 10 穴用于测定水稻产量构成因子, 随后各小区收获 3 个 2 m² 用于测定水稻籽粒产量。将水稻植株样品分成秸秆和籽粒, 调查每平方米有效穗数 (productive tiller, PT), 四分法选取 100 g 籽粒风干样品用于测定穗粒数 (spikelets per panicle, SP), 用水漂法^[10]区分饱粒 (沉入水底者) 和空瘪粒, 计算穗实粒数 (grains per panicle, GP)、结实率 (percentage of filled grains, PFG, 穗实粒数/穗粒数×100%) 和千粒质量 (thousand grain weight, TGW)。

1.3.2 植株养分含量测定

将成熟期植株样品按秸秆和籽粒分开, 105 °C 下杀青 20 min 后继续在 75 °C 烘至恒定质量, 分别测定籽粒和秸秆干物质质量; 植株样品经粉碎机 (FZ102, 天津泰斯特) 粉碎后, 过 60 目筛用于测定植株氮、磷和钾含量。植株养分分析方法: H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 采用凯氏定氮法测定氮素含量, 采用钼锑抗比色法测定磷含量^[11], 用火焰光度计法测定钾含量, 并分别计算植株籽粒和秸秆氮、磷和钾的累积量。

1.3.3 土壤样品采集与测定

试验开始前 (2012 年 5 月) 和 4 a 试验后 (2015 年 11 月) 采集 0~20 cm 深度土壤, 各小区均按照“S”形采取 5 个点作 1 个混合样品。带回实验室后, 自然风干后粉碎分别过 20 目和 100 目筛, 根据常规农化分析方法测定土壤理化性质。土壤有机碳采用铬酸氧化法, 土壤全氮采用 H₂SO₄+混合催化剂消解-凯氏定氮法, 有效磷用 0.5mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑比色法^[11], 速效钾采用 1.0mol/L NH₄OAc 浸提-火焰光度计法, 土壤和去离子水按 1:2.5 浸提后, 用 pH 计测定土壤 pH 值。

1.3.4 数据处理与统计分析

用 Excel 2010 进行数据处理, 用 SAS 9.2^[12]的 GLM 过程进行完全随机方差分析。双因素方差分析模型包括年份 (Year)、施肥 (Fertilization.) 以及年份×施肥的交互作用。用最小二乘法 (LSD) 在 0.05 水平下进行显著性检验。采用 Origin 8.0 软件进行作图。

根据下列公式计算植株地上部养分吸收量与养分收获指数等指标:

$$\text{吸氮量 } (N_{\text{upt}}, \text{ kg/hm}^2) = \text{氮含量 } (N_{\text{con}}, \text{ g/kg}) \times \text{干物质量 } (\text{kg/hm}^2) / 1000$$

$$\text{吸磷量 } (P_{\text{upt}}, \text{ kg/hm}^2) = \text{磷含量 } (P_{\text{con}}, \text{ g/kg}) \times \text{干物质量 } (\text{kg/hm}^2) / 1000$$

$$\text{吸钾量 } (K_{\text{upt}}, \text{ kg/hm}^2) = \text{钾含量 } (K_{\text{con}}, \text{ g/kg}) \times \text{干物质量 } (\text{kg/hm}^2) / 1000$$

$$\text{氮素收获指数 (NHI, \%)} = \text{成熟期籽粒中氮积累量} / \text{成熟期地上部总氮积累量} \times 100\%$$

$$\text{磷素收获指数 (PHI, \%)} = \text{成熟期籽粒中磷积累量} / \text{成熟期地上部总磷积累量} \times 100\%$$

$$\text{钾素收获指数 (KHI, \%)} = \text{成熟期籽粒中钾积累量} / \text{成熟期地上部总钾积累量} \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 有机肥替代率对水稻籽粒产量与产量构成的影响

由表 3 可以看出, 年份和氮肥均显著影响水稻产量, 并且年度间氮肥施用存在显著交互作用。等氮条件下, 与单施化肥 (M0U100) 相比, 2012 年有机肥配施处理水稻产量无显著差异, 但单施有机肥 (M100U0) 显著降低了水稻产量。2013—2015 年, 随着有机肥配施比例的增加, 水稻产量呈先增后降的趋势; 当有机肥替代率在 40% (M40U60) 和 60% (M60U40) 时, 水稻产量达到最高; 但 2015 年处理间差异均不显著。从水稻 4 a 平均产量来看, 当有机肥替代率在 40% (M40U60) 和 60% (M60U40) 时, 水稻籽粒产量达到最高值, 比单施化肥处理分别显著增加了 14.4% 和 11.3% ($P < 0.05$)。图 1 也表明, 水稻 4 a 累积产量与有机肥施用比例呈显著的一元二次曲线关系 ($P < 0.01$); 与单施化肥相比, 随着有机肥配施比例增加, 施用有机肥的增产效应先增后降。

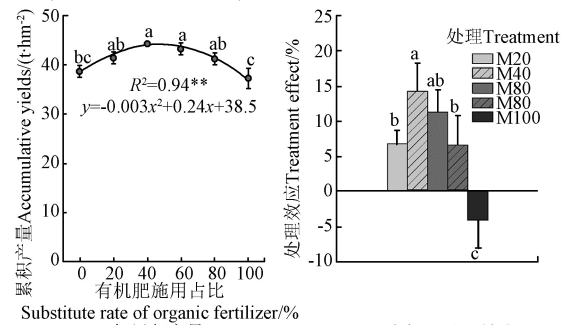
从表 4 可以看出, 有机肥与尿素不同配施比例下水稻产量构成因子也表现出一定的差异。四年试验期间, 有机肥替代率高于 80% 时显著降低了有效穗数, 2012 年

有机肥替代率为 80% (M80U20) 和 100% (M100U0) 时, 有效穗数比单施化肥分别显著降低了 10.4% 和 11.2% ($P < 0.05$)。4 a 试验期间其它配施处理与单施化肥处理有效穗数均无显著差异。有机肥与尿素配合施用一定程度上利于穗粒数的提高。总体而言, 结实率随着有机肥替代率升高呈增加趋势, 有机肥替代率在 80% (2015 年) 和 100% 时结实率显著高于单施化肥, 千粒质量显著高于单施化肥处理 (2014—2015 年)。

表 3 有机肥和尿素不同配施比例下水稻籽粒产量 (2012—2015)
Table 3 Rice grain yield as affected by different combination of organic fertilizer with mineral urea (2012-2015)

处理 Treatment	2012 年产量	2013 年产量	2014 年产量	2015 年产量	平均产量 Average yields/ (t·hm ⁻²)
	Yields in 2012/ (t·hm ⁻²)	Yields in 2013/ (t·hm ⁻²)	Yields in 2014/ (t·hm ⁻²)	Yields in 2015/ (t·hm ⁻²)	
M0U100	8.4 a	9.8 b	10.0 ab	10.5 a	9.7 b
M20U80	8.6 a	10.4 b	10.7 a	11.6 a	10.4 ab
M40U60	8.5 a	13.2 a	10.9 a	11.8 a	11.1 a
M60U40	8.5 a	12.3 a	10.7 a	11.7 a	10.8 a
M80U20	8.2 a	12.6 a	10.4 ab	10.1 a	10.3 ab
M100U0	7.1 b	10.9 b	9.2 b	10.2 a	9.3 b
双因素方差分析		年份 Yr	70.06***		
Two-factor ANOVA, F		施肥 Fert.	9.72***		
value		Yr × Fert.	2.59*		

注: 不同小写字母表示处理间差异显著; $P < 0.05$ 。双因素方差分析, ***表示方差分析达到 $P < 0.001$ 水平, *表示方差分析达到 $P < 0.05$ 显著水平。
Note: Different lowercase numbers indicate significant difference between treatment; $P < 0.05$. $P < 0.001$: ***, $P < 0.05$: *.



a. 4年累积产量 b. 有机肥处理效应
a. 4 a Accumulative yields of 4 years b. Effect of organic fertilizer treatment

注: 不同小写字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$; M20、M40、M60、M80、M100 分别代表有机肥替代率为 20%、40%、60%、80%、100%。**表示方差分析达到 $P < 0.01$ 水平。

Note: Different lowercase number indicate significant difference between treatment, $P < 0.05$. M20, M40, M60, M80, M100 represent organic fertilizer replacement rate 20%, 40%, 60%, 80, 100%. $P < 0.01$: **.

图 1 2012—2015 年水稻累积产量与有机肥替代率的相关性和与单施化肥相比有机肥配施效应

Fig.1 Correlation of accumulative yield of rice from 2012 to 2015 with substitute rate of organic fertilizer and Effect of applying different amount of organic fertilizer compared to applying urea alone

表 4 有机肥与尿素不同配施比例下水稻产量构成因子 (2012-2015)

Table 4 Yield components as influenced by different combination of organic fertilizer with mineral urea (2012-2015)

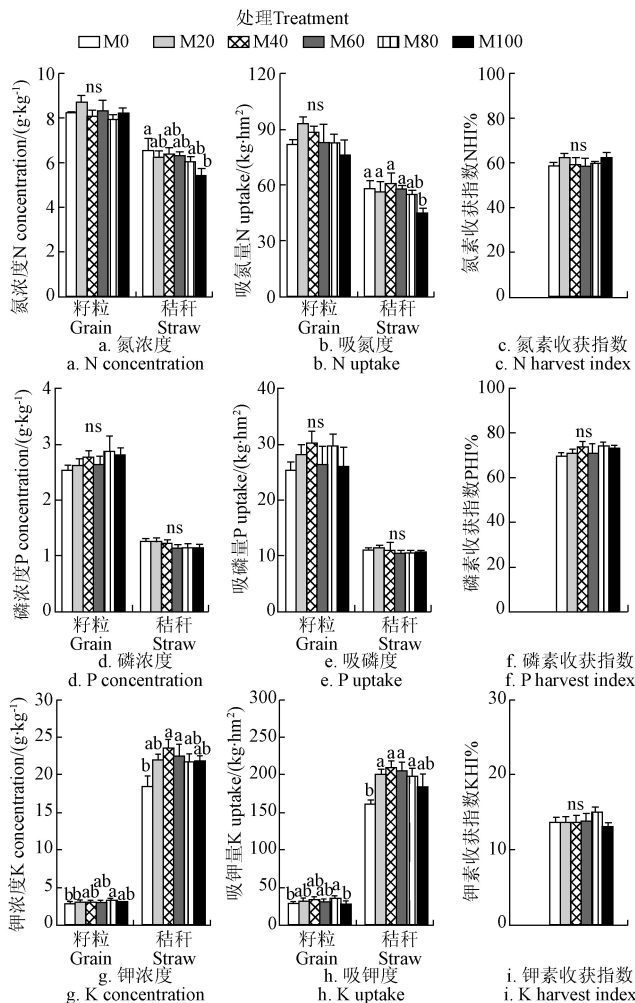
处理 Treatment	有效穗数 PT/(m ²)				穗粒数 SP/(panicle ⁻¹)				结实率 PFG/%				千粒质量 TGW/g			
	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
M0U100	405 a	520 ab	398 ab	368 a	95 ab	69 b	104 b	121 a	90.8 b	90.5b	95.7 a	81.8 c	26.8 a	28.4 a	26.2 c	28.0 c
M20U80	381 ab	589 a	417 a	369 a	103 a	84 ab	104 b	125 a	89.4 b	91.8 b	95.3 a	81.0 c	26.8 a	25.7 a	26.5 c	28.1 c
M40U60	389 ab	591 a	404 a	354 ab	103 a	87 ab	127 a	118 a	91.1 b	94.0 ab	94.6 a	84.8 bc	25.9 a	27.2 a	26.5 c	28.2 c
M60U40	385 ab	542 a	382 ab	353 ab	103 a	90 ab	114 ab	124 a	92.5 b	93.6 ab	94.9 a	89.1 abc	26.3 a	27.6 a	27.2 b	28.6 bc
M80U20	363 b	563 a	383 ab	333 b	103 a	96 a	97 b	110 a	94.6 ab	95.0 ab	96.8 a	92.0 ab	26.9 a	28.0 a	27.5 b	28.9 ab
M100U0	360 b	507 b	361 b	291 c	89 b	93 ab	102 b	110 a	97.2 a	98.2 a	97.3 a	96.1 a	27.0 a	28.1 a	28.2 a	29.3 a

注: 不同小写字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$ 。

Note: Different lowercase number indicate significant difference between treatment; $P < 0.05$.

2.2 有机肥替代率对成熟期水稻养分吸收的影响

各处理下成熟期籽粒氮浓度均无显著差异，但单施有机肥下秸秆氮浓度显著低于单施化肥；氮素吸收量与氮浓度表现一致；氮素收获指数无显著差异(图 3 a, b, c)。水稻对磷素吸收处理间差异不显著(图 3d, e, f)。与单施化肥相比，有机肥替代率在 80%下籽粒钾浓度和钾吸收量显著高于对照；有机肥替代率在 40%和 60%时秸秆中钾浓度显著高于对照，并有有机肥与尿素配施均显著提高秸秆钾吸收量；钾收获指数无显著差异(图 3 g, h, i)。



注：不同小写字母表示处理间差异显著； $P < 0.05$ 。ns 表示处理间差异不显著。
Note: Different lowercase number indicate significant difference between treatment; $P < 0.05$. ns indicates no significant difference between treatment.

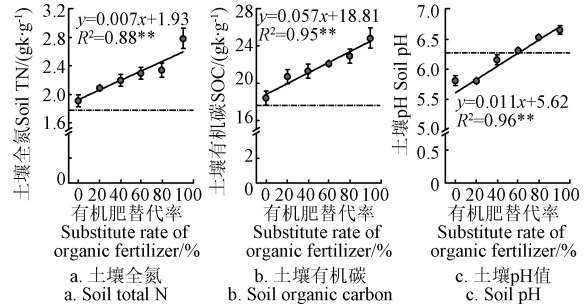
图 3 有机肥不同替代率下水稻籽粒和秸秆氮磷钾浓度、吸收量和养分收获指数(2014)

Fig.3 NPK concentration and uptake in rice grain and straw and harvest index with different organic fertilizer substitute rate (2014)

2.3 有机肥替代率对水稻土壤养分的影响

土壤有机质是维持土壤肥力的重要基础物质。连续 4a 不同比例有机肥配施下，土壤表层全氮含量、有机碳含量和土壤 pH 值均与有机肥的替代率呈显著正相关关系($P < 0.05$)，随着有机肥替代率增加而增加(图 4)。与试验前土壤基础性质相比，有机肥替代率高于 60%时，土壤 pH 值基本不变或升高，有机肥替代率低于 60%时，土壤 pH 值明显降低(图 4c)。各处理下表层土壤全氮含量和有机碳含量均较原始土壤升高(图 4a, b)。与单施

化肥相比，配合施用水生植物有机肥利于提高土壤有机质含量，同时减缓土壤酸化程度，培肥地力。有机肥与尿素配施处理下土壤全氮较 4 a 前显著提高了 18.3%~57.9%；有机碳较 4 a 前显著提高了 14.9%~29.8%，增幅显著高于单施化肥。有机肥替代率为 80%和 100%，土壤 pH 值较试验前土壤分别显著升高了 4.3%和 6.2%。



注：图中虚线表示土壤背景值；***表示达到 $P < 0.001$ 水平；**表示达到 $P < 0.01$ 水平。

Note: Dotted line indicates initial value of soil properties; $P < 0.001$: ***, $P < 0.01$: *

图 4 有机肥不同替代率下土壤全氮、有机碳含量和土壤 pH 值(2015, 0~20 cm)

Fig.4 Concentration of soil total nitrogen, soil organic carbon and pH value as affected with different organic fertilizer substitute rate (2015, 0-20 cm)

3 讨论

3.1 水生植物有机肥对水稻产量形成与养分吸收的影响

大量研究已表明，在肥力较低的土壤上，单一施无机肥可为作物生长快速提供必需的矿质养分，而有机肥中养分主要以缓效态存在，速效养分释放速率慢，难以及时满足作物生长，从而导致试验前期水稻产量低于单施化肥处理^[13-14]。然而，在本研究中，试验第 1 年，与单施化肥相比，配施有机肥对水稻产量无显著影响；仅当有机肥替代率 100%时产量显著降低(表 1)。这主要归因于试验地区土壤条件，试验点土壤属于典型潜育性水稻土，土壤肥沃，质地偏黏，具有较高的土壤肥力^[15]。同时太湖地区水稻种植夏季，温度与湿度均较高利于土壤和有机肥养分释放。从 4 a 累积产量来看，有机肥替代率在 40%和 60%时显著提高了水稻产量，分别增产 14.4%和 11.3%(图 1)，其余处理与单施化肥处理差异不显著。

从产量构成要素角度考虑，水稻产量构成因子包括有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量^[16]，它们形成和决定于水稻生长周期的不同生育阶段^[17]。总体上，本研究有机肥替代率在 20%~60%下有效穗数与单施尿素处理并无显著差异，说明该有机肥配施处理在前期的氮素供应能力基本能满足水稻分蘖期氮素需求。同时，2014-2015 年，有机肥替代率在 40%和 60%一定程度上促进了穗粒数和结实率的增加(表 2)，而穗粒数和结实率主要由水稻生殖生长期的营养状况决定^[18-19]。因此，该有机肥配施比例下，肥料中矿质养分和有机养分的释放既满足了水稻前期生长需求，又具有养分持久释放的能力，从而协调了产量构成因子和促进了水稻籽粒产量提升^[20]。然而，有机肥替代率为 100%时，4 a 研究期间有效穗数均显著最低，说明水稻植株生长前期氮素需求

收到胁迫进而限制产量的提升,这与前人研究关于畜禽粪便类有机肥表现结果基本一致^[20-22]。

此外,本研究也表明施用水生植物有机肥不仅降低了农田化学氮肥施用量,还减少了化学磷肥和钾肥施用。有机肥处理虽未施用磷钾化学肥料,但其水稻磷浓度以及吸收量与单施化肥差异不显著(图 3d, e),且有机肥配施处理秸秆钾吸收量显著高于单施尿素处理(图 3h)。一方面,本研究中水生植物有机肥中钾质量分数相对较高(表 2),另一方面,也可能由于有机肥的施入能增加土壤微生物活性,在水稻生育前期对养分的需求量不大的情况下,使得更多的养分被固持,而随作物生长的进行,被固持养分在中后期大量被释放,从而提高后期养分转运量。

3.2 水生植物有机肥对土壤碳氮及 pH 值的影响

农田土壤退化是全球农业面临的严峻问题,合理增施有机肥是提高土壤质量的一条重要措施^[23-24]。粮食产量的增加与土壤有机质关系十分密切^[25-27]。一般认为,长期配施有机肥,可以促进土壤有机碳快速积累^[28]。徐明岗等^[29]研究表明,化肥-猪粪有机肥配施和单施猪粪有机肥条件下,土壤有机质含量较 5 a 前分别显著提高了 18.5%和 37.1%,增加幅度显著高于单施化肥处理(6.5%)。本试验中,针对水生植物有机肥,结果同样表明,单施化肥处理土壤有机碳含量较 4 a 前显著提高了 4.1%,而有机肥-尿素配施处理显著提高了 14.9%~29.8%,单施有机肥处理显著增幅为 40.8%(图 4)。有机肥-尿素配施处理土壤全氮较 4 a 前显著提高了 18.3%~32.4%,显著高于单施化肥处理(7.9%)。长期大量施用化肥还会出现土壤中某些大量元素(如镁、锌等)和微量元素缺乏,不利于土壤碳氮库的平衡而影响作物-土壤系统生产力^[30]。

长期大量施用化肥也是造成农田土壤酸化的重要原因之一^[4-5],本研究中发现,随着有机肥配施量的增加,土壤 pH 值提高,其中当有机肥替代率为 0 和 20%时,土壤 pH 值较 4 a 前显著降低了 0.5 个单位,当有机肥替代率在 40%~60%时,土壤 pH 值较 4 a 前基本维持不变,当有机肥替代率在 80%~100%时,土壤 pH 值较 4 a 前显著上升 0.3~0.4 个单位(图 4c)。因此,配施一定比例的水生植物有机肥不仅能有效增加土壤有机质含量,还可缓解土壤酸化,从而在增强土壤功能和持续增产等方面发挥重要作用。

综合本试验结果,目前在太湖稻作区,利用水生植物堆制的有机肥不仅可减少化学肥料施用,还可促进水稻产量提升和土壤肥力维持,不失为一种资源节约和环境友好的施肥技术。然而,因受经济及劳动成本限制,目前不易大规模推广,相信随着未来农业集约化程度提高,以及农业资源废弃物的利用技术不断更新,水生植物有机肥的产业化应用有较大潜力成为太湖稻区有机肥利用的重要方向之一。

4 结 论

1) 随着有机肥配施比例增加,水稻产量呈现先增后

降;当有机氮肥代率在 40%和 60%时,水稻产量较单施化肥分别显著增产 14.4%和 11.3%。随着有机肥配施比例增加,水稻秸秆氮浓度降低,籽粒氮浓度却无影响;有机肥与尿素配施均显著提高了秸秆钾吸收量,同时有机肥替代率在 80%时可显著提高籽粒钾吸收量。

2) 土壤表层全氮和有机碳含量以及土壤 pH 值均与有机肥的替代率呈显著正相关关系。有机肥与尿素配施处理下土壤全氮较 4 a 前显著提高了 18.3%~57.9%;有机碳较 4 a 前显著提高了 14.9%~29.8%,增幅显著高于单施化肥。有机肥替代率为 80%和 100%,土壤 pH 值较试验前土壤分别显著升高了 4.3%和 6.2%。

[参 考 文 献]

- [1] Hofmeier M, Roelcke M, Han Y, et al. Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu Region: Recommendations based on field experiments and surveys[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209: 60-73.
- [2] 王海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. *农业环境与发展*, 2009(3): 10-15.
Wang Hai, Xi Yun'guan, Chen Ruibing, et al. Investigation of overuse of fertilizer and pesticide in Tai Lake region[J]. *Agro-Environment and Development*, 2009(3): 10-15. (in Chinese with English abstract)
- [3] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636-639.
- [4] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [6] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783-795.
Ju Xiaotang, Gu Baojin. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795. (in Chinese with English abstract)
- [7] Naguib N Y M. Organic vs chemical fertilization of medicinal plants: A concise review of researches[J]. *Advances in Environmental Biology*, 2011, 5(2): 394-400.
- [8] 周新伟, 沈明星, 金梅娟, 等. 不同水葫芦覆盖度对富营养水体氮、磷的去除效果[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(1): 97-105.
Zhou Xinwei, Shen Mingxin, Jin Meijuan, et al. Effect of water hyacinth coverages on the removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water bodies[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2016, 32(1): 97-105. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王海候, 金梅娟, 徐军, 等. 生物质炭添加量对伊乐藻堆肥过程氮素损失的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 234-240.
Wang Haihou, Jin Meijun, Xu Jun, et al. Effect of biochar addition amount on nitrogen loss during composting process of *Elodea Nuttallii*[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 234—240. (in Chinese with English abstract)
- [10] Peng S, Huang J, Sheehy J, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(27): 9971—9975.
- [11] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F E, et al. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate[Z]. United States Department of Agriculture, 1954.
- [12] Publishing SAS. SAS/STAT 9.2 User's Guide[Z]. 2010.
- [13] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 106—112. Liu Shoulong, Tong chengli, Wu Jinshui, et al. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same N condition [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 106—112. (in Chinese with English abstract)
- [14] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516—523. Hou Hongqian, Liu Xiumei, Liu Guangrong et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in soil area of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 516—523.
- [15] Shi L L, Shen M X, Lu C Y, et al. Soil phosphorus dynamic, balance and critical p values in long term fertilization experiment in Tai lake region, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(12): 2446—2455.
- [16] Yang J, Zhang J. Crop management techniques to enhance harvest index in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(12): 3177—3189.
- [17] Fageria N. Yield physiology of rice[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(6): 843—879.
- [18] Kropff M J, Casman K G, Peng S, et al. Quantitative understanding of yield potential[J]. Breaking the Yield Barrier, 1994, 12: 21—38.
- [19] Kamiji Y, Yoshida H, Palta J, et al. N applications that increase plant N during panicle development are highly effective in increasing spikelet number in rice[J]. Field Crops Research, 2011, 123(3): 242—247.
- [20] Tao Y, Qu H, Li Q, et al. Potential to improve N uptake and grain yield in water saving ground cover rice production system[J]. Field Crops Research, 2014, 168(2): 101—108.
- [21] 汪吉东, 张辉, 张永春, 等. 连续施用不同比例鸡粪氮对水稻土有机质积累及土壤酸化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014(5): 1178—1185. Wang Jidong, Zhang Hui, Zhang Yongchun, et al. Effect of different ratios of chicken manure N on organic matter accumulation and acidification of paddy soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1178—1185. (in Chinese with English abstract)
- [22] 何欣, 荣湘民, 谢勇, 等. 化肥减量与有机肥替代对水稻产量与养分利用率的影响[J]. 湖南农业科学, 2017(3): 31—34. He Xin, Rong Xiangmin, Xie Yong, et al. Effects of fertilization reduction and organic fertilizer replacement on rice yield and nutrient utilization[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017(3): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [23] Lehmann J, Kinyangi J, Solomon D. Organic matter stabilization in soil micro-aggregates: Implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(1): 45—57.
- [24] 陈利军, 孙波, 金辰, 等. 等碳投入的有机肥和生物炭对红壤微生物多样性和土壤呼吸的影响[J]. 土壤, 2015, 47(2): 340—348. Chen Lijun, Sun Bo, Jin Chen, et al. Effect of organic manure and biochar with equal amount of carbon input on microbial diversity and respiration of red soil[J]. Soils, 2015, 47(2): 340—348. (in Chinese with English abstract)
- [25] 韩秉进, 陈渊, 乔云发, 等. 连年施用有机肥对土壤理化性状的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(4): 294—296. Han Bingjin, Chen Yuan, Qiao Yunfa, et al. Effect of long term application organic fertilizer on soil physiochemical properties[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2004, 20(4): 294—296. (in Chinese with English abstract)
- [26] 孟凡乔, 吴文良, 辛德惠. 高产农田土壤有机质、养分的变化规律与作物产量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 370—374. Meng Fanqiao, Wu Wenliang, Xin Dehui. Changes of soil organic matter and nutrients and their relationship with crop yield in high yield farmland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 370—374. (in Chinese with English abstract)
- [27] 宁川川, 王建设, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175—181. Ning Chuanchuan, Wang Jianwu, Cai Kunzheng. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. Ecology and Environment Sciences, 2016, 25(1): 175—181. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王旭东, 张一平, 吕家珑, 等. 不同施肥条件对土壤有机质及胡敏酸特性的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 75—81. Wang Xudong, Zhang Yiping, Lv Jialong, et al. Effect of long term different fertilization on properties of soil organic matter and humic acids[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 75—81. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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. Xu Minggang, Li Dongchu, Li Jumei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3133—3139. (in Chinese with English abstract)
- [30] Kaur T, Brar B S, Dhillon N S. Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize-wheat cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81(1): 59—69.

Partial nitrogen fertilizer substitution by aquatic plant compost to improve rice yield and paddy soil fertility

Tao Yueyue^{1,2}, Jin Meijuan^{1,2}, Tang Yunlong³, Zhu Xinglian^{1,2}, Lu Changying^{1,2},
Wang Haihou^{1,2}, Shi Linlin^{1,2}, Zhou Xinwei^{1,2}, Shen Mingxing^{1,2*}

(Institute of Agricultural Sciences in Taihu Lake District/Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China;

2. Key Scientific Observation & Experiment Station Paddy Field Eco-environment, Suzhou, Ministry of Agriculture, Suzhou 215155, China;

3. Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of organic fertilizer based on aquatic plant composting on the rice yield and paddy soil properties, a four-year field experiment was carried out in the typical paddy field of the Tai Lake region. The four-year field experiment was composed of different combinations of organic nitrogen substitute of aquatic plant compost and mineral urea, and it included 6 treatments whose proportions of organic nitrogen were 0, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% of total nitrogen amount, respectively; and for all the treatments, the total nitrogen inputs were the same. Grain yield, yield components, the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium in rice straw and grain as well as the concentration of soil organic carbon and soil total nitrogen and pH value in the top soil layer were measured. Our study revealed the following findings: Firstly, compared to mineral urea alone, combined application of both organic fertilizer of aquatic plant composting and mineral urea had a good potential to improve the grain yield of rice, and with the increase of organic fertilizer ratio, rice yield tended to increase first and then afterwards decrease. When the replacement of organic fertilizer was 40% and 60% of total nitrogen, the rice yield reached the highest point. Applying organic fertilizer alone had similar grain yield of rice as the treatment of applying urea alone. Secondly, the number of productive tillers was significantly reduced with sole organic fertilizer, while the phenomenon could be diminished or eliminated by combined application of compost and mineral urea. The parameters including the number of productive tillers, spikelets per panicle and percentage of filled grains were all relatively higher when the organic nitrogen substitutes were at the ratio of 40% and 60% of total nitrogen input. Thirdly, with the increase of organic fertilizer application, the nitrogen concentration in straw was decreased, while no pronounced effect was found for the nitrogen concentration in grain. Furthermore, no significant difference was found for the phosphorus uptake in grain or straw among all the treatments. The potassium uptake of straw was significantly improved with the addition of organic fertilizer, and meanwhile the potassium uptake of grain was significantly enhanced when the substitute rate of organic fertilizer was 80% of total nitrogen. Lastly, there was positively significant correlation between the soil total nitrogen, soil organic carbon and pH value, and the amount of organic fertilizer application. With the addition of organic fertilizer, the soil total nitrogen and soil organic carbon were significantly increased compared to that of 4 years ago. When the organic nitrogen was applied at 80% and 100% of total nitrogen, the soil pH value was also significantly higher than that of 4 years ago. In conclusion, the combined use of aquatic plant compost plus with mineral urea is beneficial to improve the grain yield of rice, enhance soil organic matter as well as decrease the soil acidification, which is a protective and environmental-friendly fertilization technology in Tai Lake region.

Keywords: nitrogen; soil; fertilizer; Tai lake region; rice yield; nutrient uptake