

小麦产量与土壤养分对水生植物源有机氮替代率的响应*

陶玥玥 王海候 金梅娟 施林林 董林林 陆长婴 沈明星[†]

(江苏太湖地区农业科学研究所/农业部苏州水稻土生态环境重点野外科学观测试验站, 江苏苏州 215155)

摘要 制作堆肥是太湖流域水体水生植物残体的主要利用途径之一, 本文主要研究了水生植物堆肥对小麦产量及土壤养分的影响以促进水生植物残体的高效利用。在环太湖地区进行 4 a 的田间定位试验, 比较在等氮条件下水生植物有机氮不同替代率 (0、20%、40%、60%、80%和 100%) 下小麦产量、氮磷钾吸收量、土壤氮磷钾含量和 pH 变化。结果表明: 与单施尿素相比, 当有机氮替代率为 20%和 40%时, 小麦累积产量分别提高了 14.0%和 13.5% ($P<0.05$), 有机氮替代率继续增加后产量显著下降。与单施尿素相比, 有机氮替代率超过 60%时小麦籽粒和秸秆氮浓度和吸氮量均显著降低; 有机氮配施均显著提高了籽粒磷钾浓度, 随着有机氮替代率上升, 小麦籽粒磷钾吸收量呈先增后降趋势。连续 4 a 施用水生植物有机肥后, 耕层土壤全氮、有效磷钾含量和土壤 pH 均随有机肥的替代率增加而升高。兼顾小麦产量和土壤肥力, 水生植物有机氮替代率控制在 40%较为适宜, 可提高小麦产量, 增加作物对磷钾养分利用, 提高土壤氮磷钾含量, 减缓土壤酸化程度, 是太湖农作区一项环保型施肥技术。

关键词 水生植物有机肥; 小麦产量; 养分吸收; 土壤养分; 土壤 pH

中图分类号 S141; S153.6⁺²

文献标识码 A

环太湖地区是我国重要的稻麦轮作区, 长期以来持续过量化学氮肥施用不仅造成该地区氮肥肥效过低, 也带来严重的环境污染问题, 如地下水硝酸盐污染、地表水富营养化和土壤酸化等^[1-3]。有研究表明: 麦季不同深度地下水硝态氮浓度远高于稻季^[2]。麦季过量施用氮肥已越来越多地受到人们的关注^[1,4-5]。如何保证粮食产量合理稳定增长的同时, 减少化肥过量施用带来的不良影响, 具有重要的现实意义^[6]。配施一定数量有机肥不仅降低了化学氮肥施用量, 提高了肥料利用率, 还可增加土壤肥力^[7-9]。Abbasi 和 Tahir^[10]在巴基斯坦的研究发现: 以有机肥代替 25%的氮肥可以保证小麦稳产, 并利于氮素吸收。然而, 有机肥替代化肥对作物和土壤的作用效应因替代比例、作物系统、土壤质地及肥力、气候以及试验年限存在显著的差异^[11]。目前大部分研究针对畜禽粪便源有机肥, 较少针对水生植物源有机肥。

环太湖地区水体及集约化水产养殖产生大量水生植物残体, 若后期处理不当易造成二次污染, 严重影响生态环境。作为水生植物残体无害化的重要途径, 高温堆肥发酵可消除其对环境的污染和生态的破坏, 从而促进生态协调发展^[12-13]。水生植物生长过程中富集了大量植物生长所需营养元素, 也是良好的有机肥源, 其农田施用可形成良好的物质循环利用的生态种养结合模式, 对于实现我国化肥施用量零增长具有重要意义。水生植物堆肥替代部分化学氮肥可优化水稻产量构成, 提高水稻

* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300207)、江苏省自然科学基金项目 (BK20170325) 和苏州市农业科学院科研基金项目 (8111705) 资助 Supported by the National Key R & D Program of China (No. 2016YFD0300207), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province in China (No. BK20170325) and the Foundation of Suzhou Academy of Agricultural Science (No. 8111705)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: smxwwj@163.com

作者简介: 陶玥玥 (1986—), 女, 江苏大丰人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业资源高效利用研究。E-mail: twhhltyy@163.com

收稿日期: 2018-08-13; 收到修改稿日期: 2018-09-05; 优先数字出版日期 (www.cnki.net):

籽粒产量与土壤有机碳含量^[13]。然而,水生植物源有机肥与化肥配施在小麦旱地上的产量效应、养分吸收及土壤养分变化的研究却鲜见报道。基于此,本研究在小麦生长季等氮量条件下,研究了水生植物源有机肥和尿素不同全氮配比对小麦产量和土壤养分指标的影响,以期为环太湖地区小麦种植合理施用水生植物有机肥提供指导。本研究不仅对构建环太湖地区水生植物有机肥施肥模式具有重要理论意义,而且对减少水生植物资源浪费、缓解环境污染潜在风险有一定实际价值。

1 材料与方法

1.1 试验概况与供试材料

试验地位于江苏省苏州市望亭镇项路村(31°25'N, 120°26'E),濒临太湖,属于典型亚热带季风性湿润气候,年平均温度约 15.7℃,年降水量约 1 100 mm,年日照时数在 2 000 h 以上,年无霜期在 230 d 以上。土壤属于太湖地区典型渥育型水稻土,土壤有机质 30.6 g kg⁻¹,全氮 1.76 g kg⁻¹,有效磷 6.43 mg kg⁻¹,速效钾 84.8 mg kg⁻¹,pH 为 6.3。

供试小麦品种为“扬麦 16”。小麦在 11 月人工条播,行距 40 cm,按照 262.5~300 kg hm⁻²播种,次年 5 月底收获。供试化肥为尿素(含 N 46%)、钙镁磷肥(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%)。供试有机肥采用水生植物伊乐藻(*Elodea nuttallii*)渣和水稻(*Oryza sativa*)秸秆,按鲜重 4:1 混匀后高温好氧发酵堆制而成。根据常规农化分析方法^[14]测定堆肥成品含水量和干基养分含量,试验期间麦季养分平均每季养分投入量如表 1。

1.2 试验设计

根据有机氮(以下简写“M”)替代尿素氮(以下简写“U”)比例,试验共设 6 个处理,分别为 0%、20%、40%、60%、80%和 100%,分别记为 M0U100、M20U80、M40U60、M60U40、M80U20、M100U0。小麦生长季总施氮量均为 225 kg hm⁻²,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,并用农膜包被。单一化肥处理下尿素分 3 次施用,50%作基肥,25%作拔节肥,25%作穗肥;化学磷肥按 P₂O₅ 45 kg hm⁻²一次性施入;化学钾肥按 K₂O 75 kg hm⁻²以基肥与穗肥比例 1:1 施入。有机肥均作基肥一次性施用,且有机肥处理均不再施用化学磷钾肥。

表 1 各有机氮替代率下麦季平均养分投入量

Table 1 Nutrient input during the wheat growing season relative to organic manure substitution rate

处理 Treatment	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	225	0	45	0	75	0
M20U80	180	45	0	9	0	30
M40U60	135	90	0	18	0	60
M60U40	90	135	0	28	0	90
M80U20	45	180	0	37	0	120
M100U0	0	225	0	46	0	150

注: M: 有机氮, U: 尿素氮, 处理中数字表示相应施氮量占总施氮量百分比。下同 Note: M stands for organic N, U for Urea N, and the digits in treatments for percentage of organic N and urea N applied, respectively. The same below

1.3 测定指标与方法

小麦成熟期每小区收割 2 m², 带回实验室晒干, 扬净称小麦粒重。各小区随机调查 0.11 m² 有效穗数, 调查 5 个重复, 并取代表性植株 10 穴用于测定产量构成因子, 包括有效穗数、穗粒数和千粒重。将成熟期植株样品按秸秆和籽粒分开, 105℃下杀青 20 min 后继续在 75℃烘至恒定质量, 分别

测定籽粒和秸秆干物质质量。植株样品经专用粉碎机(FZ102, 泰斯特, 天津)粉碎后, 过 60 目筛用于测定籽粒和秸秆氮、磷和钾含量。植株养分分析方法^[14]: 经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 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, 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。

2012 年试验开始前和 2016 年试验结束后采集 0~20 cm 深度土壤, 用土钻按“S”形采集土样, 各小区以 5 个点作 1 个混合样品。带回实验室自然风干后, 粉碎分别过 20 目和 100 目筛, 按常规农化分析方法^[14]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 H_2SO_4 -混合催化剂消解—凯氏定氮法; 有效磷用 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 浸提—钼锑比色法; 速效钾采用 $1.0 \text{ mol L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAc}$ 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(PB-10, 赛多利斯, 德国)测定土壤 pH。

1.4 数据分析

用 Excel 2016 进行数据处理, Origin 9.2 软件进行作图。采用 SAS 9.2^[15]的广义线性模型(Generalized linear model)过程进行单因素方差分析。根据下列公式分别计算小麦籽粒与秸秆中养分吸收量指标:

$$\text{吸氮量} (\text{kg hm}^{-2}) = \text{氮含量} (\text{g kg}^{-1}) \times \text{干物质质量} (\text{kg hm}^{-2}) / 1000$$

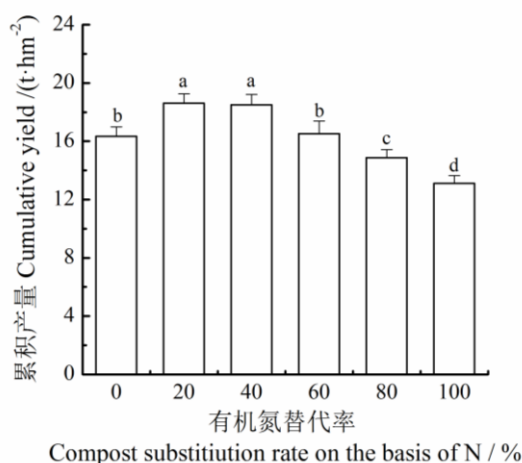
$$\text{吸磷量} (\text{kg hm}^{-2}) = \text{磷含量} (\text{g kg}^{-1}) \times \text{干物质质量} (\text{kg hm}^{-2}) / 1000$$

$$\text{吸钾量} (\text{kg hm}^{-2}) = \text{钾含量} (\text{g kg}^{-1}) \times \text{干物质质量} (\text{kg hm}^{-2}) / 1000$$

2 结果

2.1 植物源有机氮替代率对小麦籽粒产量的影响

图 1 表明, 与单施化肥相比, 有机氮替代率在 20%和 40%, 小麦 4 a 累积产量最高 ($P<0.05$); 60%有机氮替代率下与单施尿素处理相当; 有机氮替代率大于等于 80%时, 累积产量低于单施尿素处理 ($P<0.05$)。试验第 1 年, 与单施化肥相比, 小麦籽粒产量随有机氮替代率的增加而逐渐下降, 呈显著线性负相关关系 ($P < 0.05$)。试验第 2~4 年, 小麦籽粒产量随着有机氮替代率的增加呈先增后降趋势, 呈显著一元二次曲线关系 ($P < 0.05$), 且处理间差异逐渐缩小(图 2)。



注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同 Note: Different lowercases indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below

图 1 有机肥和尿素不同配比比例下小麦 4 a 累积产量

Fig. 1 Cumulative wheat yield of the four-year experiment relative to compost substitution rate

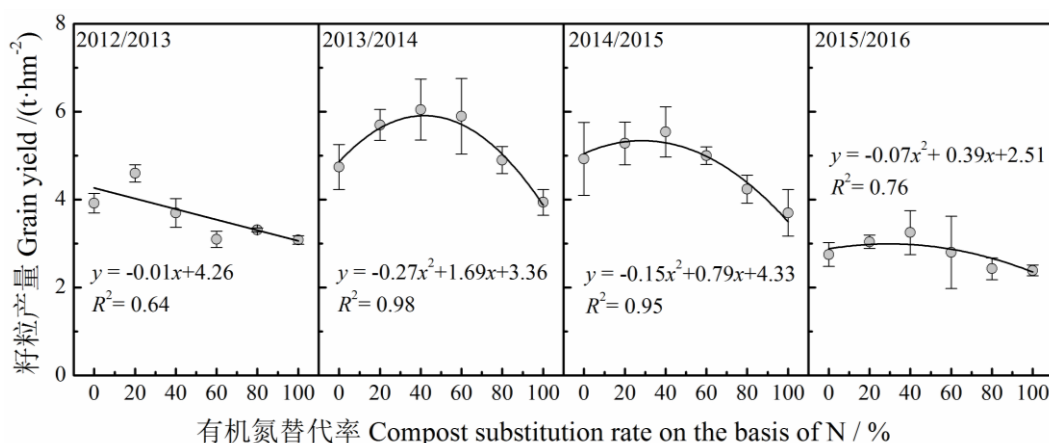


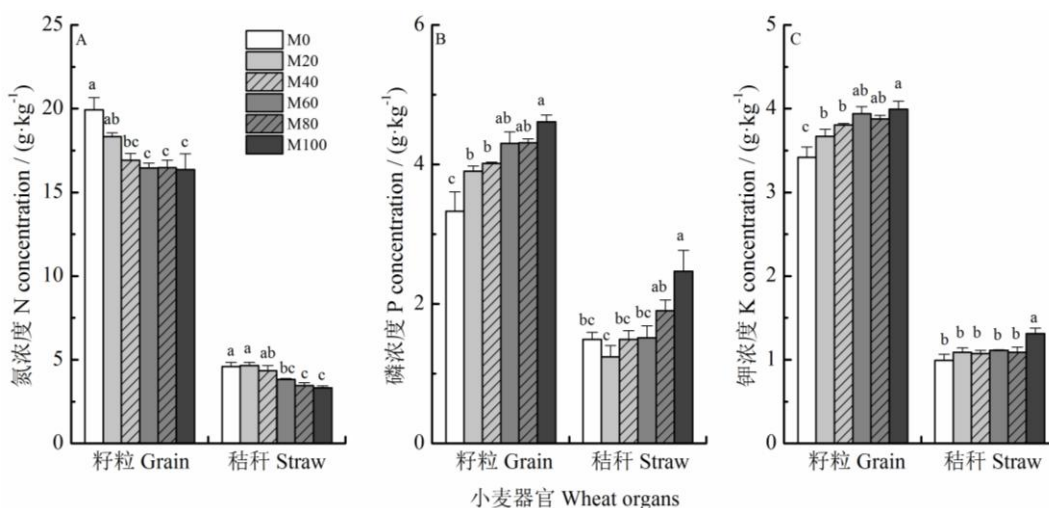
图2 各年份有机肥和尿素不同配施比例与小麦籽粒产量的关系

Fig. 2 Relationships between wheat grain yield of the experiment and compost substitution rate relative to year

2.2 植物源有机氮替代率对小麦养分吸收的影响

成熟期籽粒氮浓度随着有机氮替代率的增加而下降：当有机氮替代率大于等于 40%时，籽粒氮浓度下降了 15.1%~17.9% ($P<0.05$)；有机氮替代率大于等于 60%时，秸秆氮浓度下降了 17.1%~27.9% ($P<0.05$ ，图 3A)。与单施化肥相比，各有机氮替代率下均显著提高了籽粒的磷钾浓度，籽粒磷浓度提高了 17.2%~38.5% ($P<0.05$)，籽粒钾浓度提高了 7.3%~16.8% ($P<0.05$ ，图 3B 和图 3C)。有机肥与化肥配施处理下秸秆磷钾浓度与单施化肥处理相当，但单施有机肥下秸秆磷钾浓度显著高于单施化肥处理 ($P<0.05$ ，图 3B 和图 3C)。

成熟期籽粒吸氮量随着有机氮替代率的增加而下降：当有机氮替代率大于等于 60%时，籽粒氮吸收量下降了 20.2%~35.8% ($P<0.05$)，秸秆吸氮量降低了 16.7%~43.8% ($P<0.05$ ，图 4A)。小麦籽粒磷、钾吸收量基本随着有机氮替代率的增加呈先增后降的趋势；与单施化肥相比，单施有机肥显著提高秸秆吸磷量，秸秆吸钾量各处理间无显著差异 (图 4B 和图 4C)。



注：不同小写字母表示相同部位不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同 Note: Different lowercases indicate significant difference between treatments ($P<0.05$) of the same organ. The same below

图3 有机氮不同替代率下小麦籽粒和秸秆氮磷钾浓度 (2014—2016)

Fig. 3 NPK concentration in wheat grain and straw relative to compost substitution rate (2014-2016)

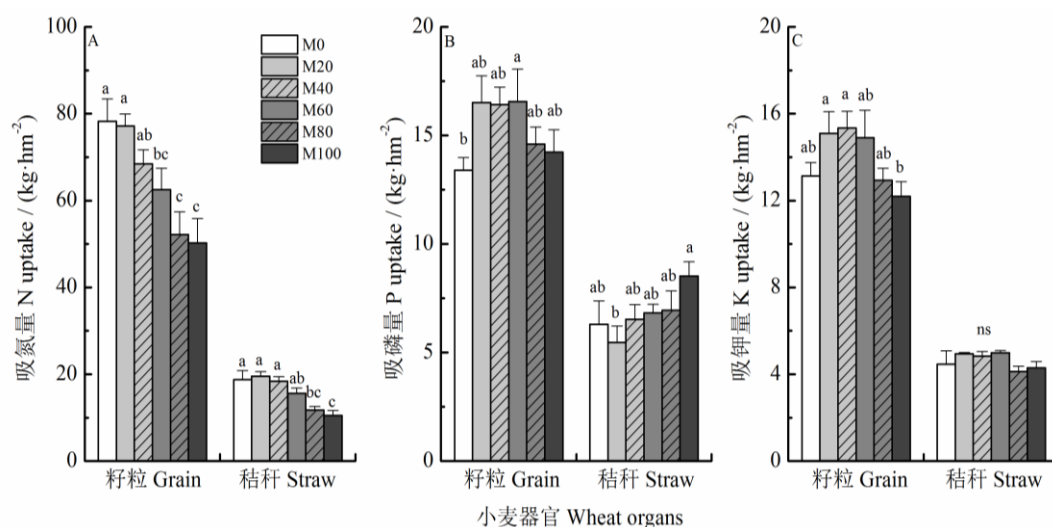


图4 有机氮不同替代率下小麦籽粒和秸秆氮磷钾吸收量 (2014—2016)
Fig. 4 NPK uptake by wheat grain and straw relative to compost substitution rate (2014-2016)

2.3 植物源有机氮替代率对小麦土壤养分的影响

连续4a不同比例植物源有机氮替代下,土壤表层全氮含量、有效磷钾含量和土壤pH均随着有机氮替代率的增加而增加(表2)。与单一施用化肥处理相比,有机肥替代率大于等于60%时,表层土壤全氮含量提高了20.3%~46.3% ($P<0.05$),有效磷含量提高了1.9倍~4.2倍 ($P<0.05$);各有机氮替代下表层土壤速效钾较单施化肥处理提高了0.5倍~3.8倍 ($P<0.05$)。有机氮替代率大于等于40%时,土壤pH则较单施化肥处理提高了0.4~0.8个单位。

表2 有机氮不同替代率下土壤全氮、有效磷、速效钾含量和土壤pH (2016, 0~20 cm)

Table 2 Contents of soil total nitrogen, available P, readily available K and pH relative to compost substitution rate (2016, 0~20 cm)

处理 Treatment	土壤全氮 Soil TN /(g kg ⁻¹)	土壤有效磷 Soil Available P /(mg kg ⁻¹)	土壤速效钾 Soil readily available K /(g kg ⁻¹)	土壤pH Soil pH
M0U100	1.90 ± 0.07c	10.4 ± 5.9c	86.8 ± 4.7d	5.81 ± 0.06c
M20U80	2.09 ± 0.04bc	16.8 ± 4.2c	132.1 ± 9.0c	5.81 ± 0.01c
M40U60	2.19 ± 0.11bc	19.1 ± 3.0c	140.1 ± 2.0c	6.16 ± 0.07b
M60U40	2.29 ± 0.08b	29.9 ± 6.3bc	172.8 ± 19.6c	6.30 ± 0.04b
M80U20	2.34 ± 0.11b	41.6 ± 9.8ab	273.8 ± 24.0b	6.53 ± 0.06a
M100U0	2.79 ± 0.14a	51.5 ± 10.2b	413.7 ± 3.3a	6.65 ± 0.05a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Note: Different lowercases in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$)

3 讨论

利用水生植物净化富营养化水体是一种解决水体污染的有效途径,然而水生植物残体再利用障碍已成为该技术推广难题之一。本研究利用伊乐藻堆肥与化学氮肥配施,探索水生植物源有机肥高效利用模式,为水生植物残体资源化利用提供理论依据和技术支撑。本文连续4a研究结果表明:

水生植物源有机氮替代率为 20%和 40%时, 小麦累积产量较单施化学氮肥提高了 14.0%和 13.5% ($P<0.05$)。有机氮替代率 60%下小麦累积产量则与单施化肥处理相当; 当有机氮替代率进一步提高时, 小麦产量则显著降低 (图 1)。且有机氮不同替代率下的小麦产量差异随着试验年份的累积而逐渐缩小 (图 2)。国内外关于有机肥适宜替代率的研究结果并不相同, 但多数研究者认为有机肥所占比例并非越高越好, 而是存在最佳比例, 这与本文植物源有机肥试验结果基本表现一致。如邢鹏飞等^[16]在华北农田棕壤 4 a 试验结果表明, 猪粪有机肥替代率为 30%, 连续 4 a 小麦产量均与单施化肥相当, 有机肥替代率为 50%, 两年小麦产量出现降低。吕凤莲等^[17]在陕西关中壤土 2 a 试验结果表明, 小麦产量随着有机肥替代率的增加表现为先增后降的趋势, 但是当有机肥替代率在 75%时, 小麦产量最高。侯红乾等^[18]在湖南红壤双季稻系统 25 a 试验表明, 30%有机肥替代下开始即能迅速增产, 但增产趋势随着时间的延续先增加再减小, 70%有机肥替代处理一开始增产幅度较小, 甚至低于化肥处理, 但随着时间的延续增产幅度明显增加。然而, 在环太湖地区稻田配施水生植物有机肥研究表明, 试验第 1 年仅单施有机肥下水稻产量显著低于单施化肥, 有机氮其他替代率下水稻产量均未受影响; 连续施用 4 a 后全量有机肥下水稻产量也与单施化肥处理相当^[13]。研究结果的差异不仅是土壤基础肥力水平和试验持续时间差异性造成, 还与试验地点的气候等环境因素相关^[17]。有机肥自身的速效养分含量有限, 需要通过微生物矿化分解来释放养分, 而土壤水分和温度等环境因素又直接影响微生物的生物量和活力等^[19]。环太湖地区是水稻高产区, 小麦种植季气候、温度和水分等完全不同于水稻季, 可能引起了有机肥中速效养分释放较慢, 加剧微生物与作物竞争速效养分, 进而影响产量^[13,19-20]。水生植物有机肥与化肥不同配比下, 肥料及土壤养分释放规律与环境水热因素的相关性今后需进一步研究。

植株体内氮素水平是决定作物生长和产量形成的关键营养元素^[21]。当有机氮替代率达到 40%后, 小麦籽粒和秸秆氮浓度均显著下降 (图 3A), 当有机氮替代率达到 60%后, 小麦籽粒和秸秆吸氮量较单施化肥分别下降了 20.2%~35.8%和 16.7%~43.8% ($P<0.05$, 图 4A), 间接表明了有机氮替代率过高下小麦生长季内出现氮素不足, 进而影响了产量形成。但同时当有机氮替代率达到 60%后, 耕层土壤全氮含量显著提高 (表 2), 有机肥与化肥配施对于提高土壤氮素含量具有重要意义, 既能快速提高土壤中有效氮的含量, 又能长久保存土壤氮素^[22]。马力等^[23]研究表明, 长期施肥使表层土壤氮素累积量明显增加, 施有机肥处理的 0~20 cm 土层含氮量普遍高于施化肥处理。值得注意的是, 配施水生植物源有机肥还提高了小麦籽粒的磷、钾浓度, 并随着有机氮替代率的提高而增加 (图 3B 和 3C)。农田施用晒干水葫芦可显著提高水稻各生育期植株磷浓度和氮磷钾吸收量^[24-25], 这与本研究中伊乐藻堆肥试验结果一致。因此, 配施水生植物有机肥还可减少农田化学磷钾肥的施用。从土壤有效磷钾养分变化来看, 连续 4 a 配施水生植物有机肥后, 表层土壤中有效磷钾含量均较单施化肥提高, 并随着有机氮替代率的增加而增加 (表 2)。作为植物源有机肥, 水生植物有机肥不仅具有动物源有机肥普遍的优势, 且长期在水体中富集了大量磷钾等中微量元素^[12-13]。另一方面, 连续施入有机肥可提高土壤有机质含量, 有效提高作物根际土壤有益微生物种群数量和土壤酶活性^[26]。大量微生物和腐殖质进入土壤, 降低无机磷的固定并促进无机磷的溶解, 减少磷钾固持, 从而释放有效养分^[27-28]。这对于目前太湖农区土壤普遍缺钾及农田磷肥施用过量的问题具有重要意义, 同时也需综合考虑过量有机肥配施后径流损失等污染问题。此外, 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^[3], 本研究中随着有机肥配施量的增加, 土壤 pH 提高, 其中, 当有机氮替代率达到 40%后, 土壤 pH 较单施化肥显著提高了 0.4~0.8 个单位 (表 2), 可见配施水生植物有机肥对缓解农田土壤酸化也具有重要意义。

综上, 配施适宜比例的水生植物有机肥不仅能有效维持小麦产量, 提高小麦籽粒磷钾吸收量及土壤氮磷钾养分含量, 还可缓解土壤酸化, 从而在持续增产和增强土壤功能方面发挥重要作用, 是资源循环利用的有效措施。随着农业集约化程度提高, 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有机肥利用的重要方向之一。

4 结 论

水生植物源有机肥替代 20%~40%无机肥即能得到较高的产量,有机肥替代超过 60%无机肥更能保持土壤肥力。既维持较高作物产量、作物养分利用率和土壤肥力,同时可减少磷钾肥施用,水生植物源有机氮替代 40%无机肥较适宜。今后尚需考虑有机肥不同替代率下农田养分径流损失等环境问题,以优化水生植物有机肥施用技术。

致 谢 江苏太湖地区农业科学研究所(苏州市农业科学院)农业资源与环境研究中心王岳初、朱兴连、俞伟兴和周菊根等同志在试验实施与样品采集中做了大量工作,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 夏永秋, 颜晓元. 太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量. 土壤学报, 2011, 48(6): 1210-1218
Xia Y Q, Yan X Y. Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental and economic benefits for wheat season in the Taihu Lake region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1210-1218
- [2] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. 土壤学报, 2003, 40(3): 426-432
Wang D J, Lin J H, Sun R J, et al. Optimum nitrogen rate for a high productive rice-wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu Lake area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 426-432
- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010
- [4] 李妍, 席运官, 张弛, 等. 太湖地区小麦生产氮和磷投入阈值的研究. 江西农业学报, 2016, 28(9): 74-78
Li Y, Xi Y G, Zhang C, et al. Study on threshold of nitrogen and phosphorus input into wheat production in Taihu Lake area (In Chinese). Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(9): 74-78
- [5] 王西娜, 王朝辉, 李华, 等. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性. 土壤学报, 2016, 53(5): 1202-1212
Wang X N, Wang C H, Li H, et al. Dynamics and availability to crops of residual fertilizer nitrogen in upland soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1202-1212
- [6] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率. 土壤, 2017, 49(6): 1067-1077
Yan X, Jin J Y, Liang M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China (In Chinese). Soils, 2017, 49(6): 1067-1077
- [7] 郑学博, 樊剑波, 周静, 等. 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响. 土壤学报, 2016, 53(3): 675-684
Zheng X B, Fan J B, Zhou J, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on soil nutrients and peanut yield in upland red soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(3): 675-684
- [8] 张黛静, 张艳艳, 王艳杰, 等. 耕层调控与有机肥处理下麦田土壤和小麦冠层结构特性及其相互关系. 应用生态学报, 2018, 29(2): 538-546
Zhang D J, Zhang Y Y, Wang Y J, et al. Structure characteristics of soil and canopy and their relationships in wheat field under different tillage and application of organic fertilizer (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 538-546
- [9] Naguib N Y M. Organic vs chemical fertilization of medicinal plants: A concise review of researches. Advances in Environmental Biology, 2011, 5(2): 394-400
- [10] Abbasi M K, Tahir M M. Economizing nitrogen fertilizer in wheat through combinations with organic manures in

- Kashmir, Pakistan. *Agronomy Journal*, 2012, 104(1): 169-177
- [11] Yang Z C, Zhao N, Huang F, et al. Long-term effects of different organic and inorganic fertilizer treatments on soil organic carbon sequestration and crop yields on the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 47-52
- [12] 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. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 234-240
- Wang H H, Jin M J, Xu J, et al. Effect of biochar addition amount on nitrogen loss during composting process of *Elodea nuttallii* (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(19): 234-240
- [13] 陶玥玥, 金梅娟, 汤云龙, 等. 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. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 196-202
- Tao Y Y, Jin M J, Tang Y L, et al. Partial nitrogen fertilizer substitution by aquatic plant compost to improve rice yield and paddy soil fertility (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 196-202
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [15] SAS Institute. *SAS user's guide: Statistics*, version 8.2. 6th ed. SAS Institute, Cary, NC, 2001
- [16] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2016(3): 98-104
- Xing P F, Gao S C, Ma M C, et al. Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the North China Plain (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(3): 98-104
- [17] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 22-32
- Lü F L, Hou M M, Zhang H T, et al. Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat-summer maize rotation system in Lou soil (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 22-32
- [18] 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. *中国农业科学*, 2011, 44(3): 516-523
- Hou H Q, Liu X M, Liu G R, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 516-523
- [19] Schmidt I K, Jonasson S, Michelsen A. Mineralization and microbial immobilization of N and P in arctic soils in relation to season, temperature and nutrient amendment. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11(2): 147-160
- [20] Khaliq A, Abbasi M K, Hussain T. Effects of integrated use of organic and inorganic nutrient sources with effective microorganism (EM) on seed cotton yield in Pakistan. *Bioresource Technology*, 2006, 97(8): 967-972
- [21] 陆景陵. 植物营养学. 上册. 北京: 中国农业大学出版社, 2003
- Lu J L. *Plant nutrition I* (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2003
- [22] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响. *土壤学报*, 2014, 51(2): 314-324
- Gao J S, Huang J, Dong C H, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314-324
- [23] 马力, 杨林章, 颜廷梅, 等. 长期施肥水稻土氮素剖面分布及温度对土壤氮素矿化特性的影响. *土壤学报*, 2010, 47(2): 286-294
- Ma L, Yang L Z, Yan T M, et al. Profile distribution and mineralization characteristics of nitrogen in relation to

- temperature in paddy soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 286-294
- [24] 盛婧, 刘红江, 陈留根, 等. 农田施用水葫芦对水稻磷素吸收利用的影响. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(6): 803-808
Sheng J, Liu H J, Chen L G, et al. Effect of hyacinth mulching on uptake and utilization of phosphorus by rice plant (*Oryza sativa* L.) (In Chinese). *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2011, 17(6): 803-808
- [25] 陈留根, 刘红江, 孙晓强, 等. 农田施用水葫芦对水稻钾素吸收利用的影响. *中国农学通报*, 2011, 27(9): 65-71
Chen L G, Liu H J, Sun X Q, et al. Effect of Hyacinth mulching on potassium uptake and utilization of rice (*Oryza sativa* L.) (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(9): 65-71
- [26] 刘金光, 李孝刚, 王兴祥. 连续施用有机肥对连作花生根际微生物种群和酶活性的影响. *土壤*, 2018, 50(2): 305-311
Liu J G, Li X G, Wang X X. Effects of successive application of organic fertilizers on rhizosphere microbial populations and enzyme activities of monoculture peanut (In Chinese). *Soils*, 2018, 50(2): 305-311
- [27] 王荣萍, 廖新荣, 李淑仪, 等. 有机肥对不同母质菜田土壤磷解吸动力学模拟. *土壤学报*, 2014, 51(4): 734-742
Wang R P, Liao X R, Li S Y, et al. Simulation of effect of organic manure on phosphorus desorption kinetics in vegetable garden soils different in parent material (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 734-742
- [28] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 施用有机肥对土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1057-1064
Yu W T, Jiang Z S, Ma Q, et al. Effects of application of manure on soil fertility (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1057-1064

Response of Wheat Yield and Soil Nutrients to Substitution of Organic Nitrogen with Aquatic Plant Residue

TAO Yueyue WANG Haihou JIN Meijuan SHI Linlin DONG Linlin LU Changying SHEN Mingxing[†]
(Institute of Agricultural Sciences in Taihu Lake District, Key Scientific Observation & Experiment Station of Paddy Field Eco-environment,
Ministry of Agriculture, Suzhou, Jiangsu 215155, China)

Abstract 【Objective】 In order to make effective use of aquatic plants wildly growing in the Taihu Lake Valley, composting is an important way. This study is to investigate effects of using aquatic plant compost as manure on wheat yield and soil nutrient status with a view to promoting effective utilization of aquatic plant residues. 【Method】 A field experiment was carried out for four years successively from 2012 to 2016 in the Taihu Lake region, preparing compost of aquatic plant residues as manure to substitute part of the N fertilizer (mineral urea) applied to a wheat field to explore effects of the substitution on wheat yield, NPK uptake, contents of soil NPK and soil pH. The field experiment was designed to have six treatments, different in substitution rate (0, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%), but the same in N supply. Grain yield of wheat, nitrogen, phosphorus and potassium uptake by the plant, contents of soil total nitrogen, soil available phosphorus, soil readily available potassium and soil pH value in the top soil layer were monitored. 【Result】 Results show that compared to Treatment M0U100 (application of mineral urea alone), Treatments M20U80 and M40U60 (20% and 40% of mineral urea substituted by the compost, respectively) was 14.0% and 13.5%, respectively, higher in total cumulative wheat grain yield, however, the increment decreased in magnitude with the substitution rate increasing over 40%, and Treatment M60U40 was even significantly lower than Treatment M0U100 in N

content in shoot and N uptake. The substitution significantly increased P and K concentrations in the grain. However, with rising substitution rate, crop uptake of P and K exhibited a trend of rising first and then declining. After four years the practice, the contents of soil total nitrogen, soil available phosphorus and potassium, and soil pH in the plough layer were all higher than in the control, showing a trend of the higher substitution rate, the more significant, the increase. 【Conclusion】 In summary, to improve the grain yield of wheat meanwhile maintain the soil fertility, Treatment 40%, that is, to apply compost of aquatic plant residue as manure to substitute 40% of the mineral urea to be applied is the optimal option, which can increase yield and phosphorus and potassium utilization efficiency of the crop, and contents of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil, and also alleviate soil acidification. Therefore, the practice of applying mineral urea and a proper amount of compost of aquatic plant residue as substitute is an economical and environment-friendly fertilization technology in the Taihu Lake region.

Key words Organic manure of composted aquatic plant residue; Wheat yield; Nutrient uptake; Soil nutrients; Soil pH

（责任编辑：陈荣府）