

农田施用水葫芦对水稻氮素吸收利用的影响

刘红江, 陈留根, 朱普平, 盛婧, 张岳芳, 郑建初*

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要:以粳稻品种运 2645 为供试材料,设计农田施用水葫芦(将晒干水葫芦按 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 农田施用)、不施用水葫芦处理和施 N 量为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (LN)、 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (NN)处理,研究其对水稻不同生育时期 N 素含量、N 素吸收、N 素分配和 N 素利用效率的影响. 结果表明:①农田施用水葫芦使水稻不同生育时期植株含 N 率显著提高;使各生育时期吸 N 量显著提高,吸 N 量从够苗到抽穗期增加幅度明显增大,抽穗到成熟期增加幅度略有降低;②农田施用水葫芦对水稻 N 素在茎鞘和叶片中分配比例无明显影响,使 N 素在穗中分配比例明显降低;③除够苗期外,农田施用水葫芦使水稻不同生育时期 N 素干物质生产效率极显著降低,使 N 素籽粒效率显著降低,但对 N 素收获指数无显著影响;④增施 N 肥,使水稻不同生育时期的植株 N 素含量和吸 N 量多得到显著或极显著增加,使 N 素干物质生产效率和 N 素籽粒生产效率多明显下降;⑤水葫芦-N 对稻株 N 素吸收利用多无显著互作效应;农田施用水葫芦使水稻植株含 N 率、N 素吸收量显著提高,使 N 素干物质生产效率和 N 素籽粒效率多显著降低.

关键词:农田施用水葫芦; 水稻; N 素吸收; N 素分配; N 素效率

中图分类号:X143 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)05-1292-07

Effect of Hyacinth Mulching on Rice (*Oryza sativa* L.) Uptake and Utilization of Nitrogen

LIU Hong-jiang, CHEN Liu-gen, ZHU Pu-ping, SHENG Jing, ZHANG Yue-fang, ZHENG Jian-chu

(Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Nitrogen is the most important element for rice growth, and hyacinth can absorb large quantities of nitrogen and accumulate in their tissues. The field experiment was conducted to investigate the effects of hyacinth mulching on rice nitrogen (N) concentration, uptake, efficiency and allocation at different growth stages. Taked Yun 2645 as a material, the nitrogen uptake and utilization of rice were evaluated under two different levels of N input: low (LN, $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and normal N (NN, $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) in 2009. Main results showed that: ① Compared with AMB, hyacinth mulching significantly increased N concentration in rice plant over the season, hyacinth mulching significantly increased nitrogen accumulation in rice plant, and the increasing rate was gradual addition from mid-tillering to heading, but from heading to maturity the increasing rate was gradual decline. ② Hyacinth mulching had no obvious effect on nitrogen allocation pattern in leaves and stems of rice over the season, significantly decreased nitrogen allocation pattern in spikes. ③ Except mid-tillering, hyacinth mulching resulted in the significant decrease in N use efficiency for biomass (NUEp) over the season and in N use efficiency for grain yield (NUEg) at grain maturity, but no effect was observed on nitrogen harvest index (NHI). ④ Nitrogen concentration and accumulation at most growth stages of rice increased with increasing N supply ($p < 0.05$ or 0.01), but NUEp and NUEg showed the opposite trends. ⑤ Interactions between hyacinth mulching $\times$ N were not observed for N uptake and utilization. Hyacinth mulching increased N concentration and N uptake, decreased NUEp and NUEg at most growth stages of rice.

Key words: hyacinth mulching; rice; nitrogen uptake; nitrogen allocation; nitrogen efficiency

太湖流域经济发展快、工业化程度高. 伴随经济的发展和人口的增长,工业排污不断加剧以及居民生活垃圾的大量排放,使太湖流域的水体富营养化程度逐年加剧^[1,2],水体中 N 素等养分物质的含量严重超标. 使水体受到污染,水质变差. 水葫芦是公认吸附水体中 N 素等养分物质能力最强的水生植物之一,并且能将这些养分物质富集于其体内,使其体内 N 素等养分物质的含量明显大于许多植物^[3-7]. 因此在水体中种养水葫芦,可以净化水体,吸附水体中 N 素等养分物质. 不过水葫芦也是一种入侵性的生物物种,必须对其进行控制性种养,并对

水葫芦加以综合利用,否则很容易形成二次污染,加剧水体环境的恶化^[8]. 前人研究表明,农田施用水葫芦能够明显培肥地力,增加农田土壤的 N 素含量^[9]. 而水稻的生长发育和产量形成很大程度受 N 素营养的影响^[10,11]. 为了明确农田施用水葫芦对水稻 N 素吸收和利用的影响,笔者等于 2009 年在江

收稿日期:2010-05-31;修订日期:2010-08-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAD89B12, 2009BAC63B01);江苏省博士后基金项目(0902035C);江苏省农业科学院博士后基金项目(6510907)

作者简介:刘红江(1979~),男,博士,主要研究方向为农业生态和水稻栽培生理生态, E-mail: LiuHongjiang2004@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: zjc@jaas.ac.cn

苏省无锡市安镇太湖水稻示范园农田 ($31^{\circ}37'N$, $120^{\circ}28'E$), 设计农田施用水葫芦 (将晒干水葫芦按 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 还田) 和不施用水葫芦试验, 研究农田施用水葫芦对粳稻品种运 2645 N 素吸收利用的影响, 以期为我国农田流失养分的循环利用、农业生产节能减排和农业生态环境健康提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 水葫芦来源与成分

水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 属雨久花科风眼莲属, 原产南美亚马逊河流域, 是富集水体 N、P 能力很强的水生植物。本研究用水葫芦养殖在太湖水稻示范园农田周围池塘中, 用以吸附农田流失进入水体的养分, 去除水体富营养化, 净化农田周围水体。待水葫芦长成后, 将水葫芦打捞、晒干、农田施用, 使农田流失养分得以循环利用。还田水葫芦体内 N、P、K 含率分别为 2.36%、0.21%、2.35%, 5 种常见重金属砷、汞、铅、镉、铬含量分别为 6.26、0.15、17.66、0.20、8.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验地点

本试验于 2009 年 5~11 月在江苏省无锡市安镇太湖水稻示范园试验田 ($31^{\circ}37'N$, $120^{\circ}28'E$) 中进行, 试验田土壤类型为黄泥土, 年降水量 $1\,100\sim1\,200\text{ mm}$, 年平均温度约 16°C , 年日照时间 $>2\,000\text{ h}$, 年无霜天数 $>230\text{ d}$, 耕作方式为水稻、冬小麦轮作。土壤基本理化性质为: 总 N $5.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 N $42.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总 P $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 P $49.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 K $246.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 容重 $1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 有机 C 1.5%, pH 6.8。

1.3 供试材料

本试验采用裂区试验设计, 共 4 个处理组合。分为水葫芦处理: 设农田施用水葫芦 (将晒干水葫芦按 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 还田)、不施用水葫芦 2 个水平; 施氮量: 设 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (LN) 和 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (NN) 2 个水平。小区面积为 20 m^2 , 试验重复 3 次。供试水稻品种为运 2645, 6 月 15 日移栽, 人工移栽。密度为 $24\text{ 穴}\cdot\text{m}^{-2}$, 行距为 25 cm, 株距为 16.7 cm。1 穴 3 苗。插秧后, 将水葫芦干样直接撒在水稻田中, N 肥施用时期分别为 6 月 14 日施基肥, 6 月 21 日施分蘖肥, 7 月 28 日施穗肥。基肥和分蘖肥占总施 N 量的 60%, 穗肥占总施 N 量的 40%。施磷、钾量分别为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 全部作基肥施用。水分管理为 6 月 15 日~7 月 10 日保持浅水层 (约 5 cm), 7 月 11 日~8 月 4 日进行多次轻搁田, 8 月 5 日至收

割前 7 d 进行间隙灌溉。适时进行病虫草害防治, 水稻正常生长发育。

1.4 测定内容与方法

在移栽日、移栽后 28 d (约够苗期)、移栽后 47 d (约拔节期)、抽穗期、抽穗后 20 d、成熟期, 每小区调查 100 穴植株的茎蘖数, 计算单穴平均茎蘖数。据此每处理取代表性植株 5 穴 (移栽期测定 50 株), 分别测定绿叶、黄叶、茎鞘、穗等器官的干物重。将不同器官材料进行粉碎后, 用半微量蒸馏法测定全 N 含量。

1.5 名词定义与说明

水稻 N 素干物质生产效率: 是水稻干物质累积量与 N 素累积量的比值, 是衡量吸收单位 N 生产的干物质量。水稻 N 素籽粒生产效率: 是水稻籽粒产量与成熟期 N 素累积量的比值, 是吸收单位 N 生产的籽粒产量。水稻 N 素收获指数: 是水稻籽粒中的 N 素累积量占全株 N 素累积量的比例。

1.6 统计分析方法

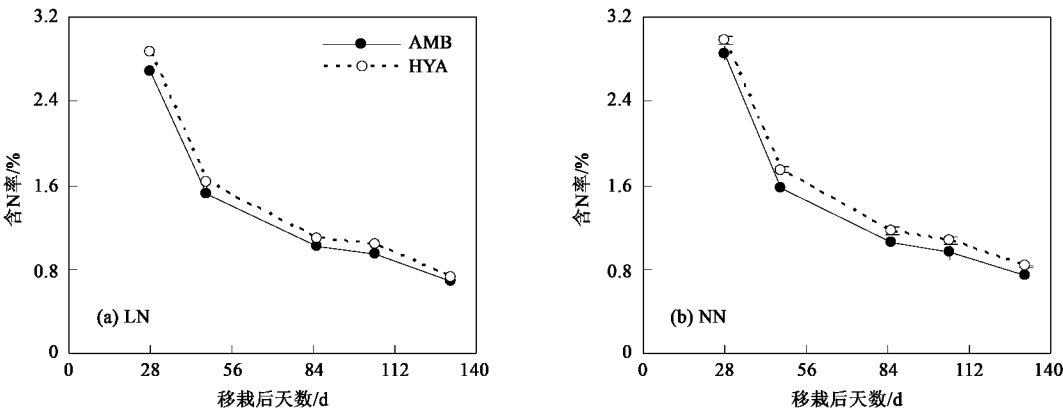
采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析, 作图采用 Excel 作图软件。各处理的比较采用最小显著差数 (LSD) 法, 凡超过 $\text{LSD}_{0.05}$ (或 $\text{LSD}_{0.01}$) 水平的视为显著 (或极显著)。

2 结果与讨论

2.1 农田施用水葫芦对水稻植株含 N 率的影响

农田施用水葫芦对水稻不同生育时期植株含 N 率的影响如图 1 所示, 农田施用水葫芦使水稻够苗期、拔节期、抽穗期、穗后 20 d、成熟期植株含 N 率分别比对照增加 5.6%、9.0%、9.6%、11.9%、7.8%, 增加幅度总体呈增大趋势, 到生育后期略有下降; NN 处理使够苗期、拔节期、抽穗期、穗后 20 d、成熟期的植株含 N 率分别比 LN 处理高 5.0%、5.7%、5.0%、2.2%、10.7%。统计分析表明 (表 1): 农田施用水葫芦使水稻不同生育时期植株含 N 率极显著增加; N 处理对水稻够苗期、拔节期和成熟期植株含 N 率的影响达到极显著水平; 水葫芦-N 的互作效应对水稻不同生育时期植株含 N 率均没有显著影响。

水稻氮素的吸收利用受到品种、施 N 量、施 N 方式、水分^[12,13]等因素的影响。前人研究表明, 稻麦等作物秸秆还田能够提高土壤有机质和氮、磷、钾等养分的含量, 维持土壤养分平衡、促进作物生长发育、增加作物产量^[14,15]。水葫芦体内氮、磷、钾等养分物质含量明显大于稻麦等农作物^[5~7]。本研究表



AMB: 常规施肥(对照); HYA: 农田施用水葫芦; NN: 常氮; LN: 低氮, 下同

图 1 农田施用水葫芦对水稻不同生育时期地上部含 N 率的影响 (2009)

Fig. 1 Effects of hyacinth mulching on shoot N concentration at different growth stages of rice in 2009

表 1 农田施用水葫芦对水稻不同生育期 N 素吸收利用与分配影响的显著性检验¹⁾

Table 1 Probability of treatment differences in N uptake and utilization of rice plant

项目	处理	够苗期	拔节期	抽穗期	穗后 20 d	成熟期
含 N 率	H(水葫芦)	* *	* *	* *	* *	* *
	N(氮)	* *	* *	ns	ns	* *
	H-N	ns	ns	ns	ns	ns
N 素累积量	H	* *	* *	* *	* *	* *
	N	* *	* *	* *	* *	* *
	H-N	ns	*	ns	ns	ns
茎鞘中 N 素比例	H	ns	ns	ns	ns	ns
	N	ns	ns	ns	ns	ns
	H-N	ns	ns	ns	ns	ns
叶片中 N 素比例	H	ns	ns	ns	ns	ns
	N	ns	ns	ns	ns	* *
	H-N	ns	ns	ns	ns	ns
穗中 N 素比例	H			ns	* *	ns
	N			ns	*	*
	H-N			ns	* *	ns
N 素物质生产效率	H	ns	* *	* *	* *	* *
	N	ns	* *	ns	ns	* *
	H-N	ns	ns	ns	ns	ns

1) ns 表示 no significance; * 表示 $p < 0.05$, * * 表示 $p < 0.01$

明,农田施用水葫芦能够显著提高不同生育时期水稻植株含 N 率(图 1),这可能是农田施用水葫芦使稻田土壤有机质和养分含量明显增加所致,数据有待另文发表.同时,农田施用水葫芦使水稻植株含 N 率,增加幅度从拔节以后,总体呈增大趋势,到生育后期略有下降.这可能与农田施用水葫芦的养分释放规律有关.

2.2 农田施用水葫芦对水稻 N 素累积量的影响

农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素累积量的影响如图 2 所示.农田施用水葫芦使水稻够苗期、拔节期、抽穗期、穗后 20 d、成熟期植株 N 素累积量分别比对照增加 12.6%、18.1%、23.3%、

23.0%、21.5%,增加幅度呈开口向下的抛物线变化趋势;NN 处理使够苗期、拔节期、抽穗期、穗后 20 d、成熟期的植株 N 素累积量分别比 LN 处理增加 13.6%、15.7%、17.2%、14.6%、20.8%.统计分析表明(表 1):农田施用水葫芦、N 处理对水稻不同生育时期植株 N 素累积量的影响均达到显著或极显著水平;除拔节期以外,水葫芦-N 的互作效应对水稻不同生育时期植株 N 素累积量均没有显著影响.

水稻 N 素累积量为某一生育时期的含 N 率乘以该期的干物质量.关于农作物秸秆还田对水稻氮素累积量的影响至今未见报道.本研究表明,农田施

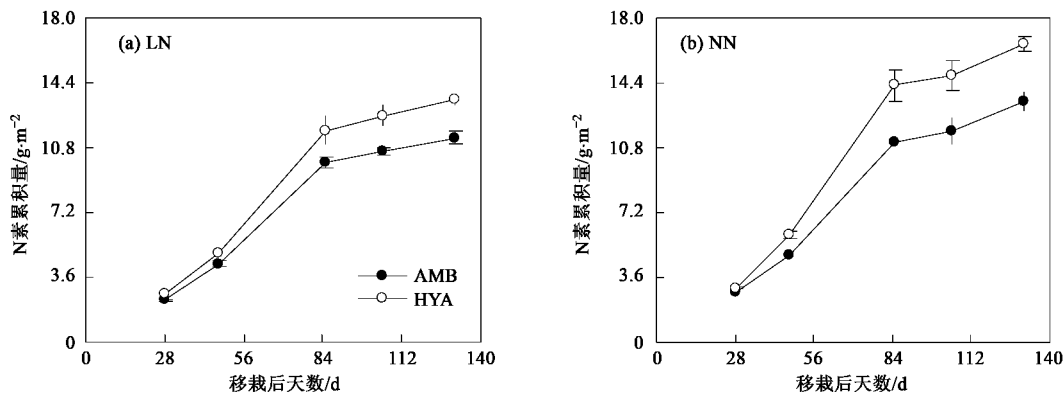


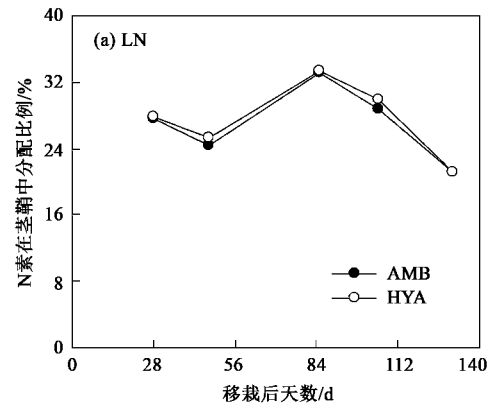
图 2 农田施用水葫芦对水稻不同生育时期地上部吸 N 量的影响 (2009)

Fig. 2 Effects of hyacinth mulching on shoot N accumulation at different growth stages of rice in 2009

用水葫芦使水稻不同生育时期 N 素累积量显著提高(图 2),这是农田施用水葫芦使水稻不同生育阶段干物质累积量明显增加(另文报道)和不同生育时期水稻植株含 N 率显著提高共同作用的结果(图 1). 与不同生育时期水稻植株含氮率的变化趋势基本一致,农田施用水葫芦使水稻不同生育时期 N 素累积量呈先增加后减少的变化趋势. 因此,在水稻生产中,应合理运筹水稻整个生育期 N 肥施用量,适当增加水稻生育中后期穗肥的施用比例,保证生育中后期农田施用水葫芦水稻的 N 肥需要,以获得较高水平的水稻产量.

2.3 农田施用水葫芦对水稻 N 素分配的影响

2.3.1 对 N 素在茎鞘中分配比例的影响



农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素在茎鞘中分配比例的影响如图 3 所示. 农田施用水葫芦使水稻够苗期和抽穗期 N 素在茎鞘中分配比例分别比对照下降 0.2% 和 3.4%, 拔节期、穗后 20 d、成熟期 N 素在茎鞘中分配比例分别比对照增加 0.3%、8.7%、1.8%; NN 处理使够苗期、成熟期 N 素在茎鞘中分配比例分别比 LN 处理增加 2.5%、1.9%, 拔节期、抽穗期、穗后 20 d N 素在茎鞘中分配比例分别比 LN 处理下降 5.4%、5.7%、1.9%. 统计分析表明(表 1): 农田施用水葫芦、N 处理、水葫芦-N 的互作效应对水稻不同生育时期 N 素在茎鞘中分配比例的影响均未达显著水平.

2.3.2 对 N 素在叶片中分配比例的影响

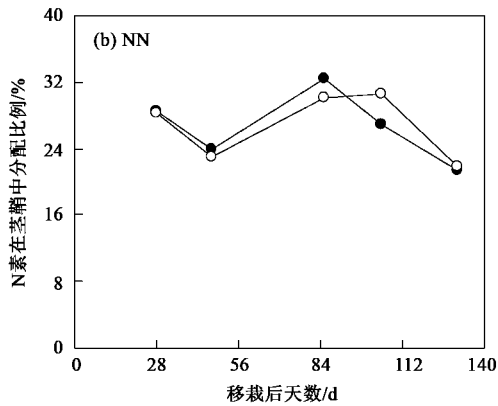


图 3 农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素在茎鞘中比例的影响 (2009)

Fig. 3 Effects of hyacinth mulching on N distribution rate in stems at different growth stages of rice in 2009

农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素在叶片中分配比例的影响如图 4 所示. 农田施用水葫芦使水稻够苗期、抽穗期、成熟期 N 素在叶片中分配比例分别比对照增加 0.1%、2.4%、5.5%, 拔节

期和穗后 20 d N 素在叶片中分配比例分别比对照下降 0.1%、1.9%; NN 处理使够苗期 N 素在叶片中分配比例比 LN 处理下降 1.0%, 拔节期、抽穗期、穗后 20 d、成熟期 N 素在叶片中分配比例分别比 LN

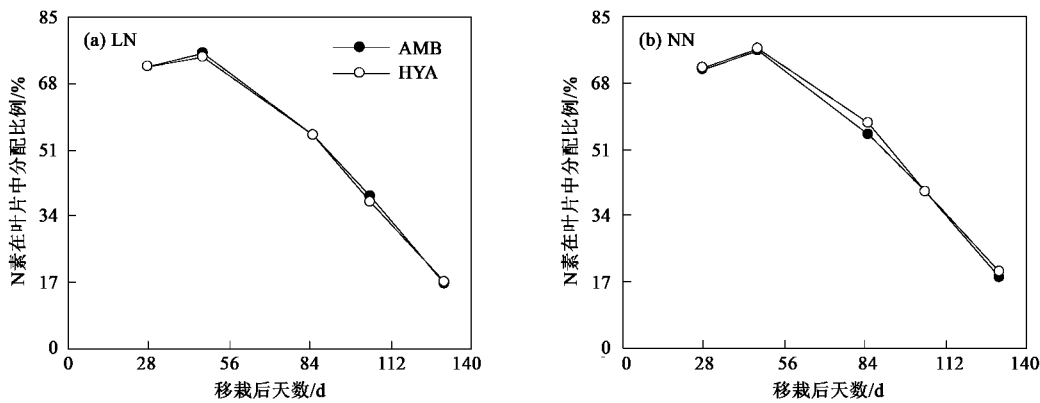


图 4 农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素在叶片中比例的影响 (2009)

Fig. 4 Effects of hyacinth mulching on N distribution rate in leaves at different growth stages of rice in 2009

处理增加 1.8%、2.7%、4.8%、11.2%。统计分析表明(表 1):农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素在叶片中分配比例的影响均未达显著水平;除成熟期外,N 处理对水稻不同生育时期 N 素在叶片中分配比例的影响均未达显著水平;水葫芦-N 的互作效应对水稻不同生育时期 N 素在叶片中分配比例的影响均未达显著水平。

2.3.3 对 N 素在穗中分配比例的影响

农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素在穗中分配比例的影响如图 5 所示.农田施用水葫芦使水稻抽穗期、穗后 20 d、成熟期 N 素在穗中分配比例分别比对照下降 1.6%、5.1%、2.2%;NN 处理使抽穗期 N 素在穗中分配比例比 LN 处理增加 3.6%,穗后 20 d、成熟期 N 素在穗中分配比例分别比 LN 处理下降 3.9%、3.7%。统计分析表明(表 1):农田施用水葫芦对水稻穗后 20 d 的 N 素在穗中分配比例的影响达极显著水平;N 处理对水稻穗

后 20 d 和成熟期 N 素在穗中分配比例的影响达显著水平;水葫芦×N 的互作效应对水稻穗后 20 d N 素在穗中分配比例的影响达极显著水平。

关于 N 素在水稻不同器官中分配比例的研究,已有不少报道.有关农作物秸秆还田对 N 素在水稻不同器官中分配比例的影响,目前为止尚未见报道.本研究表明,农田施用水葫芦对水稻 N 素在茎鞘和叶片中分配比例无明显影响(图 3、4),使 N 素在穗中分配比例明显降低(图 5)。

2.4 农田施用水葫芦对水稻 N 素利用效率的影响

2.4.1 对 N 素干物质生产效率的影响

农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素干物质生产效率的影响如图 6 所示.农田施用水葫芦使水稻够苗期 N 素干物质生产效率比对照增加 0.9%,拔节期、抽穗期、穗后 20 d、成熟期 N 素干物质生产效率分别比对照下降 8.1%、8.6%、10.7%、7.1%;NN 处理使够苗期 N 素干物质生产

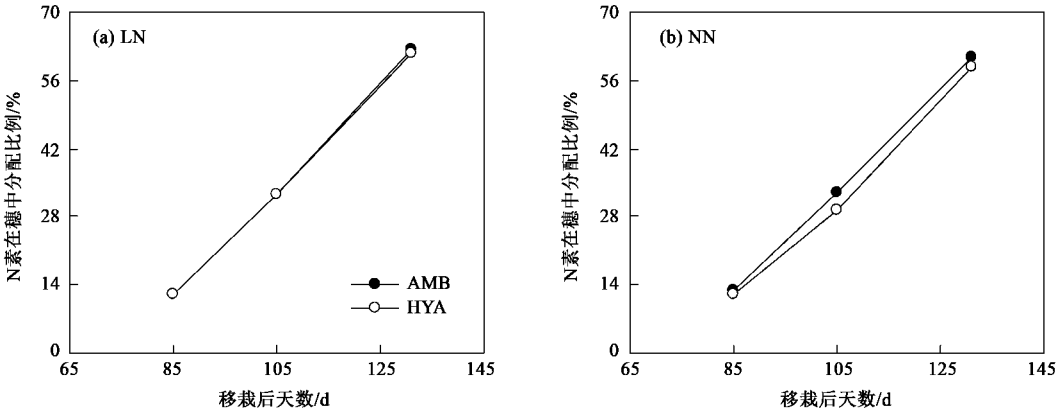


图 5 农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素在稻穗中比例的影响 (2009)

Fig. 5 Effects of hyacinth mulching on N distribution rate in spikes at different growth stages of rice in 2009

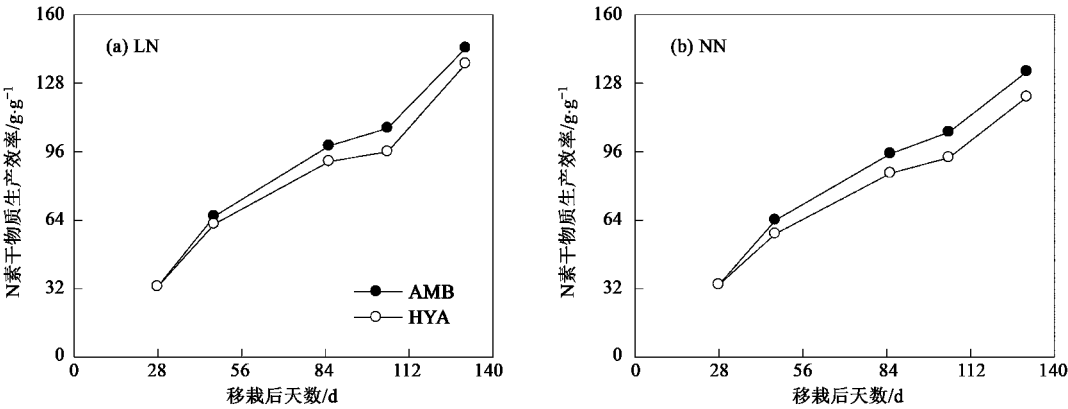


图 6 农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素干物质生产效率的影响 (2009)

Fig.6 Effects of hyacinth mulching on N use efficiency for biomass (NUEp) at different growth stages of rice in 2009

效率比 LN 处理增加 3.1%,拔节期、抽穗期、穗后 20 d、成熟期 N 素干物质生产效率分别比 LN 处理下降 5.2%、4.7%、1.9%、9.5%。统计分析表明(表 1):除够苗期外,农田施用水葫芦对水稻不同生育时期 N 素干物质生产效率的影响均达到极显著水平;N 处理对拔节期和成熟期水稻 N 素干物质生产效率的影响达极显著水平;水葫芦-N 的交互效应对水稻不同生育时期 N 素干物质生产效率均没有显著影响。

2.4.2 对 N 素籽粒生产效率和 N 素收获指数的影响

农田施用水葫芦对水稻 N 素籽粒生产效率和 N 素收获指数的影响如图 7 所示.农田施用水葫芦使水稻 N 素籽粒生产效率比对照下降 7.2%,达极显著水平;NN 处理使水稻 N 素籽粒生产效率比 LN 处理下降 9.8%,达极显著水平.农田施用水葫芦使水稻 N 素收获指数比对照下降 2.2%,差异不显著;

NN 处理使水稻 N 素收获指数比 LN 处理下降 3.7%,达显著水平.说明农田施用水葫芦能够显著降低水稻 N 素籽粒生产效率,对水稻 N 素收获指数无显著影响,增施 N 肥使水稻 N 素籽粒生产效率和收获指数均显著下降.

大量研究表明,水稻品种基因型不同和栽培方式不同等,均会对水稻 N 素利用效率产生影响^[16,17].本研究表明,农田施用水葫芦使水稻不同生育时期单位 N 素干物质生产效率多显著降低(图 6),使水稻单位 N 素籽粒生产效率显著降低[图 7 (a)].增施 N 肥,使水稻单位 N 素干物质生产效率和 N 素籽粒生产效率多明显降低.这一结果说明,与吸收同样多 N 素的对照相比,农田施用水葫芦并没有表现出生物产量和经济产量的优势.因此在农田施用水葫芦的同时,应该适当降低农田 N 肥的施用量,以减小稻田氮损失造成的地下水污染和江(湖)水富营养化等环境问题,提高水稻 N 素利用效

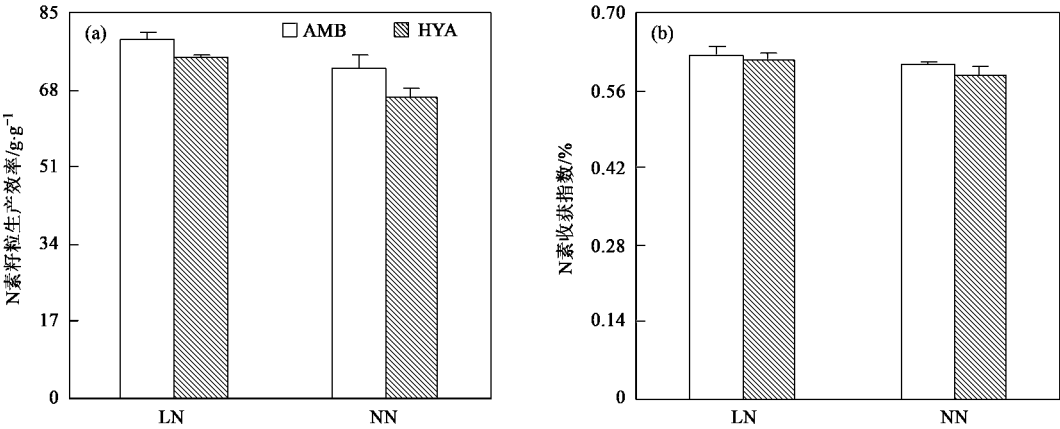


图 7 农田施用水葫芦对水稻 N 素籽粒生产效率和收获指数的影响 (2009)

Fig.7 Effects of hyacinth mulching on N use efficiency for grain yield and N harvest index of rice in 2009

率,提高稻作生产的经济效益与环境效益.

3 结论

农田施用水葫芦使水稻不同生育时期植株含 N 率和吸 N 量显著提高,对水稻 N 素在茎鞘和叶片中分配比例无明显影响,使 N 素在穗中分配比例明显降低,使水稻不同生育时期 N 素干物质生产效率和 N 素籽粒效率多显著降低,但对 N 素收获指数无显著影响. 增施 N 肥,使水稻不同生育时期的植株 N 素含量和吸 N 量多得到显著或极显著的增加,使 N 素干物质生产效率和 N 素籽粒效率多明显下降. 水葫芦-N 对稻株 N 素吸收利用多无显著互作效应. 水葫芦作为有机质农田施用,必将通过自身在土壤中的降解,对稻田耕作层土壤理化性质产生影响. 因此,为了在农田施用水葫芦条件下水稻生产合理肥料运筹,需要深入研究农田施用水葫芦对土壤养分含量影响的趋势. 同时水葫芦作为有机质稻田施用,可能对稻米品质产生积极影响,值得进一步研究.

参考文献:

[1] 郑建初,常志州,陈留根,等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, **3**: 247-250.

[2] 唐静杰,周青. 生态浮床在富营养化水体修复中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2009, **2**: 24-27.

[3] 张秋芳,刘波,官雪芳,等. 水葫芦对氮磷营养的需求及分布规律初探[J]. 中国农学通报, 2007, **23**(5): 387-389.

[4] 黄东风,李清华,陈超. 水葫芦有机肥料的研制与应用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (5): 48-52.

[5] Amanda M N, William J M. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica [J]. Ecological Engineering, 2006,

28(3): 246-257.

[6] 童昌华,杨肖娥,濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(8): 1447-1450.

[7] Polomski R F, Taylor M D, Bielenberg D G, *et al.* Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhouse-based laboratory-scale subsurface constructed wetlands[J]. Water Air and Soil Pollution, 2009, **197**(1-4): 223-232.

[8] 谭承建,董强,王银朝,等. 水葫芦的危害、利用与防除[J]. 动物医学进展, 2005, **26**(3): 55-58.

[9] 盛婧,郑建初,陈留根,等. 水葫芦富集水体养分及其农田施用研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(10): 2119-2123.

[10] Ying J F, Peng S B, Yang G Q, *et al.* Comparison of high-yield rice in a tropical and subtropical environment: I. Determinants of grain and dry matter yields[J]. Field Crops Research, 1998, **57**: 71-84.

[11] 凌启鸿,张洪程,戴其根,等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(12): 2457-2467.

[12] Hocking P J, Meyer C P. Effects of CO₂ enrichment and nitrogen stress on growth [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1991, **18**: 339-356.

[13] Schmitt M R, Ewards G E. Photosynthetic capacity and nitrogen use efficiency of maize, wheat and rice, a comparison between C₃ and C₄ photosynthetic [J]. Journal of Experimental Botany, 1981, **32**: 459.

[14] 王海景,康晓东. 秸秆还田对土壤有机质含量的影响[J]. 山西农业科学, 2009, **37**(10): 42-45, 63.

[15] 申源源,陈宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(19): 291-294.

[16] 宋桂云,徐正进,贺梅,等. 氮肥对水稻氮素吸收及利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (4): 44-48.

[17] 董桂春,王余龙,周娟,等. 不同氮素籽粒生产效率类型粳稻品种氮素分配与运转的差异[J]. 作物学报, 2009, **35**(1): 149-155.