

周志花, 王 斌, 李健陵, 等. 不同施氮下双季稻田白天 CO₂ 交换与叶面积、生物量的相互影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2143–2152.
ZHOU Zhi-hua, WANG Bin, LI Jian-ling, et al. Interrelations of CO₂ exchange in daytime, leaf area, and biomass with different nitrogen fertilizers applied in a double-rice cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2143–2152.

不同施氮下双季稻田白天 CO₂ 交换与 叶面积、生物量的相互影响

周志花¹, 王 斌¹, 李健陵¹, 万运帆^{1*}, 干珠扎布¹, 蔡威威², 苏荣瑞³, 周守华³,
Muhammad Ahmed Waqas¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434025; 3. 湖北省荆州农业气象试验站, 湖北 荆州 434025)

摘 要: 研究缓/控释氮肥、氮肥配施硝化抑制剂和微生物菌剂对稻田生态系统白天 CO₂ 净交换、群体叶面积和生物量的影响及其相互关系, 有助于进一步了解这几类新型氮肥对稻田碳同化的促进作用及增产效果。为此于 2012—2013 年在湖北荆州进行大田试验, 设置了五种氮肥处理: 常规尿素(CK)、树脂包膜控释尿素(CRU)、尿素添加硝化抑制剂氯甲基吡啶(NU)、尿素添加硝化抑制剂二甲吡唑磷酸盐(DMPP)、尿素配施微生物菌剂(EM)。采用静态箱-气相色谱法连续观测双季稻生态系统白天的 CO₂ 净交换通量, 并在各生育期测定水稻群体的叶面积和地上生物量, 分析不同氮肥处理下这些指标的变化。结果表明: 水稻生长季稻田生态系统白天表现为 CO₂ 的净吸收, 净交换通量受气温、降水等气象要素影响较大, 在拔节-抽穗阶段出现较高值。相比普通尿素, 新型氮肥在不同程度上提高了稻田 CO₂ 净交换, 在单个水稻生长季 NU 提高了 13.2%~51.6% 的平均 CO₂ 净吸收通量, 其次为 CRU 提高了 9.8%~34.1%。在各生育期, 新型氮肥对水稻群体叶面积指数和地上生物量表现出更高的促进效果, 其中以 CRU 最为显著, 其最大峰值相比 CK 分别提高了 12.4%~18.6% 和 9.1%~18.8%。通过回归分析发现, 水稻群体叶面积指数与 CO₂ 净吸收通量为线性正相关关系, 地上生物量与 CO₂ 净吸收通量为抛物线型关系, 这在一定程度上说明了水稻群体生长状况与稻田生态系统 CO₂ 同化速率间的关系。包膜控释尿素、添加硝化抑制剂、添加微生物菌剂有助于提高水稻群体叶面积和生物量, 促进稻田生态系统 CO₂ 同化, 其中树脂包膜控释尿素效果最佳。

关键词: 控释尿素; 硝化抑制剂; EM 菌; CO₂ 净交换; 叶面积; 生物量

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)10-2143-10 doi:10.11654/jaes.2017-0390

Interrelations of CO₂ exchange in daytime, leaf area, and biomass with different nitrogen fertilizers applied in a double-rice cropping system

ZHOU Zhi-hua¹, WANG Bin¹, LI Jian-ling¹, WAN Yun-fan^{1*}, Hasbagan Ganjurjav¹, CAI Wei-wei², SU Rong-rui³, ZHOU Shou-hua³,
Muhammad Ahmed Waqas¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 3. Jingzhou Agro-meteorological Trial Station, Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434025, China)

Abstract: Effects of controlled-release urea, nitrification inhibitor, and microbial inoculants on net CO₂ exchange, leaf area development,

收稿日期: 2017-03-17 录用日期: 2017-06-09

作者简介: 周志花(1992—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 从事农业固碳减排研究。E-mail: 13522466374@163.com

* 通信作者: 万运帆 E-mail: wanyunfan@caas.cn

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAC02B06)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAC02B06)

and biomass production in a double-rice cropping system were investigated, for a further understanding of carbon assimilation in rice paddies with the application of these new nitrogen fertilizers. Five different fertilizer treatments were set in situ to conduct a 2-year (2012–2013) field experiment in Jingzhou, Hubei Province, i.e. CK:conventional urea, CRU:polymer-coated controlled-release urea, NU:urea containing nitrapyrin, DMPP:urea containing 3,4-dimethylpyrazole phosphate, and EM:urea combined with effective microorganism inocula. Static chamber gas chromatography was employed to monitor CO_2 exchange fluxes in rice paddies in the daytime. Leaf area index and aboveground biomass were also measured during different rice growing stages. The results showed that CO_2 was assimilated from air to plants in the daytime during the rice growing season and net CO_2 exchange fluxes varied with the change of ambient temperature and precipitation, and attained a peak value at the jointing and heading stages. The application of new nitrogen fertilizers resulted in higher CO_2 assimilation rates, of which NU caused an increase of 13.2%~51.6%, followed by CRU at 9.8%~4.1%, each compared to CK (on average) during each rice season. Promotion of leaf area and aboveground biomass were also investigated in different growing stages, and CRU caused the highest increase for the peak values, by 12.4%~18.6% and 9.1%~18.8% respectively. Through regression analysis, a linear positive relationship was found between leaf area and CO_2 assimilation rate, and a parabolic relationship was found between aboveground biomass and CO_2 assimilation rate. Thus, the application of controlled-release urea, nitrification inhibitor, and microorganisms all contribute to the increase of leaf area and biomass and promote CO_2 assimilation in rice paddy ecosystems; controlled-release urea had the best effects.

Keywords: controlled-release urea; nitrification inhibitor; effective microorganisms; net CO_2 exchange; leaf area; biomass

水稻是我国主要的粮食作物,是全球半数以上人口赖以生存的基本食粮^[1]。氮素是影响水稻生长发育的关键营养元素,合理的氮素供应能促进水稻叶片的光合作用,提高叶面积指数(LAI, leaf area index)和干物质积累量,进而实现稳产增产^[2]。相比于传统尿素氮肥,缓/控释氮肥^[3-7]、添加硝化抑制剂^[8-10]以及微生物菌剂^[11-12]等新型氮肥具有长肥效、高养分利用率和低环境污染等特征,为合理的氮素运筹提供了新的解决方案。光照条件下稻田生态系统中土壤-植株的 CO_2 净通量反映了 CO_2 的净同化速率,是碳排放(土壤呼吸、植物呼吸)与碳固定(光合作用)之间综合作用结果^[13],除受环境条件(温度、阴雨等)影响较大外,主要由作物生长状况和光合强度决定,而氮肥的施用又直接影响这两个方面。关于缓/控释氮肥及添加抑制剂菌剂氮肥对水稻的稳产增产效果,前人已做过不少研究^[3-12],但其对稻田生态系统的 CO_2 净交换变化及其与植株群体的生长状况交互作用的影响,还有待进一步探讨。另外,氮肥对稻田生态系统碳固定的影响,可明显体现在与大气的 CO_2 净交换通量变化,该方面的研究有助于更好地了解稻田的碳同化特征以及新型氮肥增产机理。

本研究采用透明静态箱法在连续两年4个水稻生长季对稻田生态系统白天的 CO_2 净交换量进行原位监测,施用4种代表性的新型氮肥,同步测定水稻群体地上生物量和叶面积指数,阐明不同氮肥施用下稻田生态系统的碳通量特征及与植物生长状态的关系,评价其对稻田碳同化的促进作用。

1 材料与方法

1.1 试验设计

大田试验于2012—2013年在湖北省荆州市农业气象站内(30°21'N, 112°09'E)进行。该地区为江汉平原代表站点,属于亚热带季风气候区,光热丰富,降雨集中于4—10月。供试土壤为内陆河湖交替沉积形成的水稻土,质地为粉质中壤土,保水保肥能力良好。土壤基础理化性质为:容重 $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pH(H_2O) 7.8, 有机碳 $15.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $56.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $9.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验为单因素随机区组设计,设5个不同的氮肥处理,每个处理3次重复,共15个小区,小区为 $6 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 。处理分别为,CK:常规尿素(N 46%),作为对照处理;CRU:树脂包膜控释尿素(N 42%),“S”型曲线释放,控释期为90 d(山东金正大生态工程股份有限公司提供);NU:常规尿素添加质量分数0.5%的硝化抑制剂氯甲基吡啶(N 46%),由上海碧晶农业科技有限公司提供;DMPP:常规尿素添加质量分数1%的硝化抑制剂3,4-二甲基 DMPP 吡唑磷酸盐;EM:为尿素配施与200倍等重的EM菌液(有效微生物菌 $2 \times 10^9 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$),主要包括酵母菌群、乳酸菌群、光合菌群、芽孢杆菌群和放线菌群等),配制方法为菌剂:红糖:水=1:1:200培养48 h。

每季水稻施肥分为三次,施肥方式为撒施,基肥在水稻移栽前施用,追肥分别在分蘖期和抽穗期施用,具体施肥方案如表1所示。总施氮量早稻为165

kg N·hm⁻²,晚稻为 180 kg N·hm⁻²,各阶段施氮量根据肥料种类和特性而定,为当地推荐施肥方式。由于包膜控释肥养分释放周期长,只采用 1 次追施。所有处理磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),用量均为 60 kg P₂O₅·hm⁻²,作为基肥全部施入;钾肥为氯化钾(K₂O 60%),用量均为 90 kg K₂O·hm⁻²。2012 年早稻移栽和收割日期分别为 5 月 3 日和 7 月 17 日,晚稻为 7 月 22 日和 10 月 15 日。2013 年早稻移栽和收割日期分别为 4 月 25 日和 7 月 15 日,晚稻为 7 月 18 日和 10 月 13 日。早稻品种为两优 287,晚稻为湘丰优 9 号,皆为当地主推品种,移栽密度为 21 万穴·hm⁻²。各个小区由田埂和薄膜隔离,保证互不干扰,依照当地的常规习惯进行水肥管理和病虫害防治。

1.2 采样及测定方法

水稻生长季内采用静态箱-气相色谱法监测稻田 CO₂ 净交换量,静态箱为自动采气的三开式透明箱(70 cm×70 cm×150 cm),主体材料为透明聚碳酸酯板和不锈钢合金^[14]。箱体插入稻田 15 cm,覆盖 9 穴正常生长水稻,不采气时呈自然开放状态,对箱内植株影响很小。为了保证试验的严谨性,我们根据箱内面积按比例算出施肥量精准施入。

CO₂ 净交换量监测频率为每日 1 次,上午 9:00—

11:00 间^[15]由系统自动控制每个小区静态箱关闭 30 min,分别在第 0、7、14、21、28 min 采集气样,每次采样时均记录箱内空气温度。由于仪器故障维护等客观原因导致系统不能工作,而造成数据出现缺失值的现象少量存在,但最大缺失间隔不超过 2 d。采集的气样于 24 h 内回实验室利用气相色谱仪(Agilent 7890A)测定 CO₂ 浓度,线性拟合同一处理 5 个气样浓度与时间的变化斜率,根据静态箱法通量计算公式求出 CO₂ 净交换量^[16]。气相色谱仪工作条件为 Wang 等文献所述^[17],CO₂ 通过镍转化炉还原为 CH₄,然后由氢火焰离子检测器测出浓度。在白天采用静态箱法计算出的 CO₂ 净交换量,只是反映光照条件下稻田生态系统的 CO₂ 净通量或净吸收速率,不能归纳为全天的 CO₂ 平均交换量。

在水稻的各个生育期(返青、分蘖、拔节、抽穗、乳熟、成熟),每个处理根据平均茎蘖数采集 3 穴水稻植株,利用长宽校正法测定每株叶面积,并根据单位面积水稻株数计算叶面积指数^[18]。测完叶面积后取植株地上部分,于 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,测定生物量。具体采样日期如表 2 所示。论文中逐日气象数据来自于距离试验地 50 m 处的荆州市国家基本气象站。

表 1 双季稻肥料施用方案
Table 1 Fertilization scheme in double rice cropping system(kg N·hm⁻²)

处理 Treatment		基肥 Basic fertilizer			分蘖肥 Tiller fertilizer			穗肥 Panicle fertilizer		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
早稻 Early rice	CK	90	60	30	30	0	15	45	0	45
	CRU	120	60	30	45	0	15	0	0	45
	NU	90	60	30	30	0	15	45	0	45
	DMPP	90	60	30	30	0	15	45	0	45
	EM	90	60	30	30	0	15	45	0	45
晚稻 Late rice	CK	90	60	30	45	0	15	45	0	45
	CRU	120	60	30	60	0	15	0	0	45
	NU	90	60	30	45	0	15	45	0	45
	DMPP	90	60	30	45	0	15	45	0	45
	EM	90	60	30	45	0	15	45	0	45

表 2 双季稻各生育期采样时间
Table 2 Sampling date of each growth period in double rice cropping system

年份	生长季 Growing season	返青 Green date	分蘖 Tillering date	拔节 Jointing date	抽穗 Heading date	乳熟 Milky date	成熟 Mature date
2012	早稻 Early rice	5/6	5/18	6/6	6/19	6/29	7/15
	晚稻 Late rice	7/28	8/9	8/21	9/2	9/20	10/15
2013	早稻 Early rice	5/1	5/13	6/2	6/18	6/28	7/12
	晚稻 Late rice	7/23	8/1	8/20	9/7	9/19	10/12

1.3 数据处理

CO₂ 交换通量计算公式^[14]为:

$$F = \rho \cdot (V/A) \cdot (dc/dt) \cdot 273 / (273 + T)$$

式中: F 为交换通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为 CO₂ 气体标准状态下的密度; V 为采样箱有效体积, m^3 ; A 为采样箱覆盖土壤面积, m^2 ; dc/dt 为采样过程中静态箱内 CO₂ 浓度变化速率, $\text{mL} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为采样箱内平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

试验数据均为同一处理的平均值,误差限为标准误,回归分析、方差分析和多重比较采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件完成,多重比较均为 LSD 分级法。

2 结果与分析

2.1 双季稻生态系统白天 CO₂ 净交换的变化特征

在水稻生长季内,稻田生态系统在白天表现为 CO₂ 净吸收。不同氮素处理下 2012—2013 年稻田 CO₂ 净交换及对应的气温降水要素逐日变化如图 1 所示, CO₂ 的通量值波动范围为 $-20.2 \sim -1573.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在移栽后随着植株生长,稻田 CO₂ 净交换逐渐增大,很快达到平稳,其中在拔节—抽穗阶段出现较高值(绝对值,下同),且随着气温、降水等气象条件波动,在生长后期(成熟)随着叶片的老化,CO₂ 净交换有所降低。温度的峰值与 CO₂ 通量的较高值相对应,降水量的高值与 CO₂ 通量的较低值相对应,即在晴朗且温度较高的天气,稻田生态系统 CO₂ 净吸收速率高,在阴雨天气由于光照较低不利于光合作用,CO₂ 净吸收速率较低。在晚稻的乳熟至成熟时期,CO₂ 净交换量骤降,主要是这一时期气温明显下降和叶片逐渐老化所导致。气象要素特别是光照和温度条件是影响稻田生态系统逐日 CO₂ 交换的重要因素。

对于不同氮素处理,常规尿素 CK 的 CO₂ 净吸收

通量最低,控释尿素、添加硝化抑制剂和配施 EM 菌剂处理均表现出更高的通量值(图 1),说明新型氮肥的施入促进了水稻的 CO₂ 同化作用。在四个水稻生长季,相比于 CK,NU 在白天的平均 CO₂ 吸收通量提高了 13.2%~51.6%,增长率最为明显,其余各处理提高了 1.2%~34.1%(表 3)。由于生态系统的 CO₂ 交换受监测时的环境因素影响很大,容易出现大的波动,除了 2013 年晚稻以外,不同处理间的 CO₂ 净吸收通量在统计上不存在显著差异。

2.2 不同氮肥处理对水稻叶面积指数(LAI)的影响

叶面积指数 LAI 是水稻群体生长状况的一个重要指标,影响群体潜在的光合效率。从图 2 可以看出, LAI 值随着水稻的生长逐渐增大,返青到拔节期间增加迅速,在抽穗期达到顶峰,而后趋于平稳,且随着植株老化叶片掉落略有所下降。四个水稻生长季内,早稻 LAI 值变化范围为 0.23~3.77,晚稻为 0.24~5.84。新型氮肥对提高群体叶面积指数表现出更为高效的促进作用,在各生育期其 LAI 值均在不同程度上高于 CK,其中 CRU 效果最为显著,其最大峰值相比 CK 提高了 12.4%~18.6%,而后依次为 NU(9.9%~18.1%)、DMPP(6.9%~11.6%)和 EM(1.1%~9.9%)。从晚稻拔节到成熟,CRU 的 LAI 值均显著高于 CK 处理($P < 0.05$),进一步说明了其肥效对于叶面积的促进作用更为持久和高效。

2.3 不同氮肥处理对水稻地上生物量的影响

从图 3 可以看出,水稻的地上部分生物量在分蘖后开始迅速增加,在乳熟后增长平缓。早稻生物量变化范围为 $42.7 \sim 1484 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,晚稻为 $76 \sim 1800.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在水稻生长初期,各处理对水稻生物量的变化影响不大,返青期和分蘖期生物量均不存在显著差异(2013 年晚稻除外)。在之后的生育期,控释尿素、添加硝化

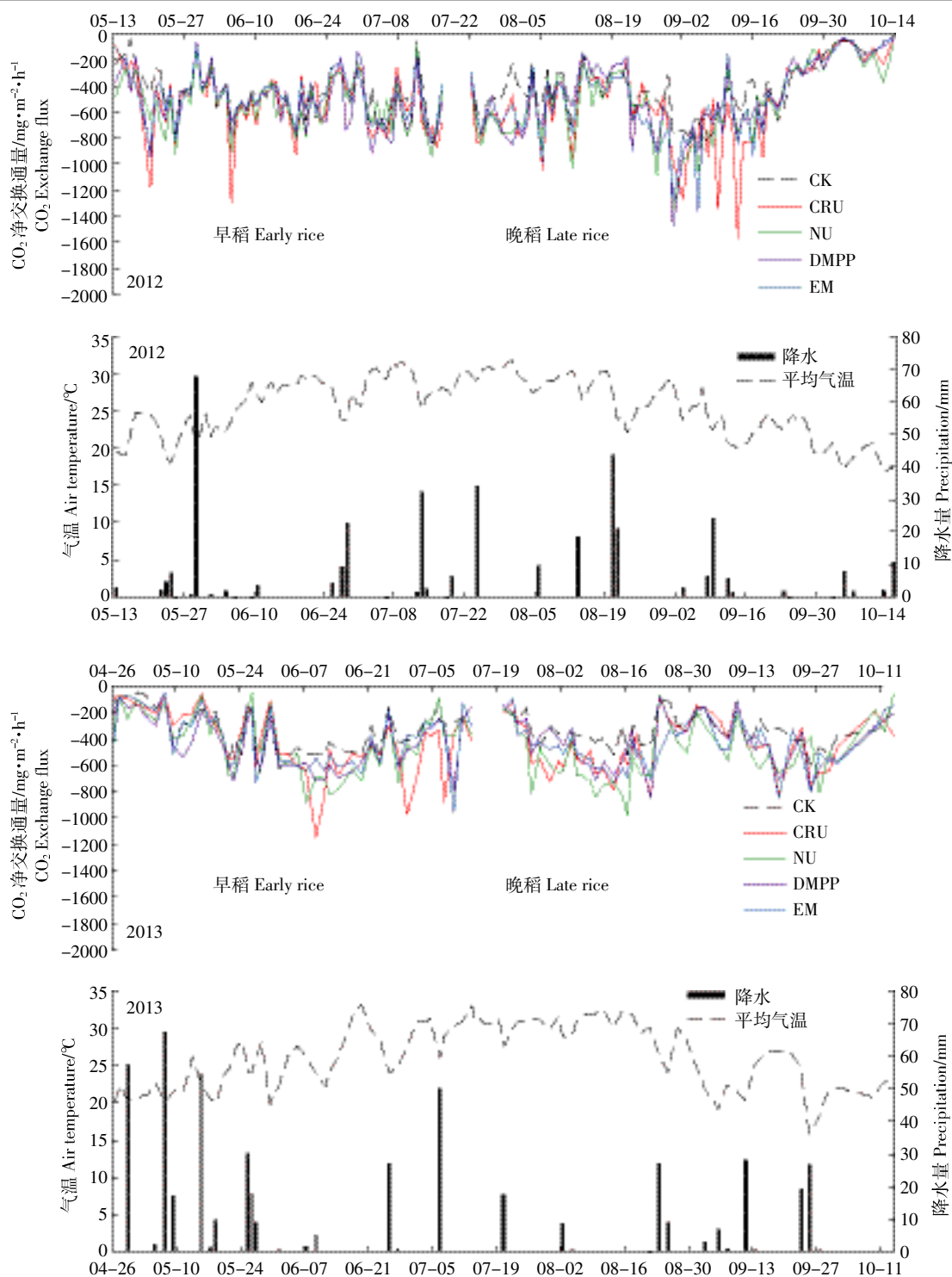
表 3 不同氮素处理下双季稻田平均白天 CO₂ 净交换通量

Table 3 Average CO₂ exchange fluxes in daytime during double rice season under different nitrogen fertilizations

处理 Treatment	2012 年早稻 Early rice in 2012		2012 年晚稻 Late rice in 2012		2013 年早稻 Early rice in 2013		2013 年晚稻 Late rice in 2013	
	CO ₂ 净交换通量 CO ₂ exchange flux/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	增加百分比 Increase rate/%	CO ₂ 净交换通量 CO ₂ exchange flux/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	增加百分比 Increase rate/%	CO ₂ 净交换通量 CO ₂ exchange flux/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	增加百分比 Increase rate/%	CO ₂ 净交换通量 CO ₂ exchange flux/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	增加百分比 Increase rate/%
CK	-461.3±26.3a	—	-425.9±17.4a	—	-339.0±12.4a	—	-335.9±28.9a	—
CRU	-524.4±64.9a	9.8	-544.7±63.3a	27.9	-406.5±44.6a	19.9	-450.5±56.1bc	34.1
NU	-540.5±63.0a	13.2	-526.0±68.7a	23.5	-405.7±75.4a	19.7	-450.5±52.9c	51.6
DMPP	-535.0±81.7a	12.0	-496.4±65.0a	16.6	-410.7±46.2a	21.2	-509.3±60.8ab	22.4
EM	-481.9±30.1a	1.2	-524.2±67.4a	23.1	-391.7±64.2a	15.6	-446.6±73.7bc	33.0

注:不同小写字母表示肥料类型间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference among fertilizations at $P < 0.05$. The same below.

图 1 2012—2013 年降水、气温及稻田白天 CO₂ 净交换动态变化Figure 1 Dynamic changes of precipitation, air temperature and CO₂ exchange in daytime in 2012 and 2013

抑制剂和配施 EM 菌剂处理在不同程度上促进了地上生物量的增长,其中 CRU 的效果最优,相比于 CK,其最大生物量增长幅度高达 9.1%~18.8%,且在多个生育期达到显著性差异($P<0.05$);其次为 NU,增幅为 6.6%~18.5%,DMPP 和 EM 居末。

2.4 CO₂ 净交换、叶面积指数、地上生物量的相互关系

不考虑阴雨天气的前提下,对水稻各生育期的 LAI、地上生物量以及对应取样日期的白天 CO₂ 净交换通量进行两两回归分析(图 4、图 5、图 6),可看出各要素之间均存在显著的相关关系。早稻和晚稻各处

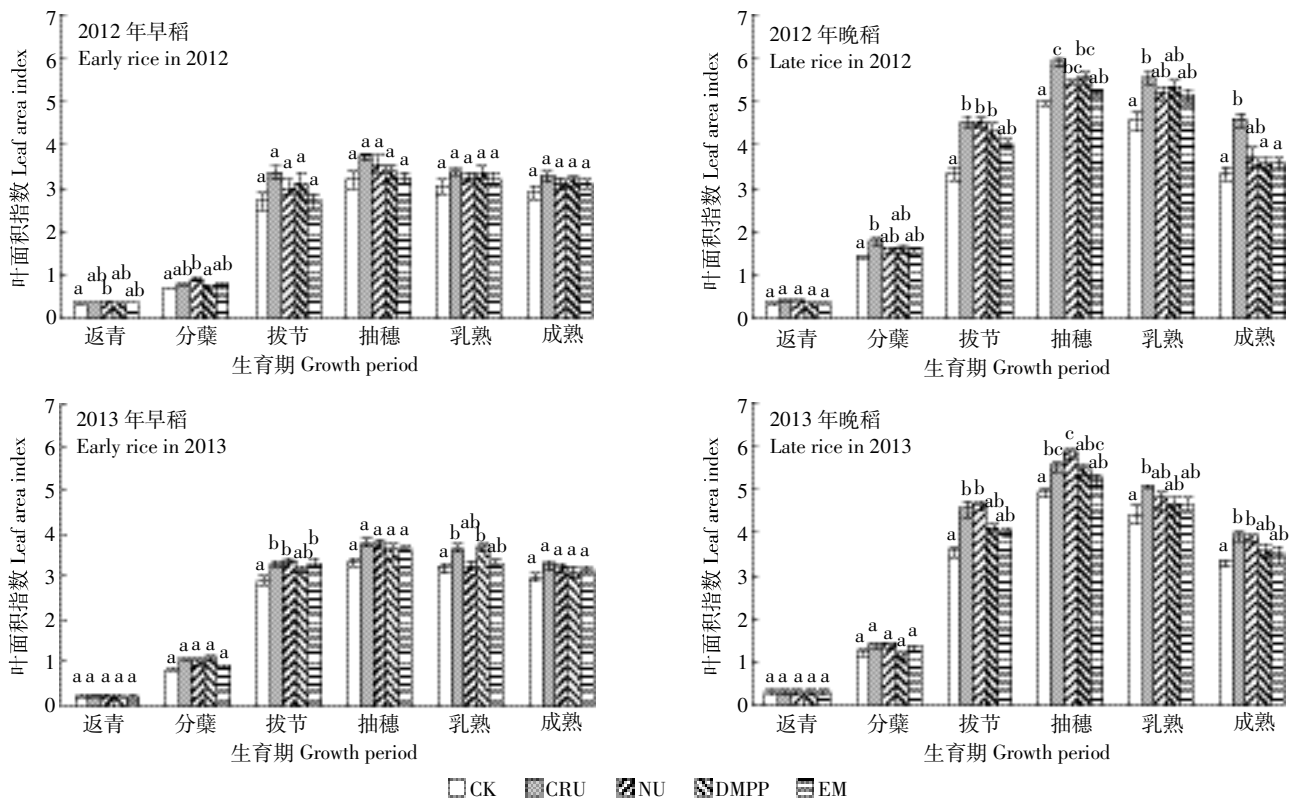


图 2 不同氮肥处理下双季稻叶面积指数变化

Figure 2 Dynamics of LAI in double rice cropping system under different nitrogen fertilizations

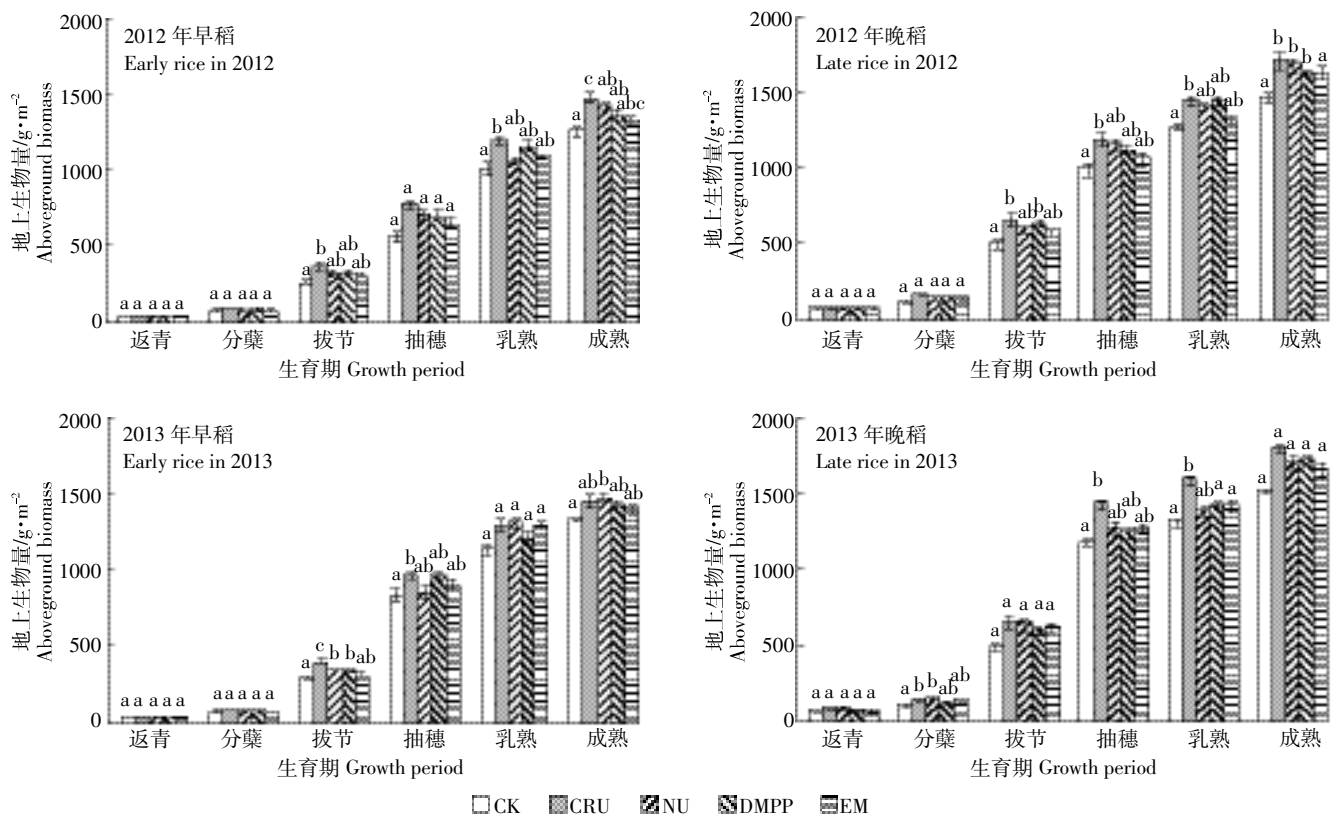


图 3 不同氮肥处理下双季稻地上生物量的变化

Figure 3 Dynamics of aboveground biomass in double rice cropping system under different nitrogen fertilizations

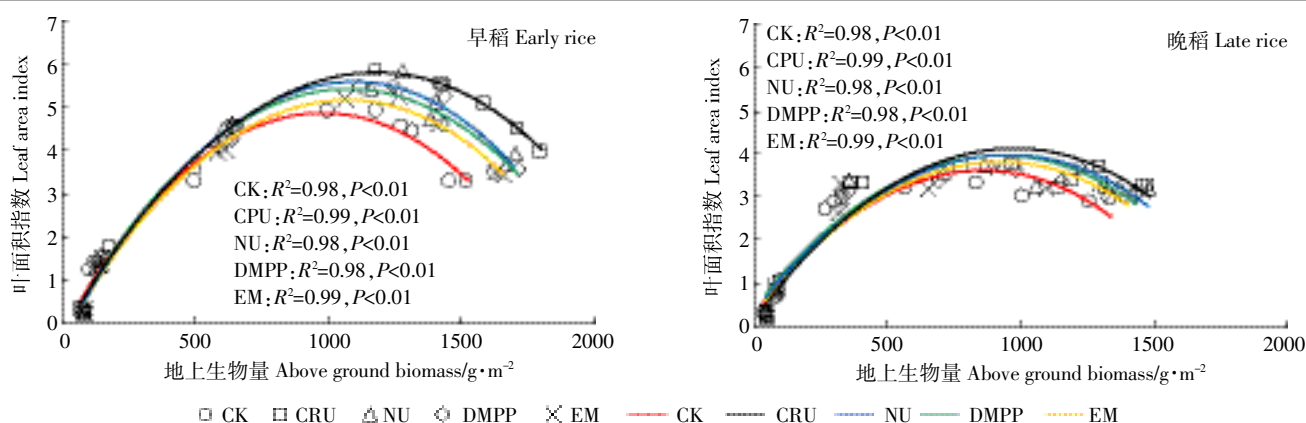
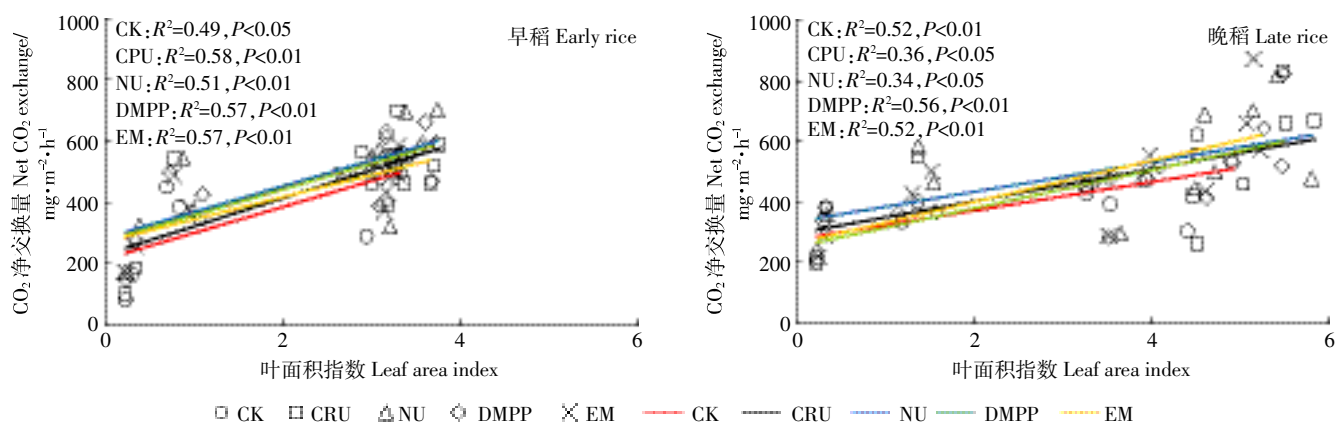
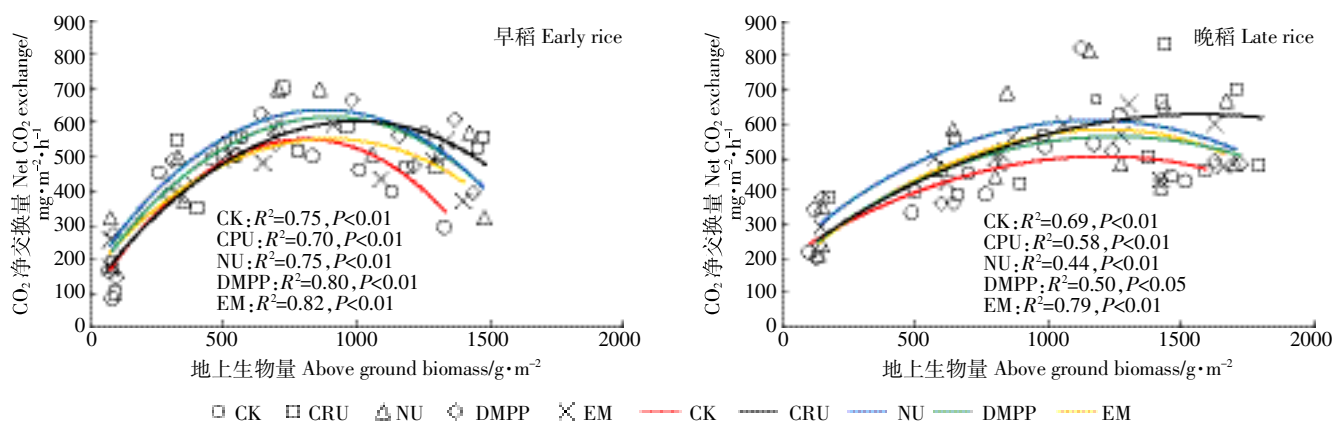


图 4 双季稻叶面积指数与地上生物量的相互关系

Figure 4 The relationship between aboveground biomass and LAI in double rice cropping system

图 5 双季稻叶面积指数与白天 CO₂ 净交换通量的相互关系Figure 5 The relationship between leaf area index and CO₂ exchange in daytime in double rice cropping system图 6 双季稻地上生物量与白天 CO₂ 净交换量的相互关系Figure 6 The relationship between aboveground biomass and CO₂ exchange in daytime in double rice cropping system

理 LAI 与地上生物量之间表现为抛物线型关系 ($P<0.01$), 相关系数高达 0.95~0.99。水稻生长过程中干物质不断积累, 叶片生长迅速, 此时生物量与 LAI 值呈正相关增加, 在生长后期随着叶片衰老脱落, LAI 值

减小, 但水稻生物量继续增加, 因此抛物线模型很好地阐释了这一现象。早晚和晚稻各处理 LAI 与 CO₂ 净交换通量表现为显著的线性正相关关系 ($P<0.05$), 相关系数为 0.58~0.76, 叶面积越大, 同等条件下可捕获

的光能越多,光合速率越强,则 CO_2 净同化速率越高。水稻地上生物量与 CO_2 净交换通量(除晚稻 NU 处理外)也表现为显著抛物线关系($P<0.05$),相关系数为 0.58~0.91,随着生物量的增加白天 CO_2 净交换呈先升高后降低的趋势,在水稻的生长后期随着叶片老化,光合速率下降, CO_2 净吸收通量也相应减小。因此,LAI 和地上生物量与 CO_2 净交换通量具有较好的拟合性,LAI 变化能解释 34%~58%的 CO_2 通量变化,生物量变化能解释 44%~82%的 CO_2 通量变化。

3 讨论

3.1 静态箱法测定生态系统 CO_2 净交换的误差分析

陆地生态系统碳通量观测以涡度相关法和静态箱-气相色谱法较为常见^[15-16]。涡度相关法不破坏植株群落,响应速度快且能连续测定地气系统 CO_2 净交换量,但造价昂贵,且要求适宜的湍流交换条件和足够面积的均匀下垫面,这不适用于小尺度的农田观测。对于多个处理的稻田小区试验,静态箱-气相色谱法更为常用,其操作简单、成本低廉以及灵敏度高,被广泛用于我国典型农田碳通量及痕量气体的观测^[19]。但静态箱的封闭效应会对自然环境产生扰动,对温度、湿度以及气体组成等产生干扰,土壤和植物的呼吸、叶片的光合都将受到影响,在一定程度上改变箱内的气体交换过程^[20]。邹建文等^[16]基于静态暗箱-气相色谱法设计了一套模型用于估算逐日稻田生态系统与大气的 CO_2 净交换,其季节变化趋势为水稻在移栽三周后表现为 CO_2 净固定,最高值出现在孕穗抽穗期,之后逐步下降。本试验中观测到白天 CO_2 净交换通量也呈现类似趋势。此外,本试验采用的透明静态箱固定在稻田,采样方式为自动抽取气体,消除了搬箱和覆盖过程中对稻田环境的扰动,但在闭箱取样过程中温度上升明显,不可避免存在系统误差。植物的 CO_2 净交换通量受气象要素特别是光照影响极大^[21],由于试验处理为随机区组排列,不同重复间取样存在间隔,采样时光照强度和气温存在变化,导致观测结果的组内误差较大。郑泽梅等^[15]对比分析了静态箱-气相色谱法和涡度相关法在不同生态系统碳通量观测中的差异,指出前者观测的日平均通量普遍大于后者,但静态箱法能较好区分白天碳通量组分。本试验由于未在夜间或暗箱条件下观测稻田的 CO_2 净呼吸,得出的通量主要反映了白天光照条件下稻田生态系统的 CO_2 净同化速率,不同于涡度相关法计算出的全

天 CO_2 净交换量。孙小祥等^[21]采用涡度相关法测定了长三角地区水稻生态系统的碳交换,水稻生长季日均 CO_2 净交换通量约为 $330 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,明显低于本研究中箱法所测出的平均值(表 3),主要原因在于监测方法的差异。

3.2 新型氮肥对水稻碳同化的促进效果

树脂包膜控释尿素能根据作物需肥特征缓慢释放氮素^[22],可为作物整个生育期提供充足氮素含量和适宜的氮素浓度。硝化抑制剂能调控硝化作用进而减少氮素的损失^[23],EM 菌剂含有多种有益微生物促进植株生长^[24],比普通尿素具有更好的肥效。在本研究中,施用上述肥料后水稻群体具有更高的叶面积指数和生物量积累,在各生育阶段分别提高了 12.4%~18.6%和 9.1%~18.8%,其中以包膜控释尿素效果最为显著和稳定。在本试验的另一项研究中,施用上述氮肥能显著提高水稻的氮素利用效率,并促进籽粒产量增长最高达 20%^[3]。前人的大多数研究也证实了新型氮肥在大田试验中的增产增效作用^[5-12,25-28]。

干物质的积累和产量的提高与作物的光合作用关系密切,而光合强度直接体现为叶片尺度上的 CO_2 净交换通量^[29]。在稻田生态系统中,氮素的施入对植株和土壤都将产生影响,探究光照条件下稻田 CO_2 净吸收速率有助于从碳同化的角度解释新型氮肥的增产效果。本试验中,虽然水稻生长期间的环境气象要素对稻田 CO_2 净交换产生了较大影响,但新型氮肥不同程度地提高了 CO_2 净吸收速率(表 3),即促进了稻田生态系统的碳固定。通过回归分析,我们发现水稻群体的叶面积与 CO_2 净吸收通量呈显著的线性正相关,新型氮肥促进了群体叶面积的增长,进而提高了碳同化,特别是在晚稻的拟合直线中,新型氮肥具有更高的斜率(图 5),反映出其肥效对 CO_2 同化速率具有更强的促进效果。水稻群体地上生物量与 CO_2 净吸收通量呈显著的抛物线型关系,在生长中前期,营养供应充足,叶面积增长迅速,群体光合强度逐步增加,干物质的积累和 CO_2 净吸收呈正相关;在生长后期由于叶片老化枯萎,光合能力下降,同时植株脱落物增多加剧土壤呼吸,导致 CO_2 净吸收有所下降,但生物量仍在积累,二者表现出负相关。相比普通尿素,施用新型氮肥后水稻群体地上生物量和白天 CO_2 净吸收增长显著,高的碳同化速率促进了生物量积累,高的生物量也提高了碳同化速率,二者为一个促进循环。而在成熟期,虽然 CO_2 净吸收相比抽穗期有所降低,但新型氮肥的抛物线回落趋势低于普通尿素(图 6),

表明其叶片老化速度低于尿素,在后期仍具有较好的氮素营养和较强的光合能力。新型氮肥处理能够提高水稻生育中后期叶绿素含量,进而延缓水稻后期叶片衰老,在前人的研究中均观测到这一现象^[30-31],也说明其肥效作用的长效性。此外,施用新型氮素会对土壤的生物活性产生影响,研究表明相比于普通尿素,施用控释尿素显著促进了脲酶等土壤酶活性^[32],土壤全氮、碱解氮含量更高。这有利于水稻氮素利用率的提高,对水稻叶片净光合速率也起到了促进作用^[30,32]。而叶面积的增长,进一步提高了水稻群体光合作用的固碳效果,本试验中观测到更高的CO₂净吸收通量也证实了这一点。DMPP对氨氧化细菌的活性有抑制作用^[8,33],从而抑制铵态氮在微生物的作用下被氧化为硝态氮,维持了土壤中的氮素以铵态氮的形态存在,相较于普通尿素可以增加作物氮素的吸收与利用,促进作物光合作用,提高干物质的积累。有效微生物菌剂的施用能提高土壤微生物的多样性和活性,更快地分解土壤有机质释放养分^[11,24],虽然有利于作物生长,但也加剧了土壤的呼吸,因此我们观测到的CO₂净吸收通量低于控释尿素或抑制剂处理。

4 结论

(1)相比普通尿素,树脂包膜控释尿素、尿素添加硝化抑制剂和尿素配施菌剂能增加双季稻群体叶面积和地上生物量,提高白天稻田生态系统CO₂净吸收通量,对于稻田碳同化具有积极作用,其中以树脂包膜控释尿素的效果最为显著和稳定。

(2)水稻群体叶面积指数与CO₂净吸收通量表现为正相关的线性模型,地上生物量与CO₂净吸收通量表现为抛物线模型,在一定程度上阐释了水稻群体生长状况与稻田生态系统CO₂同化速率间的关系。

参考文献:

- [1] 方福平,程式华.论中国水稻生产能力[J].中国水稻科学,2009,23(6):559-566.
FANG Fu-ping, CHENG Shi-hua. Rice production capacity in China [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(6):559-566.
- [2] Mae T. Physiological nitrogen efficiency in rice; Nitrogen utilization, photosynthesis, and yield potential[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(2):201-210.
- [3] 王 斌,万运帆,郭 晨,等.控释尿素、稳定性尿素和配施菌剂尿素提高双季稻产量和氮素利用率的效应比较[J].植物营养与肥料学报,2015(5):1104-1112.
WANG Bin, WAN Yun-fan, GUO Chen, et al. A comparison of the effects of controlled release urea, stable urea and microorganisms increas-
- ing double rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015(5):1104-1112.
- [4] 同 湘,金继运,何 萍,等.提高肥料利用率技术研究进展[J].中国农业科学,2008,41(2):450-459.
YAN Xiang, JIN Ji-yun, HE Ping, et al. Advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2):450-459.
- [5] 李文军,夏永秋,杨晓云,等.施氮和肥料添加剂对水稻产量、氮素吸收转运及利用的影响[J].应用生态学报,2011,22(9):2331-2336.
LI Wen-jun, XIA Yong-qiu, YANG Xiao-yun, et al. Effects of applying nitrogen fertilizer and fertilizer additive on rice yield and rice plant nitrogen uptake, translocation, and utilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9):2331-2336.
- [6] 陈建生,徐培智,唐拴虎,等.一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果[J].应用生态学报,2005,16(10):1868-1871.
CHEN Jian-sheng, XU Pei-zhi, TANG Shuan-hu, et al. Nutrient use efficiency and yield-increasing effect of single basal application of rice-specific controlled release fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10):1868-1871.
- [7] 宋付朋,张 民,史衍玺,等.控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应[J].土壤学报,2005,42(4):619-627.
SONG Fu-peng, ZHANG Min, SHI Yan-xi, et al. Releasing characteristics of controlled-release nitrogen fertilizer and its effects on rice yield [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4):619-627.
- [8] 俞巧钢,殷建祯,马军伟,等.硝化抑制剂DMPP应用研究进展及其影响因素[J].农业环境科学学报,2014,33(6):1057-1066.
YU Qiao-gang, YIN Jian-zhen, MA Jun-wei, et al. Effects of nitrification inhibitor DMPP application in agricultural ecosystems and their influencing factors: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6):1057-1066.
- [9] 周 卉,田光明,李 华,等.DMPP减少稻田土壤氮素损失的研究进展[J].土壤,2013,45(6):964-969.
ZHOU Hui, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Research progress of DMPP in reducing nitrogen losses from paddy fields[J]. *Soils*, 2013, 45(6):964-969.
- [10] 张苗苗,沈菊培,贺纪正,等.硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2077-2083.
ZHANG Miao-miao, SHEN Ju-pei, HE Ji-zheng, et al. Microbial mechanisms of nitrification inhibitors and their application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2077-2083.
- [11] Higa T, Parr J F. Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment[M]. Atami, Japan: International Nature Farming Research Center, 1994.
- [12] 陈惠哲,朱德峰,林贤青,等.微生物肥对水稻产量及氮肥利用的影响[J].核农学报,2010,24(5):1051-1055.
CHEN Hui-zhe, ZHU De-feng, LIN Xian-qing, et al. Effect of microbial fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in rice[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2010, 24(5):1051-1055.
- [13] 曹明奎,李克让.陆地生态系统与气候相互作用的研究进展[J].地球科学进展,2000,15(4):446-452.
CAO Ming-kui, LI Ke-rang. Perspective on terrestrial ecosystem-climate interaction[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(4):446-452.
- [14] 王 斌,李玉娥,万运帆,等.控释肥和添加剂对双季稻温室气体排

- 放影响和减排评价[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 314-323.
- WANG Bin, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gas-emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 314-323.
- [15] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 290-298.
- ZHENG Ze-mei, YU Gui-rui, SUN Xiao-min, et al. Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 290-298.
- [16] 邹建文, 黄耀, 郑循华, 等. 基于静态暗箱法的陆地生态系统-大气 CO₂ 净交换估算[J]. 科学通报, 2004, 49(3): 258-264.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Estimation of net CO₂ exchange based on static chamber-gas chromatography method in terrestrial ecosystem[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(3): 258-264.
- [17] WANG Bin, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 215: 100-109.
- [18] 陶洪斌, 林杉. 打孔称重法与复印称重法和长宽校正法测定水稻叶面积的方法比较[J]. 植物生理学报, 2006, 42(3): 496-498.
- TAO Hong-bin, LIN Shan. Comparison on disc method with copy method and length-width method for measuring leaf area of rice[J]. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(3): 496-498.
- [19] 杜睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 箱法在草地温室气体通量野外实验观测中的应用研究[J]. 大气科学, 2001, 25(1): 61-70.
- DU Rui, WANG Geng-chen, LÜ Da-ren, et al. A study of chamber method for in-site measurements of greenhouse gas emissions from grassland[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 25(1): 61-70.
- [20] Denmead O T, Raupach M R. Methods for measuring atmospheric gas transport in agricultural and forest systems[M]. Asa Special Publication, 1993.
- [21] 孙小祥, 常志州, 杨桂山, 等. 长三角地区稻麦轮作生态系统净碳交换及其环境影响因子[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 803-811.
- SUN Xiao-xiang, CHANG Zhi-zhou, YANG Gui-shan, et al. Characteristics of net ecosystem exchange and environmental factors of rice-wheat rotation system in the Yangtze River Delta of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 803-811.
- [22] Shoji S, Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 39(2): 147-152.
- [23] Zerulla W, Barth T, Dressel J, et al. 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP): A new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(2): 79-84.
- [24] Higa T, Wididana G N. The concept and theories of effective microorganisms[C]//Proceedings of the first international conference on Kyusei nature farming. US Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 1991: 118-124.
- [25] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 等. 实地氮肥管理对寒地水稻干物质积累和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2286-2293.
- PENG Xian-long, LIU Yuan-ying, LUO Sheng-guo, et al. Effects of the site-specific nitrogen management on yield and dry matter accumulation of rice in cold areas of Northeastern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(11): 2286-2293.
- [26] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 307-316.
- XU Xian-ju, MA Hong-bo, NING Yun-wang, et al. Effects of slow-released nitrogen fertilizers with different application patterns on crop yields and nitrogen fertilizer use efficiency in rice-wheat rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(2): 307-316.
- [27] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智, 等. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 177-182.
- XIE Chun-sheng, TANG Shuan-hu, XU Pei-zhi, et al. Effects of single basal application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2): 177-182.
- [28] 王彦荣, 岩石真嗣, 三木孝昭, 等. 自然农法条件下稻田有益微生物菌群多年施用累积效果[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(4): 443-446.
- WANG Yan-rong, Iwashi Shinji, Takaaki Mik, et al. Effects of effective microorganisms continual application in paddy fields in natural farming[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(4): 443-446.
- [29] 黄策, 王天铎. 水稻群体物质生产过程的计算机模拟[J]. 作物学报, 1986(1): 1-8.
- HUANG Ce, WANG Tian-duo. Computer simulation of biomass production in rice community[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1986(1): 1-8.
- [30] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量, 光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808-815.
- LI Min, GUO Xi-sheng, YE Shu-ya, et al. Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(4): 808-815.
- [31] 聂军, 郑圣先, 戴平安, 等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 255-261.
- NIE Jun, ZHENG Sheng-xian, Dai Ping-an, et al. Regulation of senescence and photosynthetic function of rice leaves by controlled release nitrogen fertilizer[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(3): 255-261.
- [32] 王鑫, 徐秋明, 曹兵, 等. 包膜控释尿素对保护地菜地土壤肥力及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 77-80.
- WANG Xin, XU Qiu-ming, CAO Bing, et al. Effects of controlled release coated urea on soil fertility and enzyme activities of protected vegetable field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 77-80.
- [33] Kleineidam K, Košmrlj K, Kublik S, et al. Influence of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in rhizosphere and bulk soil[J]. *Chemosphere*, 2011, 84: 182-186.