

doi: 10.11838/sfsc.20160309

海藻寡糖增效尿素对水稻光合特性及碳代谢产物积累的影响

张运红^{1,2}, 孙克刚^{1,2*}, 杜君^{1,2}, 和爱玲^{1,2}, 张起义¹

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002;

2. 河南省农业生态与环境重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了海藻寡糖增效尿素对水稻光合特性、碳代谢关键酶活性及相关产物积累的影响。结果表明, 和普通尿素相比, 海藻寡糖增效尿素处理的水稻净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和水分利用效率 (WUE) 有所增加, 气孔限制值 (L_s) 有所降低, 叶绿素含量和核酮糖-1, 5-二磷酸羧化加氧酶 (Rubisco) 活性显著提高。拔节期、齐穗期和成熟期叶中和籽粒中蔗糖磷酸合成酶 (SPS)、蔗糖合成酶 (SUS) 和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶 (ADPase) 活性显著增强, 从而促进籽粒中蔗糖和淀粉积累; 地上部和地下部生物量在 4 个生育期也均显著增加, 籽粒产量显著提高, 其中较对照增加 9.32%, 较普通尿素处理增加 3.94%。

关键词: 海藻寡糖增效尿素; 水稻; 光合特性; 碳代谢产物

中图分类号: S143.1; Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2016) 03-0054-06

水稻是我国主要的粮食作物之一, 其持续高产是我国水稻生产中长期以来追求的目标, 对解决我国粮食安全与人民温饱问题具有重要意义。施氮是水稻栽培的重要技术措施, 合理有效地施用对水稻生长发育及籽粒灌浆具有重要的作用^[1-2]。我国碳酸氢铵、尿素等传统氮肥利用率低, 大量施用带来了环境污染、食品安全等一系列问题^[3-4]。如何提高氮肥利用率, 最大限度地发挥其在农业生产中的增产增收作用已成为亟待解决的问题, 增效氮肥的出现则是目前较为有效的解决办法之一。海藻寡糖 (ADO) 是海藻酸钠经 N-乙酰-B-D-氨基葡萄糖苷酶酶解的产物, 由 β -D-甘露糖醛酸 (PM) 与 α -L-古罗糖醛酸 (PG) 依靠 1, 4-糖苷键连接而成^[5]。张朝霞等^[6-7]将其添加到尿素中施用发现可促进小麦增产, 提高氮肥利用率; 在油菜上的研究显示, 海藻寡糖对酰胺态氮素的增效作用好于

铵态氮和硝态氮。周勇明等^[8]报道, 海藻酸尿素 (含有藻多糖、海藻多酚、寡糖素、碘等) 可显著提高玉米产量和籽粒吸氮量, 氮肥表观利用率和农学效率分别较普通尿素提高 2.94 个百分点和 26%。海藻寡糖增效尿素是将海藻寡糖与尿素或尿素合成步骤的原料或中间产物混合后, 再经尿素制备工艺中的蒸发和造粒步骤制备而成, 海藻寡糖含有的负电荷与氮肥中的氨、铵态氮络合, 从而抑制其向硝态氮及亚硝态氮的转化, 提高氮肥利用率。海藻寡糖增效尿素具有调控作物生长, 提高农作物品质, 增强作物抗病能力, 不污染环境等优点, 随着 21 世纪“绿色营销”市场的不断开拓, 其在农业生产上必将有广阔的应用前景。笔者研究显示^[9], 在同等施氮水平下, 海藻寡糖增效尿素和普通尿素相比, 对水稻的产量和品质均有一定的改善效果, 但是目前对其作用机制还不是很清楚。碳代谢主要通过光合作用、呼吸作用及糖类代谢等途径影响作物的生长发育、有机化合物的合成、转运和积累, 进而影响作物的产量和品质^[10]。张庚等^[11]在菜薹上的研究显示, 海藻寡糖可促进光能的捕获及转化, 提高其光能利用效率。本文采用盆栽试验, 研究了海藻寡糖增效尿素对水稻光合特性、碳代谢关键酶活性及相关产物积累的影响, 旨在从碳代谢角度揭示其促进作物增产的作用机制, 并为在农业上进一步推广应用提供理论依据。

收稿日期: 2015-09-25; 最后修订日期: 2015-12-08

基金项目: 河南省财政预算项目“氮肥增值提效及高效施用技术研究与应用”(2016); 河南省农业科学院科研发展专项资金项目“优质稻米的关键施肥技术研究”(20137913); 河南省农业科学院自主创新项目(2069999)。

作者简介: 张运红 (1983-), 女, 河南新乡人, 助理研究员, 博士, 主要从事寡糖生物活性及新型植物生长调节剂研究。
E-mail: snowgirl23@126.com。

通讯作者: 孙克刚, E-mail: kgsun@ipni.ac.cn。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试海藻寡糖 (ADO), 聚合度 2 ~ 10, 糖醛酸组成为 β -D-甘露糖醛酸 (M) : α -L-古罗糖醛酸 (G) = 7:3, 糖醛酸含量 92%。普通尿素 (N 46.2%)。供试水稻品种为杂交籼稻汕优 63。

1.2 试验方案

试验于 2014 年通过盆栽进行, 供试土壤采自河南省信阳市罗山县农科所试验园区, 质地轻粘, 基本理化性状为 pH 值 6.6, 有机质 1.87%, 碱解氮 85.5 mg/kg, 有效磷 (P) 43.1 mg/kg, 速效钾 (K) 93.3 mg/kg。

试验设 3 个处理: 对照 (不施氮肥)、普通尿素处理 (施普通尿素)、海藻寡糖增效尿素处理 (海藻寡糖在增效尿素中的含量为 0.3%), 每个处理 4 次重复, 因水稻 4 个生育时期破坏性采样, 每个处理共种植 16 桶。将田间采集土样风干粉碎后过 2 mm 筛, 混匀分别装在直径 25 cm、高 25 cm 的塑料桶中, 每桶装土 6 kg, 施肥量为 N 0.133 g/kg、 P_2O_5 0.045 g/kg、 K_2O 0.119 g/kg, 磷、钾肥分别采用过磷酸钙、氯化钾。其中氮肥 50% 基施, 50% 追施, 磷、钾肥全部基施。将长势一致且 35 d 苗龄的水稻幼苗移栽于塑料桶中, 每桶 3 穴, 每穴 1 苗。9 月 15 日收获。水稻生长周期为 153 d。

1.3 指标测定与方法

1.3.1 光合参数的测定

采用 LI-6400 便携式光合测定仪分别在水稻苗期、拔节期、齐穗期、成熟期测定水稻剑叶净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i)。测定时间为北京时间 8:30 ~ 11:40, 使用红蓝光源, 光量子通量密度 (PFD) 为 $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 叶室 ($2\ \text{cm} \times 3\ \text{cm}$) 内温度设定为 30°C 。每个单株样品重复测定 6 次, 每桶测定 3 株, 每个处理测定 4 桶。气孔限制值 (L_s) 按照 $L_s = 1 - C_i/C_0$ (C_0 代表气室中 CO_2 浓度 $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$) 计算; 水分利用效率 (WUE) 按公式 $WUE = P_n/T_r$ 计算^[11]。

1.3.2 光合色素含量的测定

分别在水稻苗期、拔节期、齐穗期和成熟期对水稻剑叶进行破坏性采样, 取部分样品液氮 -70°C 超低温保存, 用于测定光合色素含量及相关酶活性, 部分样品烘干后用于碳代谢产物测定。其中光

合色素含量的测定, 称取剪碎的新鲜叶片 0.2 g, 置于刻度试管中, 加入 25 mL 80% 丙酮, 塞盖置于室温下暗储藏至组织变白。将提取液倒入光径 1 cm 比色杯内, 以 80% 丙酮为空白, 于 663、645、440 nm 处测其吸光值。

1.3.3 碳代谢关键酶活性的测定

分别在苗期、拔节期、齐穗期和成熟期测定水稻剑叶或籽粒中核酮糖-1, 5-二磷酸羧化加氧酶 (Rubisco)、蔗糖合成酶 (SUS)、蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶 (ADPase) 活性。其中 Rubisco 活性采用李合生^[12]的方法测定。SUS 和 SPS 活性的测定参照汤章城^[13]的方法, 二者均以 1 h 内反应生成 1 mg 蔗糖所需要的酶量作为 1 个酶活性单位 (U)。ADPase 的提取和活性测定参照李永庚等^[14]的方法, 以 1 h 反应生成 1 mg 1-磷酸葡萄糖所需要的酶量作为 1 个酶活性单位 (U)。

1.3.4 碳代谢产物含量和干物质积累的测定

分别在苗期、拔节期、齐穗期和成熟期测定剑叶或籽粒中蔗糖和淀粉含量。其中蔗糖含量测定采用间苯二酚法, 淀粉含量测定采用蒽酮比色法^[13]。生物量的测定采用称重法, 将植株样品按地上部和地下部分开, 洗净, 擦干, 105°C 下杀青 30 min, 再在 70°C 下烘干至恒重, 称量并换算成每穴植株的干重。水稻收获前, 调查每穴籽粒产量。

1.4 数据统计分析

数据用 Excel 2007 作图, Origin 7.5 软件统计分析, 采用 LSD 法进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 海藻寡糖增效尿素对水稻光合作用的影响

P_n 、 T_r 、 C_i 、 G_s 是反应光合作用强度的指标。WUE 是指植物消耗单位水量所产生的同化物量^[14]。表 1 显示, 在拔节期和齐穗期, 海藻寡糖增效尿素处理的水稻 P_n 、 G_s 、 C_i 和 WUE 均显著高于对照和普通尿素处理, 其中拔节期分别较对照增加 17.05%、23.08%、6.52% 和 15.41%, 较普通尿素处理增加 8.68%、8.47%、3.79% 和 7.82%; 齐穗期分别较对照增加 19.08%、25.00%、9.76% 和 15.86%, 较普通尿素处理增加 9.41%、6.06%、2.97% 和 7.89%。苗期, 海藻寡糖增效尿素处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 WUE 也显著增加; 除 G_s 外, 其余 3 个指标也显著高于普通尿素处理。成熟期, 海藻寡

糖增效尿素处理的水稻 P_n 也有增高, 但和普通尿素处理无显著差异。海藻寡糖增效尿素处理的 L_s 在苗期、拔节期和齐穗期均显著低于对照和普通尿素处

理, 分别较对照下降 13.98%、25.87% 和 72.88%, 较普通尿素处理下降 7.31%、17.22% 和 41.82%。 T_r 在 4 个生育期均无显著变化。

表 1 海藻寡糖增效尿素对水稻功能叶片光合特征的影响

生育期	处理	P_n [CO ₂ μmol/ (m ² ·s)]	G_s [H ₂ O mol/ (m ² ·s)]	C_i (μmol/mol)	T_r [H ₂ O mol/ (m ² ·s)]	L_s	WUE (CO ₂ μmol/ mol H ₂ O)
苗期	CK	19.63 c	0.31 b	305.76 c	2.08 a	0.236 a	9.44 c
	普通尿素	20.80 b	0.36 a	312.24 b	2.12 a	0.219 b	9.81 b
	ADO 增效尿素	22.02 a	0.38 a	318.85 a	2.11 a	0.203 c	10.44 a
拔节期	CK	21.17 c	0.52 c	319.72 c	2.81 a	0.201 a	7.53 c
	普通尿素	22.80 b	0.59 b	328.12 b	2.83 a	0.180 b	8.06 b
	ADO 增效尿素	24.78 a	0.64 a	340.56 a	2.85 a	0.149 c	8.69 a
齐穗期	CK	13.88 c	0.28 c	352.89 c	2.18 a	0.118 a	6.37 c
	普通尿素	14.98 b	0.33 b	378.12 b	2.19 a	0.055 b	6.84 b
	ADO 增效尿素	16.39 a	0.35 a	389.34 a	2.22 a	0.032 c	7.38 a
成熟期	CK	5.09 b	0.09 a	254.32 a	1.11 a	0.364 a	4.59 a
	普通尿素	5.31 a	0.10 a	256.47 a	1.13 a	0.359 a	4.70 a
	ADO 增效尿素	5.34 a	0.11 a	257.13 a	1.14 a	0.357 a	4.68 a

注: 同一列数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 海藻寡糖增效尿素对水稻光合色素含量的影响

叶绿素含量的高低与植物叶片光合效率有一定的相关性, 也是衡量植物叶片衰老的主要指标之一^[15]。表2显示, 4个生育期, 海藻寡糖增效尿素

表 2 海藻寡糖增效尿素对水稻叶片光合色素含量的影响

生育期	处理	叶绿素 (mg/g)	类胡萝卜素 (mg/g)	叶绿素 a/b
苗期	CK	2.25 c	0.38 a	5.62 a
	普通尿素	2.45 b	0.39 a	5.63 a
	ADO 增效尿素	2.56 a	0.39 a	5.67 a
拔节期	CK	3.55 c	0.52 a	3.66 a
	普通尿素	3.87 b	0.53 a	3.67 a
	ADO 增效尿素	4.05 a	0.55 a	3.71 a
齐穗期	CK	2.40 c	0.35 a	3.49 a
	普通尿素	2.63 b	0.35 a	3.51 a
	ADO 增效尿素	2.87 a	0.36 a	3.55 a
成熟期	CK	1.31 b	0.25 a	3.46 a
	普通尿素	1.42 a	0.27 a	3.47 a
	ADO 增效尿素	1.45 a	0.28 a	3.46 a

处理的水稻叶绿素含量均显著高于对照, 增幅分别为 13.78%、14.08%、19.58% 和 10.69%。除成熟期外, 其余 3 个时期较普通尿素处理也显著增加, 增幅分别为 4.49%、4.65% 和 9.13%。海藻寡糖增效尿素和普通尿素处理的水稻类胡萝卜素含量和叶绿素 a/b 值与对照无显著差异。

2.3 海藻寡糖增效尿素对水稻碳代谢关键酶活性的影响

Rubisco 作为光合碳同化的关键酶, 其活性高低直接影响作物光合速率^[15]。表3显示, 4个生育期, 海藻寡糖增效尿素处理的水稻叶中 Rubisco 活性均显著高于对照, 增幅为 15.80%~22.80%; 除成熟期外, 其余 3 个时期较普通尿素处理也显著增加。SUS 和 SPS 是蔗糖代谢的主要酶, 前者促进运输到籽粒等库器官的蔗糖的分解, 后者则主要是促进蔗糖的合成^[16-17]。从表3可以看出, 4个生育期, 海藻寡糖增效尿素处理的水稻叶中 SUS 活性均显著高于对照和普通尿素处理, 分别较对照增加 16.67%~27.78%, 较普通尿素处理增加 8.33%~11.81%; 籽粒中 SUS 活性在齐穗期和成熟期也均显著高于对照和普通尿素处理。叶中 SPS 活性除苗

期外, 其余3个时期均显著高于对照和普通尿素处理, 分别较对照增加6.77%~14.64%, 较普通尿素处理增加4.58%~6.77%。籽粒中SPS和ADPase活性也均显著高于对照和普通尿素处理,

其中齐穗期分别较对照增加16.49%和18.76%, 较普通尿素处理显著增加8.45%和7.87%; 成熟期分别较对照增加15.80%和22.80%, 较普通尿素处理增加6.74%和10.82%。

表3 海藻寡糖增效尿素对水稻碳代谢关键酶活性的影响

生育期	处理	Rubisco 活性 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	SUS 活性 (U/g FW)		SPS 活性 (U/g FW)		ADPase 活性 (U/g FW)
			叶	籽粒	叶	籽粒	
苗期	CK	5.23 c	0.63 c	—	5.21 b	—	—
	普通尿素	5.72 b	0.72 b	—	5.47 a	—	—
	ADO 增效尿素	6.28 a	0.78 a	—	5.51 a	—	—
拔节期	CK	24.12 c	1.13 c	—	6.12 c	—	—
	普通尿素	26.45 b	1.32 b	—	6.55 b	—	—
	ADO 增效尿素	29.62 a	1.43 a	—	6.85 a	—	—
齐穗期	CK	18.13 c	1.62 c	1.80 c	8.88 c	4.85 a	4.85 c
	普通尿素	20.12 b	1.90 b	2.04 b	9.73 b	5.21 b	5.34 b
	ADO 增效尿素	22.14 a	2.07 a	2.12 a	10.18 a	5.65 a	5.76 a
成熟期	CK	9.05 b	2.02 c	3.50 c	8.12 c	12.85 c	11.84 c
	普通尿素	10.31 a	2.37 b	3.98 b	8.45 b	13.94 b	13.12 b
	ADO 增效尿素	10.48 a	2.65 a	4.14 a	8.67 a	14.88 a	14.54 a

2.4 海藻寡糖增效尿素对水稻碳代谢产物固定及其积累的影响

作物体内碳水化合物大约占干物质总量的90%~95%, 而碳水化合物中含量较高且能够互相转化和再利用的主要是蔗糖、淀粉和还原糖等糖类物质^[16]。表4显示, 海藻寡糖增效尿素处理后水稻叶中蔗糖含量无显著变化, 籽粒中蔗糖含量在齐穗期和成熟期均显著高于对照和普通尿素处理, 分别较对照增加13.47%和16.98%, 较普通尿素处理

增加4.70%和3.13%。籽粒中淀粉含量在成熟期也显著高于对照和普通尿素处理, 分别较对照增加12.27%, 较普通尿素增加2.42%。地上部生物量和地下部生物量在4个生育期均显著高于对照和普通尿素处理, 二者分别较对照增加37.76%~47.62%和15.04%~44.44%; 较普通尿素处理增加5.36%~14.81%和8.84%~13.04%。成熟期籽粒产量也显著高于对照和普通尿素处理, 分别较对照增加9.32%, 较普通尿素处理增加3.94%。

表4 海藻寡糖增效尿素对水稻碳代谢产物固定及其积累的影响

生育期	处理	蔗糖含量 (mg/kg)		籽粒中淀粉含量 (mg/kg)	生物量 (g/盆)		实际产量 (g/穴)
		叶	籽粒		地上部	地下部	
苗期	CK	5.21 a	—	—	0.21 c	0.18 c	—
	普通尿素	5.32 a	—	—	0.27 b	0.23 b	—
	ADO 增效尿素	5.34 a	—	—	0.31 a	0.26 a	—
拔节期	CK	26.45 a	—	—	7.15 c	1.68 c	—
	普通尿素	26.62 a	—	—	9.55 b	1.97 b	—
	ADO 增效尿素	26.78 a	—	—	10.39 a	2.21 a	—
齐穗期	CK	49.82 a	31.24 c	28.05 a	32.88 c	5.35 c	—
	普通尿素	50.01 a	33.86 b	28.12 a	45.73 b	5.81 b	—
	ADO 增效尿素	50.86 a	35.45 a	28.45 a	48.18 a	6.45 a	—
成熟期	CK	18.98 a	11.25 c	76.21 c	45.21 c	6.85 c	31.87 c
	普通尿素	19.04 a	12.76 b	83.54 b	58.67 b	7.24 b	33.52 b
	ADO 增效尿素	19.11 a	13.16 a	85.56 a	62.28 a	7.88 a	34.84 a

3 结论与讨论

光合作用是作物产量形成的物质基础, 主要受到光合羧化部分 CO_2 供应能力和光合器官同化 CO_2 效率两方面的制约。在 CO_2 向羧化位点的扩散过程中, CO_2 的传导能力由 G_s 和叶肉导度共同决定, 并构成了光合作用的气孔限制和非气孔限制^[18]。本研究显示, 在水稻苗期、拔节期和齐穗期, 海藻寡糖增效尿素和普通尿素相比, 均能提高水稻的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 WUE, 降低 L_s 。由此可见, 海藻寡糖增效尿素主要是通过调节 G_s , 影响 C_i , 进而促进光合作用的进行, 这与郭卫华等^[19] 在烟草上的研究结果一致。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素, 在光吸收中起核心作用, 其含量高低与光合速率密切相关。Rubisco 是碳同化的限速酶, 对 P_n 起着决定性的作用, 催化核酮糖二磷酸的羧化反应和氧化反应, 生成的 3-磷酸甘油酸参加卡尔文循环^[15]。本试验中, 海藻寡糖增效尿素可显著提高水稻叶绿素含量和 Rubisco 活性, 这可能是其促进光合作用进行的主要原因。

作为以收获籽粒为经济价值的水稻, 获得高产不仅要求功能叶片有较强的光合生产能力, 更要求以蔗糖为主的光合产物能够合理充分地分配到生产中心, 以满足其生产发育的需要^[16]。SPS 和 SUS 是蔗糖代谢的主要酶, 其中 SPS 是以尿苷二磷酸葡萄糖 (UDPG) 为供体, 以 6-磷酸果糖为受体的糖转移酶, 合成 6-磷酸蔗糖, 再在磷酸蔗糖磷酸化酶的作用下脱磷酸并水解形成蔗糖和磷酸根离子, 该途径被认为是植物体内蔗糖合成的主要途径, 与植物的干物质的积累密切相关。SUS 是蔗糖代谢中的关键酶, 在叶中参与蔗糖的合成, 在籽粒中催化蔗糖的分解, 形成鸟苷二磷酸葡萄糖和果糖, 为淀粉合成提供前提物质, 该反应被认为是蔗糖向淀粉转变的第一步^[14]。ADPase 是淀粉合成的关键酶, 催化 $G-1-P$ 和 ATP 反应生成腺苷二磷酸葡萄糖 (ADPG), 进而参与淀粉合成, 其活性大小与淀粉积累速率和灌浆速率呈正相关^[20]。谢桂先等^[21] 报道, 氮中量施肥水稻旗叶和籽粒中的 SPS、SUS、ADPase 活性较高; 叶和籽粒中蔗糖含量较高, 蔗糖转化成淀粉的能力较强。侧重前期施氮有利于提高淀粉合成酶活性^[22], 而侧重后期施氮则不仅有利于水稻维持灌浆速率和较长的灌浆时间^[23], 还可提高 ADPase 和淀粉分支酶活性^[21]。张赓等^[11] 报

道, 海藻酸钠寡糖可促进菜薹中蔗糖和淀粉的积累。本试验中, 和普通尿素相比, 海藻寡糖增效尿素处理可显著提高水稻拔节期、齐穗期和成熟期叶中和籽粒中 SPS、SUS 和 ADPase 活性, 促进籽粒中蔗糖和淀粉的积累; 地上部和地下部干物质质量在 4 个生育期也均显著增加, 籽粒产量显著提高, 从而证明海藻寡糖增效氮肥促进水稻光合碳代谢的进行, 可能是其产量增加的主要原因。

参考文献:

- [1] 陈关, 李木英, 石庆华, 等. 施氮量对直播稻群体发育及产量的影响 [J]. 作物杂志, 2011, (1): 33-37.
- [2] 陈爱忠, 潘晓华, 吴建富, 等. 施氮量对双季超级稻产量、干物质生产及氮素利用效率的影响 [J]. 杂交水稻, 2011, 26 (2): 58-63.
- [3] 宋立芳, 王毅, 吴金水, 等. 水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35 (1): 150-160.
- [4] 柳金来, 宋继娟, 周柏明, 等. 氮肥施用量与水稻品质的关系 [J]. 土壤肥料, 2005, (1): 17-19.
- [5] 刘航, 尹恒, 张运红, 等. 褐藻胶寡糖生物活性研究进展 [J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24: 201-204, 228.
- [6] 张朝霞, 许加超, 盛泰, 等. 海藻寡糖 (ADO) 增效尿素对小麦的影响 [J]. 农产品加工, 2014, (11): 61-63, 66.
- [7] 张朝霞, 许加超, 盛泰, 等. 海藻寡糖 (ADO) 对不同形态氮素的影响 [J]. 农产品加工, 2014, (10): 1-8.
- [8] 周勇明, 商照聪, 宝德俊, 等. 海藻酸尿素对夏玉米产量和氮肥利用率的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2014, (3): 23-26.
- [9] 张运红, 孙克刚, 杜君, 等. 海藻寡糖增效尿素对水稻产量和品质的影响 [J]. 河南农业科学, 2016, 45 (1): 53-56.
- [10] 李杰, 张洪程, 常勇, 等. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究 [J]. 作物学报, 2011, 37 (7): 1235-1248.
- [11] 张赓, 张运红, 赵凯, 等. 海藻酸钠寡糖对菜薹光合特性和碳代谢的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (4): 153-159.
- [12] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [13] 汤章城. 现代植物生理学实验指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [14] 李永庚, 于振文, 姜东, 等. 冬小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉合成动态及与其有关的酶活性的研究 [J]. 作物学报, 2001, 27 (5): 658-663.
- [15] 刘微, 王树涛, 陈英旭, 等. 转 Bt (*Cry1Ab*) 基因对水稻光合特性及光合产物积累的影响 [J]. 中国农业科学, 2011, 44 (3): 627-633.
- [16] 阳剑, 时亚文, 李宙炜, 等. 水稻碳氮代谢研究进展 [J].

- 作物研究, 2011, 25 (4): 383 - 387.
- [17] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, et al. Activities of key enzymes in sucrose - to - starch conversion in wheat grains subjected to water deficit during grain filling [J]. *Plant Physiology*, 2004, 135: 1621 - 1629.
- [18] Farquhar G D, Sharkey T G. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1982, 33: 317 - 345.
- [19] 郭卫华, 赵小明, 杜昱光. 海藻酸钠寡糖对烟草幼苗生长及光合特性的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39 (6): 648 - 651.
- [20] Janneke H M, Hendriks, Anna K, et al. ADP glucose pyrophosphorylase is activated by posttranslation at redox - modification in response to light and to sugars in leaves of *Arabidopsis* and other plant species [J]. *Plant Physiology*, 2003, 133: 838 - 849.
- [21] 谢桂先, 刘强, 荣湘民, 等. 节水灌溉条件下饲料稻不同施氮水平碳代谢关键酶活性及产量表现 [J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26 (5): 36 - 46.
- [22] 马均, 明东风, 马文波, 等. 不同施氮时期对水稻淀粉积累及淀粉合成相关酶类活性变化的研究 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38 (2): 290 - 296.
- [23] 李志刚, 叶正钱, 杨肖娥, 等. 不同养分管理对杂交稻生育后期功能叶生理活性和籽粒灌浆的影响 [J]. *浙江大学学报*, 2003, 29 (3): 265 - 270.

Effects of alginate-derived oligosaccharides synergistic urea on the photosynthetic characteristics and accumulation of carbon metabolites in rice

ZHANG Yun-hong^{1,2}, SUN Ke-gang^{1,2*}, DU Jun^{1,2}, HE Ai-ling^{1,2}, ZHANG Qi-yi¹ (1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 2. Henan Key Laboratory of Agricultural Eco-environment, Zhengzhou Henan 450002)

Abstract: Pot experiments were used to study the effects of alginate-derived oligosaccharide (ADO) synergistic urea on photosynthetic characteristics, key enzymes activities and carbon metabolites accumulation of rice (*Oryza. Sativa* L.). The results showed that net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and water use efficiency (WUE) of rice under ADO synergistic urea treatment were increased, and stomatal limitation value (L_s) was decreased, compared with ordinary urea. Chlorophyll content and ribulose-1, 5-bisphosphate-carboxylase (Rubisco) activity were also significantly raised. At booting, full heading and maturing stages, sucrose phosphate synthase (SPS), sucrose synthase (SUS) and ADP-glucose pyrophosphorylase (ADPase) activity in leaves or grain of rice were significantly enhanced, thus contributing to the accumulation of sucrose and starch in grain. Aboveground and belowground biomass were also significantly increased at all the four growth stages. Rice yield of ADO synergistic urea treatment was significantly raised by 9.32% compared with the control, and was higher than that of ordinary urea treatment by 3.94%.

Key words: alginate-derived oligosaccharide synergistic urea; rice; photosynthetic characteristics; carbon metabolites