

DOI: 10.11766/trxb201509100385

保水缓释肥对盐胁迫下水稻生长和光合特性的调控*

孙志国¹ 刘冉¹ 吴昊² 赵海燕¹ 赛比热·安乃瓦¹
郑青松¹ 罗朝晖^{1†} 管永祥^{2†}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 江苏省农业环境监测与保护站, 南京 210036)

摘要 为了探讨保水缓释肥对作物生长的调控, 以“盐稻12号”为材料, 研究了不同配比(1%、2%和4%)的盐碱地保水缓释肥(ZL 2012 1 0400570.0)对盐胁迫20、40、80 d水稻幼苗植株形态、根系发育、干重、叶绿素含量、气体交换参数和水分利用效率的影响。结果表明: 无论是低盐还是高盐处理下, 随着肥料施用配比的增加, 植株长势逐渐增强, 总根长、根体积、根表面积、根尖数、植株干重均显著上升, 尤其在4%肥料施用下这些促进效果尤为明显; 随着肥料施用配比的增加, 叶片叶绿素含量、气体交换各参数、水分利用效率等均逐渐上升, 而气孔限制值显著下降。综上所述, 该盐碱地保水缓释肥明显增强水稻幼苗的耐盐性, 主要与其能促进盐胁迫下根系生长, 提高叶绿素含量, 改善气孔限制, 促进植株的光合作用并提高水分利用效率有关。

关键词 保水缓释肥; 水稻幼苗; 耐盐性; 光合作用

中图分类号 S365 **文献标识码** A

在人口日益增长、粮食安全问题凸显的现状面前, 通过肥料施用、基质栽培等手段提高盐土上种植作物的产量是很必要的^[1-3]。在广大旱区和半干旱地区, 盐渍化和营养匮乏是降低作物产量的主要因子。过量的可溶性盐离子聚集在作物根际周围, 从而导致矿质元素不均衡、降低根际土壤环境的渗透势和形成盐离子毒害^[4-5]。在盐土上, 不同植物的生长响应、营养吸收和利用均是不同的。盐土会降低肥料或基质的有效性, 损害植物的光合作用等生理代谢过程^[6]。江苏省沿海滩涂面积逐年新增, 据最新统计其总面积约6 530 km², 约占中国沿海滩涂总面积的1/4^[7]。沿海滩涂以及盐渍化土壤的合理改良和利用, 对于土壤可利用面积的增

加, 乃至人类生存空间的扩展都有积极的影响。不断采用新型的农业技术和农艺管理措施, 对于提高盐土农业生产力、发展高效农业亦很有意义。

目前中国的化肥使用量超过了任何其他国家, 而我国化肥当季利用率低, 远远落后于其他发达国家^[8-9]。低的肥料利用率不仅造成了水体富营养化、臭氧层破坏等环境问题, 而且浪费了大量的人力、财力和资源等^[10]。农业的可持续发展促使各种养分配比的复混肥料、保水型复混肥、缓释肥料及专用肥等化肥品种日渐增多, 各类化肥性质和效果各异^[2, 11-12]。缓释肥可根据作物对养分的需要控制其养分释放模式, 使养分释放与作物养分吸收同步。施用缓释肥能促进作物营养生长和生殖生

* 江苏省农业三新工程项目(SXGC [2015] 291)、江苏省农业科技自主创新项目(CX(15)1044)和南京农业大学校级SRT计划项目(1513A12)共同资助 Supported by the “3-New” Agriculture Project of Jiangsu Province (No. SXGC [2015] 291), Jiangsu Independent Innovation Program of Agricultural Science and Technology (No. CX (15) 1044) and SRT Project of Nanjing Agricultural University (No. 1513A12)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lzhu@njau.edu.cn; gyx5598@163.com

作者简介: 孙志国(1991—), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 盐土农业生态。E-mail: 2014103089@njau.edu.cn

收稿日期: 2015-09-10; 收到修改稿日期: 2015-10-12

长, 增强抗倒伏能力, 提高肥料利用率, 增产效果和经济收益明显, 且不用追肥, 减少工时, 可满足当前农村劳动力转移、简化生产的需求^[13]。到目前为止, 已对多种缓释材料进行了探究, 并有一些缓释包膜肥料已经实现工业化生产^[14], 但是盐土农业中的保水缓释肥的施用及其研究极为匮乏。因此, 本研究以江苏沿海滩涂地区种植较多的耐盐水稻“盐稻12号”为试验材料, 探讨新型颗粒状盐碱地保水缓释肥对水稻苗期生长的调控效应, 并从光合作用机制上探讨调控的生物学机制, 为新型抗盐基质的施用提供理论依据和技术方法, 为进一步兼顾环境友好、开发盐土农业提供有力的科学指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以水稻“盐稻12号” (*Oryza sativa* L.) 为试验材料。颗粒状盐碱地保水缓释肥 (ZL 2012 1 0400570.0) (简称为“基质肥”, Substrate fertilizer, 缩写为M) 由江苏花海种苗科技有限公司提供。该盐碱地保水缓释肥的配料按重量百分比由下列组分组成: 凹凸棒石黏土5%~15%、磷石膏10%~30%、过磷酸钙5%~28%、硫酸铵5%~25%、硫酸钾2%~20%、微量元素混合物0.01%~1%和水10%~35%^[15]。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of the soil used (g kg^{-1})

土壤类型 Soil type	水溶性 盐 Water soluble salt	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	有机质 Organic matter	有效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkali-hydrolysable nitrogen
海积潮湿正常盐成土 Marinic Aquic-Orthic Halosols	2.68 ± 0.08	0.37 ± 0.00	0.48 ± 0.00	23.21 ± 3.18	3.11 ± 0.53	0.0149 ± 0.00	18.45 ± 2.59

从东台三仓农场采集当地土壤 (中国土壤系统分类为海积潮湿正常盐成土), 将其碾细至最大土块不超过 1 cm^3 备用。土壤基本理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

试验于2015年3月下旬至同年6月中旬在南京农业大学牌楼基地温室中自然光照下进行。按设定配比在土壤中加入基质肥 (M) (1%、2%、4% (w:w)) 和“多特”生物有机肥 (南京绿野有机肥厂生产) (每盆30 g) 拌匀, 装于上口直径230 mm、下口直径130 mm、高130 mm、底部具孔的塑料盆内。即试验起初设4个处理: L0%M (不加基质肥)、L1%M (1%基质肥 (w:w))、L2%M (2%基质肥 (w:w))、L4%M (4%基质肥 (w:w)) (对照土壤处理用“L”表示, 即 Low salt stress)。每盆土壤、基质肥和商品生物有机肥总重量2 kg。并在盆下放置适宜大小的托盆, 以便将每次渗漏的浇培液浇回相应的盆钵内, 以保证在整个处理过程中盆内部盐分和肥料浓度的相对稳定。

3月底选取大小一致、饱满的水稻种子, 置于

40 °C 恒温干燥箱中, 干燥5 d打破休眠后, 用5%的次氯酸钠溶液表面消毒10 min, 用去离子水反复冲洗种子多次, 置于去离子水中浸种24 h, 然后将吸足水的种子均匀铺在垫有3层湿润纱棉布的托盘中, 于28 °C 恒温培养箱黑暗环境下避光催芽。挑选露白一致的水稻种子播种于装有不同基质肥配比土壤的塑料盆中, 每盆12粒种子。出苗后间苗保证每盆7株苗。播种20 d后长至三叶期, 从原来的四个处理中各取出半数的盆钵, 进行外加盐处理, 即用饱和的NaCl溶液浇灌, 再用蒸馏水润洗, 使得外加的0.2%盐分 (w:w, 即 2.0 g kg^{-1}) 在土壤中均匀 (标注为高盐处理“H”, 即 High salt stress), 其余半数用蒸馏水浇灌 (即低盐处理“L”)。此刻, 试验盆钵被分为8个处理, 即在L0%M、L1%M、L2%M、L4%M四个处理 (土壤含盐 2.68 g kg^{-1}) 的基础上对应产生加盐的H0%M、H1%M、H2%M、H4%M处理 (含盐 4.68 g kg^{-1})。整个过程中, 保持所有盆钵土壤含水量为田间持水量的70%。分别于播种后20 d、40 d、80 d对植株进行拍照和相关指标测定。

1.3 测定指标及方法

土壤水溶性盐、全氮、全磷、全钾、有机质、有效磷、碱解氮的测定：将采回的土壤置于室内通风阴干，样品风干后研细，使之全部通过20目的筛子。充分混匀后用四分法分成4份，选取一份进一步研细，使之全部通过100目的筛子，保存待用。对上述处理后的土壤按照文献[16]进行以下各指标的测定：土壤水溶性盐采用电导法测定；土壤全氮采用半微量开氏法测定；土壤全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法消煮-钼锑抗比色法测定；土壤全钾采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法消煮，ICP-OES原子发射光谱仪（Agilent 710，澳大利亚）测定；土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定；土壤有效磷采用 $0.5\text{ mol L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 法浸提-钼锑抗比色法测定；土壤碱解氮采用碱解扩散法测定。

植株根系形态分析：播种后20 d和40 d，水稻根用流动清水从泥土中分离，将根系清洗干净进行扫描。使用爱普生扫描仪（1640XL，中国）对根系进行扫描及WinRHIZO分析系统软件（LA1600+，加拿大）进行分析^[17]，得到总根长、根表面积、根体积、根尖数等指标。播种后80 d，植株根系过于发达和相互缠绕，因此根系扫描取消。

植株形态外观的观察及其生物量测定：分别于播种后20 d、40 d、80 d对植株进行拍照。然后从盆中取出植株，先用自来水冲洗，再用蒸馏水将鲜样洗净，用吸水纸吸干表面水分，分为地上部和根部两部分，在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青15 min后于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重，称得干重（DW）。

植株叶片叶绿素含量和光合参数测定：播种后40 d，植株叶片的宽度已经可为可持式SPAD叶绿素仪（SPAD502-plus，中国）所检测，播种后80 d，叶片的宽度可用可持式SPAD叶绿素仪进行气体交换参数测定。于上午9:00~11:30采用可持式SPAD叶绿素仪测定植株完全展开新叶叶绿素（Chl）含量。同时用Li-6400便携式光合作用测定仪（Li-COR，美国）测定完全展开新叶的净光合速率（ P_n ）、气孔导度（ G_s ）、细胞间 CO_2 浓度（ C_i ）和蒸腾速率（ T_r ）。测定时使用红蓝光源叶室，光照强度为 $1\ 500\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ，叶温（ 30 ± 2 ） $^\circ\text{C}$ ，相对湿度约30%。叶片水分利用效率（WUE）计算公式为： $\text{WUE} = P_n / T_r$ ，气孔限制值（ L_s ）计算公式为： $L_s = 1 - C_i/C_a$ （ C_a 为空气中

CO_2 浓度）^[18]。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel、SPSS17.0软件进行数据的处理、作图和统计分析，数据均为“平均数±标准差”格式，采用Duncan新复极差测验法（ $p < 0.05$ ）进行显著性分析。

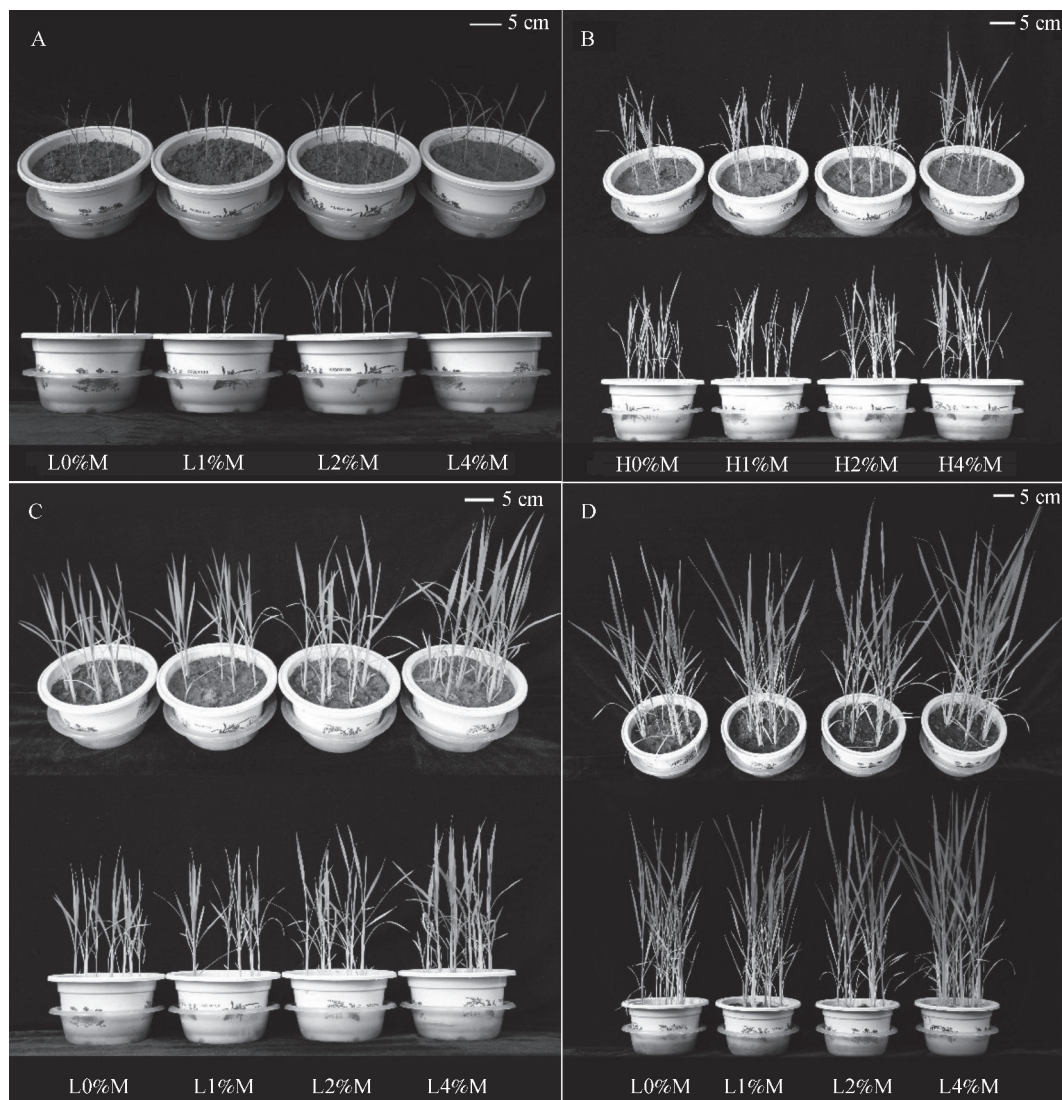
2 结果

2.1 盐胁迫下基质肥对水稻幼苗外部形态的影响

播种后20 d，随着基质肥施用配比的增加，在对照低盐土壤上生长的水稻幼苗长势逐渐好转，2%基质肥（L2%M）的施用已对水稻幼苗生长产生明显的促进，4%基质肥（L4%M）施用下，对水稻幼苗长势的促进作用更加明显（图1A）；图1B、C则是水稻外加盐处理20 d（播种后40 d）的长势情况，可以看出低盐（对照土壤）、高盐（加盐）处理下，随着基质肥配比的上升，水稻幼苗长势趋好；低盐处理下，基质配比增加对水稻长势调控作用更加明显。外加盐后60 d（播种后80 d），高盐处理的植株全部死亡，低盐处理80 d水稻幼苗长势，基质调控作用依然明显，尤其是4%基质肥处理的（图1D）。

2.2 盐胁迫下基质肥对水稻幼苗根系形态的影响

与不添加基质肥的对照相比，低盐处理20 d、40 d，添加1%基质肥根系形态各指标均呈现增加趋势，根表面积（20 d、40 d）、总根长（20 d）和根体积（20 d）的增加未达到显著水平（ $p > 0.05$ ）（图2ABC），而其他根形态指标均显著上升（ $p < 0.05$ ）（图2ACD）；添加2%基质肥情况下，除了根体积的增加（20 d）未达显著外（图2C），其他所有根形态指标均显著上升（图2）；添加4%基质肥对根形态指标的增加效果尤为明显，低盐处理20 d、40 d，水稻植株总根长增加160 cm和249 cm（图2A），根表面积增加约 13 cm^2 和 75 cm^2 （图2B），根体积增加 0.07 和 1.38 cm^3 （图2C），根尖数增加379和598（图2D）。图3所示，播种后20 d，加盐处理形成高盐胁迫，再处理20 d后，添加1%、2%和4%基质肥总根长相对于0%基质肥分别增加21%、45%和92%（图3A），根表面积分别增加14%、55%和139%（图3B），根体积分别增加19%、125%和247%（图3C），根尖数分别增加17%、24%和53%（图3D）。



注: A: 播种后20 d; B、C: 加盐处理20 d (播种后40 d); D: 加盐处理60 d (播种后80 d)

L0%M: 低盐 (0.268%盐分) +0%基质肥; L1%M: 低盐 (0.268%盐分) +1%基质肥;

L2%M: 低盐 (0.268%盐分) +2%基质肥; L4%M: 低盐 (0.268%盐分) +4%基质肥;

H0%M: 高盐 (0.468%盐分) +0%基质肥; H1%M: 高盐 (0.468%盐分) +1%基质肥;

H2%M: 高盐 (0.468%盐分) +2%基质肥; H4%M: 高盐 (0.468%盐分) +4%基质肥

Note: A: 20 days after sowing; B, C: Salt amendment for 20 d (40 days after sowing); D: Salt amendment for 60 d (80 days after sowing)

L0%M: Low salinity (0.268% salinity) +0% Substrate fertilizer; L1%M: Low salinity (0.268% salinity) +1% Substrate fertilizer;

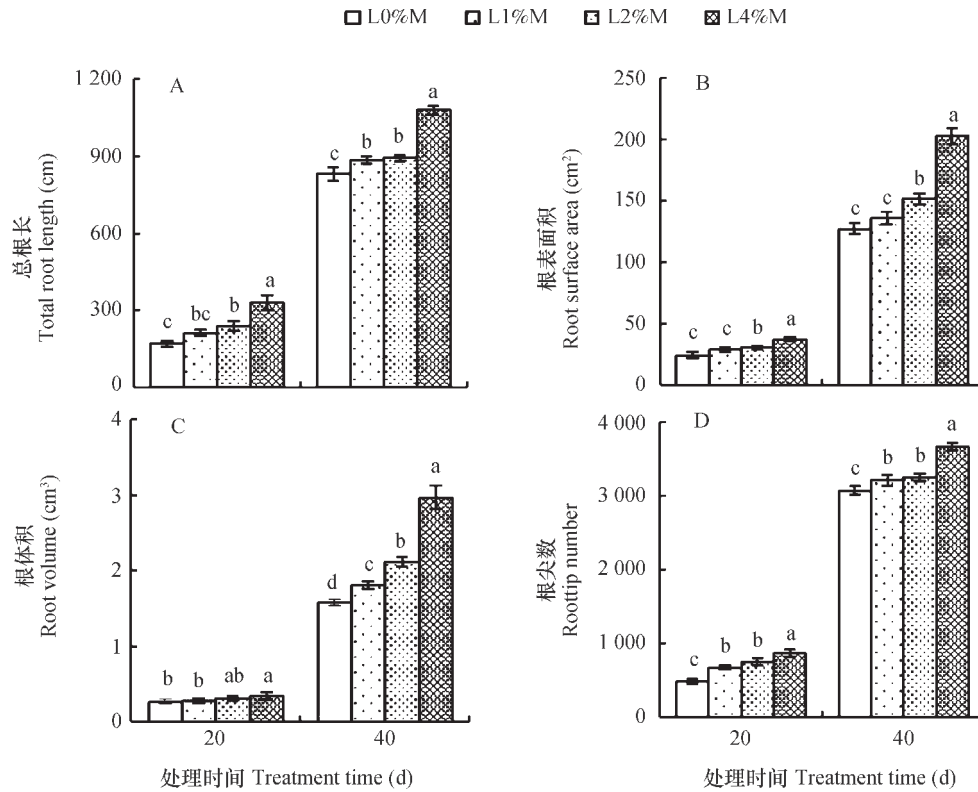
L2%M: Low salinity (0.268% salinity) +2% Substrate fertilizer; L4%M: Low salinity (0.268% salinity) +4% Substrate fertilizer;

H0%M: High salinity (0.468% salinity) +0% Substrate fertilizer; H1%M: High salinity (0.468% salinity) +1% Substrate fertilizer;

H2%M: High salinity (0.468% salinity) +2% Substrate fertilizer; H4%M: High salinity (0.468% salinity) +4% Substrate fertilizer

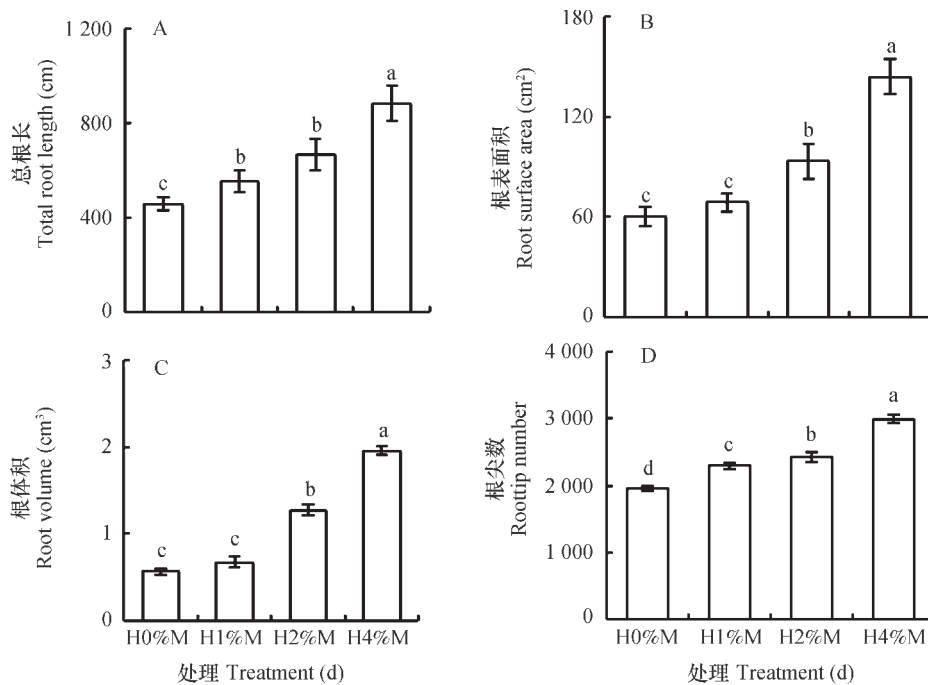
图1 盐胁迫下不同时期基质肥对水稻幼苗外部形态特征的影响

Fig. 1 Effects of the substrate fertilizer on morphological characteristics of rice seedlings under salt stress at different periods



注：同簇不同的小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)，下同 Note: Values by the different lowercase letter in the same cluster are significantly different at the level of 5%. The same as below

图2 低盐胁迫下20、40 d基质肥对水稻幼苗总根长 (A)、根表面积 (B)、根体积 (C) 和根尖数 (D) 的影响
Fig. 2 Effects of substrate fertilizer on total root length (A), root surface area (B), root volume (C) and number of root tips (D) of rice seedlings under low salt stress for 20 and 40 days



注：不同的小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)，下同 Note: Values by the different lowercase letter are significantly different at the level of 5%. The same as below

图3 高盐胁迫下20 d基质肥对水稻幼苗总根长 (A)、根表面积 (B)、根体积 (C) 和根尖数 (D) 的影响
Fig. 3 Effects of substrate fertilizer on total root length (A), root surface area (B), root volume (C) and number of root tips (D) of rice seedlings under high salt stress for 20 days

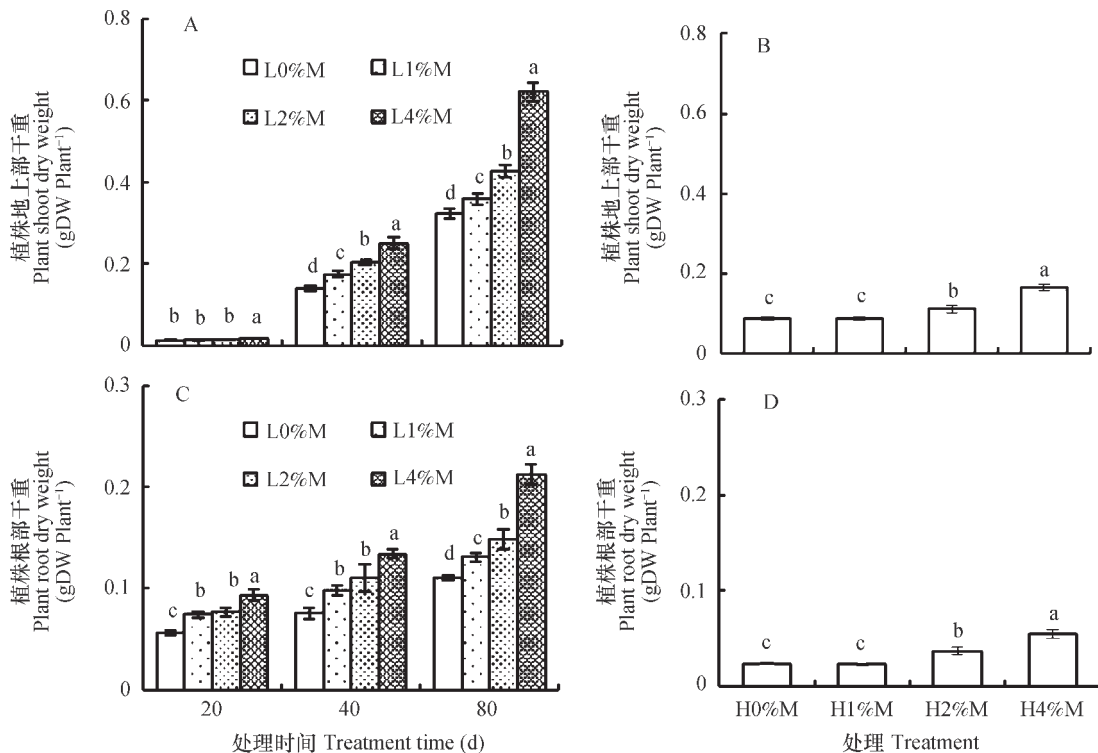
2.3 盐胁迫下基质肥对水稻幼苗生物量和叶绿素含量的影响

与不加基质肥相比, 添加不同配比的基质肥均能促进水稻植株生物量的积累, 但是在低盐处理20 d, 1%和2%基质肥处理的植株地上部干重的增加未达到显著水平 ($p > 0.05$), 高盐处理下, 1%基质肥的生物量促进效果也未达到显著水平 ($p > 0.05$), 其他情况下基质肥处理对生物量的提升均达到显著水平 ($p < 0.05$), 4%基质肥处理的促进作用尤为明显。低盐处理20 d、40 d和80 d, 添加4%基质肥植株地上部干重分别增加39%、79%和92% (图4A), 根部干重分别增加66%、78%和91% (图4C)。加盐处理20 d (播种后40 d), 1%基质肥施用对植株地上部和根部的促进作用并不显著 ($p > 0.05$), 2%和4%基质肥显著促进植株地上部和根部生物量积累, 植株地上部干重分别增加28%和91% (图4B), 根部干重分别增加61%、140% (图4D)。盐胁迫下, 随着基质肥配

比的增加, 叶绿素含量逐渐上升, 除了低盐胁迫下添加1%基质肥植株叶片叶绿素含量上升未达显著水平 ($p > 0.05$) 外, 其他基质肥处理显著促进植株叶片叶绿素含量的上升 ($p < 0.05$), 且高盐胁迫下, 对叶片叶绿素含量的促进效果更明显。低盐胁迫下, 添加4%基质肥植株叶片叶绿素含量在40 d和80 d分别上升14%和16% (图5A), 而高盐胁迫下, 添加4%基质肥植株叶片叶绿素含量上升达35% (图5B)。

2.4 盐胁迫下基质肥对水稻幼苗叶片光合参数的影响

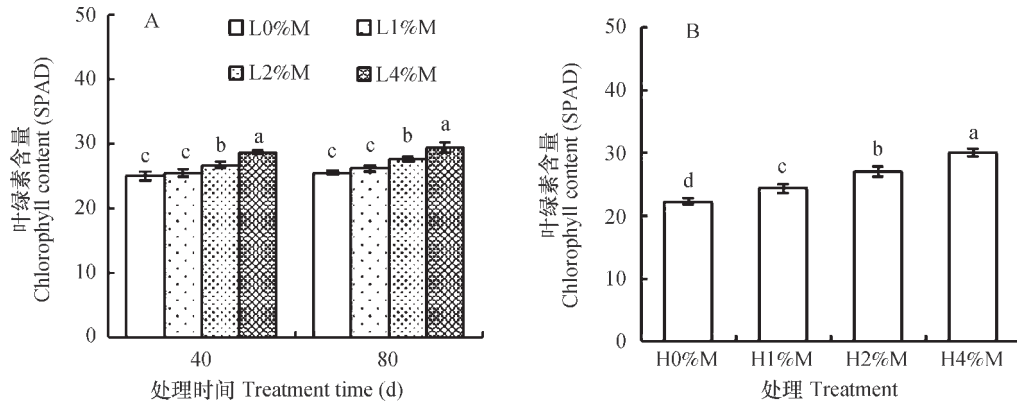
在低盐胁迫下, 随着基质肥配比的增加, P_n 、 G_s 、 C_i 、 Tr 和 WUE 均逐渐上升, 而 L_s 则显著下降。1%基质肥施用下, 除了 C_i 和 WUE 的增加达到显著水平 ($p < 0.05$) (图6CF), P_n 、 G_s 、 Tr 的增加均未达显著水平 ($p > 0.05$) (图6ABD); 2%基质肥施用下, P_n 的增长也达到显著水平 ($p < 0.05$) (图6A); 4%基质肥施用下, P_n 、



注: A: 植株地上部干重, 低盐处理20 d、40 d、80 d; B: 植株地上部干重, 低盐处理20 d后, 高盐再处理20 d; C: 植株根部干重, 低盐处理20 d、40 d、80 d; D: 植株根部干重, 低盐处理20 d后, 高盐再处理20 d
 Note: A: Dry weight of plant shoots under low salt stress for 20 d, 40 d and 80 d; B: Dry weight of plant shoots under low salt stress for 20 d and high salt stress for another 20 days; C: Dry weight of plant root under low salt stress for 20 d, 40 d and 80 d; D: Dry weight of plant root under low salt stress for 20 d and another 20 day of high salt stress

图4 盐胁迫下基质肥对水稻幼苗地上部和根部干重的影响

Fig. 4 Effects of substrate fertilizer on shoot and root dry weight of rice seedlings under salt stress



注：A：低盐处理40 d、80 d；B：低盐处理20 d后，高盐再处理20 d Note: A: Low salt stress for 40 d and 80 d; B: high salt stress for 20 d following 20-day low salt stress

图5 盐胁迫下基质肥对水稻幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 5 Effects of substrate fertilizer on leaf chlorophyll content of rice seedlings under salt stress

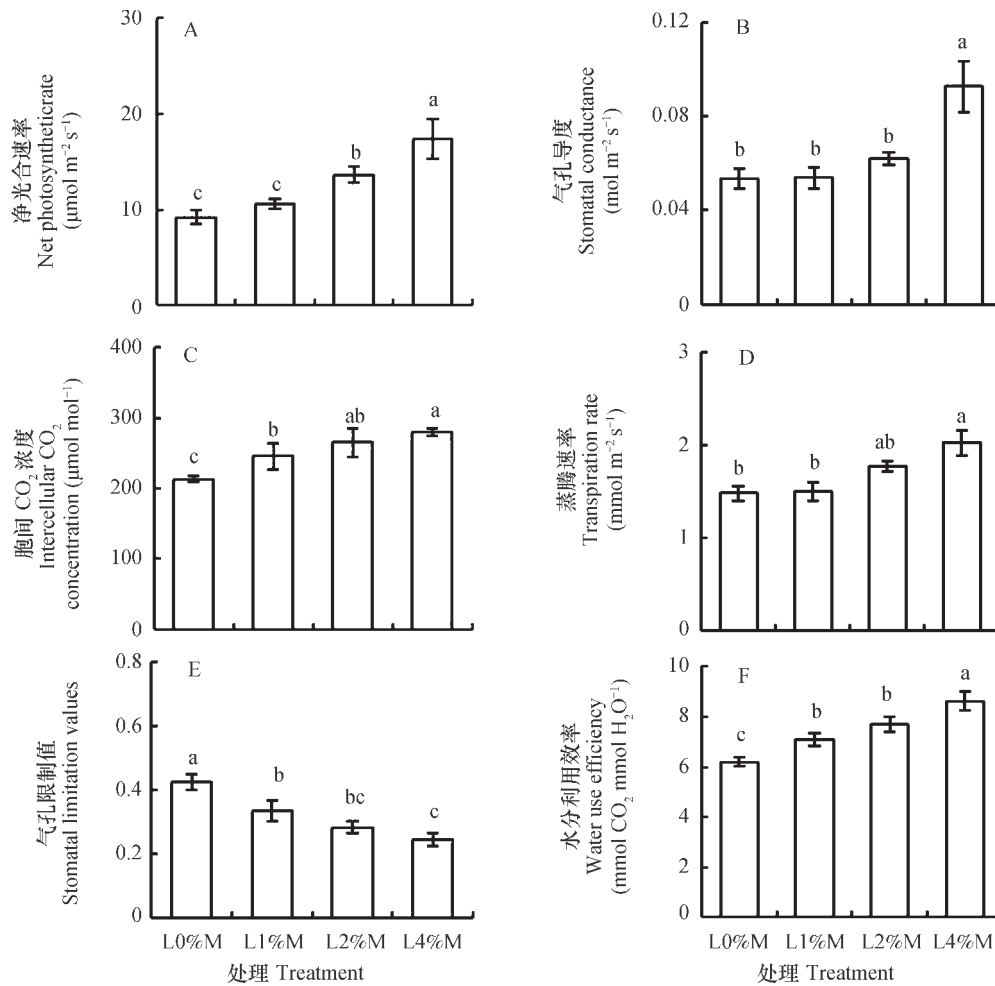


图6 低盐胁迫下80 d基质肥对水稻幼苗叶片净光合速率 (A)、气孔导度 (B)、胞间 CO_2 浓度 (C)、蒸腾速率 (D)、气孔限制值 (E) 和水分利用效率 (F) 的影响

Fig. 6 Effects of substrate fertilizer on Pn (A), Gs (B), Ci (C), Tr (D), Ls (E) and WUE (F) of rice seedling leaves under low salt stress for 80 d

G_s 、 C_i 、 T_r 和 WUE 上升均非常明显,分别上升90%、75%、36%和39%(图6A~图6D,图6F),而 L_s 下降也尤为明显,下降43%(图6E)。

3 讨论

作物高产和资源高效利用是科学施肥的重要目标,然而在肥料投入量上升的同时我国肥料利用率却维持在相对较低水平,并且养分流失严重,导致土壤次生盐渍化等一系列的环境问题日趋严重。施用保水缓释肥料是提高作物产量和肥料利用效率并兼顾环境友好的重要技术措施,成为我国乃至世界农业的研究热点^[14, 19]。施用肥料可提高作物的耐盐性见诸文献报告,如Yarami和Sepaskhah^[6]研究表明,藏红花(*Crocus sativus*)对盐渍敏感,盐渍环境下,每公顷地施用4 000 kg的奶牛粪,明显提高其产量。Sarangi等^[20]在滨海盐土上联合施用无机肥和有机肥,可显著促进水稻幼苗的生长,提高其叶片氮含量。然而保水缓释肥在盐土农业上应用的文献极其匮乏,很可能是由于在我们一味施用化肥和灌溉追求农作物产量迅速提高的潮流下,对保水缓释肥施用的重视不够。日本自20世纪70年代以来也大力发展设施温室大棚蔬菜栽培,结果造成土壤次生盐渍化,其中硫酸盐的积累被发现是一个重要因素^[21],因此Nakano等^[21]施用低硫缓释肥明显促进番茄根系生长、提高其果实产量,并且番茄果糖含量显著增加。本研究表明,盐胁迫下,添加1%、2%和4%的保水缓释肥(ZL 2012 1 0400570.0),明显促进水稻植株根部生长和发育,高盐胁迫下植株根体积和根表面积受肥料的促进尤为明显,从而显著促进根部生物量的积累,改善其地上部生长,植株生物量显著提高,4%基质肥的添加效果极为显著。本研究中用的基质肥属于颗粒状盐碱地保水缓释肥,呈酸性,可以降低土壤的碱性,促进土壤团粒结构的形成,达到改良盐碱地的目的;且肥料中含有大量的氮、磷、钾和多种微量元素,具有缓慢释放肥效和保水功能^[15],从而明显提高作物的耐盐性。Liu等^[22]用一种新型土壤改良剂和石膏、牛粪作比较对盐土上盐角草(*Salicornia europaea*)生长的调控效果,发现石膏施用的效果最好,其次是牛粪,再次是新型基质肥,进一步的复合配方试验表明,将三种肥料按照每公顷新型改良剂45 t、石膏18 t和牛粪300 t

的配比施用,对盐角草生长的促进效果更为理想,这一复合配方的研究也为我们研究的深入指出了一个应用型的方向。

盐胁迫下植物叶片叶绿素含量不仅直接关系到植物光合同化过程,而且也是衡量植物耐盐性的重要生理指标之一^[23]。叶绿素是绿色植物进行光合作用的主要色素,其含量的稳定有利于植株在胁迫条件下进行正常的光合作用,从而增强植株对盐胁迫的耐受能力^[24]。Luo等^[2]叶面喷施或者土壤中施氮肥,均明显增加盐胁迫下棉花叶片的叶面积、叶绿素含量和净光合速率(P_n),叶面喷施氮肥再辅助以土壤施肥对叶面积、叶绿素含量和 P_n 的促进效果更为明显,从而提高棉花的耐盐性。本研究表明,不同浓度的盐处理,且处理不同时期,随着保水缓释基质肥配比的增加,水稻植株叶片叶绿素含量显著上升(图5)。盐胁迫下,添加该肥料的植株叶片 P_n 的变化与叶绿素含量的变化相一致,说明由于叶绿素含量上升,明显促进植株的光合作用,从而促进水稻幼苗的抗盐性提高。如果胞间 CO_2 浓度(C_i)明显下降,而气孔限制值(L_s)升高,则是因气孔导度(G_s)降低导致叶肉细胞光合能力降低,这是典型的气孔限制;相反,如果叶肉细胞光合能力显著下降,即使在 G_s 下降的情况下, C_i 升高,那么 P_n 下降的因素为非气孔限制,即叶肉细胞的光合活性的下降^[18]。本研究表明,盐胁迫下,随着添加基质肥配比的上升, L_s 不断下降,而 G_s 和 C_i 不断上升(图6),这表明,盐胁迫下,本基质肥通过保水、缓慢释放营养和调节土壤酸碱度等,可明显改善气孔限制,从而促进植株的光合作用。

4 结论

外施颗粒状盐碱地保水缓释肥(ZL 2012 1 0400570.0)可以明显促进水稻幼苗根系生长发育、提高叶片叶绿素含量、改善植株的气孔限制,促进光合作用,提高水分利用效率,从而促进植株生物量积累,提高其抗盐性。其中,这一肥料添加达到4%,效果极其明显。然而,要全面衡量该肥料对盐胁迫下水稻生长、发育和产量的调控效应,阐述其调控特征和生物学机制,以期为盐土水稻的水肥运筹工作提供技术路线,还需要我们做深入的探讨。

参 考 文 献

- [1] Aydin A, Kant C, Turan M. Hydrogel substrate alleviates salt stress with increase antioxidant enzymes activity of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under salinity stress. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6 (3) : 715—724
- [2] Luo Z, Kong X Q, Dai J L, et al. Soil plus foliar nitrogen application increases cotton growth and salinity tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38 (3) : 443—455
- [3] 杜振宇, 马丙尧, 刘方春, 等. 盐胁迫下冬寒幼苗对土壤施钾的响应. *土壤*, 2015, 47 (1) : 68—73
Du Z Y, Ma B Y, Liu F C, et al. Response of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Zhanhua) to potassium applied into soil under salt stress (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (1) : 68—73
- [4] Parihar P, Singh S, Singh R, et al. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22 (6) : 4056—4075
- [5] 郭凯, 张秀梅, 刘小京. 咸水结冰灌溉下覆膜时间对滨海盐土水盐运移的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (6) : 1202—1212
Guo K, Zhang X M, Liu X J. Effect of timing of plastic film mulching on water and salt movements in coastal saline soil under freezing saline water irrigation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (6) : 1202—1212
- [6] Yarami N, Sepaskhah A R. Saffron response to irrigation water salinity, cow manure and planting method. *Agricultural Water Management*, 2015, 150 (1) : 57—66
- [7] 张长宽. 江苏省近海海洋环境资源基本现状. 北京: 海洋出版社, 2012
Zhang C K. Basic status of offshore marine environment and resources of Jiangsu Province (In Chinese). Beijing: Ocean Press, 2012
- [8] Smith L E D, Siciliano G. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209 (1) : 15—25
- [9] 赵伟, 梁斌, 周建斌. 施入¹⁵N 标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用. *土壤学报*, 2015, 52 (3) : 587—596
Zhao W, Liang B, Zhou J B. Residual of applied ¹⁵N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3) : 587—596
- [10] Vaneekhaute C, Ghekiere G, Michels E, et al. Assessing nutrient use efficiency and environmental pressure of macronutrients in bio-based mineral fertilizers: A review of recent advances and best practices at field scale. *Advances in Agronomy*, 2014, 128 (1) : 137—180
- [11] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究. *土壤学报*, 2015, 52 (4) : 802—817
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, et al. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4) : 802—817
- [12] 刘艳丽, 丁方军, 谷端银, 等. 不同活化处理腐植酸—尿素对褐土小麦—玉米产量及有机碳氮矿化的影响. *土壤*, 2015, 47 (1) : 42—48
Liu Y L, Ding F J, Gu D Y, et al. Characteristics of wheat—maize yield and soil organic carbon/nitrogen mineralization in cinnamon soil with application of different activation humic acid—urea (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (1) : 42—48
- [13] Li J, Zhuang X G, Font O, et al. Synthesis of merlinoite from Chinese coal fly ashes and its potential utilization as slow release K—fertilizer. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 265 (1) : 242—252
- [14] Senna A M, do Carmo J B, da Silva J M S, et al. Synthesis, characterization and application of hydrogel derived from cellulose acetate as a substrate for slow—release NPK fertilizer and water retention in soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, 3 (2) : 996—1002
- [15] 金白云, 章东林, 管永祥, 等. 颗粒状盐碱地保水缓释肥的生产方法. ZL 2012 1 0400570.0. 2013—01—16
Jin B Y, Zhang D L, Guan Y X, et al. Manufacturing process of granular saline—soil fertility of water retaining and slowly—release (In Chinese). ZL 2012 1 0400570.0. 2013—01—16
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [17] 夏扬, 秦江涛, 朱晓军, 等. 不同有机物添加方式下水稻对干旱胁迫的响应. *土壤*, 2009, 41 (1) : 118—125
Xia Y, Qin J T, Zhu X J, et al. Responses to drought stress of rice with different organic matter placement (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (1) : 118—125
- [18] Yang Y, Zheng Q S, Liu M, et al. Difference in sodium spatial

- distribution in the shoot of two canola cultivars under saline stress. *Plant and Cell Physiology*, 2012, 53 (6): 1083—1092
- [19] Azeem B, KuShaari K, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181 (1): 11—21
- [20] Sarangi S K, Maji B, Singh S, et al. Improved nursery management further enhances the productivity of stress-tolerant rice varieties in coastal rainfed lowlands. *Field Crops Research*, 2015, 174 (1): 61—70
- [21] Nakano A, Yamauchi A, Uehara Y. Effects of application of low-sulfate slow-release fertilizer (LSR) on shoot and root growth and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *The Japan Agricultural Research Quarterly*, 2003, 37 (2): 121—127
- [22] Liu L P, Long X H, Shao H B, et al. Ameliorants improve saline - alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 328—334
- [23] Yemets O, Gausla Y, Solhaug K A, et al. Monitoring with lichens-Conductivity methods assess salt and heavy metal damage more efficiently than chlorophyll fluorescence. *Ecological Indicators*, 2015, 55 (1): 59—64
- [24] Kostopoulou Z, Therios I, Roumeliotis E, et al. Melatonin combined with ascorbic acid provides salt adaptation in *Citrus aurantium* L. seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 86 (1): 155—165

Regulation of Water Retaining Slowly-Release Fertilizer on Growth and Photosynthesis of Rice under Salt Stress

SUN Zhiguo¹ LIU Ran¹ WU Hao² ZHAO Haiyan¹ SAIBIRE Annaiwa¹ ZHENG Qingsong¹
LUO Zhaohui^{1†} GUAN Yongxiang^{2†}

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Jiangsu Station of Agro-Environmental Monitoring and Protection, Nanjing 210036, China)

Abstract Fertilizer, especially chemical fertilizer, contributes significantly to the production of modern agriculture. However, in recent years, fertilizer consumption has been increasing exponentially throughout the world, and as a result, causing a series of serious environmental problems. The use of water retaining slowly-release fertilizer (WRSRF) is a promising approach to improving the utilization of water resources and fertilizer nutrients, and pursuing sustainable development of the environment and agriculture. Some fertilizers can also be used to alleviate salt stress of crop plants, such as urea, manure, etc. however, little has been reported on application of water retaining slowly-release fertilizer to plants under salt stress. To fill the gap, a pot experiment was conducted to evaluate effects of WRSRF (ZL 2012 1 0400570.0) on plant morphology, root development, plant dry weight, leaf chlorophyll content, gas exchange parameters and water use efficiency (WUE) of rice seedlings under salt stress for 20, 40 and 80 d, separately. Rice seeds were sown in pots filled with natural soil, 2.68 g kg⁻¹ in salinity. Twenty days later, half of the pots were amended with sodium chloride (NaCl) through irrigation to make 2.0 g kg⁻¹ in salinity. WRSRF was applied at 0, 1, 2 and 4 g kg⁻¹, separately to the pots. Results showed that: (1) growth of the rice seedlings applied with WRSRF increased with application rate of the fertilizer regardless of salt stress; (2) total root length, root surface area, root volume and number of root tips were all increased as EPSON scanning reveals, particularly in the treatment applied with WRSRF at 4% and the increase was especially significant in root surface area and root volume; (3) WRSRF application increased dry weight of the rice plants under salt stress, and the effect was more significant when WRSRF was higher in application rate. However, the stimulation effect was more obvious on roots than on shoots; (4) the fertilizer application increased leaf chlorophyll content of the plants under salt stress, and the increase was getting more significant with the experiment

going on. However, the increase effect on chlorophyll content in plants under high salt stress was more obvious than that in plants under low salt stress; and (5) application of water retaining and slowly-release fertilizer promoted net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular carbon dioxide concentration (Ci), transpiration rate (Tr) and WUE, and these effects became more significant with increasing WRSFR rate, especially on Pn. However, application of the fertilizer decreased stomatal limitation values (Ls) of the plants, and the decrease became more significant with increasing fertilization rate. To sum up, application of the water retaining and slowly-release fertilizer (ZL 2012 1 0400570.0) may improve salt tolerance of rice seedlings significantly, which may be attributed to its effects on root growth, content of leaf chlorophyll, photosynthesis and WUE.

Key words Water retaining slowly-release fertilizer; Rice seedlings; Salt tolerance; Photosynthesis

(责任编辑：陈荣府)