

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第8期 Vol.32 No.8 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 8 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

东北地区 5 种阔叶树苗木对火烧的生理响应	王 荣, 胡海清	(2303)
梭梭木虱发生规律及其影响因素	李粉莲, 吴雪海, 王佩玲, 等	(2311)
基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布	刘双娜, 周 涛, 舒 阳, 等	(2320)
流域景观格局与河流水质的多变量相关分析	赵 鹏, 夏北成, 秦建桥, 等	(2331)
内蒙古达赉湖地区赤狐生境选择及生境景观特征分析	张洪海, 李成涛, 窦华山, 等	(2342)
雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价	徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等	(2351)
用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响	翟天庆, 李欣海	(2361)
2010 年牧区 2 代草地螟成虫迁飞的虫源分析	张 丽, 张云慧, 曾 娟, 等	(2371)
基于细胞色素 b 基因的中国岩羊不同地理种群遗传差异分析	李楠楠, 刘振生, 王正寰, 等	(2381)
喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性	鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等	(2390)
永定河沿河沙地杨树人工林生态系统呼吸特征	方显瑞, 张志强, 查同刚, 等	(2400)
基于湿地植物光谱的水体总氮估测	刘 克, 赵文吉, 郭逍宇, 等	(2410)
背瘤丽蚌 F 型线粒体基因组全序列分析	陈 玲, 汪桂玲, 李家乐	(2420)
流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例	李崇巍, 胡 婕, 王 飒, 等	(2430)
线虫群落对抚顺煤矸石山周边土壤可溶性盐污染的响应	张伟东, 吕 莹, 肖 莹, 等	(2439)
地上竞争对林下红松生物量分配的影响	汪金松, 范秀华, 范 娟, 等	(2447)
湿地松和马尾松人工林土壤甲烷代谢微生物群落的结构特征	王 芸, 郑 华, 陈法霖, 等	(2458)
马尾松和杉木树干韧皮部水溶性糖 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气象因子的响应	卢钰茜, 王振兴, 郑怀舟, 等	(2466)
沙坡头人工植被演替过程的土壤呼吸特征	高艳红, 刘立超, 贾荣亮, 等	(2474)
豫西刺槐能源林的热值动态	谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 等	(2483)
铁皮石斛种子的室内共生萌发	吴慧凤, 宋希强, 刘红霞	(2491)
红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响	杨再强, 张继波, 李永秀, 等	(2498)
扑草净对远志幼苗根系活力及氧化胁迫的影响	温银元, 郭平毅, 尹美强, 等	(2506)
地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响	郑有飞, 徐卫民, 吴荣军, 等	(2515)
AMF 对喀斯特土壤枯落物分解和对宿主植物的养分传递	何跃军, 钟章成, 董 鸣	(2525)
传统豆酱发酵过程中细菌多样性动态	葛菁萍, 柴洋洋, 陈 丽, 等	(2532)
定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响	孙倩倩, 王正银, 赵 欢, 等	(2539)
基于生态需水保障的农业生态补偿标准	庞爱萍, 孙 涛	(2550)
保障粮食安全造成的生态价值损失评估模型及应用	芦蔚叶, 姜志德, 张应龙, 等	(2561)
专论与综述		
疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力	黄华梅, 高 杨, 王银霞, 等	(2571)
问题讨论		
厌氧氨氧化菌群体感应系统研究	丁 爽, 郑 平, 张 萌, 等	(2581)
基于形态结构特征的洞庭湖湖泊健康评价	帅 红, 李景保, 夏北成, 等	(2588)
研究简报		
黄土高原不同树种枯落叶混合分解效应	刘增文, 杜良贞, 张晓曦, 等	(2596)
不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异	马少杰, 李正才, 王 斌, 等	(2603)
干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响	欧立军, 陈 波, 邹学校	(2612)
硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响	陈 伟, 蔡昆争, 陈基宁	(2620)



封面图说: 红树林粗大的气生根——红树林是热带、亚热带海湾及河口泥滩上特有的常绿灌木或乔木群落。由于海水环境条件特殊,红树林植物具有一系列特殊的生态和生理特征。其中之一就是气根,红树从根部长出许多指状的气生根露出海滩地面,以便在退潮时甚至潮水淹没时用以通气,故称呼吸根。在中国,红树林主要分布在海南、广西、广东和福建省沿海,它一般分布于高潮线与低潮线之间的潮间带,往往潮差越大,红树的呼吸根就长得越高越粗大。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chen@163.com

DOI: 10.5846/stxb201103140314

陈伟, 蔡昆争, 陈基宁. 硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响. 生态学报, 2012, 32(8): 2620-2628.

Chen Wei, Cai Kunzheng*, Chen J N. Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2620-2628.

硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和 矿质养分吸收的影响

陈 伟, 蔡昆争*, 陈基宁

(华南农业大学 农业部生态农业重点实验室, 广州 510642)

摘要: 硅被认为是植物生长的有益元素, 它能增强植物对非生物逆境和生物逆境胁迫的抗性。以抗旱性不同的一对水稻近等基因系 w-14 和 w-20 为实验材料, 采用盆栽实验, 研究了干旱胁迫下硅处理对水稻生长性状、光合生理特性和矿质养分吸收的影响。结果表明, 在正常水分条件下硅处理对水稻的生长及生理特性没有明显影响。干旱胁迫显著降低水稻植株的生长, 叶绿素含量、叶绿素荧光参数 F_v/F_m 及 F_v/F_0 值显著降低, 光合作用受到明显抑制。加硅能提高干旱胁迫条件下水稻植株的生物量、水分利用效率、叶片叶绿素含量、净光合速率和蒸腾速率, 而气孔导度和细胞间隙 CO_2 浓度则下降。无论干旱与否, 施硅后水稻的叶片硅含量均显著上升。两个水稻品系叶片的无机离子含量在干旱胁迫条件下均呈显著增加的趋势, 而硅处理后材料 w-14 的叶片 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 含量分别降低 16.38%, 24.50%, 19.70%, 21.52%, 18.58%, w-20 则分别降低 11.64%, 12.11%, 16.06%, 11.11% 和 19.15%, 并使之回复到与对照更接近的水平。研究结果表明了硅提高水稻植株的抗旱性与光合作用的改善和矿质养分的调节有关。

关键词: 水稻; 硅; 干旱胁迫; 水分利用效率; 光合作用; 矿质养分

Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves

CHEN Wei, CAI Kunzheng*, CHEN Jining

(Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Drought stress is one of the major constraints for rice production in the rainfed lowlands in the world. Silicon (Si) has been verified to play an important role in increasing plant resistance to biotic and abiotic stress, although it is not considered an essential element to higher plants. In addition, there were some reports about the beneficial role of Si in alleviating drought stress, yet the mechanism is still poorly understood. Here, two near-isogenic lines of rice (*Oryza sativa* L.), w-14 (drought susceptible) and w-20 (drought resistant), were chosen to study the effects of exogenous Si application on the growth traits, photosynthetic characteristics and mineral nutrient absorption of rice plant under drought stress. Water was withheld 10 days during heading stage. The results showed that 1.5 mmol/L Si supply had no significant effects on growth and physiological parameters of rice plants under well-watered conditions. Drought stress was found to reduce dry weight, leaf water potential, photosynthetic parameters, basal quantum yield (F_v/F_0) and maximum quantum efficiency of PS II photochemistry (F_v/F_m) in rice plants, while Si application significantly increased dry matter accumulation, water utilization efficiency, water potential, chlorophyll content, F_v/F_m and F_v/F_0 , photosynthetic rate (Pr), transpiration rate (Tr) of leaves for both rice lines under drought stress, but stomatal conductance (G_s) and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31070396); 教育部博士点基金资助项目 (20094404110007)

收稿日期: 2011-03-14; **修订日期:** 2011-09-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kzcai@scau.edu.cn

intercellular CO_2 concentration (C_i) were decreased. Silicon content in leaves was significantly increased by Si treatment whether drought stress occurred or not. In addition, Si supply could influence mineral nutrient level of rice leaves. Significant increase in the content of inorganic ions level of leaves were found in the two near-isogenic rice lines under drought stress, but Si treatment significantly reduced these ions, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} content in leaves were reduced by 16.38%, 24.50%, 19.70%, 21.52% and 18.58% for line w-14, 11.64%, 12.11%, 16.06%, 11.11% and 19.15% for line w-20, respectively. These results suggested that silicon application is useful to alleviate drought stress of rice through the enhancement of photochemical efficiency and adjustment of the mineral nutrient absorption in rice plants.

Key Words: rice; silicon; drought stress; water utilization efficiency; photosynthesis; mineral nutrient

硅是自然界最丰富的元素之一。目前虽无足够证据证明硅是植物生长的必需元素,但越来越多的证据表明,硅对植物的健康生长至少是有益的^[1]。研究证实,硅在提高植物对非生物胁迫如离子毒害^[2]、盐害^[3-4]、干旱胁迫^[5-6]等和生物胁迫如稻瘟病、甘蔗茎螟的抗性方面有重要作用^[7-9]。

硅可以显著提高干旱胁迫下黄瓜、小麦、草坪草、高粱、水稻^[5-6, 10]等的抗旱性,但其抗旱机理仍不完全清楚。水稻是典型的硅积累植物,茎组织硅含量能高达10%,相当于大量元素N, P, K的几倍^[11]。硅的分布在水稻叶片中含量最高,然后是茎,再其次是根^[12]。生理学的研究表明,水稻能主动吸收硅,并且比水吸收速度快,不受蒸腾的影响^[11, 13]。与其他作物(小麦、玉米、大麦、黄瓜)相比,系统研究硅与水稻的抗旱性关系较少。研究表明,水稻根系能大量吸收硅酸,然后硅酸随蒸腾液流上升到植株的地上部分,最后水分从茎叶表皮散失,大部分硅酸则沉积在表皮细胞的角质层上,使表皮细胞的外侧细胞壁中纤维素微团孔隙被硅胶充满为硅—纤维膜,同时吸收的硅中有相当部分沉积在叶片表面,形成“角质—双硅层”结构,这种结构可降低气孔的蒸腾速率和水分或水汽的渗透,使植物的凋萎减轻,蒸腾作用降低^[14-15]。Lux等^[16]对水稻2个旱地品种和1个水田品种根系研究表明,硅的沉积发生在其内皮层细胞中,2个旱地品种的硅化程度高于低地品种,这可能与具有较强抗旱性有关。本文选用两个抗旱性不同的一对水稻近等基因系材料,通过实验研究硅在干旱胁迫条件下是如何调节水稻的生长、光合作用及无机离子吸收的。

1 材料与方法

1.1 供试材料及实验设计

供试材料为两个抗旱性存在一定差异的水稻近等基因系,为材料w-14(抗旱性差)和材料w-20(抗旱性强)背景材料为华粳籼74,由华南农业大学农学院提供。试验为盆栽实验,在华南农业大学农学院温室内进行。塑料盆直径大小为25 cm,高度为30 cm,每盆装5 kg土。供试土壤为华南农业大学试验农场的水稻土,土壤的理化性状为:碱解氮179.2 mg/kg,速效磷45.4 mg/kg,速效钾134.4 mg/kg,全磷0.98 g/kg,全钾26.2 g/kg,有机质31.3 g/kg,有效硅52.6 mg/kg,土壤pH值为5.9。水稻每盆种植3穴,移栽前每盆施入尿素0.15g和复合肥0.2g(N、P、K含量均为15%),生长管理在处理前按常规管理,8月10日进行幼苗移栽,11月9日实验结束。

两个水稻实验材料分别设置对照(CK),干旱(D),对照+1.5 mmol/L硅(CK+Si),干旱+1.5 mmol/L硅(D+Si)4个处理,硅处理是在移栽前将1.5 mmol/L的硅酸钾加到土壤中,通过施硅带来的钾通过添加等量的KCl以消除钾的影响。待植株生长到抽穗期(移栽后65 d)进行干旱处理(处理10 d),通过称重法将土壤含水量控制在21%,土壤含水量(重量%)=(原土重-烘干土重)/烘干土重 $\times 100\%$,对照为淹水处理。每个处理设4个重复,共2个材料 $\times 4$ 种处理 $\times 4$ 个重复共32盆,到干旱胁迫结束后10 d(移栽后85 d)取样测定地上部生物量、叶片水势、叶绿素含量、叶绿素荧光、叶片硅含量、光合作用参数、无机离子含量等有关指标。整个实验期间计算灌水量,最后计算水分利用效率。

1.4 测定指标及方法

生物量 取水稻植株,用蒸馏水洗净,用吸水纸吸干表面的水分,称取鲜重。然后将其在110℃杀青

30min, 于 75 ℃ 烘干至恒重, 称取干重。

水势 统一取主茎的倒 2 叶, 采用美国 Yamato 公司生产的 WP4 水势仪进行测定, 单位为 MPa。

叶绿素含量的测定 参照有关文献的方法^[17]。叶绿素荧光: 用美国产的 OS-30P 型叶绿素荧光仪直接测定。得到叶片的初始荧光(F_0), 可变荧光(F_v), 最大荧光(F_m)。

硅含量 参照戴伟民等^[18]的方法, 略有改动。将 0.1 g 烘干磨碎的叶片样品放入 100 mL 耐高压塑料管中, 加入 3 mL 50% 的 NaOH 溶液, 盖上盖子, 振荡器上摇匀, 于高压灭菌锅 121 ℃ 下灭菌 20 min 后, 用漏斗转移至 50 mL 容量瓶中, 蒸馏水定容, 颠倒摇匀 10 次。然后从中吸取 1 mL 样品至 50 mL 容量瓶中, 加入 30 mL 20% 的冰醋酸, 接着加入 10 mL 钼酸铵溶液(54 g/L, pH 值 7.0), 摇匀; 5 min 后, 快速加入 5 mL 20% 的酒石酸, 接着快速加入 1 mL 还原试剂, 溶液 A: 溶解 2 g Na_2SO_3 和 0.4 g 1-氨基-2-萘酚-4-磺酸于 25 mL 蒸馏水中; 溶液 B: 溶解 25 g NaHSO_3 于 200 mL 蒸馏水中, 混合溶液 A 和 B, 并定容至 250 mL, 装于聚乙烯瓶(外套黑罩), 放于暗处保存(最多 2 周), 最后用 20% 的冰醋酸定容至 50 mL。30 min 以后, 于 650 nm 处比色, 读取 OD 值。根据吸光值在标准曲线上查得含硅量, 计算出样品的硅含量。

光合作用参数 选取健康的水稻叶片倒 3 叶, 用 LI-COR 公司生产的 LI-6400 光合仪标准叶室测定净光合速率、蒸腾速率和气孔导度和胞间 CO_2 浓度。

无机离子含量 称取 0.3 g 烘干磨碎的叶片样品于 150 mL 三角瓶中, 加入 5 mL 高氯酸和 15 mL 浓硝酸浸泡(静置过夜), 然后在电热板上于 180 ℃ 下煮至透明色, 冷却后用去离子水定容至 50 mL, 用 Vurian 公司(美国)生产的 SpectrAA220FS 火焰原子吸收光谱仪测定 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量。

1.5 数据处理

所用数据均用 Excel 录入数据、制作图表和计算, 以 SPSS13.0 软件进行统计分析, 用邓肯氏新复极差法(DMRT)测验不同处理的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 硅和干旱胁迫对地上部生物量和水分利用效率、硅含量的影响

从表 1 中可以看出, 水稻地上部干重在干旱胁迫后与对照相比有所减少, 材料 14 和 20 分别降低 14.36% 和 7.23%, 材料 14 降低幅度较大。干旱胁迫条件下, 加硅处理能显著增加水稻地上部的干重, 达到与对照接近的水平, 其中抗旱性差的材料 14 增加幅度较大, 为 36.58%, 抗旱性强的材料 20 增加幅度为 17.97%。表明施硅明显减轻了干旱胁迫对水稻植株的不利影响

表 1 硅和干旱胁迫对水稻植株地上部干重、叶片水分状况及硅含量的影响

Table 1 Effects of Si and drought stress on shoot dry weight, water status and Si content in rice leaves

品系 Rice line	处理 Treatment	地上部干重 Shoot weight /(g/株)	叶片水势 Leaf water potential /MPa	水分利用效率 Water utilization efficiency /(g/cm ³)	叶片硅含量 Si content of leaves /(g/kg)
w-14	CK	37.89±1.24 b	-1.19±0.05 ab	0.42±0.02 ab	32.31±1.89 b
	CK+Si	44.66±1.51 a	-0.85±0.08 a	0.53±0.03 a	41.76±1.40 a
	D	32.45±2.30 b	-1.71±0.24 b	0.37±0.01 b	33.32±1.71 b
	D+Si	44.32±2.07 a	-1.20±0.06b	0.56±0.03 a	44.77±2.42 a
w-20	CK	38.33±2.94 ab	-1.33±0.23 a	0.42±0.03 b	30.91±0.77 b
	CK+Si	46.32±3.21 a	-1.27±0.02 a	0.56±0.02 a	45.98±1.16 a
	D	35.56±0.96 b	-1.92±0.19 b	0.48±0.02 b	32.82±1.24 b
	D+Si	41.95±3.22 ab	-1.41±0.08a	0.44±0.01 b	49.19±2.72 a

CK, D, CK+Si, D+Si 分别表示对照, 干旱, 对照+硅, 干旱+硅处理, 表中同一列同一品系的不同处理字母不同者为差异达到显著差异($P < 0.05$)

干旱处理显著降低水稻叶片水势, 而加硅处理则能改善叶片的水分状况, 分别使材料 w-14 和 w-20 的叶片水势分别增加 29.82% 和 15.17%, 对材料 w-14 的效果更为明显。另外, 硅处理还显著提高了干旱胁迫下

材料 14 的水分利用效率,但对材料 20 没有明显影响。这些结果说明硅提高了水稻植株的保水能力。

无论是正常淹水还是干旱胁迫条件下,加硅处理均能显著增加水稻叶片的硅含量。正常水分条件下,硅处理增加材料 w-14 和 w-20 的叶片硅含量的幅度分别为 29.25% 和 48.75%,干旱胁迫条件则分别增加 34.36% 和 49.88%,其中 w-20 增加幅度更大,这说明抗旱性强的水稻品系硅吸收能力更强。

2.2 硅处理和干旱胁迫对水稻叶片叶绿素含量和叶绿素荧光的影响

水分胁迫显著降低叶片的叶绿素含量、叶绿素荧光参数 F_v/F_0 和 F_v/F_m 值,而加硅处理则能显著提高这些指标,甚至干旱胁迫下加硅处理的 F_v/F_0 和 F_v/F_m 值能达到正常生长条件下的水平(表 2)。与对照相比,材料 w-14 和 w-20 叶片叶绿素含量在干旱后分别降低 30.29% 和 38.09%,而在加硅处理(D+Si)则分别增加 22.43% 和 24.62%,两个品系之间差异不大; F_v/F_0 及 F_v/F_m 值也有类似的效果。

表 2 硅和干旱胁迫对水稻叶片叶绿素含量和叶绿素荧光参数的影响

Table 2 Effects of Si and drought on leaf chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameter F_0 , F_v/F_m of rice leaves

品系 Line	处理 Treatment	叶绿素含量 leaf chlorophyll content (mg/g)	F_v/F_m	F_v/F_0
品系 w-14 Line 14	CK	3.07±0.09 a	0.786±0.001 b	3.66±0.009 b
	CK+Si	3.30±0.10 a	0.801±0.002 a	4.14±0.008 a
	D	2.14±0.012 c	0.764±0.01 c	3.02±0.011 c
	D+Si	2.62±0.012 b	0.780±0.01 b	3.56±0.010 b
品系 w-20 Line 20	CK	3.15±0.13 a	0.792±0.001 a	3.83±0.006 ab
	CK+Si	2.87±0.022 ab	0.798±0.001 a	3.96±0.011 a
	D	1.95±0.009 c	0.764±0.002 b	3.09±0.012 c
	D+Si	2.43±0.012 b	0.789±0.001 a	3.74±0.009 b

2.3 硅对干旱胁迫条件下水稻叶片光合特性的影响

2.3.1 净光合速率和蒸腾速率

在无胁迫情况下,施硅水稻植株光合作用与不施硅植株相比无明显差异(图 1)。干旱胁迫条件下,两个水稻材料的叶片净光合速率均显著下降,材料 w-14 和 w-20 分别下降 29.89% 和 45.39%,材料 w-20 下降幅度较大。而在干旱胁迫下施加硅后,材料 w-14 和 w-20 的净光合速率分别升高 26.17% 和 62.56%,差异显著,其中 w-20 增加幅度更大。

干旱胁迫下,两个抗旱性不同的水稻材料其植株叶片的蒸腾速率与对照相比都有明显下降(图 2)。与对照相比,材料 w-14 和 w-20 分别降低 25.62% 和 24.38%。加硅处理后,两个材料的叶片蒸腾速率均显著增加,w-14 和 w-20 分别比单纯干旱处理增加 15.63% 和 23.74%,品系间差异不明显。这是由于硅提高了植株的叶片水势和保水能力,从而保证施硅水稻植株蒸腾速率的相对稳定。

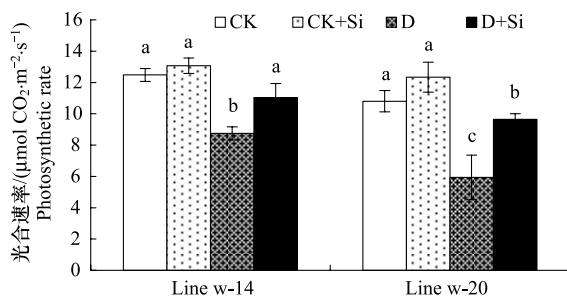


图 1 硅处理对干旱胁迫条件下水稻叶片光合速率的影响

Fig. 1 Effects of Si and drought on photosynthetic rate of rice leaves

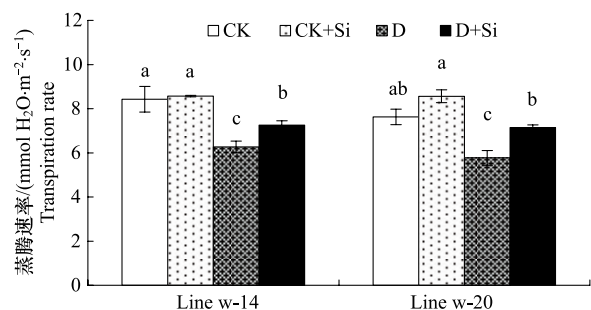


图 2 硅处理对干旱胁迫条件下水稻叶片蒸腾速率的影响

Fig. 2 Effects of Si and drought on transpiration rate of rice leaves

2.3.2 气孔导度和胞间 CO₂ 浓度

正常水分条件下,两个水稻材料的叶片气孔导度与对照没有显著性差异(图3)。干旱胁迫显著降低叶片的气孔导度,材料 w-14 和 w-20 分别降低 18.18% 和 17.65%。加硅处理后,两个水稻材料的气孔导度均较单一干旱处理有所下降,其中材料 w-14 的气孔导度下降 11.11%,达到显著水平,而材料 w-20 则没有显著差异。

从图4可以看出,加硅与否对正常水分管理条件下水稻叶片的细胞间隙 CO₂ 浓度没有明显影响。干旱胁迫后两个水稻材料的叶片细胞间隙 CO₂ 浓度均显著降低,材料 w-20 的下降幅度大于 w-14。与单一干旱相比,加硅处理在一定程度上进一步降低了叶片细胞间隙 CO₂ 的浓度,材料 w-14 和 w-20 分别降低 9.19% 和 3.48%,且前者达到显著差异。

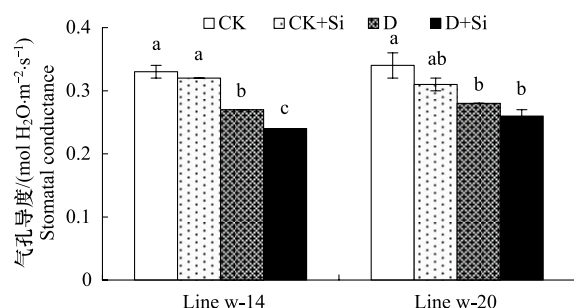


图3 硅处理对干旱胁迫条件下水稻叶片气孔导度的影响

Fig. 3 Effects of Si and drought on stomatal conductance of rice leaves

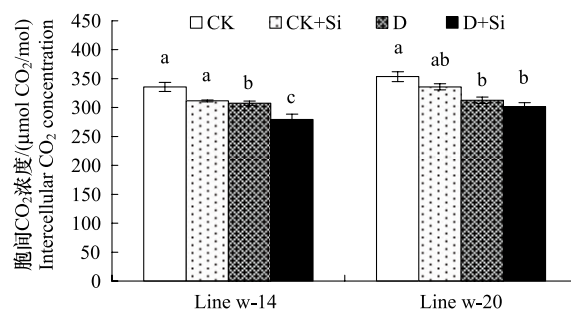


图4 硅处理对干旱胁迫条件下水稻叶片胞间 CO₂ 浓度的影响

Fig. 4 Effects of Si and drought on intercellular CO₂ concentration of rice leaves

2.4 硅和干旱胁迫对叶片无机离子吸收的影响

硅和干旱胁迫能显著影响水稻叶片的无机离子含量。从表3可以看出,正常水分条件下无论施硅与否对无机离子含量没有明显影响。干旱胁迫则显著增加叶片的无机离子含量,其中材料 w-14 叶片的 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe³⁺ 含量分别增加 15.93%、41.88%、28.40%、24.30% 和 31.95%,材料 w-20 分别则分别增加 25.43%、47.22%、21.12%、16.93% 和 15.38%,材料 14 叶片 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe³⁺ 含量增加的幅度要大于材料 20,K⁺、Na⁺ 的积累幅度则以材料 20 较大。在干旱胁迫条件下,加硅处理则能缓解由于干旱胁迫所带来的植株体内离子积累的状况,显著降低两个品系的叶片离子含量,使之恢复到与对照接近的水平。其中材料 w-14 叶片的 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe³⁺ 含量分别降低 16.38%、24.50%、19.70%、21.52% 和 18.58%,材料 w-20 分别则分别增加 11.64%、12.11%、16.06%、11.11% 和 19.15%。

表3 施硅和干旱胁迫对水稻叶片无机离子含量的影响

Table 3 Effects Si and drought on the content of inorganic ion of rice leaves

品系 Line	处理 Treatment	K ⁺ /(g/kg)	Na ⁺ /(g/kg)	Ca ²⁺ /(g/kg)	Mg ²⁺ /(g/kg)	Fe ³⁺ /(mg/kg)
w-14	CK	16.81±0.043 b	4.72±0.018 bc	9.12±0.022 b	2.87±0.004 b	263.30±0.041 b
	CK+Si	15.82±0.082 b	4.26±0.045 c	8.66±0.024 b	2.80±0.011 b	257.43±0.049 bc
	D	20.00±1.64 a	8.12±0.089 a	11.72±0.012 a	3.57±0.016 a	347.43±0.042 a
	D+Si	16.72±0.050 b	6.13±0.031 b	9.41±0.038 b	2.80±0.016 b	282.89±0.083 b
w-20	CK	15.59±1.19 b	4.77±0.032 c	9.50±0.014 b	2.75±0.009 b	310.15±3.06 b
	CK+Si	15.61±0.052 b	4.41±0.026 c	9.26±0.027 b	2.71±0.005 b	289.31±24.60 b
	D	19.55±0.045 a	9.03±0.020 a	11.50±0.027 a	3.21±0.006 a	357.84±5.84 a
	D+Si	17.27±0.073 ab	7.94±0.019 b	9.66±0.039 b	2.86±0.008 b	294.01±10.10 b

3 讨论

干旱是影响作物生长及生理特性的最重要的逆境因子之一,严重干旱将造成作物生长减缓,代谢失调,产量显著下降,而硅处理则能提高作物对干旱胁迫的抗性。干旱胁迫条件下,硅可以提高高粱的干物质量,提高根冠比,促进植物对水分吸收的利用率^[6];同时,硅还可以通过提高干旱胁迫条件下小麦的相对含水量,增加小麦叶水势和叶面积以及叶片厚度,减少水分蒸发损失,而提高小麦抗旱性^[5]。本研究结果表明,干旱胁迫条件下,加硅处理能够增加水稻的植株生物量和叶片水势,提高水分利用效率,改善叶片的光合作用特性,从而增加对干旱的抗性。其中抗旱性弱的水稻材料(w-14)受干旱胁迫影响较大,硅处理后对胁迫的缓解效果更为明显,表现为生物量和叶片水势及水分利用效率增加幅度更大(表1)。

3.1 干旱逆境下硅处理与叶绿素荧光及光合作用的关系

在干旱胁迫下,水稻叶绿素含量,叶绿素荧光大小,光合速率,蒸腾速率以及气孔导度等均明显降低,抗旱性强的品种能维持较强的光合作用^[19-20]。 F_v/F_m 和 F_v/F_0 常被用作标明环境胁迫程度的指标和探针,可作为抗旱性检测的相对指标^[21-22]。随着渗透胁迫的加剧, F_v/F_m 和 F_v/F_0 都表现出降低-增加-降低的趋势,其中, F_v/F_0 和 F_v/F_m 分别代表 PS II 的潜在活性和 PS II 原初光能转化效率^[23]。

本实验结果表明,在干旱胁迫下,水稻叶片的叶绿素荧光参数 F_v/F_m 值及 F_v/F_0 值均比对照显著下降,这与前人的研究结果一致^[24-25]。说明水稻在遭受缺水状况时光能转化率受到严重抑制,干旱胁迫直接影响了光合作用的电子传递和 CO_2 同化过程,使包括光合电子传递和质子梯度建立在内的 CO_2 同化过程受到抑制和损伤,使光合电子传递速率和光合同化速率下降,光合强度减弱。经过加硅处理后,这两个值都有所回升,接近对照水平,有利于光合色素把所捕获的光能以更高的速度和效率转化为化学能,从而为碳同化提供了更加充足的能量,进而提高光合特性。

硅能显著影响干旱胁迫下植物的气体交换特性。Agarie 等^[15]研究表明,硅能降低 PEG 干旱胁迫下水稻叶片的气孔导度从而降低蒸腾速率和膜透性,加硅处理的黄瓜具有较高的水分含量和并能够增加干物重^[26]。李清芳等^[27]报道,硅参与大豆抗旱的生理反应,随着土壤有效硅含量的提高,幼苗生长过程中蒸腾强度减弱,水分利用效率和叶片含水量升高,抗旱保水能力提高。有研究认为,干旱胁迫条件下硅的调控作用是与蒸腾速率的降低有关的^[15, 28]。然而,本研究发现,硅处理显著增加了干旱胁迫下水稻叶片的蒸腾速率,类似的结果在黄瓜和小麦的研究中也有报道^[5-6]。Hattori 等^[29]认为硅提高抗旱性与叶片水分状况之间是独立的关系,这预示着硅介导植物的抗旱性是比较复杂的一个过程,需要更深入的了解。

本研究结果发现,干旱显著降低水稻的生长和抑制水稻的光合作用。而加硅处理能有效提高干旱胁迫条件下水稻的叶片光合速率、蒸腾速率,而气孔导度和细胞间隙 CO_2 浓度显著下降,这些结果与丁燕芳等^[30]和 Chen 等^[31]的结果相似。有研究表明,硅可以影响气孔运动和细胞汁液浓度,施加硅酸的玉米植株木质部汁液流动速度比未施加硅酸的玉米植株降低 20%,表明硅的沉积导致木质部导管汁液的亲和力增加^[32]。Hattori 等^[6]认为硅能使高粱植株的气孔导度维持在一个很高的水平,有利于提高吸水能力,明显增强抗旱性。硅降低了干旱胁迫下黄瓜叶片的气孔导度,提高了抗旱保水能力,使蒸腾速率保持在一个相对稳定的水平^[10]。李清芳等^[33]对玉米的研究也有类似研究结果,即施硅降低了干旱胁迫下玉米植株的气孔导度,降低了干旱胁迫早期到中期的蒸腾速率,保持了干旱胁迫后期较高的蒸腾速率,从而导致施硅玉米植株的叶片含水量和水势高于对照。本研究结果发现,加硅处理后,干旱胁迫条件下两个水稻材料的净光合速率都显著提高,蒸腾速率有明显上升。干旱胁迫条件下,水稻叶片气孔导度和细胞间隙 CO_2 浓度显著降低,硅处理后其值仍然降低,但硅处理后净光合速率有较明显的上升,这可能是由于硅提高了 RuBP 羧化酶活性所致^[34],其机理有待于今后进一步研究。

3.2 干旱逆境胁迫下硅与无机离子吸收的关系

无机离子的积累是植物适应干旱逆境和渗透调节的重要途径之一。植物在遭受水分胁迫后会通过积累一些可溶性物质来进行渗透调节,这是其适应水分胁迫的重要生理机制^[35-38]。这些渗透调节物质包括有机

物质如可溶性糖、游离氨基酸、脯氨酸等和无机离子如 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 等。研究表明,在干旱胁迫下两个水稻材料 w-14 和 w-20 植株的无机离子含量大幅上升,特别是 w-20 材料更为明显。早期的研究也发现^[39],不同生育期干旱胁迫后水稻根系和叶片的无机渗透调节物质包括 K^+ 、 Mg^{2+} 等含量均大幅度上升,而且幼穗分化期和抽穗期这两个对水分胁迫最敏感的时期上升幅度最大。李春香等^[40]通过小麦试验表明随着水分胁迫的加重,叶片中无机渗透调节物质(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的浓度均有增加的趋势,不同生育期及不同品种之间差异不显著。刘建新等^[41]通过对 NaCl 胁迫下 3 种国产骆驼蓬属植物体内的无机离子进行了分析比较表明,不同浓度盐胁迫下,无机离子含量的变化,产生了其在渗透调节中贡献的差异。无机离子在渗透调节中的贡献随盐胁迫浓度增加而降低。

本研究表明,在正常水分管理条件下,硅处理对叶片无机离子含量影响不大,而在干旱胁迫条件下,硅处理由于改善了植株体内的水分状况,减缓了胁迫所造成的负面影响,由此显著降低由于胁迫所造成的无机离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+})积累,使之恢复到与对照(CK)接近的水平。Pei 等^[42]通过对小麦进行 PEG 模拟干旱实验,也有类似的结论,即硅处理能降低 K、Ca、Mg 的吸收。但由于在干旱胁迫条件下,硅处理增加干物质积累的幅度(表 1,材料 14 和 20 增加幅度分别为 36.58% 和 17.97%)大于无机离子降低的幅度(表 3,材料 14 和 20 无机离子降低的幅度分别为 16.38%—24.50% 和 11.64%—19.15%),因此总的来说硅处理尽管降低叶片无机离子含量,但还是增加了无机离子吸收的总量。Kaya 等^[43]研究也有类似结果,即干旱胁迫下,硅处理能增加玉米叶片 Ca、K、Si 的含量。至于硅促进无机离子吸收的机理,有研究表明,硅增加 K 的吸收可能与胁迫条件下硅对原生质膜 H^+ -ATPase 活性的促进有关^[3]。Ca 是通过木质部进行运转的,与蒸腾作用关系密切,干旱胁迫下硅处理能增加蒸腾作用,同时也就促进 Ca 的吸收^[6,44]。因此水分胁迫条件下硅能影响和调节无机离子的吸收和积累,但深入的机理需要进一步深入研究。

4 结论

(1) 抽穗期干旱胁迫条件下,供试的两个水稻材料的生长和光合作用受到显著抑制。硅处理则缓解了这种抑制效应,显著提高胁迫条件下的地上部生物量、叶片水势和水分利用效率。其中抗旱性弱的水稻材料(w-14)受干旱胁迫影响较大,硅处理后对胁迫的缓解效果更为明显,表现为生物量和叶片水势及水分利用效率增加幅度更大。硅处理能显著改善叶片的光合作用特性,提高叶片的叶绿素含量和叶绿素荧光参数值 Fv/Fm 及 Fv/F_0 值,增加叶片的光合速率和蒸腾速率,从而增加对干旱的抗性。

(2) 干旱胁迫后,两个水稻材料的叶片无机渗透调节物质发生显著变化,表现为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 含量均呈上升趋势。而加硅处理则显著降低这些离子的含量,使之回复到与对照更接近的水平。但由于生物量积累的速度大于无机离子降低的速度,因此硅处理还是增加了无机离子吸收的总量。因此硅提高干旱抗性不但与硅在细胞壁的沉积有关,而且与硅参与胁迫条件下植物体内的代谢生理活动是密切相关的。

References:

- [1] Epstein E. Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50(1): 641-664.
- [2] Neumann D, zur Nieden U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. Phytochemistry, 2001, 56(7): 685-692.
- [3] Liang Y C. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. Plant and Soil, 1999, 209(2): 217-224.
- [4] Zhu Z J, Wei G Q, Li J, Qian Q Q, Yu J Q. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plant Science, 2004, 167(3): 527-533.
- [5] Gong H J, Chen K M, Chen G C, Wang S M, Zhang C L. Effects of silicon on growth of wheat under drought. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26(5): 1055-1063.
- [6] Hattori T, Inanaga S, Araki H, An P, Morita S, Luxová M, Lux A. Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor. Physiologia Plantarum, 2005, 123(4): 459-466.
- [7] Kvedaras O L, Keeping M G. Silicon impedes stalk penetration by the borer *Eldana saccharina* in sugarcane. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2007, 125(1): 103-110.

- [8] Cai K Z, Gao D, Luo S M, Zeng R S, Yang J Y, Zhu X Y. Physiological and cytological mechanisms of silicon-induced resistance in rice against blast disease. *Physiologia Plantarum*, 2008, 134(2): 324-333.
- [9] Gao D, Chen J N, Cai K Z, Luo S M. Distribution and absorption of silicon in plant and its role in plant disease resistance under environmental stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2745-2753.
- [10] Ma J F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(1): 11-18.
- [11] Ma J F, Takahashi E. Soil, Fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier Science, 2002.
- [12] Majumder N D, Rakshit S C, Borthakur D N. Genetics of silica uptake in selected genotypes of rice (*O. sativa* L.). *Plant and Soil*, 1985, 88(3): 449-453.
- [13] Raven J A. Cycling silicon-the role of accumulation in plants. *New Phytologist*, 2003, 158(3): 419-421.
- [14] Agarie S, Hanaoka N, Ueno O, Miyazaki A, Kubota F, Agata W, Kaufman P B. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science*, 1998, 1(2): 96-103.
- [15] Agarie S, Uchida H, Agata W, Kubota F, Kaufman P B. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 1998, 1(2): 89-95.
- [16] Lux A, Luxova M, Morita S, Abe J, Inanaga S. Endodermal silicification in developing seminal roots of lowland and upland cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Canadian Journal of Botany*, 1999, 77(7): 955-960.
- [17] Li H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [18] Dai W M, Zhang K Q, Duan B W, Sun C X, Zheng K L, Cai R, Zhang J Y. Rapid determination of silicon content in rice (*Oryza sativa*). *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(5): 460-462.
- [19] Yang J C, Zhu Q S, Wang Z Q. Effects of soil moisture the yield and physiological characteristics in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(1): 110-114.
- [20] Meng L, Li L X, Chen W F, Xu Z J, Liu L X. Effect of water stress on stomatal density, length width and net photosynthetic rate in rice leaves. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1999, 30(5): 477-480.
- [21] Ogren E, Evans J R. Photoinhibition *in situ* in six species of *Eucalyptus*. *Australia Journal of Plant Physiology*, 1992, 19(3): 223-232.
- [22] Luo J, Zhang M Q, Lin Y Q, Zhang H, Chen R K. Studies on the relationship of chlorophyll fluorescence characters and drought tolerance in seedling of sugarcane under water stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11): 1718-1721.
- [23] Lin S Q, Xu C H, Zhang Q D, Xu L, Mao D Z, Kuang T Y. Some application of chlorophyll fluorescence kinetics to plant stress physiology to ecology and agricultural modernization. *Chinese Bulletin of Botany*, 1992, 9(1): 1-16.
- [24] Zhang Y Q, Mao X S, Sun H Y, Li W J, Yu H N. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(4): 13-15.
- [25] Zhou X J, Zhao H B, Ma C C. Effects of silicon on chlorophyll fluorescence of cucumber seedlings under severe drought stress. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(5): 79-81.
- [26] Hattori T, Lux A, Tanimoto E, Luxova M, Sugimoto Y, Inanaga S. The effect of silicon on the growth of sorghum under drought//Proceedings of the 6th Symposium of the International Society of Root Research. Nagoya, 2001: 348-349.
- [27] Li Q F, Ma C C, Li H P, Xiao Y L, Liu X Y. Effects of soil available silicon on growth, development and physiological functions of soybean. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 73-76.
- [28] Gao X P, Zou C Q, Wang L J, Zhang F S. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(9): 1637-1647.
- [29] Hattori T, Sonobe K, Inanaga S, An P, Morita S. Effects of silicon on photosynthesis of young cucumber seedlings under osmotic stress. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(6): 1046-1058.
- [30] Ding Y F, Liang Y C, Zhu J, Li Z J. Effects of silicon on plant growth, photosynthetic parameters and soluble sugar content in leaves of wheat under drought stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 471-478.
- [31] Chen W, Yao X Q, Cai K Z, Chen J N. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, 2011, 142(1): 67-76.
- [32] Gao X P, Zou C Q, Wang L J, Zhang F S. Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(8): 1457-1470.
- [33] Li Q F, Ma C C, Ji B J. Effect of silicon on water metabolism in maize plants under drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4163-4168.
- [34] Lee J S, Park J H, Han K S. Effects of potassium silicate on growth, photosynthesis, and inorganic ion absorption in cucumber hydroponics. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*, 2000, 41(5): 480-484.

- [35] Morgan J M. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1984, 35(1): 299-319.
- [36] Chaves M M, Oliveira M M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 55(407): 2365-2384.
- [37] Ashraf M, Iram A. Drought stress induced changes in some organic substances in nodules and other plant parts of two potential legumes differing in salt tolerance. *Flora*, 2005, 200(6): 535-546.
- [38] Zhu X Y, Gong H J, Chen G C, Wang S M, Zhang C L. Different solute levels in two spring wheat cultivars induced by progressive field water stress at different developmental stages. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(1): 1-14.
- [39] Cai K Z, Wu X Z, Luo S M. Effects of water stress on osmolytes at different growth stages in rice leaves and roots. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(2): 491-500.
- [40] Li C X, Wang W, Li D Q. Effects of long-term water stress on osmotic adjustment and osmolytes in wheat roots and leaves. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, 21(5): 924-930.
- [41] Liu J X, Zhao G L, Hu H B, Liu L P. Effect of NaCl stress on osmotic adjustment of *Peganum* L. seedlings. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(5): 115-119.
- [42] Pei Z F, Ming D F, Liu D, Wan G L, Geng X X, Gong H J, Zhou W J. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2010, 29(1): 106-115.
- [43] Kaya C, Tuna L, Higgs D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(8): 1469-1480.
- [44] Gong H J, Zhu X Y, Chen K M, Wang S M, Zhang C L. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 2005, 169(2): 313-321.

参考文献:

- [9] 高丹, 陈基宁, 蔡昆争, 骆世明. 硅在植物体内的分布和吸收及其在病害逆境胁迫中的抗性作用. *生态学报*, 2010, 30(10): 2745-2753.
- [17] 李合生. 植物生理实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [18] 戴伟民, 张克勤, 段彬伍, 孙成效, 郑康乐, 蔡润, 庄杰云. 测定水稻硅含量的一种简易方法. *中国水稻科学*, 2005, 19(5): 460-462.
- [19] 杨建昌, 朱庆森, 王志琴. 土壤水分对水稻产量与生理特性的影响. *作物学报*, 1995, 21(1): 110-114.
- [20] 孟雷, 李磊鑫, 陈温福, 徐正进, 刘丽霞. 水分胁迫对水稻叶片气孔密度、大小及净光合速率的影响. *沈阳农业大学学报*, 1999, 30(5): 477-480.
- [22] 罗俊, 张木清, 林彦铨, 张华, 陈如凯. 甘蔗苗期叶绿素荧光参数与抗旱性关系研究. *中国农业科学*, 2004, 37(11): 1718-1721.
- [23] 林世青, 许春辉, 张其德, 徐黎, 毛大璋, 匡廷云. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用. *植物学通报*, 1992, 9(1): 1-16.
- [24] 张永强, 毛学森, 孙宏勇, 李文杰, 于沪宁. 干旱胁迫对冬小麦叶绿素荧光的影响. *中国生态农业学报*, 2002, 10(4): 13-15.
- [25] 周秀杰, 赵红波, 马成仓. 硅对严重干旱胁迫下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响. *华北农学报*, 2007, 22(5): 79-81.
- [27] 李清芳, 马成仓, 李韩平, 萧云丽, 刘雪艳. 土壤有效硅对大豆生长发育和生理功能的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 73-76.
- [30] 丁燕芳, 梁永超, 朱佳, 李兆君. 硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 471-478.
- [33] 李清芳, 马成仓, 季必金. 硅对干旱胁迫下玉米水分代谢的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4163-4168.
- [39] 蔡昆争, 吴学祝, 骆世明. 不同生育期水分胁迫对水稻根叶渗透调节物质变化的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 491-500.
- [40] 李春香, 王玮, 李德全. 长期水分胁迫对小麦生育中后期根叶渗透调节能力、渗透调节物质的影响. *西北植物学报*, 2001, 21(5): 924-930.
- [41] 刘建新, 赵国林, 胡浩斌, 刘立品. NaCl 胁迫对骆驼蓬属植物渗透调节作用的影响. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(5): 115-119.

CONTENTS

Physiological responses of five deciduous broad-leaved tree seedlings in the Northeast Area of China to burning	WANG Rong, HU Haiqing (2303)
The occurrence regularity of psyllid in <i>Haloxylon</i> spp and its influencing factors	LI Fenlian, WU Xuehai, WANG Peiling, et al (2311)
The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques	LIU Shuangna, ZHOU Tao, SHU Yang, et al (2320)
Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality	ZHAO Peng, XIA Beicheng, QIN Jianqiao, et al (2331)
Red fox habitat selection and landscape feature analysis in the Dalai Lake Natural Reserve in Inner Mongolia	ZHANG Honghai, LI Chengtao, DOU Huashan, et al (2342)
Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin	XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu, et al (2351)
Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models	ZHAI Tianqing, LI Xinhai (2361)
Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010	ZHANG Li, ZHANG Yunhui, ZENG Juan, et al (2371)
Genetic diversity based on cytochrome <i>b</i> gene analysis of different geographic populations of blue sheep in China	LI Nannan, LIU Zhensheng, WANG Zhenghuan, et al (2381)
Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills	LU Shiyang, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2390)
Ecosystem and soil respiration of a poplar plantation on a sandy floodplain in Northern China	FANG Xianrui, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, et al (2400)
Estimating total nitrogen content in water body based on reflectance from wetland vegetation	LIU Ke, ZHAO Wenji, GUO Xiaoyu, et al (2410)
Analysis on complete F type of mitochondrial genome in <i>Lamprotula lei</i>	CHEN Ling, WANG Guiling, LI Jiale (2420)
The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed	LI Chongwei, HU Jie, WANG Sa, et al (2430)
Responses of soil nematode communities to soluble salt contamination around Gangue hill in Fushun	ZHANG Weidong, LV Ying, XIAO Ying, et al (2439)
Effect of aboveground competition on biomass partitioning of understory Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>)	WANG Jinsong, FAN Xiuhua, FAN Juan, et al (2447)
Research of methane metabolic microbial community in soils of slash pine plantation and Masson pine plantation	WANG Yun, ZHENG Hua, CHEN Falin, et al (2458)
$\delta^{13}\text{C}$ values of stem phloem water soluble sugars of <i>Pinus massoniana</i> and <i>Cunninghamia lanceolata</i> response to meteorological factors	LU Yuxi, WANG Zhenxing, ZHENG Huaizhou, et al (2466)
Soil respiration patterns during restoration of vegetation in the Shapotou area, Northern China	GAO Yanhong, LIU Lichao, JIA Rongliang, et al (2474)
Dynamics of caloric value of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. energy forest in the west of Henan Province	TAN Xiaohong, LIU Shiqi, MA Luyi, et al (2483)
<i>Ex-situ</i> symbiotic seed germination of <i>Dendrobium catenatum</i>	WU Huifeng, SONG Xiqiang, LIU Hongxia (2491)
Effects of red/far red ratio on morphological index, leaf area and dry matter partitioning of cut chrysanthemum flower	YANG Zaiqiang, ZHANG Jibo, LI Yongxiu, et al (2498)
Effect of prometryne on root activity and oxidative stress of <i>Polygala tenuifolia</i> Willd. seedling roots	WEN Yinyuan, GUO Pingyi, YIN Meiqiang, et al (2506)
Combined effects of elevated O_3 concentration and UV-B radiation on photosynthetic characteristics of soybean	ZHENG Youfei, XU Weimin, WU Rongjun, et al (2515)
Nutrients transfer for host plant and litter decomposition by AMF in Karst soil	HE Yuejun, ZHONG Zhangcheng, DONG Ming (2525)
The dynamics of bacteria community diversity during the fermentation process of traditional soybean paste	GE Jingping, CHAI Yangyang, CHEN Li, et al (2532)
Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil	SUN Qianqian, WANG Zhengyin, ZHAO Huan, et al (2539)
A method of determining standards for ecological compensation in agricultural areas, giving priority to environmental flows in water allocation	PANG Aiping, SUN Tao (2550)
The loss of ecosystem services value caused by food security assessment model and its application	LU Weiye, JIANG Zhide, ZHANG Yinglong, et al (2561)
Review and Monograph	
Review of the current situation of coastal ecological engineering using dredged marine sediments and prospects for potential application in China	HUANG Huamei, GAO Yang, WANG Yinxia, et al (2571)
Discussion	
Quorum sensing in anaerobic ammonium oxidation bacteria	DING Shuang, ZHENG Ping, ZHANG Meng, et al (2581)
Health evaluation of Dongting Lake based on morphological characters	SHUAI Hong, LI Jingbao, XIA Beicheng, et al (2588)
Scientific Note	
Effects of mix-leaf litter decomposition of different trees in the Loess Plateau	LIU Zengwen, DU Liangzhen, ZHANG Xiaoxi, et al (2596)
Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands	MA Shaojie, LI Zhengcai, WANG Bin, et al (2603)
Effects of drought stress on photosynthesis and associated physiological characters of pepper	OU Lijun, CHEN Bo, ZOU Xuexiao (2612)
Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves	CHEN Wei, CAI Kunzheng, CHEN Jining (2620)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 8 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 8 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元