

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

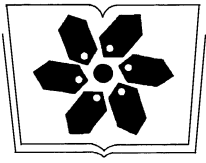
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 5 期
Vol.31 No.5
2011



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 31 卷 第 5 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

盐胁迫下 3 种滨海盐生植物的根系生长和分布·····	弋良朋,王祖伟 (1195)
蕙兰病株根部内生细菌种群变化·····	杨 娜,杨 波 (1203)
森林不同土壤层全氮空间变异特征·····	张振明,余新晓,王友生,等 (1213)
基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测·····	罗 翀,徐卫华,周志翔,等 (1221)
黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释·····	王晓春,赵玉芳 (1230)
两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性·····	李维焕,于兰兰,程显好,等 (1240)
2005—2009 年浙江省不同土地类型上空对流层 NO ₂ 变化特征 ·····	程苗苗,江 洪,陈 健,等 (1249)
关帝山天然次生针叶林林隙径高比 ·····	符利勇,唐守正,刘应安 (1260)
鄱阳湖湿地水位变化的景观响应·····	谢冬明,郑 鹏,邓红兵,等 (1269)
模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹凋落物分解的影响·····	涂利华,戴洪忠,胡庭兴,等 (1277)
喷施芳香植物源营养液对梨树生长、果实品质及病害的影响 ·····	耿 健,崔楠楠,张 杰,等 (1285)
不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响 ·····	马忠明,杜少平,薛 亮 (1295)
干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响 ·····	张仁和,郑友军,马国胜,等 (1303)
不同供水条件下冬小麦叶与非叶绿色器官光合日变化特征 ·····	张永平,张英华,王志敏 (1312)
水分亏缺下紫花苜蓿和高粱根系水力学导度与水分利用效率的关系 ···	李文娆,李小利,张岁岐,等 (1323)
美洲森林群落 Beta 多样性的纬度梯度性 ·····	陈圣宾,欧阳志云,郑 华,等 (1334)
水体泥沙对菖蒲和石菖蒲生长发育的影响·····	李 强,朱启红,丁武泉,等 (1341)
蚯蚓在植物修复芫污染土壤中的作用·····	潘声旺,魏世强,袁 馨,等 (1349)
石榴园西花蓟马种群动态及其与气象因素的关系·····	刘 凌,陈 斌,李正跃,等 (1356)
黄山短尾猴食土行为·····	尹华宝,韩德民,谢继峰,等 (1364)
扎龙湿地昆虫群落结构及动态·····	马 玲,顾 伟,丁新华,等 (1371)
浙江双栉蝠蛾发生与土壤关系的层次递进判别分析·····	杜瑞卿,陈顺立,张征田,等 (1378)
低温导致中华蜜蜂后翅翅脉的新变异 ·····	周冰峰,朱翔杰,李 月 (1387)
双壳纲贝类 18S rRNA 基因序列变异及系统发生 ·····	孟学平,申 欣,程汉良,等 (1393)
基于物理模型实验的光倒刺鲃生态行为学研究 ·····	李卫明,陈求稳,黄应平 (1404)
中国铁路机车牵引能耗的生态足迹变化 ·····	何吉成 (1412)
城市承载力空间差异分析方法——以常州市为例·····	王 丹,陈 爽,高 群,等 (1419)
水资源短缺的社会适应能力理论及实证——以黑河流域为例 ·····	程怀文,李玉文,徐中民 (1430)
寄主植物叶片物理性状对潜叶昆虫的影响·····	戴小华,朱朝东,徐家生,等 (1440)
专论与综述	
C ₄ 作物 FACE (free-air CO ₂ enrichment) 研究进展 ·····	王云霞,杨连新,Remy Manderscheid,等 (1450)
研究简报	
石灰石粉施用剂量对重庆酸雨区受害马尾松林细根生长的影响·····	李志勇,王彦辉,于澎涛,等 (1460)
女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察 ·····	石 辉,王会霞,李秧秧,刘 肖 (1471)

水分亏缺下紫花苜蓿和高粱根系水力学导度 与水分利用效率的关系

李文尧^{1,2}, 李小利³, 张岁岐^{2,*}, 山 仑^{1,2}

(1. 河南大学生命科学学院, 生态科学与技术研究所, 开封 475004;

2. 西北农林科技大学 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

3. 河南工业大学, 化学化工学院, 郑州 450001)

摘要: 利用聚乙二醇(PEG-6000)模拟水分亏缺条件(胁迫水势 -0.2MPa , 胁迫48h), 研究了变水条件下紫花苜蓿(品种: 阿尔冈金和陇东)和高粱(品种: 抗四)根系水力学导度(L_p)、根系活力、根叶相对含水量、水分利用效率等参数的动态变化, 以期进一步明确植物水分吸收及散失过程调控的生理生态学基础。结果表明: 水分亏缺限制了紫花苜蓿和高粱根系吸水, 表现在 L_p 的下降和根系活力的降低; 继而调控了其地上部反应, 引起气孔导度、光合速率、叶片相对含水量和蒸腾速率等的下降, 但限制性的提高了其水分利用效率, 尤其在胁迫初期。恢复到正常供水条件后, L_p 、根系活性、气孔导度等水分利用参数逐渐部分或完全恢复到了胁迫前水平, 但恢复程度存在种间和品种间差异, 并且根系吸水能力的恢复对于是植株地上部生长状态的恢复至关重要, 尤其是水分恢复初期。紫花苜蓿根系中检测到水通道蛋白(AQPs)的存在, 水分亏缺对紫花苜蓿 L_p 的影响认为主要是通过影响AQPs的活性实现的。比较紫花苜蓿和高粱水分吸收与利用状况在变水条件下的动态变化, 认为紫花苜蓿幼苗对于干旱逆境的适应能力相对弱于高粱, 品种间陇东适应能力更强。

关键词: 根系吸水; 水分利用效率; 紫花苜蓿; 高粱; 干旱适应性

The root system hydraulic conductivity and water use efficiency of alfalfa and sorghum under water deficit

LI Wenrao^{1,2}, LI Xiaoli³, ZHANG Suiqi^{2,*}, SHAN Lun^{1,2}

1 College of Life Sciences, Institute of Ecological Science and Technology, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farmings on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China

3 Institute of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: How to absorb more water and consume less water for plant has become increasingly more important because of water shortage. Root system is essential to uptake water from soil and stomata are important tissues to dismiss water for plant growth. However, one of great challenges in agricultural production is how to balance water absorption by roots and water use by shoots, especially under water deficit.

In this paper we are focus on the regulating mechanism between roots water absorption and shoots water consumption, to clarify eco-physiological basis of drought resistance and understand the adaptive traits to drought stress. In drought-stressed plants, roots system hydraulic conductivity (L_p), roots vigor, relative water content of leave and roots, water use efficiency and some parameters dedicated water use characteristics, such as stomatal conductivity, net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration and transpiration rate, etc. of alfalfa (*Medicago sativa* L cultivars: Algonquin and Long-Dong) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. cultivars: Kang-Si) were studied. Under variable water conditions of mimicked

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB118604); 国家自然科学基金(30971714); 河南省自然科学基金研究项目(092300410095); 省部共建河南大学科研课题(SBGJ090405)

收稿日期: 2010-10-07; 修订日期: 2011-01-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

by PEG-6000, when tested plants undergo for 48 h stress (-0.2 MPa water potential) and subsequent water recovery of 48 h, the experimental results indicated that roots water absorption (L_p) affected vitally water use and photosynthesis of shoots, especially at primary of water deficit and water recovery. Water absorption of alfalfa and sorghum was inhibited firstly by water deficit accompanying with decrease of L_p and root vigor and then, decline of stomatal conductivity. Net photosynthetic rate, relative water content of leave and transpiration rate etc. were induced. On the other hand, a limited increased in water use efficiency not in sorghum but in alfalfa are observed. It also shows that water deficit affect alfalfa stronger than that of sorghum. After rewatering from stress, L_p , root vigor, other parameters related to water characteristics (stomatal conductivity, net photosynthetic rate, relative water content of leave and transpiration rate and so on) and water use efficiency recovered gradually to the level of control treatment partly in alfalfa and completely in sorghum. These changes show that variable water conditions induced some significant differences, such as roots water absorption and shoots water consumption between two specie as well as two cultures. In this experiment, we also checked the role of aquaporins (AQPs) in alfalfa roots, results indicate that water deficit decrease L_p of alfalfa through inhibiting activity of AQPs. Comparing to the change extents of alfalfa and sorghum in L_p and other water parameters under variable water conditions, alfalfa is more sensitive to water stress than sorghum, and Algonquin is more sensitive than Long-Dong. All these data could increase our better understanding on the adaptive mechanism to drought and control role of root water absorption in water balance of alfalfa and sorghum.

Key Words: water absorption; water use efficiency; drought tolerance; alfalfa; sorghum

通常状态下的土壤-植物-大气连续体 (SPAC 系统) 中, 植物体维持着水分吸收与散失利用的动态平衡。干旱逆境来临时, 植物根系最先感知, 继而转化为生化信号向上传输, 协调地上部生长与行为, 当不能协调一致的时候, 这种动态平衡将会被破坏, 甚至难以维持^[1-5]。近年来, 人们对植物根系水分传导及其影响因素和气孔行为的研究表明: 这种平衡状态的打破可以归因于并进一步影响着叶片及根系的生理特性、形态特征和植株整体水分的利用, 如根系吸水阻力的增加^[1-3]、木质部中运移水流的中断和水分散失速率的下降^[4-5]、气孔功能的减弱、 CO_2 吸收受阻甚至光合器官的破坏^[1,5]等。

气孔是植物水分散失的主要通道, 可以特异性的反映出根系水分吸收特性的变化; 根系水力学导度 (简称水导, L_p), 是表征植物根系吸水能力和逆境下植物水分关系变化的一个重要的水力学参数, 在整株根系水平上以整个根系的水流量与根木质部和根表土壤间的水势差之比来表示^[1], 二者的变化成为研究植株水分吸收与利用以及根冠关系的重要参数指标。研究显示, L_p 会随着物种的不同和环境条件的改变而产生相应的变化^[1,6-10], 现已在多种植物上观察到土壤干旱条件下根系 L_p 的降低^[11-13]; 气孔亦会因为干旱的影响而选择性的开关, 并且存在种间差异^[3-5]。但目前针对根冠协调理论以及地上水分散失和地下水吸收影响一致性问题的机理性研究还存在不足。因此, 为了进一步揭示植物水分吸收及散失调控机理、明确植物抗旱的生理生态基础, 选择黄土高原区广泛种植的紫花苜蓿 (品种: 陇东和阿尔冈金) 和普遍认同具有较好耐旱能力的高粱 (品种: 抗四) 为试验材料, 继前人对其植物根系形态^[14-18]、植株光合能力和蒸腾耗水特性以及水分利用规律^[18-22]等方面研究基础上, 对紫花苜蓿和高粱根系水分吸收与传输特性及其维持植株整体水分平衡中的调控作用、干旱逆境下根系水分传输与利用动态变化进行了研究, 同时进行品种间比较, 以进一步揭示植物对于干旱胁迫的忍耐和响应机制及其种间差异。

1 材料与方法

1.1 材料培养与处理

选用紫花苜蓿 (品种: 陇东和阿尔冈金) 和高粱 (品种: 抗四) 为试验材料。种子经 75% 的无水乙醇溶液消毒 2 min 后, 无菌水冲洗数次, 放入培养皿内, 25 °C 培养箱内暗中纸上萌发 (萌发昼夜温度 23/18 °C)。待子叶完全展开后移入步入式植物生长箱 (加拿大产 PGV-36 型) 中, 1/2 Hoagland 全营养液 (pH: 5.5—6.0) 培

养,白天光照 $260 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光暗周期 12/12 h,昼夜温度 23/18 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 65%。每 2d 更换 1 次培养液。紫花苜蓿 10—12 片、高粱 4 片完全展开叶出现时始实验。

1.1.1 聚乙二醇-6000(PEG-6000)模拟水分胁迫处理

添加 101.2 g PEG-6000 至 1 L 1/2 Hoagland 全营养液中,得到水势为 -0.2 MPa 的胁迫培养液,模拟水分胁迫,幼苗胁迫处理 48 h 后恢复至 1/2 Hoagland 全营养液中继续培养。3 次重复,以正常生长植株为对照。

1.1.2 氯化汞及 β -巯基乙醇处理

(1) 选取生长在正常水分条件下的幼苗,将根系做如下处理:① $500 \mu\text{mol/L}$ β -巯基乙醇处理幼苗根系 20 min;② $1000 \mu\text{mol/L}$ β -巯基乙醇处理幼苗根系 20 min;③ $50 \mu\text{mol/L}$ 氯化汞处理幼苗根系 20 min;④ $100 \mu\text{mol/L}$ 氯化汞处理幼苗根系 20 min;⑤ 先同③处理,再分别用 500 和 $1000 \mu\text{mol/L}$ β -巯基乙醇进行恢复性处理 20 min;⑥ 先同④处理,再分别用 500 和 $1000 \mu\text{mol/L}$ β -巯基乙醇进行恢复性处理 20 min。

(2) 先用 -0.2 MPa PEG 溶液处理陇东幼苗根系 24 h,然后同(1)中处理③—⑥。

1.2 测定方法

根系水力学导度 (L_p) 的测定使用压力室(3005 型,美国产)来完成:参照文献^[6]的方法略加改动:在压力室内放入 1/2 Hoagland 全营养液,植株从子叶下部距根系 2.5 cm 处剪断,将根系部分放入压力室中密封后用高压氮气慢慢加压,每隔 0.05 MPa 加压 1 次,直至 0.4 MPa。在每个压力下等达到出流稳态后(约 1—2 min),用塑料离心管放入吸水纸吸取汁液,吸水时间统一为 60 s,迅速在万分之一天平上准确称量吸水前后吸水纸的重量,重复 3 次。计算每个压力下的汁液流出速率,用 CI-400 型根系图像分析系统求出根系表面积。根据流速的计算结果,计算出单位时间、单位根表面积下的流量通量。用根系水流通量与压力差关系曲线的斜率表示根系的水导。

叶片相对含水量测定用烘干法;根系活力测定选用苯基四氮唑(TTC)还原法^[23];植株光合作用参数:净光合作用速率(P_n),气孔导度(G_s),蒸腾速率(T_r)和细胞间隙二氧化碳浓度(C_i)用 LI-6400 型便携式光合作用系统(美国 LI-cor 公司生产)在培养室内进行测定,6 次重复。水分利用效率(WUE) = P_n/T_r 。

2 结果与分析

2.1 水分亏缺下紫花苜蓿和高粱根系水力学导度 (L_p) 的变化

如表 1 所示,PEG 模拟水分胁迫显著降低了紫花苜蓿(品种:阿尔冈金、陇东)和高粱(品种:抗四)的根系水力学导度 (L_p),这种影响可在恢复到正常供水条件后得到不同程度的恢复,且水分胁迫的影响存在种间 ($P < 0.05$) 和品种间 ($P < 0.05$) 差异。具体表现在:胁迫处理 2 h,阿尔冈金和陇东 L_p 就出现了显著下降,但直到胁迫 6 h 后,抗四 L_p 才出现明显下降(较对照降低了 54.13%);随着胁迫时间的延长,陇东和抗四 L_p 一直保持着较高值,直到胁迫 48 h 达到胁迫期内最小,分别为对照的 17.86% 和 10.36%;阿尔冈金 L_p 则随着

表 1 水分亏缺对阿尔冈金、陇东和抗四 L_p 的影响

Table 1 Effect of water stress on root system hydraulic conductivity (L_p) of Algonquin, Long-Dong and Kang Si

胁迫时间/h Stress time	根系水导 $L_p/(\times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$			复水时间/h Rehydration time	根系水导 $L_p/(\times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$		
	抗四 Kang Si	陇东 Long Dong	阿尔冈金 Algonquin		抗四 Kang Si	陇东 Long Dong	阿尔冈金 Algonquin
CK	5.93±2.51 a	9.33±1.41 a	8.67±1.25 a	CK	—	—	—
2	4.23±0.88 ab	5.67±1.76 b	7.67±1.70 ab	2	0.93±0.36 cd	1.93±0.90 c	1.10±0.70 ef
6	2.72±0.30 bc	5.33±2.36 b	5.00±1.63 cd	6	1.55±0.49 cd	2.30±0.99 c	1.27±0.52 ef
12	2.02±0.45 cd	5.00±1.41 b	3.67±0.94 de	12	1.80±0.22 cd	2.33±0.47 c	1.43±1.14 ef
24	1.53±0.087 cd	3.67±2.05 b	3.33±1.25 def	24	2.35±0.24 cd	4.67±0.47 b	3.23±2.72 cd
36	1.00±0.098 cd	3.33±1.70 b	1.83±1.03 ef	36	4.16±2.06 ab	5.67±0.94 b	3.67±1.70 bed
48	0.61±0.084 d	1.67±0.94 c	0.90±0.08 f	48	5.44±0.89 a	6.67±2.05 b	5.33±1.25 bc

表中字母为方差分析列比(胁迫与复水处理 13 个数据)结果; $P < 0.05$

胁迫时间的延长持续下降,胁迫 48 h 达到对照的 10.38%;恢复到营养液培养后 24 h,阿尔冈金和陇东 L_p , 方才有显著恢复,到 48 h 时仍没有恢复到胁迫前水平(分别恢复到对照的 61.50% 和 71.43%),抗四 L_p ,则在恢复营养液培养后 36 h 恢复到了胁迫前水平。

2.2 水通道蛋白抑制剂(氯化汞 MC)和去抑制剂(β -巯基乙醇 β -ME)处理下紫花苜蓿 L_p 的变化

在根系复合模型的径向水分运输途径中,一些巯基反应物,例如氯化汞,是水通道蛋白(Aquaporins, 简称 AQPs)的典型抑制剂,它们可通过与 AQPs 的半胱氨酸残基特异性结合而抑制其活性^[24-25];而 β -巯基乙醇(称为去抑制剂)则可以部分解除汞离子的这种抑制作用,继而恢复根系水导^[26-27],但汞离子并非对所有物种 AQPs 起作用。紫花苜蓿的实验表明;只经 β -ME 处理,陇东 L_p ,没有明显变化,说明 β -ME 对根细胞原生质膜没有破坏作用,根系对水分的传输未受到影响;但仅用 MC 处理根系,陇东根系 L_p ,显著下降,说明 MC 显著抑制了正常水分处理下陇东根系的水分传输(表 2, $P < 0.01$)。经 50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ MC 处理后, L_p 较对照分别下降了 56.31% 和 65.65%,即应用 MC 浓度越大, L_p 下降越多;随后分别给予 500 或 1000 $\mu\text{mol/L}$ β -ME 进行恢复性处理, L_p 显著恢复到对照的 47.86%—71.76%,恢复了 10.94%—54.95%, β -ME 浓度越高恢复越多,证明紫花苜蓿根细胞中 AQPs 的存在。另一方面,先经 PEG-6000 处理 24 h,再用 50 $\mu\text{mol/L}$ 或 100 $\mu\text{mol/L}$ MC 分别处理根系 20 min,陇东 L_p ,分别较胁迫 24 h 时下降了 13.68% 和 28.05%,随后再分别用 500 或 1000 $\mu\text{mol/L}$ β -ME 恢复处理根系,陇东 L_p ,均恢复到了胁迫 24 h 的水平。因此认为,在逆境水分运输过程中,紫花苜蓿根系的水通道蛋白起主导作用;水分胁迫对紫花苜蓿 L_p 的影响主要是通过影响水通道蛋白的活性实现的。

表 2 水通道蛋白抑制剂(氯化汞)和(或)去抑制剂(β -巯基乙醇)处理下陇东 L_p 的变化

Table 2 The change of L_p after treating with inhibitor of AQPs (mercuric chloride) and/or exhibitor of AQP (β -mercaptoethanol) in Long-Dong

处理 Treatments	根系水导 $L_p / (\times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$		处理 Treatments	根系水导 $L_p / (\times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	
	正常水分处理 Under water plenitude	水分胁迫处理 Under water stress(S24 h)		正常水分处理 Under water plenitude	水分胁迫处理 Under water stress(S24 h)
对照 CK	10.56±0.54 a	4.30±0.95 a	—	—	—
500 $\mu\text{mol/L}$ β -ME	10.43±2.40 a	—	1000 $\mu\text{mol/L}$ β -ME	10.95±1.56 a	—
50 $\mu\text{mol/L}$ MC	4.61±0.59 d	3.71±0.52 b	100 $\mu\text{mol/L}$ MC	3.63±0.62 d	3.10±0.35 c
50 $\mu\text{mol/L}$ MC + 500 $\mu\text{mol/L}$ β -ME	5.26±1.15 c	3.99±0.50 ab	100 $\mu\text{mol/L}$ MC + 500 $\mu\text{mol/L}$ β -ME	5.05±0.80 c	3.80±0.90 b
50 $\mu\text{mol/L}$ MC + 1000 $\mu\text{mol/L}$ β -ME	7.58±1.13 b	4.03±0.11 ab	100 $\mu\text{mol/L}$ MC + 1000 $\mu\text{mol/L}$ β -ME	7.44±1.23 b	4.19±0.90 a

表中字母为方差分析列比(胁迫与复水处理 13 个数据)结果; $P < 0.05$

2.3 水分亏缺下紫花苜蓿和高粱叶片和根系相对含水量的变化

相对含水量(RWC)的大小可以表征植株生长状态的优劣^[5]。如表 3 所示,PEG 水分胁迫处理降低了紫花苜蓿和高粱根系与叶片的 RWC,但根系 RWC 的降幅小于叶片,仅下降了 3.23%—7.29% ($P > 0.05$),叶片 RWC 则下降了 17.07%—36.47% ($P < 0.05$);在恢复到营养液培养 48h 后,紫花苜蓿和高粱根系 RWC

表 3 水分亏缺对阿尔冈金、陇东和抗四根系和叶片相对含水量(RWC)的影响

Table 3 Effect of water stress on relative water contents (RWC) of roots and leaves of Algonquin, Long-Dong and Kang Si

	处理 Treatments	阿尔冈金 Algonquin	陇东 Long Dong	抗四 Kang Si
根系 Roots	对照 CK	0.96±0.03	0.93±0.05	0.93±0.09
	胁迫 48h Stress 48h	0.89±0.05	0.89±0.02	0.90±0.07
	复水 48h Rehydration 48h	0.95±0.07	0.91±0.04	0.91±0.07
叶片 Leaves	对照 CK	0.85±0.03 a	0.86±0.02 a	0.82±0.02 a
	胁迫 48h Stress 48h	0.54±0.04 c	0.60±0.01 c	0.68±0.04 b
	复水 48h Rehydration 48h	0.67±0.04 b	0.72±0.03 b	0.72±0.03 b

表中字母为方差分析列比(胁迫与复水处理 13 个数据)结果; $P < 0.05$

恢复到了对照水平,而叶片的未完全恢复到对照水平,这与不同器官对水分亏缺的适应性不同有关^[28-29]。同时可以看出,高粱 RWC 在受到胁迫后的降低幅度小于紫花苜蓿的,复水后的恢复程度大于紫花苜蓿的($P < 0.05$);品种间相比,陇东叶片 RWC 降低幅度小于阿尔冈金的,复水后的恢复程度大于阿尔冈金的($P < 0.05$)。

2.4 水分亏缺下紫花苜蓿根系活力的变化

根系活力是反映根系新陈代谢活动及吸收功能强弱的最直接指标。阿尔冈金和陇东根系活力在 PEG 胁迫后 2 h 即显著下降,并随着胁迫时间的延长而持续下降(图 1, $P < 0.05$)。胁迫 48 h,阿尔冈金和陇东根系活力分别下降到对照的 17.09% 和 23.18%。恢复到营养液培养后,阿尔冈金和陇东根系活力立即显著增强,但胁迫 48 h 后仅陇东根系活力恢复到胁迫前水平。

结合前述,根系活力在水分亏缺及复水过程中的变化趋势与 L_p 的变化一致。另外,从图 1 还可知,阿尔冈金和陇东根系活力在胁迫复水过程中的变化存在明显的品种间差异($P < 0.01$):受到水分胁迫后陇东根系活力降幅较小,而复水后则恢复程度较大,即陇东能在水分亏缺下较阿尔冈金保持更强的根系活力,从而保证对水分的吸收,以维持植株的生长发育。认为水分亏缺下供试品种间根系活力上的变化差异可能是其 L_p 变化趋势不同的原因之一。

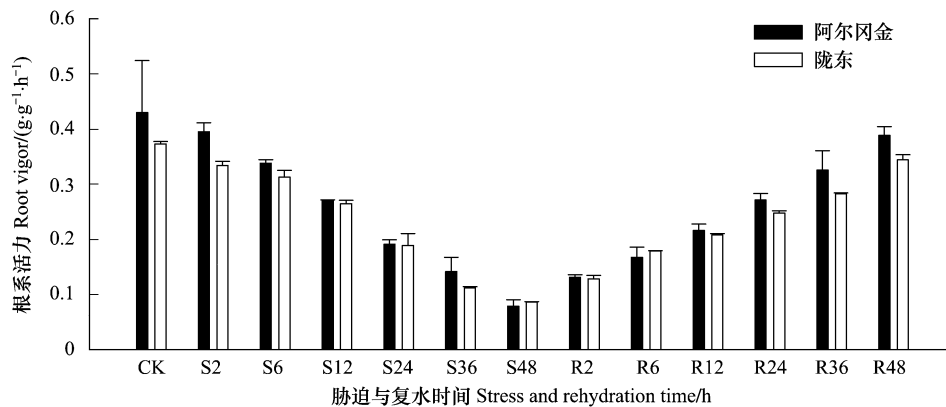


图 1 水分亏缺对阿尔冈金和陇东根系活力(RV)的影响

Fig. 1 Effect of water stress on root vigor (RV) of Algonquin and Long Dong

2.5 水分亏缺下紫花苜蓿和高粱气体交换参数的变化

受到水分胁迫后 2 h,供试紫花苜蓿各品种净光合作用速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)即显著下降,并在胁迫 48 h 达到胁迫期内最低值(图 2, $P < 0.05$)。细胞间隙二氧化碳浓度(C_i)变化有所不同:阿尔冈金 C_i 随着胁迫时间的延长呈波动性变化($P < 0.05$);陇东 C_i 则随着胁迫时间的延长持续下降,但供试品种 C_i 均在胁迫 48 h 达到对照水平(与胁迫 36 h 相比出现累积)($P < 0.05$),认为是羧化作用被抑制而造成了 CO_2 的轻微累积。高粱(抗四) P_n 、 G_s 、 T_r 和 C_i 在受到水分胁迫 2—6 h 后开始随着胁迫时间的延长持续下降,直到胁迫 48 h (C_i 为胁迫 36 h)达到胁迫期内最低值,分别下降到对照的 40.64%、33.58%、37.39% 和 67.35% (图 3, $P < 0.05$)。

恢复至营养液培养 24—36 h 后,阿尔冈金 G_s 、 T_r 和 P_n 始出现明显恢复,但陇东 P_n 、 G_s 和 T_r 则在复水后 12 h 则有明显恢复,二者 C_i 则在复水后显著回降,后又随着复水时间的延长而逐渐增加,但各气体交换参数(除陇东 C_i 外)均未能在恢复培养 48 h 后达到胁迫前水平。复水 48 h,阿尔冈金 P_n 、 G_s 、 T_r 和 C_i 分别恢复到对照的 53.71%、38.81%、66.23% 和 90.10%;陇东 P_n 、 G_s 、 T_r 和 C_i 分别恢复到对照的 51.80%、59.71%、61.01% 和 110.92%。抗四 P_n 、 G_s 和 T_r 在恢复培养 2 h 后立即显著回升,但恢复培养 48 h 后也仅恢复到对照的 93.88%、89.53% 和 94.27%; C_i 则在恢复培养 24 h 后即达到了对照水平。

结合图 2 和图 3 可以看出,在培养介质水势变化的过程中,紫花苜蓿和高粱气体交换参数呈现一致的变

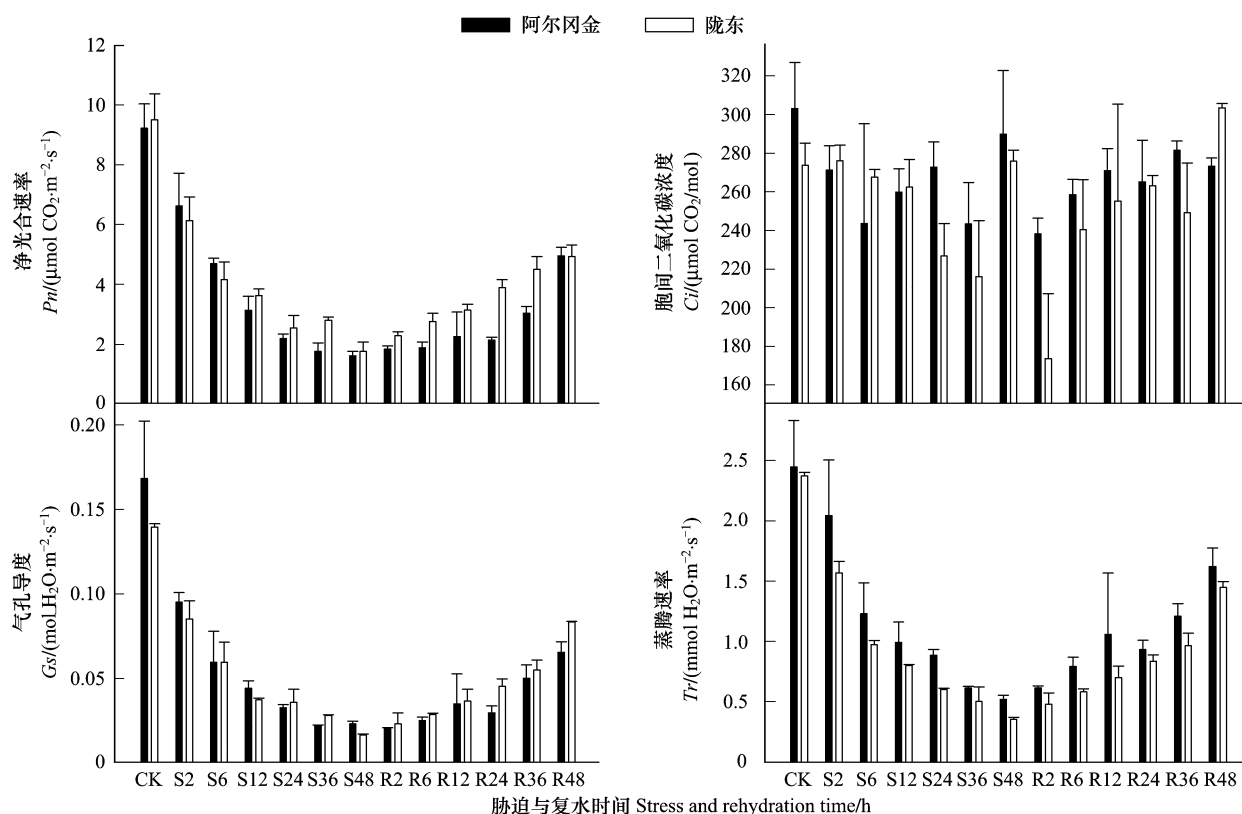


图2 水分亏缺对阿尔冈金和陇东光合参数(P_n , G_s , C_i and T_r)的影响

Fig. 2 Effect of water stress on photosynthetic parameters in Algonquin and Long Dong

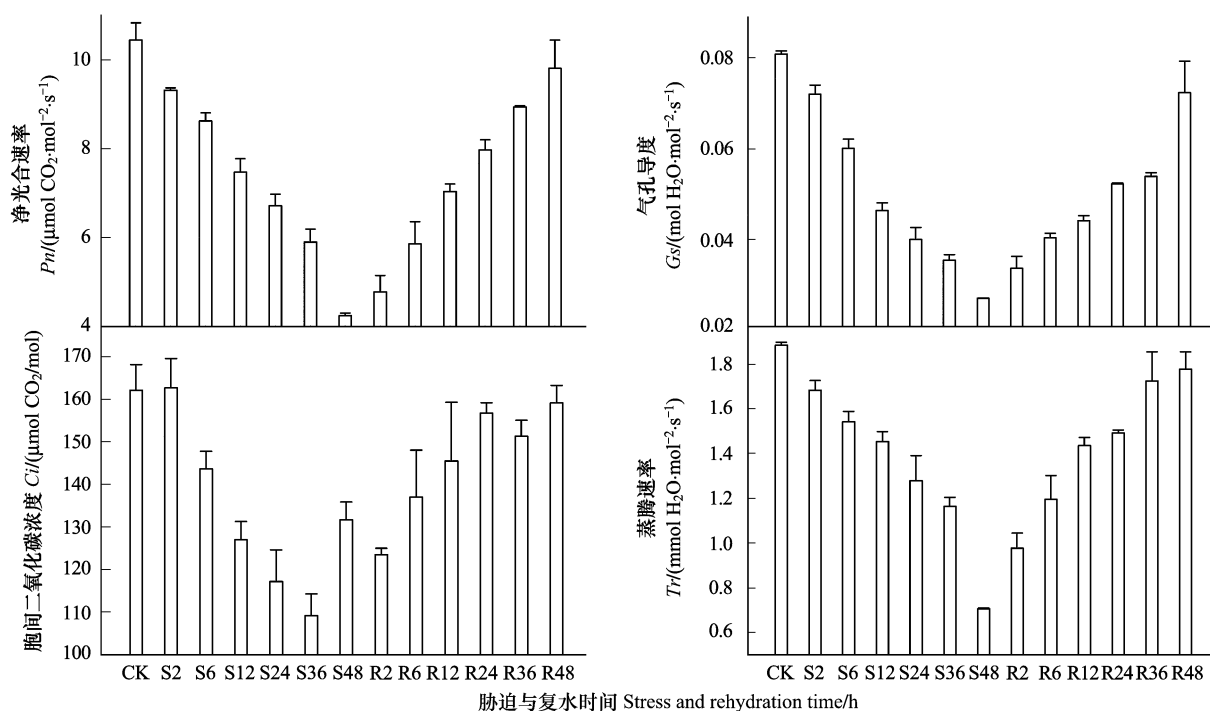


图3 水分亏缺对高粱光合参数(P_n , G_s , C_i 和 T_r)的影响

Fig. 3 Effect of water stress on photosynthetic parameters (P_n , G_s , C_i and T_r) in sorghum

化趋势,但在变化幅度上有显著差异($P<0.05$);紫花苜蓿品种间 G_s 也展示了一致的变化趋势,但 P_n 、 C_i 和 Tr 的变化则存在明显不同($P<0.01$),相对于陇东,阿尔冈金在复水后光合作用能力恢复较慢。

2.6 水分亏缺下紫花苜蓿和高粱水分利用效率(WUE)的变化

当紫花苜蓿和高粱生长介质水势发生变化的时候,其吸水能力和气体交换能力也随之发生改变的结果就是带来了 WUE 的变化。如表 4 所示,PEG 胁迫 24 h 后和 6 h 后,阿尔冈金和陇东 WUE 开始显著提高,胁迫 36 h 后增加到最大,分别达到对照的 1.79 和 1.77 倍,后随之下降,说明水分亏缺带来了紫花苜蓿水分利用效率在一定程度上的提高;恢复到营养液栽培后,紫花苜蓿 WUE 有所减小,并逐渐恢复到对照水平。抗四 WUE 在整个水分变动过程中变化不大,在胁迫处理 48 h 后显著提高到对照的 1.23 倍,说明高粱受到胁迫的影响相对较弱,这与前述根系 L_p 和气体交换参数(P_n 和 Tr)的变化规律一致。同时可以看出,陇东 WUE 在受到胁迫过程中相对于阿尔冈金亦保持较高值。

表 4 水分亏缺对紫花苜蓿和高粱水分利用效率(WUE)的影响

Table 4 The effect of water stress on water use efficiency (WUE) of alfalfa and sorghum leaves

胁迫时间 Stress time/h	WUE/($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			水时间 Rehydration time/h	WUE/($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	阿尔冈金 Algonquin	陇东 Long-Dong	抗四 Kang-Si		阿尔冈金 Algonquin	陇东 Long-Dong	抗四 Kang-Si
0 (CK)	2.14±0.78d	3.41±0.25d	4.90±0.21b	—	—	—	—
2	2.37±0.65cd	4.01±0.16cd	4.90±0.59b	2	3.10±0.34abc	4.76±0.81abc	5.52±0.26ab
6	2.52±0.23bcd	4.54±0.19bc	5.07±1.03ab	6	3.25±0.51ab	4.68±0.35bc	5.54±0.83ab
12	2.86±0.31bcd	4.67±0.41bc	5.25±0.37ab	12	2.98±0.28abcd	4.50±0.33bc	5.34±0.45ab
24	3.16±0.48abc	4.79±0.28abc	5.53±0.26ab	24	3.06±0.19abc	4.23±0.63bcd	5.18±0.38ab
36	3.83±0.14a	5.56±0.81a	5.60±0.31ab	36	2.48±0.61bcd	4.28±0.28bc	5.14±0.52ab
48	3.78±0.53a	4.95±0.29ab	6.02±0.62a	48	2.29±0.20cd	3.92±0.51cd	4.90±0.55b

表中字母为方差分析列比(胁迫与复水处理 13 个数据)结果; $P<0.05$

结合前述及图 4,水分变动条件下,紫花苜蓿和高粱 WUE 和 Tr 及根系 L_p 间均呈现负相关关系。说明,减少水分吸收和减弱植株蒸腾均可带来 WUE 在一定程度上的增加,但这种增加对紫花苜蓿而言弱于高粱。

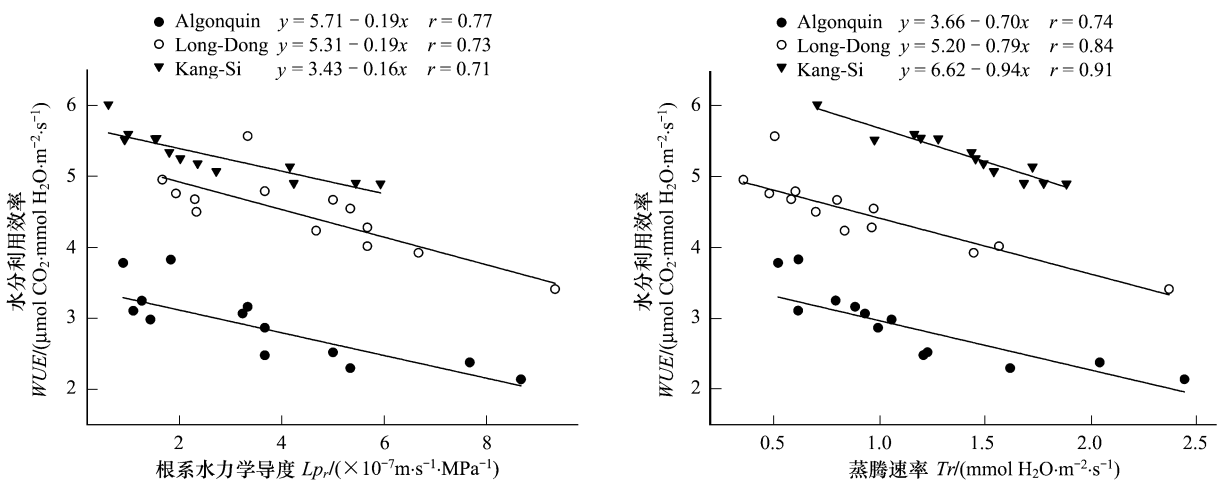


图 4 紫花苜蓿和高粱根系 L_p 、 Tr 与 WUE 之间的关系

Fig. 4 Relationship of L_p , Tr and WUE in Algonquin, Long Dong and Kang Si

3 讨论

3.1 变水条件下紫花苜蓿水分吸收与利用平衡状态发生改变

植株根系水分吸收与传输的阻力主要来自径向途径。本试验中氯化汞-巯基乙醇实验证明,水分亏缺条

条件下紫花苜蓿根系水分传输主要是通过 AQP_s 来完成的,因此根系径向途径中水通道的关闭是导致水分逆境下紫花苜蓿 L_p 下降的主要原因之一。王生毅等^[30]在西红柿根系试验中也得出了类似结论。Carvajal 等^[31]对小麦的研究也曾指出,营养亏缺(缺氮或缺磷)条件下,生长的小麦主要通过降低汞敏感的水通道蛋白的活性或含量来降低其根质膜上的导水能力。另外诸多研究指出,水分胁迫条件下导致根径向水流导度随根表水势降低而减小的原因可能是多方面的:如根系渗透调节作用的减弱^[29,32]、 T_r 的下降继而导致根系吸水原动力的降低^[4-5]、受水分胁迫的根系常发生栓化或栓化程度的增大^[12]、根系外皮层内空气隙的形成^[11,13]、细胞膜内水流通道的形成和透性减弱^[11-12]、根系木质部中央大导管直径的降低和根系直径及皮层厚度的增加^[12-13]等。

生长介质水势下降后,紫花苜蓿根系吸水阻力增加,根系 L_p 的下降随之带来了植株地上部分气孔的迅速关闭,叶片 RWC 降低,以减少蒸腾失水,达到“节流”的目的,表现在 WUE 的提高,尽管这种有效行为持续时间相对有限(图 4);继而气体进出气孔阻力增大, T_r 和 P_n 下降,此时光合作用下降的主要原因是 L_p 下降所引起的气孔关闭^[28-29]。随着水分胁迫时间的延长,供试品种 L_p 持续降低,RWC、 G_s 、 P_n 和 T_r 随之继续下降,胞间 CO_2 逐渐累积(尤其是阿尔冈金),WUE 在胁迫 36 h 达到最大后开始下降,由于植株水分失调所引起的光合功能(CO_2 固定、RUBP 羧化和无机磷的转换)失调和结构的损伤成为光合作用降低的主要原因^[28-29,33-36]。恢复到营养液栽培后,阿尔冈金和陇东根系吸水能力(L_p)随着水势恢复时间的延长而缓慢增强,在复水 24 h 后达到显著水平;同时,阿尔冈金 G_s 、 T_r 和 P_n 在复水后 24—36 h,陇东 P_n 、 G_s 、 T_r 在复水后 12 h 开始明显恢复;供试品种 C_i 在复水初期亦逐渐下降,叶片 RWC 和 WUE 也逐渐恢复,但恢复培养 48 h 后,除陇东 C_i 及两品种 WUE(略高于对照)外,其它各气体交换参数均没有恢复到对照水平。

研究表明,紫花苜蓿根系水分传输能力的恢复对于地上部生理进程的延续起着至关重要的作用,尤其对于气孔的调控^[37-38],其中根系活力的完全恢复将有助于 L_p 的恢复^[12,39],而根系生长的受抑(光合产物减少)程度又可在一定程度上减弱根系水分吸收能力的恢复程度。另外,水分胁迫带来的对紫花苜蓿根系细胞质膜的氧化伤害^[29],则成为 L_p 恢复的阻力之一,同时,水分亏缺对紫花苜蓿叶片光合结构和功能造成较为严重的损伤而使得 P_n 等气体交换参数最终没能恢复到胁迫前水平,并可能由此限制了根系的生长而影响 L_p 的恢复。图 5 表明了变水条件下紫花苜蓿 L_p 与 G_s 及 P_n 间显著正相关关系的存在:一方面,随着根系吸水能力的下降,植株水分供应受到抑制,继而与外界水分和气体交换受到影响,光合产物的生成速率受到抑制,并可能导致植株水分平衡的失调和光合生理机能的混乱;另一方面,生境水分的恢复带来了根系导水能力的增强,使得植株在水分条件不利生长的状况下,保持一定的生理代谢强度,以最大限度的维持植株生长发育。

综合上述还可以看出,紫花苜蓿不同品种间,陇东 L_p 在生长介质水势变动过程中变化相对平稳,变幅较小,在正常供水情况下、胁迫 48 h 后均大于阿尔冈金,复水后亦有更大程度的恢复(复水 48 h,阿尔冈金和陇东 L_p 分别恢复到对照的 61.50% 和 71.43%;同时,相对于阿尔冈金,陇东在水分逆境下能够维持较高的 P_n 、WUE、叶片 RWC 和较低的 T_r 。这些说明紫花苜蓿在水分传输和利用过程中存在品种间差异,即陇东的这些生理特征相对更有利于在干旱逆境下扩展水分吸收范围,维持水分吸收能力和减少无效水分的散失。认为陇东根系吸水能力优于阿尔冈金,对水分胁迫的适应能力可能强于阿尔冈金。

3.2 紫花苜蓿和高粱水分传输与利用能力及幼苗水分亏缺适应能力存在差异

和紫花苜蓿相比,水分变动同样带来了高粱 L_p 和气体交换参数、WUE 等的变化,但存在显著种间差异($P < 0.01$)。具体表现在:一方面,高粱 L_p 在受到水分胁迫后 6 h 始出现显著下降,而紫花苜蓿(陇东) L_p 在胁迫后 2 h 就出现了显著下降,且在受到胁迫过程中高粱 L_p 变化更为平缓(表 1);另一方面,恢复营养液培养后 2 h,高粱 L_p 即出现了显著恢复,而紫花苜蓿 L_p 直到复水处理 24 h 后才出现显著恢复,复水 36 h 后高粱 L_p 恢复到了胁迫前水平,而直到复水 48 h 紫花苜蓿 L_p 也未能恢复完全。Gullo 等^[40]曾在对盆栽油橄榄的实验研究中证明:经历轻度干旱胁迫后,复水 24 h 油橄榄 L_p 可完全恢复,中度干旱胁迫后复水 48 h L_p 亦可完全恢复到对照水平。因此紫花苜蓿 L_p 在胁迫和复水过程中的表现及复水后的恢复程度说明其在干旱逆境下

维持水分传输的能力以及对干旱逆境的抵御与适应能力相对弱于高粱。

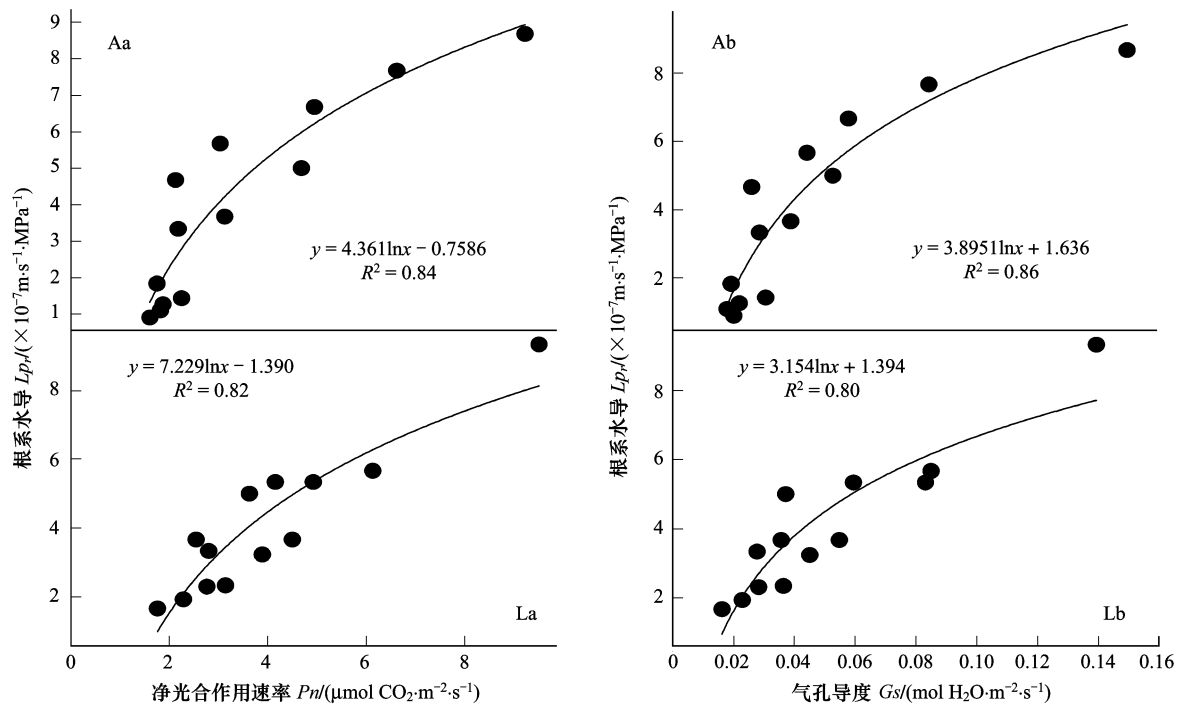


图5 阿尔冈金(A)与陇东(L) L_{pr} 与 P_n (a)、 L_{pr} 与 G_s (b)之间的关系

Fig. 5 Relationship of L_{pr} and P_n (a), L_{pr} and G_s (b) in Algonquin (A) and Long Dong (L)

再比较高粱和紫花苜蓿水分利用情况可知:两物种 P_n 、 G_s 和 T_r 均在受到水分胁迫后开始随着胁迫时间的延长而持续下降,但高粱的下降幅度远小于紫花苜蓿(胁迫 48 h,抗四 P_n 、 G_s 和 T_r 分别下降到对照的 40.64%、33.58% 和 37.39%,而陇东分别下降到对照的 18.5%、11.4% 和 15.2%,阿尔冈金则分别下降到对照的 17.4%、13.5% 和 21.3%),且恢复到营养液培养后,高粱 P_n 、 G_s 和 T_r 立即显著恢复,而紫花苜蓿在复水后 12—36 h 才显著恢复;同时,高粱 P_n 、 G_s 和 T_r 的恢复程度远大于紫花苜蓿(复水 48 h,抗四 P_n 、 G_s 和 T_r 分别恢复到对照的 93.88%、89.53% 和 94.27%,而陇东分别恢复到对照的 51.80%、59.71% 和 61.01%,阿尔冈金则分别恢复到对照的 53.71%、38.81%、66.23%);再者,高粱叶片 RWC 和 WUE 在环境水势变动过程中的变幅小于紫花苜蓿(表 3 和表 4),因此,认为水分亏缺对高粱光合作用造成的伤害小于紫花苜蓿,高粱对干旱逆境的忍耐能力强于紫花苜蓿。

综合前述,紫花苜蓿和高粱 L_{pr} 及气体交换(水分利用)参数等在变水条件下的动态变化表明,水分亏缺通过减弱水分的可利用性阻遏了根系吸水继而调控地上部反应,虽然带来了 WUE 的提高,但胁迫(复水)初期植株水分吸收利用平衡的打破在很大程度上限制(恢复)了地上部的水分利用。干旱条件下紫花苜蓿根系水分传输主要是通过 AQP 来实现的。相比较而言,水分亏缺条件下高粱能维持更好的水分吸收和水分利用能力,并在复水后较紫花苜蓿有更大程度的恢复,因此高粱幼苗对干旱逆境的忍耐能力可能强于紫花苜蓿;紫花苜蓿品种间,陇东亦在变水条件下较阿尔冈金有着更好的维持水分吸收与利用平衡的能力,因此对水分胁迫有着更强的适应能力。

References:

- [1] Steudle E. Water uptake by roots; effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(350): 1531-1542.
- [2] Lee S H, Chung G C, Steudle E. Gating of aquaporins by low temperature in roots of chilling-sensitive cucumber and chilling-tolerant figleaf gourd. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(413): 985-995.

- [3] Niinemets Ü, Díaz-Espejo A, Flexas J, Galmés J, Warren C R. Role of mesophyll diffusion conductance in constraining potential photosynthetic productivity in the field. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(8) : 2249-2270.
- [4] Meinzer F C, Grantz D A. Stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane; stomatal adjustment to water transport capacity. *Plant, Cell and Experiment*, 1990, 13(4) : 383-388.
- [5] Cochard H, Coll L, Le Roux X, Améglio T. Unraveling the effects of plant hydraulics on stomatal closure during water stress in walnut. *Plant Physiology*, 2002, 128(1) : 282-290.
- [6] Miyamoto N, Steudle E, Hirasawa T, Lafitte R. Hydraulic conductivity of rice roots. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(362) : 1835-1846.
- [7] Zhang S Q, Shan L, Deng X P. Change of water use efficiency and its relation with root system growth in wheat evolution. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 1879-188.
- [8] Siemens J A, Zwiazek J J. Changes in root water flow properties of solution culture-grown trembling aspen (*Populus tremuloides*) seedlings under different intensities of water-deficit stress. *Physiologia Plantarum*, 2004, 121(1) : 44-49.
- [9] Zhao C X, Deng X P, Zhang S Q, Ye Q, Steudle E, Lun S. Advances in the studies on water uptake by plant roots. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2004, 46(5) : 505-514.
- [10] Mu Z X, Zhang S Q, Zhang L S, Liang A H, Liang Z S. Hydraulic conductivity of whole root system is better than hydraulic conductivity of single root in correlation with the leaf water status of maize. *Botanical Studies*, 2006, 47(2) : 145-151.
- [11] Steudle E, Peterson C A. How does water get through roots?. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(322) : 775-788.
- [12] Zhang S, Shan L. Research progress on water uptake in plant roots. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(4) : 396-402.
- [13] Yang X Q, Zhang S Q, Liu X F, Mu Z X. Relationship between roots hydraulic conductivity and root anatomy of winter wheat (*T. aestivum*). *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(8) : 160-164.
- [14] Yao A X, Wang H S, Liang Z F. Study of biological characteristics of alfalfa. *Grass and Feed Crops*, 1989, 2: 23-26.
- [15] Bai W M, Zuo Q, Huang Y F, Li B G. Effect of water supply on root growth and water uptake of alfalfa in wulanbuhe sandy region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(1) : 35-41.
- [16] Guo Y J, Xu H Z, Zhang J H. A study on the morphology of the root system of alfalfa. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(6) : 484-486.
- [17] Rubio M C, González E M, Minchin F R, Judith Webb K, Arrese-Igor C, Ramos J, Becana M. Effects of water stress on antioxidant enzymes of leaves and nodules of transgenic alfalfa overexpressing superoxide dismutases. *Physiologia Plantarum*, 2002, 115(4) : 531-540.
- [18] Li W R, Zhang S Q, Ding S Y, Shan L. Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19) : 5140-5150.
- [19] Irigoyen J J, Emerich D W, Sánchez-Díaz M. Alfalfa Leaf senescence induced by drought stress: photosynthesis, hydrogen peroxide metabolism, lipid peroxidation and ethylene evolution. *Physiologia Plantarum*, 1992, 84(1) : 67-72.
- [20] Yang Q G, Zhang X D, Yang X G. Studies on water consumption of alfalfa and characteristics of soil moisture in semi-arid areas of middle Gansu Province. *Agricultural Meteorology*, 2003, 24(4) : 37-40.
- [21] Sun H R, Liu G R, Zhang Y J, Gao F, Lu T L, Han J G. Water requirement, water consumption, water requirement rate, water consumption rate and water use efficiency of alfalfa. *Pratacultural Science*, 2005, 22(12) : 24-30.
- [22] Sang Y Q, Wu W L, Zhang J S, Zhou Z F, Zhang Z S. Evapotranspiration of *Medicago sativa* L. under poplar shelterbelts in Maowusu Sandy Area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5) : 44-49.
- [23] Gao J F. *Experimental Technology in Plant Physiology*. 2nd edn. Xian: World Books Publishing Company, 2006 : 69-201.
- [24] Zhang W H, Tyerman S D. Inhibition of water channels by HgCl₂ in intact wheat root cells. *Plant Physiology*, 1999, 120(3) : 849-858.
- [25] Martre P, North G B, Nobel P S. Hydraulic conductance and mercury-sensitive water transport for roots of *Opuntia acanthocarpa* in relation to soil drying and rewetting. *Plant Physiology*, 2001, 126(1) : 352-362.
- [26] Tyerman S D, Bohnert H J, Maurel C, Steudle E, Smith J A C. Plant aquaporins their molecular biology, biophysics and significance for plant water relations. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50: 1055-1071.
- [27] Wan X C, Zwiazek J J. Mercuric chloride effects on root water transport in aspen seedlings. *Plant Physiology*, 1999, 121(3) : 939-946.
- [28] Li W R, Zhang S Q, Shan L. Physiological and biochemical responses of leaves and roots of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to water stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(4) : 299-305.
- [29] Li W R, Zhang S Q, Shan L, Zhang T, Shan Y. Effect of water stress mimicked by PEG-6000 and rehydration on eco-physiological characteristics of leaf and stem in alfalfa seedlings. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 17(6) : 247-252.
- [30] Wang S Y, Deng X P, Xue S, Xue S L. Comparison research on water transportation of non-drought and drought-stressed tomato root systems.

- Journal of Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry: Nature and Science Edition, 2003, 31(2): 105-108.
- [31] Carvajal M, Cook D T, Clarkson D T. Responses of wheat plants to nutrient deprivation may involve the regulation of water-channel function. *Planta*, 1996, 199(3): 372-381.
- [32] Shen Y F, Wang B L, Qu D, Chen R F. Effects of phosphorus on root hydraulic conductance of corn under water stress. *Journal of Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry: Nature and Science Edition*, 2002, 30(5): 11-15.
- [33] Parry M A J, Andralojc P J, Khan S, Lea P J, Keys A J. Rubisco activity: effects of drought stress. *Annals of Botany*, 2002, 89(7): 833-901.
- [34] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25(2): 275-294.
- [35] Bota J, Medrano H, Flexas J. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? *New Phytologist*, 2004, 162(3): 671-681.
- [36] Marques da Silva J, Arrabaça M C. Photosynthesis in the water-stressed *C₄* grass *Setaria sphacelata* is mainly limited by stomata with both rapidly and slowly imposed water deficits. *Physiologia Plantarum*, 2004, 121(3): 409-420.
- [37] Brodribb J T, Holbrook N M. Stomatal closure during leaf dehydration correlation with other leaf physiological traits. *Plant Physiology*, 2003, 132(4): 2166-2173.
- [38] Beyel V, Brüggemann W. Differential inhibition of photosynthesis during pre-flowering drought stress in *Sorghum bicolor* genotypes with different senescence traits. *Physiologia Plantarum*, 2005, 124(2): 249-259.
- [39] Li Y Y, Shao M A. Axial Changes in Root Xylem Water Potential and Radial Hydraulic Conductivity of Corn. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 200-204.
- [40] Gullo M L, Nardini A, Salleo S, Tyree M. Changes in root hydraulic conductance (K_R) of *Olea oleaster* seedlings following drought stress and irrigation. *New Phytologist*, 1998, 140(1): 25-31.

参考文献:

- [12] 张岁岐, 山仑. 根系吸水机理研究进展. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(4): 396-402.
- [13] 杨晓青, 张岁岐, 刘小芳, 慕自新. 不同抗旱型冬小麦品种根系水力导度与解剖结构的关系. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(8): 160-164.
- [14] 姚爱兴, 王槐三, 梁祖锋. 紫花苜蓿根系生物学特性的研究. *牧草与饲料*, 1989, 2: 23-26.
- [15] 白文明, 左强, 黄元仿, 李保国. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 25-31.
- [16] 郭彦军, 徐恢仲, 张家骅. 紫花苜蓿根系形态学研究. *西南农业大学学报*, 2002, 25(6): 484-486.
- [18] 李文尧, 张岁岐, 丁圣彦, 山仑. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系. *生态学报*, 2010, 30(19): .
- [20] 杨启国, 张旭东, 杨兴国. 甘肃中部半干旱区紫花苜蓿耗水规律及土壤水分变化特征研究. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 37-40.
- [21] 孙洪仁, 刘国荣, 张英俊, 高飞, 逯涛林, 韩建国. 紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究. *草业科学*, 2005, 22(12): 24-30.
- [22] 桑玉强, 吴文良, 张劲松, 周择福, 张忠山. 毛乌素沙地杨树防护林内紫花苜蓿蒸散耗水规律的研究. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 44-49.
- [23] 高俊凤. *植物生理学实验技术*. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 69-201.
- [28] 李文尧, 张岁岐, 山仑. 苜蓿叶片及根系对水分亏缺的生理生化响应. *草地学报*, 2007, 15(4): 299-305.
- [29] 李文尧, 张岁岐, 山仑, 张彤, 山颖. PEG 模拟旱后复水对紫花苜蓿茎叶生理生态特性的影响. *西北农业学报*, 2008, 17(6): 247-252.
- [30] 王生毅, 邓西平, 薛崧, 薛思林. 干旱胁迫对西红柿根系水导的影响研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(2): 105-108.
- [32] 沈玉芳, 王保莉, 曲东, 陈荣府. 水分胁迫下磷营养对玉米苗期根系导水率的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(5): 11-15.
- [39] 李秧秧, 邵明安. 玉米单根木质部水势与径向水力导度的轴向变化. *土壤学报*, 2003, 40(2): 200-204.

CONTENTS

Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes YI Liangpeng, WANG Zuwei (1195)

Population dynamics of endophytic bacteria isolated from the roots of infected *Cymbidium faberi* YANG Na, YANG Bo (1203)

Spatial variability of forest soil total nitrogen of different soil layers ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, WANG Yousheng, et al (1213)

Habitat prediction for forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Qinling mountain range based on niche model LUO Chong, XU Weihua, ZHOU Zhixiang, et al (1221)

Growth release determination and interpretation of Korean pine and Koyama spruce in Shengshan National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China WANG Xiaochun, ZHAO Yufang (1230)

Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals LI Weihuan, YU Lanlan, CHENG Xianhao, et al (1240)

Characters of the OMI NO₂ column densities over different ecosystems in Zhejiang Province during 2005—2009 CHENG Miaomiao, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (1249)

The forest gap diameter height ratio in a secondary coniferous forest of Guan Di Mountain FU Liyong, TANG Shouzheng, LIU Yingan (1260)

Landscape responses to changes in water levels at Poyang Lake wetlands XIE Dongming, ZHENG Peng, DENG Hongbing, et al (1269)

Effect of simulated nitrogen deposition on litter decomposition in a *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocala mopsi* plantation, Rainy Area of West China TU Lihua, DAI Hongzhong, HU Tingxing, et al (1277)

Effect of aromatic plant-derived nutrient solution on the growth, fruit quality and disease prevention of pear trees GENG Jian, CUI Nannan, ZHANG Jie, et al (1285)

Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land MA Zhongming, DU Shaoping, XUE Liang (1295)

Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling ZHANG Renhe, ZHENG Youjun, MA Guosheng, et al (1303)

Photosynthetic diurnal variation characteristics of leaf and non-leaf organs in winter wheat under different irrigation regimes ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, WANG Zhimin (1312)

The root system hydraulic conductivity and water use efficiency of alfalfa and sorghum under water deficit LI Wenrao, LI Xiaoli, ZHANG Suiqi, et al (1323)

Latitudinal gradient in beta diversity of forest communities in America CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1334)

Influence of silts on growth and development of *Acorus calamus* and *Acorus tatarinowii* in turbid water LI Qiang, ZHU Qihong, DING Wuquan, et al (1341)

Roles of earthworm in phytoremediation of pyrene contaminated soil PAN Shengwang, WEI Shiqiang, YUAN Xin, et al (1349)

Population dynamics of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) along with analysis on the meteorological factors influencing the population in pomegranate orchards LIU Ling, CHEN Bin, LI Zhengyue, et al (1356)

Geophagy of *Macaca Thibetana* at Mt. Huangshan, China YIN Huabao, HAN Demin, XIE Jifeng, et al (1364)

The structure and dynamic of insect community in Zhalong Wetland MA Ling, GU Wei, DING Xinhua, et al (1371)

Analysis of layer progressive discriminant relations between the occurrence of *Bipectilus zhejiangensis* and soil DU Ruiqing, CHEN Shunli, ZHANG Zhengtian, et al (1378)

New mutations in hind wing vein of *Apis cerana cerana* (Hymenoptera: Apidae) induced by lower developmental temperature ZHOU Bingfeng, ZHU Xiangjie, LI Yue (1387)

18S rRNA gene variation and phylogenetic analysis among 6 orders of Bivalvia class MENG Xueping, SHEN Xin, CHENG Hanliang, et al (1393)

Laboratory study on ethology of *Spinibarbus hollandi* LI Weiming, CHEN Qiuwen, HUANG Yingping (1404)

Dynamic change in ecological footprint of energy consumption for traction of locomotives in China HE Jicheng (1412)

Approach to spatial differences analysis of urban carrying capacity: a case study of Changzhou City WANG Dan, CHEN Shuang, GAO Qun, et al (1419)

Social adaptive capacity for water resource scarcity in human systems and case study on its measuring CHENG Huaiwen, LI Yuwen, XU Zhongmin (1430)

Effects of physical leaf features of host plants on leaf-mining insects DAI Xiaohua, ZHU Chaodong, XU Jiasheng, et al (1440)

Review and Monograph

Progresses of free-air CO₂ enrichment (FACE) researches on C₄ crops: a review WANG Yunxia, YANG Lianxin, Remy Manderscheid, et al (1450)

Scientific Note

Influence of limestone powder doses on fine root growth of seriously damaged forests of *Pinus massoniana* in the acid rain region of Chongqing, China LI Zhiyong, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1460)

Leaf surface microstructure of *Ligustrum lucidum* and *Viburnum odoratissimum* observed by Atomic force microscopy (AFM) SHI Hui, WANG Huixia, LI Yangyang, LIU Xiao (1471)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 5 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 5 2011

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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
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

订 购 全国各地邮局
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

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

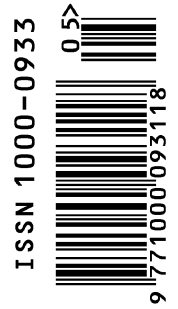
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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