

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 11 期 Vol.32 No.11 **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 11 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子·····	蔡文华, 杨健, 刘志华, 等 (3303)
基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价·····	杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等 (3313)
川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征·····	马姜明, 刘世荣, 史作民, 等 (3323)
老龄阔叶红松林下层木空间分布的生境关联分析·····	丁胜建, 张春雨, 夏富才, 等 (3334)
内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较·····	张媛媛, 马成仓, 韩磊, 等 (3343)
角果藜的生长动态及其生殖配置·····	全杜娟, 魏岩, 周晓青, 等 (3352)
基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例·····	侍昊, 王笑, 薛建辉, 等 (3359)
祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布·····	姜林, 耿增超, 李珊珊, 等 (3368)
水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响·····	马树庆, 王琪, 吕厚荃, 等 (3378)
施氮对水稻土 N ₂ O 释放及反硝化功能基因 (<i>narG/nosZ</i>) 丰度的影响·····	郑燕, 侯海军, 秦红灵, 等 (3386)
中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因·····	曹雯, 申双和, 段春峰 (3394)
基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究·····	杜加强, 舒俭民, 张林波 (3404)
异速生长法计算秋茄红树林生物量·····	金川, 王金旺, 郑坚, 等 (3414)
乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征·····	马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等 (3423)
不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系·····	张萍, 刘林德, 柏新富, 等 (3432)
浑善达克沙地沙地榆种子雨的扩散规律·····	谷伟, 岳永杰, 李钢铁, 等 (3440)
咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响·····	何新林, 陈书飞, 王振华, 等 (3449)
外源 NO 对 NaHCO ₃ 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节·····	刘建新, 王金成, 王鑫, 等 (3460)
呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化·····	丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等 (3467)
海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性·····	耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等 (3477)
江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价·····	陈京都, 戴其根, 许学宏, 等 (3487)
应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系·····	黎道洪, 苏晓梅 (3497)
利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性·····	屠腾, 李蕾, 毛冠男, 等 (3505)
中国主要入海河流河口集水区划分与分类·····	黄金良, 李青生, 黄玲, 等 (3516)
基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力·····	殷燕, 张运林, 时志强, 等 (3528)
低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力·····	王娜, 邵晨, 颜志刚, 等 (3538)
转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化·····	祝向钰, 李志毅, 常亮, 等 (3546)
尼日利亚非洲蜂和安徽意大利蜜蜂及其杂交二代形态特征与微卫星 DNA 遗传多样性·····	余林生, 解文飞, 巫厚长, 等 (3555)
北京城市公园湿地休憩功能的利用及其社会人口学因素·····	李芬, 孙然好, 陈利顶 (3565)
基于协整理论的经济增长与生态环境变化关系分析——以重庆市渝东南地区为例·····	肖强, 胡聃, 肖洋, 等 (3577)
感潮河网区环境合作博弈模型及实证·····	刘红刚, 陈新庚, 彭晓春 (3586)
专论与综述	
国内外生态效率核算方法及其应用研究述评·····	尹科, 王如松, 周传斌, 等 (3595)
全球变化背景下的现代生态学——第六届现代生态学讲座纪要·····	温腾, 徐德琳, 徐驰, 等 (3606)
问题讨论	
流域环境要素空间尺度特征及其与水生态分区尺度的关系——以辽河流域为例·····	刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 等 (3613)
研究简报	
不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响·····	鲁艺芳, 石蕾, 严善春 (3621)
木荷种源间光合作用参数分析·····	熊彩云, 曾伟, 肖复明, 等 (3628)
基于能值分析的深圳市三个小型农业生态系统研究·····	杨卓翔, 高阳, 赵志强, 等 (3635)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 342 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2012-06



封面图说: 爬升樟木沟的暖湿气流——樟木沟是中国境内横切喜马拉雅山脉南坡的几条著名大沟之一, 它位于我国西藏聂拉木县境内的希夏邦马峰东南侧, 延绵 5400km 的 318 国道在此沟中到达其最西头。从聂拉木县城到樟木口岸短短的 30km 中, 海拔从 4000m 急降至 2000m。在大气环流作用下, 来自印度洋的暖湿气流沿樟木沟不断费力地往上爬升, 给该沟谷留下了大量的降水。尤其是在雨季到来时, 山间到处是流水及悬垂崖头的瀑布, 翠峰直插云霄, 森林茂密苍郁, 溪流碧澄清澈, 奇花异葩繁多, 风景美如画卷, 气势壮丽非凡。

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

DOI: 10.5846/stxb201104280562

何新林, 陈书飞, 王振华, 贾文俊, 何建斌, 王海燕, 杨广. 咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响. 生态学报, 2012, 32(11): 3449-3459.
He X L, Chen S F, Wang Z H, Jia W J, He J B, Wang H Y, Yang G. Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of *Populus euphratica* Oliv. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3449-3459.

咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响

何新林^{1,2,*}, 陈书飞^{1,4}, 王振华^{1,2}, 贾文俊², 何建斌², 王海燕³, 杨 广^{1,2}

(1. 现代节水灌溉兵团重点试验室/兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832000;
2. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832003; 3. 石河子大学生命科学院, 石河子 832003;
4. 天津城建设计院(安徽分院), 合肥 230011)

摘要:通过咸水灌溉沙土土质生长的幼龄胡杨,分析了咸水灌溉沙土土壤盐分分布累积特点、盐分胁迫对胡杨的耗水生长关系、叶绿素、Pro、MDA 的影响,结果表明:(1)在 1.2—3 g/L 范围内,微咸水灌溉沙土处于脱盐状态,6—12 g/L 咸水灌溉使沙土积盐大增。在整个生长周期内,微咸水和咸水灌溉,0—200 cm 内土体的总盐都呈累积趋势。(2)咸水灌溉胡杨,不同盐分处理的生长耗水关系可以用对数模型描述。(3)盐分胁迫下,胡杨叶片内叶绿素含量呈抛物线递减,Pro 和 MDA 含量则呈现抛物线递增趋势。说明短期内咸水灌溉对土壤安全和胡杨的生长影响有限,可用咸水解决生态缺水现状,3 种生理指标可用来衡量胡杨的盐胁迫程度,以此为指导提高人工造林的成活率。

关键词:咸水灌溉;沙土;土壤盐分;胡杨;生理生长

Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of *Populus euphratica* Oliv.

HE Xinlin^{1,2,*}, CHEN Shufei^{1,3}, WANG Zhenhua^{1,2}, JIA Wenjun², HE Jianbin², WANG Haiyan⁴, YANG Guang^{1,2}

1 Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Bingtuan/ Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi 832000, China

2 College of Water Conservancy & Architectural Engineering Shihezi University, Xinjiang, Shihezi 832003, China

3 The College of Life Sciences Shihezi University, Shihezi 832003, China

4. Tianjin Urban Construction Design Institute(Anhui Branch Company), Hefei 230011, China

Abstract: *Populus euphratica* Oliv. is a typical species for afforestation in xinjiang. Lots of forests have been planted for protecting the ecological environment in south of junggar basin. Yet the survival rate is strained by the scarce water resources. *Populus euphratica* Oliv. was selected as the reaearch object in this study. The influence of salt water on the physical properties of sand soil and the physiological growth of *Populus euphratica* Oliv. has been analysed. Under different saline water irrigation condition, we got the salt distribution and accumulation characteristics in sand soil, the relationship between the salt stress and water consumption, chlorophyll, Pro and MDA. Through analyzing the characteristic of salt accumulation in the sand soil and the physiological change of *Populus euphratica* Oliv. under the salt water irrigation, we got the response characteristic with salt stress. This study can provide scientific basis for making full use of local salty water and improving the survival rate of afforestation. The results show that:

基金项目:973 计划前期研究专项(2011CB411905);国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951004);石河子大学大学生创新创业训练计划项目;国家自然科学基金项目(40861027)

收稿日期:2011-04-28; **修订日期:**2011-09-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hexinlin2002@163.com

(1) The total salt of sand soil becomes to desalt when the salt content of irrigating water is 1.2—3 g/L. The salt in soil increases when the content is 6—12 g/L. On the other side, whether the saline or brackish water irrigation, soil salt in 0—200 cm shows an increasing trend in the whole growth period. When irrigated using saline water, the accumulation rate of soil salt increases with salinity. There is a direct proportion relationship between the soil salt accumulation and salinity.

(2) Salt water irrigation can make the growth period shorten. The higher the salinity is, the shorter the period is. The *Populus euphratica* Oliv. does not grow any longer at the end of June when irrigated with salt water of 12 g/L, and the average soil salinity reaches 13.96 g/kg at the same time. When using the salt water of 1.2 g/L, the *Populus euphratica* Oliv. is growing slowly at the end of August and the average soil salinity is 2.99 g/kg. It has little harm to the growth of *Populus euphratica* Oliv. under the low salinity level. The relationship of growth and water consumption of *Populus euphratica* Oliv. can be expressed using the logarithm model. It has a good agreement with the observing results in 1—6 g/L salinity. The relationship is not so strong in 9 g/L, 12 g/L salinity. The minimum of correlation coefficient is 0.7644.

(3) The external form response of *Populus euphratica* Oliv with salt water irrigation is mainly manifested as growth indices. The inner destruction shows from the typical physiological indexes chlorophyll, proline (Pro) and malondialdehyde (MDA). The three physiological indexes have significant changes under adversity conditions. The leaf chlorophyll content decreases with parabolic, and the Pro and MDA content has a parabolic increasing trend under the salt stress.

The result shows that three kinds of physiological indexes can be used to measure the salt stress level, and short-term salt-water irrigation has little effect on soil safety and the growth of *Populus euphratica* Oliv. Salt water is beneficial to relieving ecological water shortage. This study can be a guide to improve the survival rate of afforestation.

Key Words: saline water irrigation; sandy soil; soil salt; *Populus euphratica* Oliv.; physiological growth

为提高干旱区植被对不同质量水资源的高效利用,咸水灌溉对干旱区域植被恢复重建有着重要意义。目前,咸水的开发利用已成为热点,众多学者已有很多研究^[1-8]。但是咸水灌溉荒漠植物的研究不多^[7, 9-10]。因此,本文以胡杨为研究对象,研究咸水灌溉中土壤盐分在沙土中的聚积效应以及胡杨对咸水灌溉的生理生长响应,能够充分认识不同水盐环境对胡杨生长的影响程度,为区域有效利用水资源提供科学依据。

胡杨是新疆造林的典型树种,准噶尔盆地南缘人工营造胡杨林的活动开展很多,但是要保证成活率,就需要大量的供水才能满足,然而当地水资源供需紧张,已有的淡水和微咸水主要用于灌溉农田作物,生态用水不能保证供给。调查发现,准噶尔盆地分布有较为丰富的咸水,矿化度多在 3—10 g/L,在新疆兵团农八师 147 团,148 团甚至出现 10—30 g/L 的高矿化度水^[11],根据灌溉试验规范的要求原则是不能灌溉作物的,但是针对耐盐的荒漠植物胡杨,尝试用复合盐分组成的咸水去灌溉(以往学者研究多为单一盐分 NaCl 灌溉),研究咸水对沙土土壤的影响和胡杨的生理生长变化,可以充分利用当地的非常规水资源,为提高人工造林的成活率提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于天山北麓准噶尔盆地南缘,新疆石河子市石河子大学西郊农试场二连现代节水灌溉兵团重点试验室,东经 85°59'47",北纬 44°19'28",海拔 412 m。平均地面坡度 6‰,属于典型的温带大陆性气候,干旱少雨,年均降水量 117 mm,年平均蒸发量 1945 mm,蒸发量为降水量的 16 倍,≥10℃年积温 3457.8℃,无霜期 166 d,全年日照时数 2797.5 h。2010 年气象状况较异常,试验阶段各月降雨量、最低与最高气温数据见表 1。

1.2 材料与仪器

供试土壤为沙土,取自准噶尔盆地南缘农八师 147 团,为野生荒漠植物生长的沙土质,土壤干容重、田间持水率(质量含水率)和测坑的初始含盐量见表 2 和表 3。

表 1 2010 年气象状况

Table 1 The meteorological conditions in 2010

月份 Month	5	6	7	8	9	10
最高气温 Highest temperature/℃	33.8	38.6	38.9	37.1	36.4	30.3
最低气温 Lowest temperature/℃	3.5	10.4	13	11.3	5.7	-1.3
平均气温 Average temperature/℃	18.7	24.4	25.5	23.7	19.9	10.3
降雨量 Rainfall/mm	42	39.2	28.8	24.4	8.8	34.4

表 2 测坑土壤容重和田间持水率

Table 2 The soil bulk density and field capacity in test-pits

土层深度 Soil depth/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	平均
容重 Density/(g/cm ³)	1.4897	1.4655	1.4593	1.4422	1.4630	1.4615	1.4635
田间持水率 Field capacity water rate/%	19.73	19.06	20.08	19.55	17.20	19.14	19.13

表 3 测坑矿化度处理和初始含盐量

Table 3 The different salinity treatments and initial salt content in the test-pits

处理 Processing	A	B	C	D	E
设计矿化度 Design salinity	1.2 g/L	3 g/L	6 g/L	9 g/L	12 g/L
初始盐分 Initial salt/%	0.482	0.515	0.335	0.324	0.396

每个处理设 3 个重复,初始盐分为所设处理小区测坑的平均含盐量

监测的 3a 龄荒漠植物胡杨移植于农八师石河子市 150 团。所用咸水为配置而成,配置方法和组成见文献^[10],灌水方式为滴灌,潜水泵加压供水,工作压力 9.0—11.5 MPa,滴头流量约为 7.9—10.8 L/h,胡杨株间距 1 m×1 m,滴头布置于距树基径 5 cm 内,试验所用测坑规格为 2 m×2 m×2.5 m,底部设 30 cm 的反滤层,四周侧壁进行防渗处理,采用烘干法和中子仪监测土壤水分,试验所用的中子仪为美国 CPN 公司的 503DR·9 中子仪,测试深度为 0—140 cm,每隔 20 cm 测试 1 次,盐分测定按照 1:5 的土水比提取土壤中的盐分,采用南京土壤研究所生产的 DDB-2 型便携式数字电导率仪,测土样溶液的电导率值,利用标定曲线,计算其不同土壤层的含盐量。

1.3 测试指标

(1) 土壤盐分 初始含盐量取土深度 200 cm,0—140 cm 土层每隔 20 cm 一个土样,140—200 cm 土层深度取 170、200 两个土样。所取土样风干后,按照 1:5 的土水比充分混合,静止沉淀至澄清,取其上清液,用电导率仪测其电导值,然后上清液定容至烧杯 100 mL,置上清液于烘箱内烘干,用分析天平(精度为 0.0001)称其盐分干重,最后把所得的盐分干重和对应上清液的电导率值进行拟合,得出土壤盐分和土壤溶液电导率的标准曲线(1),由此即可算出土壤的含盐量。土壤盐分的标准曲线方程如下:

$$S = 0.0352EC - 0.1775 \quad R^2 = 0.9907, N = 32 \quad (1)$$

式中, S 为土壤含盐量(g/kg); EC 表示土壤溶液电导率值(10^{-2} ms/cm); N 样本数量(个);

(2) 胡杨基径、株高、新枝条、冠幅的生长指标 基径采用数字电子游标卡尺测试,精度 0.01 mm,其它指标采用卷尺测试,精度 0.1 cm。基径、株高和冠幅 15 d 测试 1 次,新枝长度大约 7 d 测 1 次。胡杨生长测试从 5 月 11 日开始,9 月 30 日结束。其中 5 月、6 月、7 月间新枝测试每隔 7 d 1 次,9 月胡杨生长几乎停止,每隔 10 d 测试 1 次。

(3) 胡杨脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)、叶绿素荧光参数的测定 胡杨叶片 Pro 采用磺基水杨酸提取、MDA 用硫代巴比妥酸法,制作的 Pro 的标准曲线),操作步骤和测定方法详见文献^[12]。

$$C = 45.79 \cdot A_{520} + 0.1308 \quad R^2 = 0.9997, N = 7 \quad (2)$$

$$M = (C \times V_T) / (W \times V_S) \quad (3)$$

式中, C 为标准曲线上获得 Pro 的质量(μ g); A_{520} 为波长 520 nm 下的吸光值; M 为 Pro 的含量(μ g/g); V_T 表示

提取溶液的总体积(mL); V_s 标被测溶液的体积(mL); W 为样品的质量(g); N 样本数量(个)。

2 结果与分析

2.1 咸水灌溉对沙土土壤盐分的影响

(1) 灌前和灌后土壤盐分的运移特点

首先,把 1.2—12 g/L 矿化度水划分为微咸水(1.2—3 g/L)和咸水(6—12 g/L)。不同处理咸水灌溉沙土后,灌水前后盐分运移有较大的差异(图 1)。

在微咸水范围内,灌后沙土土壤基本处于脱盐状态,只有 3 g/L 处理在 100 cm 以下深层盐分略有增加;在咸水灌溉后,土壤全部处于积盐趋势,盐分累积的程度随着灌溉水矿化度的升高而不断增加,以高矿化度水 12 g/L 灌后累积的盐分最大,土壤积盐和灌溉水的矿化度成正比。

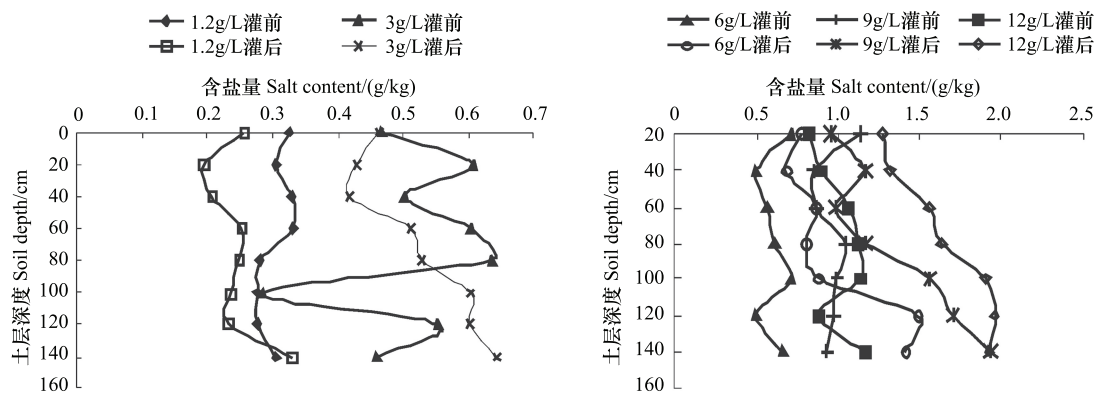


图 1 不同盐分处理灌水前、后土壤盐分变化

Fig.1 The before irrigation、after irrigation the soil salt content dynamic of *Populus euphratica* in the different salt treatments

(2) 生育期内土壤盐分累积规律

咸水灌溉,土壤会呈现不同程度的积盐。长期灌溉咸水会加大土壤盐渍化的风险,分析咸水中盐分在土壤中的累积规律,进行合理的水盐调控,有助于提高咸水灌溉的效率。通过整个生长周期的 4 次咸水灌溉,带入土体的盐分日趋增多。距离胡杨基径不同位置土壤总盐有很大的差异(表 4)。

表 4 不同矿化度处理下胡杨土壤湿润区盐分累积分析(0—200 cm)

Table 4 Analysis on the accumulation salt of soil humid areas of *Populus euphratica* under different salinity treatments (in the 0—200 cm soil zones)

盐分处理 Salt processing (g/L)	距滴头 0—15cm 区域 (0—15 cm from the drop head)			距滴头 15—30cm (15—30 cm from the drop head)			距滴头 30—45cm (30—45cm from the drop head)		
	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%
	Initial salt/g	Finally salt/g	Cumulative salt/%	Initial salt/g	Finally salt/g	Cumulative salt/%	Initial salt/g	Finally salt/g	Cumulative salt/%
1.2	68.52	74.38	8.55	257.43	344.43	33.8	517.37	758.79	46.66
3	87.29	134.56	54.15	259.16	472.48	82.31	761.22	969.41	27.35
6	48.98	194.54	297.17	126.95	587.87	363.08	476.71	1007.5	111.34
9	59.52	269.09	352.13	182.79	849.72	364.85	422.85	1446.6	242.09
12	113.97	374.86	228.87	229.43	1110.6	384.08	335.01	1557.4	364.91

土壤盐分概化分析按柱状土体分析,土层深度为 200 cm,直径为 90 cm 内

不同盐分处理,经过整个生长期的的灌溉后,最终在 0—200 cm 内土壤平均总盐分都处于积盐趋势,最终积盐的多少和灌溉水矿化度正相关(图 2),说明灌溉水矿化度是盐分积累的关键因素。

但在湿润区,距离滴头的不同位置,盐分累积规律不同,就土壤中的含盐量来说,距滴头 30—45 cm 的最终含盐量最大,但与初始含盐量相比,累积盐分的百分比不是最大,土壤盐分累积百分比最大的是 15—30 cm

土层区域,这一区域是点水源的向四周扩散的“过渡区”,水分和盐分在这里中转到更远的土层区域,所以土壤累积的盐分百分比可能导致最大,但就土壤含盐量和最终盐分在湿润区边缘聚集是学者一致认同的结论^[13-14]。

由表 5 可知,在计划湿润层 0—100 cm 土体内,不同处理下土壤的总盐都呈积累趋势,积盐的百分比随灌溉水矿化度的增大而不断增大,距滴头不同位置,土壤总盐主要在湿润边缘积聚,但矿化度超过 3 g/L,滴头附近近区域也有较大的盐分累积;滴头附近 0—15 cm 范围,积盐最小的是 1.2 g/L 处理,最大的是 9 g/L 处理,其原因是灌溉水矿化度小,初始含盐量小,积累的盐分有限,会比较小;灌溉水矿化度较高(9 g/L),初始含盐量较小,积盐率就会较大。距滴头 15—30 cm 和 30—45 cm 区域积盐率也有同样的规律。9 g/L 处理相比 12 g/L 处理积盐率还高的原因都与初始含盐量和灌溉水矿化度这两个因素密切相关,初始含盐量越小,较高矿化度水灌溉后,土壤积盐率迅速增大。此外,矿化度越高,沙土土壤在多次咸水灌溉后,土壤空隙结构被带入的盐分物质改变,在沙土持水性很差的条件下,水分下移至深层,盐分在土壤空隙的逐渐过滤渗流下,固体溶质被先被小孔隙截留,然后多次高矿化度(9 g/L 以上)水灌溉使土壤小孔隙颗粒物充满阻塞水分流动,使土壤透水性下降,致使土壤水分不能运移到更远的土体,使得高矿化度水灌溉的湿润体范围缩小。

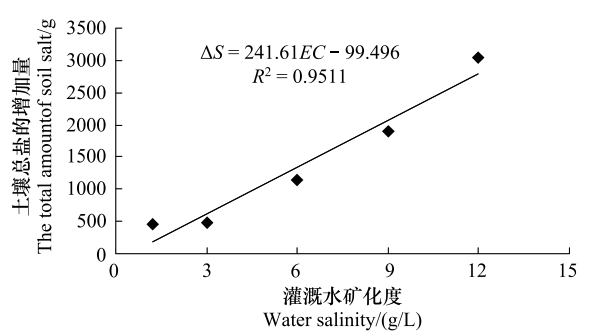


图 2 灌溉水矿化度和土壤总盐增量的关系
Fig. 2 The relation curve for the soil total salt incrementation and the salinity of irrigation water

表 5 不同矿化度处理下胡杨土壤湿润区盐分累积分析(0—100 cm 计划湿润层)

Table 5 Analysis on the accumulation salt of soil humid areas of *Populus euphratica* under different salinity treatments (in the 0—100 cm planned moisture layer)

盐分处理 Salt processing /(g/L)	距滴头 0—15cm 区域 (0—15 cm from the drop head)			距滴头 15—30cm (15—30 cm from the drop head)			距滴头 30—45cm (30—45cm from the drop head)		
	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%
	Initial salt/g	Finally salt/g	Cumulative salt/%	Initial salt/g	Finally salt/g	Cumulative salt/%	Initial salt/g	Finally salt/g	Cumulative salt/%
1.2	17.25	25.65	48.70	66.11	149.41	126.00	137.82	338.53	145.63
3	17.77	57.33	222.62	92.27	193.06	109.23	401.29	421.93	5.14
6	20.86	67.96	225.79	55.13	272.90	395.01	109.88	505.07	359.66
9	11.55	113.69	884.33	34.00	374.69	1002.03	57.47	698.44	1115.31
12	50.70	189.62	274.01	81.51	663.52	714.03	92.10	832.60	804.02

由表 6 可知,不同处理下土壤总盐在 100—200 cm 土体内依然呈积累趋势,与计划湿润层 0—100 cm 土体体积盐不同的是,不同处理总盐累积的量较 0—100 cm 的更多,但是盐分累积的百分比却小于计划湿润层的盐分;灌溉水矿化度超过 6 g/L,滴头下附近 0—15 cm 盐分迅速累积,且随着矿化度的加大,同一矿化度处理 0—45 cm 3 个划分区域的盐分累积百分比差异逐渐缩小,12 g/L 的高矿化度处理在 0—15 cm、15—30 cm、30—45 cm 3 个不同土壤区域总盐累积的百分比分别为 192.73%、202.27%、198.41%,可见高矿化度水灌溉使得土体总盐在滴头湿润区附近累积的百分比比较大,且几乎没有太大差别。

总之,由于土壤是一个开放的介质体系,在内在的物理化学特性、外界的环境和人为的影响下,土壤盐分的运移和累积是一个复杂的过程,土壤质地、灌溉水质、气温、灌水方式、灌水量、滴头流量、灌溉计划湿润层深度等都将影响着水盐的迁移和累积。

表 6 不同矿化度处理下胡杨土壤湿润区盐分累积分析(100—200cm 水分下渗土层)

Table 6 Analysis on the accumulation salt of soil humid areas of *Populus euphratica* under different salinity treatments(in the100—200cm soil water infiltration zones)

盐分处理 Salt processing /(g/L)	距滴头 0—15cm 区域 (0—15 cm from the drop head)			距滴头 15—30cm (15—30 cm from the drop head)			距滴头 30—45cm (30—45cm from the drop head)		
	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%	初始盐分 Initial salt/g	最终盐分 Finally salt/g	累积盐分 Cumulative salt/%
1.2	51.27	48.73	-4.95	191.32	195.02	1.93	379.56	420.26	10.72
3	69.52	77.23	11.09	166.89	279.42	67.43	359.93	547.47	52.11
6	28.12	126.58	350.14	71.81	314.96	338.60	366.84	502.41	36.96
9	47.97	155.40	223.95	148.79	475.03	219.26	365.38	748.10	104.75
12	63.27	185.21	192.73	147.92	447.12	202.27	242.90	724.84	198.41

2.2 咸水灌溉条件下胡杨的水分生长关系

咸水灌溉条件下,胡杨生长前期 5—7 月份,生长随着耗水量增加而不断加快,到了 8 月初耗水量增大,生长开始缓慢,到了后期 9 月份,虽然一定程度上耗水在增加,但是生长基本处于停止状态。咸水灌溉可使得胡杨的生长期提前结束,矿化度越高,胡杨的生长期结束越早,12 g/L 的胡杨处理,在 6 月末基本就不再生长,此时土壤平均盐分高达 13.96 g/kg,较高的含盐量对胡杨已形成显著的抑制;1.2 g/L 的处理,到了 8 月末,胡杨还在缓慢生长,土壤平均盐分含量仅 2.99 g/kg,较低的含盐量对胡杨没有造成生长危害。由表 7 水分生长关系分析,可以用对数模型描述胡杨生长耗水变化:

$$L=a\ln(ET)+b$$
 (4)

其中,L 为生长增长量(基径 mm,株高、新枝长 cm,冠幅 cm²)ET 为田间耗水量,mm; a,b 为模型参数。

表 7 不同盐分处理胡杨的耗水生长模型(2010 年)

Table 7 The water consumption-growth model in different salinity treatments 2010

生长指标 Growth index	盐分处理 Salt treatment	模型 Model	R ²
基径 Base diameter	A	$L=8.0656\ln(ET)-30.389$	0.9892
	B	$L=6.6519\ln(ET)-27.777$	0.9845
	C	$L=4.7555\ln(ET)-20.101$	0.892
	D	$L=5.3875\ln(ET)-23.327$	0.972
	E	$L=0.4702\ln(ET)-0.4451$	0.8854
株高 Plant height	A	$L=42.223\ln(ET)-156.61$	0.8587
	B	$L=55.696\ln(ET)-217.26$	0.9845
	C	$L=36.903\ln(ET)-159.12$	0.924
	D	$L=3.454\ln(ET)-14.914$	0.9559
	E	$L=4.8673\ln(ET)-20.079$	0.8648
新枝长 Sectio of long	A	$L=72.425\ln(ET)-287.42$	0.9577
	B	$L=50.354\ln(ET)-211.49$	0.924
	C	$L=39.861\ln(ET)-180.68$	0.896
	D	$L=19.824\ln(ET)-49.154$	0.948
	E	$L=3.0844\ln(ET)+2.6132$	0.7644
冠幅 Crown breadth	A	$L=3752.9\ln(ET)+5469.2$	0.8487
	B	$L=4673.4\ln(ET)+1754.4$	0.8853
	C	$L=7479\ln(ET)-19855$	0.8863
	D	$L=3187.8\ln(ET)-3773.3$	0.7689
	E	$L=130.77\ln(ET)+5114.5$	0.9734

由拟合结果知,1—6 g/L 处理的生长量与耗水量用对数关系拟合的效果比较好,相关系数都很高,9、12 g/L 处理生长量和耗水量拟合的效果稍差些,但是最低的相关系数 R^2 也达到了 0.7644,也满足了模型的准确度,可以说明不同盐分处理下胡杨的生长量和耗水量符合较好的对数模型。

2.3 咸水灌溉对胡杨生理的影响

咸水灌溉胡杨外在形态反应是对各生长指标的抑制,对内在的破坏则通过典型生理指标叶绿素、脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)呈现出来。逆境条件下,这 3 个生理指标都会有明显的变化。在不同的盐分梯度下,胡杨叶片内的 Pro 和 MDA 含量变化如图 3 所示。

6 月 11 日首次灌水后,胡杨各处理的叶绿素含量都较高,只有 1.2 g/L 处理胡杨的叶绿素含量最高,且与高矿化度 12 g/L 处理叶绿素有明显差异,其他处理之间含量差异不大;脯氨酸含量 1.2 g/L(对照)处理和其它处理有显著的差异($P<0.05$),Pro 含量最大的为 12 g/L 处理;丙二醛初始含量只有 1.2 g/L 处理较小,其它对照 1.2 g/L 相比较,且差异也显著($P<0.05$)。到 9 月 3 日第 4 次灌水后,1.2、3、6、9、12 g/L 处理的叶绿素含量都不同程度的下降,同 6 月 11 日比,分别下降了 31.6%、27.9%、25.5%、34.3%、45.8%,脯氨酸和丙二醛呈现逐步累积增加趋势,脯氨酸各处理分别增加了 109.5%、35.2%、54.6%、35.4%、83.1%,丙二醛分别增加了 47.6%、6.9%、22.8%、51.8%、63.2%,由此可以得知,12 g/L 处理的脯氨酸和丙二醛积累较多,说明高矿化度水对胡杨生理的影响最明显(图 3)。总之,不同盐分处理咸水灌溉胡杨后,叶片内的叶绿素含量呈抛物线递减,Pro 和 MDA 含量则呈现抛物线递增趋势。

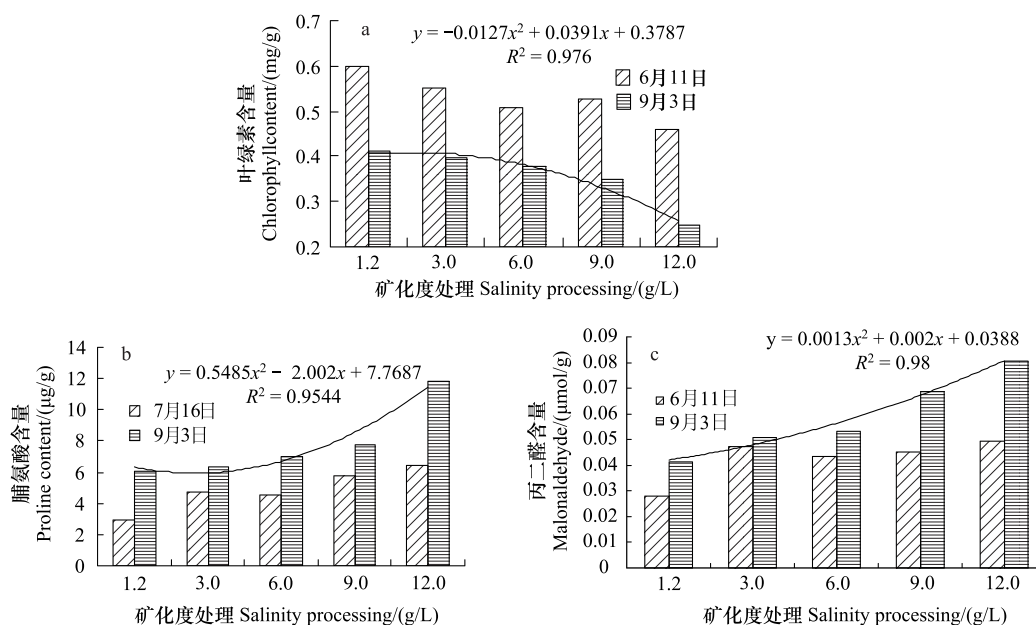


图 3 不同矿化度处理下胡杨叶片内叶绿素(a)、脯氨酸(b)、丙二醛(c)的含量变化

Fig. 3 The chlorophyll, Pro and MDA contents of *Populus euphratica* under different salinity treatments

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 咸水灌溉对沙土盐分的影响和灌水措施的探讨

咸水灌溉,土壤盐分控制是很关键的一个因素。咸水必要的补充灌溉对耐盐的荒漠植物短期内可缓解干旱现状,但是水分带来的同时,也带来了大量的盐分,沙土土质透水性较好,咸水滴灌能够创造有利于胡杨生长的水盐环境,较高的盐分大部分运移至 100 cm 以下土体,减轻了盐分对 3 年生幼龄胡杨盐分的胁迫,但是随着胡杨根系不断下扎较深,长期咸水灌溉使得 100—200 cm 土壤总盐分日积月累,深层累积的盐分超越胡杨的耐盐限值,这可能会导致胡杨根系不能正常吸水,一旦生理胁迫加剧危及胡杨的正常生长,就会导致胡杨

退化或死亡。所以咸水灌溉耐盐的荒漠植物也必须在关键时期少灌,而且灌水要考虑沙土通水性好的特点,设计灌水计划湿润层深度的时候要浅些,一般考虑 80—100 cm 范围较为合理,避免盐分累积效应的加大,如果长期灌溉咸水,最好能够在积盐较多的时候采取渠水中的淡水压盐调控。

此外,咸水灌溉使得土壤返盐能力很强,盐分表聚就会加剧,新疆多大风,这些咸水若长期灌溉沙土,将很快使土壤的 pH 值普遍达到 9.0 左右,会加速沙土的次生盐碱化。而且表层风沙土随风而起的盐土很容易产生二次盐害,并且王晓静等认为^[7]发现高矿化度咸水滴灌沙土后,沙土表层有盐结皮层现象,而且表层盐结皮中盐分的含量大于下层的盐分,这种盐结皮的厚度会随林地的生长而增厚,但到最后会稳定在一定厚度上。王晓静等还认为^[7]指出这种表层盐结皮中的盐分在季节突发的大雨淋洗下,会下移到植物根系层,严重后果可致使林地植物盐胁迫而死亡。这对于咸水灌溉沙土质是否能够持续,也是一个挑战。因此,咸水灌溉要得以持续利用,必须进行淡水压盐调控、土壤排盐和生物化学改良土壤,这些措施还要考虑比较低廉的成本。

3.1.2 咸水灌溉对胡杨生理生长的讨论

胡杨耐盐、耐旱、抗风沙,是沙漠造林、防风固沙的好树种。正是由于胡杨在恶劣环境中的抗逆本性,使得许多学者对胡杨的研究特别丰富。逆境胁迫下,对胡杨的水分生理、盐分生理生长的影响等都很大。胡杨作为耐盐碱造林植物的主要树种,王东健等认为胡杨耐盐性随生长阶段有所不同,土壤含盐量达 0.3% 时,幼苗成活率低且生长开始下降;土壤盐分达到 0.7% 便不能生根,耐盐的上限为 0.8%,但成林后,耐盐可增加到 2%^[15]。通过研究 1.2—12 g/L 的咸水灌溉胡杨,发现胡杨在 1—6 g/L 矿化度水的条件下,1a 内土壤盐分在 0.6 g/kg—1.0 g/kg,幼龄胡杨生长较好;在 9—12 g/L 咸水灌溉下,胡杨 1 年内根区土壤盐分达到 1.6 g/kg—2.0 g/kg 时,1 年龄胡杨生长几乎停止,叶尖部位有烧枯焦干现象。3 年龄胡杨生长在土壤含盐量达到 13.96 g/kg 抑制显著,叶片灰暗枯黄,但都没有死亡出现,表现出很强的耐盐性,说明胡杨灌溉咸水矿化度的耐盐上限在 12 g/L 之上,证实了胡杨有较强的耐盐能力。但是生育期内土体总盐随灌溉水矿化度升高而积盐加剧。谷瑞升等发现胡杨根尖有发达的表皮和外表皮,根毛着生近根端,不发达的叶片输导组织,细胞膜和细胞壁呈齿状结合稳定^[16]。这些结构特点都说明胡杨在高浓度的盐分环境下适应能力更强。胡杨是盐生植物,在盐分胁迫下,叶片内的叶绿素(chlorophyll)会减少、脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量逐渐累积增加,这些生理指标都是植物对逆境生理的响应。关于 Pro 累积对植物是一种危害还是能够提高植物逆境生存能力,目前学者还有不同的看法^[17-19]。但关于植物体内 Pro 积累能够增加抗逆能力的观点较多,Singh 早在 1972 年就指出 Pro 含量累积会使植物的抗旱性增强^[20],李德全^[21],舒薇^[22]分别对小麦和谷子 Pro 累积的研究也有相似的结论。此外,在干旱胁迫下,刘俄俄^[23]对水稻幼苗、李波等^[24]对苜蓿、陈亚鹏等^[25]对胡杨、张成军等^[26]对 4 种木本植物辽东栎、大叶白蜡、柔毛绣线菊和二色胡枝子幼苗、马剑英等^[27]对荒漠植物红砂、骆建霞等^[28]对柽柳(*Cotoneaster hymenocladus*)、众学者一致认为干旱逆境都将导致叶片内的 Pro 逐渐增加;在盐胁迫下,耐盐植物、烟草、菠菜、马铃薯、番茄、拟南芥、紫苜蓿、大豆、小麦、大麦和水稻等也出现大量 Pro 积累的现象^[23,29-33],本文盐分胁迫对胡杨叶片内 Pro 累积增加的结果与上面学者的结论相符。所以,遭受干旱和盐分胁迫植物叶片 Pro 增加是一种普遍的研究共识,脯氨酸具有渗透调节作用,在干旱和盐胁迫引起的生理干旱下,它能够降低渗透势,植物仍能够从土壤中吸收水分,同时它还使植物具有持水作用,因此可以作为检验逆境胁迫的一个典型生理指标,但是植物体内脯氨酸无限制增加能否使植物抗逆性更强,仍需要从多方面加以研究论证。此外,MDA 也是植物逆境生存能力的一个判断指标,研究表明:植物在低温^[34-35]、重金属铅^[36]、干旱缺水^[25,28,34]、高盐^[29,34,37-38]、土壤压实^[39]等不利环境胁迫下,其 MDA 含量都会增加。本研究在盐分胁迫下胡杨叶片内的 MDA 含量逐渐增加,这与以往的研究结论一致^[29,34,37-38]。所以在盐分胁迫逆境下,胡杨叶绿素、Pro、MDA 三种生理指标呈不同程度的波动变化,由于试验过程中盐胁迫没有造成幼龄胡杨的死亡,所以不能得出胡杨在盐分胁迫下 3 种生理指标的极限值,但是研究证实胡杨遭受盐分胁迫的程度可以用这 3 种指标来衡量。

3.2 结论

(1) 在 1.2—3 g/L 范围内,微咸水灌溉沙土处于脱盐状态,6—12 g/L 咸水灌溉使沙土积盐大增。在整个

生长周期内,微咸水和咸水灌溉,0—200 cm 内土体的总盐都呈累积趋势。

(2) 咸水灌溉胡杨,不同盐分处理的生长耗水关系可以用对数模型描述。

(3) 盐分胁迫下,胡杨叶片内叶绿素含量呈抛物线递减,Pro 和 MDA 含量则呈现抛物线递增趋势。

References:

- [1] Gong J D. Crop salt tolerances and its management of irrigation with saline water. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(2): 158-164.
- [2] LI S, He X L, Wang Z H, Pu S H, Yang G, Wang Z F. Effects of water salinity on soil salt and water movement under a point source drip irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(5): 79-81.
- [3] Wang Q J, Xu Y M, Wang J D, Wang Y P, Jiang Q H. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(4): 73-77.
- [4] Lei T W, Xiao J, Wang J P, Liu Z Z, Li G Y, Zhang J G, Mao J H. Experimental investigation into effects of drip irrigation with saline groundwater on water use efficiency and quality of honeydew melons in Hetao Region, Inner Mongolia. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(2): 80-84.
- [5] Pang H C, Yang J S, Yan H J. Effects of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 599-603.
- [6] Zhang Y L, Shao Y C. Soil safety of long term brackish water irrigation. *Urban Environment and Urban ecology*, 2004, 17(1): 22-24
- [7] Wang X J, Xu X W, Lei J Q, Li S Y, Xiang J P, Cheng H P. Spatiotemporal distribution of salt crust in a shelter-forest belt under drip-irrigation with salt water. *Arid Zone Research*, 2006, 23(3): 399-404.
- [8] Ma D H, Wang Q J, Lai J B. Field experimental studies on the effects of water quality and drip rate on soil salt distribution in drip irrigation under film. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(3): 42-46.
- [9] Huang Q, Li S X, Song Y D. The movement of water and salt in sandy land after irrigated with saline water. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 547-553.
- [10] Chen S F, He X L, Wang Z H, Li S, Jia W J. Research on Characteristics of the soil water and salt movement of *Haloxylon ammodendron* and *Tamarisk* under saline drip irrigation. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, (11): 61-65.
- [11] Wang Z H, He X L, Yang G. Sustainable strategies and status of development and utilization of unconventional water resources in the Manas River Basin. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, (8): 99-101.
- [12] Zhang Z A, Chen Z Y. *Experiment Technology of Plant Physiology*. Changchun: Jilin University Press, 2008.
- [13] Wang Q J, Wang W Y, Wang Z R, Zhang J F, Li Y. Determination of technique parameters for saline-alkali soil through drip irrigation under film. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(2): 47-50.
- [14] Li Y, Wang W Y, Wang Q J, Shao M A, Lai J B. Experimental study on water and salt transport characteristics under infiltration of non-sufficient trickle irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1): 16-19.
- [15] Wang D J, Yang Z M. Different growth stages of salt resistance. *Xinjiang Forestry*, 1998, (4): 9-10.
- [16] Gu R S, Jiang X N, Guo Z C. Structure characteristics associated with salt tolerance of *Populus euphratica*. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(6): 576-579.
- [17] Samuel D, Kumar T K, Ganesh G, Jayaraman G, Yang P W, Chang M M, Trivedi V D, Wang S L, Hwang K C, Chang D K, Yu C. Proline inhibits aggregation during protein refolding. *Protein Science*, 2000, 9(2): 344-352.
- [18] Lutts S, Majerus V, Kinet J M. NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa*) seedlings. *Physiologia Plantarum*, 1999, 105(3): 450-458.
- [19] de Lacerda C F, Cambraia J, Oliva M A, Ruiz H A, Prisco J T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(2): 107-120.
- [20] Singh T N, Aspinall F, Paley L G. Proline accumulation and varietal adaptability to drought resistance. *Nature New Biology*, 1972, 236(67): 188-190.
- [21] Li D Q, Guo Q F, Zou Q, Cheng B S, Zhang Y Q. Studies on physiological characteristics of drought resistance in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1993, 19(2): 125-132.
- [22] Shu W, Zheng P Y, Wang J W. Studies on the physiological adaptivity to drought resistance in common millet (*Setaria italica*) cultivars. *Journal of China Agricultural university*, 1992, 18(S1): 156-160.
- [23] Liu E E, Zong H, Guo Z F, Li Y C. Effects of drought, salt and chilling stresses on proline accumulation in shoot of rice seedlings. *Journal of Tropical and subtropical Botany*, 2000, 8(3): 235-238.

- [24] Li B, Jia X F, Bai Q W, Tang Y H. Effect of drought stress on proline accumulation of alfalfa. *Bulletin of Botanical Research*, 2003, 23(2): 189-191.
- [25] Chen Y P, Chen Y N, Li W H, Xue Y, Zhang H F. Analysis on the change of drought stress on proline of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River. *Arid Land Geography*, 2003, 26(4): 420-424.
- [26] Zhang C J, Xie H C, Guo J Q, Zhang W H. Effects of drought on proline content in seedlings of four woody species. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2005, 29(5): 33-36.
- [27] Ma J Y, Zhou B C, Xia D S, Zhang H W, Jiang X L. Relationships between environmental factors and chlorophyll, proline cumulation in desert plant *Reaumuria soongorica*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(4): 769-775.
- [28] Luo J X, Ma L, Chai C J, Wang D, Zong J Y, Lu X X, Hu Y Y, Zhang J H. Effect of Drought Stress on Growth and MDA and Proline of *Cotoneaster hjelmqvistii*. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2009, 15(1): 1-4.
- [29] Luo J X, Shentu Y J, Zhang J H, Zhang R Y, Shi Y S, Chai C J, Lu X X, Hu Y Y. Effects of salt stress on growth and content of malondialdehyde and proline of *Cotoneaster hjelmqvistii*. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2008, 15(4): 8-11.
- [30] Delauney A J, Verma D P S. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal*, 1993, 4(2): 215-223.
- [31] Stewart G R, Lee J A. The role of proline accumulation in halophytes. *Planta*, 1974, 120(3): 279-289.
- [32] McCue K F, Hanson A D. Drought and salt tolerance: towards understanding and application. *Trends in Biotechnology*, 1990, (8): 358-362.
- [33] Chen T X, Zhang J L, Lu N Wang S M. The characteristics of free proline distribution in various types of salt-resistant plants. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(1): 36-41.
- [34] Zhang Q, He J, Wang Z, He S J, Chen J H. The changes of the contents of malonaldehyde and soluble sugar under the various stress in *Aloe vera* L. var *Chinensis* (Haw.). *Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition*, 2009, 35(2): 290-292.
- [35] Lu X H, Sun G M, Ye C H. Changes of membrane permeability, malondialdehyde and chlorophyll content in pineapple seedlings under low temperature stress. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(16): 8374-8375, 8411-8411.
- [36] Li B, Li Z Y, Wu J Y, Wang X J. Effects of Pb stress on malondialdehyde content of seedlings leaves from 4 avenue trees species. *Hunan Forestry Science and Technology*, 2010, 37(2): 8-11.
- [37] Sun W Z, Han B, Hu X N, Hu T M. Malonyl dialdehyde changes of alfalfa under salt stress. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(5): 1905-1906, 1911-1911.
- [38] Zhang Y F, Yin B. Influences of salt and alkali mixed stresses on antioxidative activity and MDA content of *Medicago sativa* at seedling stage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(1): 46-50.
- [39] Liu S, Wu Y B. Effect of soil compaction on Proline and Malondialdehyde of trees. *Journal of Wuhan Bioengineering Institute*, 2010, 6(1): 23-26.

参考文献:

- [1] 龚家栋. 作物的耐盐性及盐水灌溉管理. *中国沙漠*, 1995, 15(2): 158-164.
- [2] 李莎, 何新林, 王振华, 蒲胜海, 杨广, 汪宗飞. 入渗水矿化度对点滴灌土壤水盐运移特征的影响. *灌溉排水学报*, 2009(5): 79-81.
- [3] 王全九, 徐益敏, 王金栋, 王永平, 蒋庆华. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用. *灌溉排水*, 2002, 21(4): 73-77.
- [4] 雷廷武, 肖娟, 王建平, 刘志忠, 李光永, 张建国, 冒建华. 地下咸水滴灌对内蒙古河套地区蜜瓜用水效率和产量品质影响的试验研究. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 80-84.
- [5] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 599-603.
- [6] 张余良, 邵玉翠. 长期灌溉微咸水的土壤安全性. *城市环境与城市生态*, 2004, 17(1): 22-24.
- [7] 王晓静, 徐新文, 雷加强, 李生宇, 相建民, 成和平. 咸水滴灌下林带的盐结皮时空分布规律. *干旱区研究*, 2006, 23(3): 399-404.
- [8] 马东豪, 王全九, 来剑斌. 膜下滴灌条件下灌水水质和流量对土壤盐分分布影响的田间试验研究. *农业工程学报*, 2005, 21(3): 42-46.
- [9] 黄强, 李生秀, 宋郁东. 咸水灌溉沙地后的水盐运移规律. *土壤学报*, 2003, 40(4): 547-553.
- [10] 陈书飞, 何新林, 汪宗飞, 李莎, 贾文俊. 咸水滴灌条件下梭梭和怪柳的土壤水盐运移特征. *中国农村水利水电*, 2010, (11): 61-65.
- [11] 王振华, 何新林, 杨广. 玛纳斯河流域非常规水资源开发利用现状及可持续对策. *中国农村水利水电*, 2010, (8): 99-101.
- [12] 张治安, 陈展宇. *植物生理学实验技术*. 长春: 吉林大学出版社, 2008.
- [13] 王全九, 王文焰, 汪志荣, 张建丰, 李毅. 盐碱地膜下滴灌技术参数的确定. *农业工程学报*, 2001, 17(2): 47-50.
- [14] 李毅, 王文焰, 王全九, 邵明安, 来剑斌. 非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 16-19.
- [15] 王东键, 杨振铭. 胡杨不同生长阶段的耐盐性. *新疆林业*, 1998, (4): 9-10.
- [16] 谷瑞升, 蒋湘宁, 郭仲琛. 胡杨细胞和组织结构与其耐盐性关系的研究. *植物学报*, 1999, 41(6): 576-579.
- [21] 李德全, 郭清福, 张以勤, 邹琦, 程炳嵩. 冬小麦抗旱生理特性的研究. *作物学报*, 1993, 19(2): 125-132.

- [22] 舒薇, 郑丕尧, 王经武. 谷子品种对于旱生理适应性的研究. 北京农业大学学报, 1992, 18 (增刊): 156-160.
- [23] 刘娥娥, 宗会, 郭振飞, 黎用朝. 干旱、盐和低温胁迫对水稻幼苗脯氨酸含量的影响. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(3): 235-238.
- [24] 李波, 贾秀峰, 白庆武, 唐宇红. 干旱胁迫对苜蓿脯氨酸累积的影响. 植物研究, 2003, 23(2): 189-191.
- [25] 陈亚鹏, 陈亚宁, 李卫红, 薛燕, 张宏锋. 干旱胁迫下的胡杨脯氨酸累积特点分析. 干旱区地理, 2003, 26(4): 420-424.
- [26] 张成军, 解恒才, 郭佳秋, 张文辉. 干旱对4种木本植物幼苗脯氨酸含量的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(5): 33-36.
- [27] 马剑英, 周邦才, 夏敦胜, 张慧文, 江小雷. 荒漠植物红砂叶绿素和脯氨酸累积与环境因子的相关分析. 西北植物学报, 2007, 27(4): 769-775.
- [28] 骆建霞, 马莉, 柴慈江, 王丹, 宗晶莹, 卢兴霞, 胡妍妍, 张津华. 干旱胁迫对海姆维斯蒂栒子生长及丙二醛和脯氨酸含量的影响. 天津农业科学, 2009, 15(1): 1-4.
- [29] 骆建霞, 申屠雅瑾, 张津华, 郑如意, 史燕山, 柴慈江, 卢兴霞, 胡妍妍. 盐胁迫对海姆维斯蒂栒子生长及丙二醛和脯氨酸含量的影响. 天津农学院学报, 2008, 15(4): 8-11.
- [33] 陈托兄, 张金林, 陆妮, 王锁民. 不同类型抗盐植物整株水平游离脯氨酸的分配. 草业学报, 2006, 15(1): 36-41.
- [34] 张倩, 何婧, 王桢, 胡淑静, 湛继红. 中华芦荟在不同胁迫下的丙二醛和可溶性糖含量的变化. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2009, 35(2): 290-292.
- [35] 陆新华, 孙光明, 叶春海. 低温胁迫对菠萝幼苗膜透性·丙二醛和叶绿素含量的影响. 安徽农业科学, 2010, 38(16): 8374-8375, 8411-8411.
- [36] 李斌, 李志辉, 吴际友, 王旭军. 铅胁迫对4种行道树种幼苗叶片丙二醛含量的影响. 湖南林业科技, 2010, 37(2): 8-11.
- [37] 孙伟泽, 韩博, 胡晓宁, 呼天明. 不同浓度盐胁迫下苜蓿丙二醛含量变化. 安徽农业科学, 2009, 37(5): 1905-1906, 1911-1911.
- [38] 张永峰, 殷波. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响. 草业学报, 2009, 18(1): 46-50.
- [39] 刘爽, 吴永波. 土壤压实对树木脯氨酸及丙二醛含量的影响. 武汉生物工程学院学报, 2010, 6(1): 23-26.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 11 June, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province	CAI Wenhua, YANG Jian, LIU Zhihua, et al (3303)
The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River	YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al (3313)
Consume of soil seeds of <i>Betula albo-sinensis</i> and <i>Abies faxoniana</i> in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China	MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3323)
Habitat associations of understory species spatial distribution in old growth broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) forest	DING Shengjian, ZHANG Chunyu, XIA Fucui, et al (3334)
Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant <i>Caragana</i> species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau	ZHANG Yuanyuan, MA Chengchang, HAN Lei, et al (3343)
Growth dynamics, biomass allocation and ecological adaptation in <i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	QUAN Dujuan, WEI Yan, ZHOU Xiaoqing, et al (3352)
A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series; a case study from Guizhou Province	SHI Hao, WANG Xiao, XUE Jianhui, et al (3359)
Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains	JIANG Lin, GENG Zengchao, LI Shanshan, et al (3368)
Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate	MA Shuqing, WANG Qi, LÜ Houquan, et al (3378)
Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (<i>narG/nosZ</i>) and N ₂ O emission in paddy soil	ZHENG Yan, HOU Haijun, QIN Hongling, et al (3386)
Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China	CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng (3394)
Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin	DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo (3404)
An assessment method of <i>Kandelia obovata</i> population biomass	JIN Chuan, WANG Jinwang, ZHENG Jian, et al (3414)
Quantitative characteristics and species composition of <i>Artemisia sphaerocephala</i> and <i>A. ordosica</i> communities in the Ulanbuh Desert ...	MA Quanlin, ZHENG Qingzhong, JIA Jujie, et al (3423)
Photosynthesis and transpiration in relation to ion accumulation in <i>Vitex trifolia</i> under varied light intensity	ZHANG Ping, LIU Linde, BAI Xinfu, et al (3432)
Diffusion of elm seed rain in Otindag Sand Land	GU Wei, YUE Yongjie, LI Gangtie, et al (3440)
Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of <i>Populus euphratica</i> Oliv.	HE Xinlin, CHEN Shufei, WANG Zhenhua, et al (3449)
Regulation of exogenous nitric oxide on photosynthetic physiological response of <i>Lolium perenne</i> seedlings under NaHCO ₃ Stress	LIU Jianxin, WANG Jincheng, WANG Xin, et al (3460)
Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir	DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al (3467)
Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security	GENG Jianmei, WANG Wenbin, WEN Cuiping, et al (3477)
Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province	CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, et al (3487)
The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitro- gen isotopes	LI Daohong, SU Xiaomei (3497)
Analysis of bacterial diversity in the Songhua River based on nested PCR and DGGE	TU Teng, LI Lei, MAO Guannan, et al (3505)

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China	HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HUANG Ling, et al (3516)
Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data	YIN Yan, ZHANG Yunlin, SHI Zhiqiang, et al (3528)
Viability and changes of physiological functions in the tiger frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) exposed to cold stress	WANG Na, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (3538)
Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields	ZHU Xiangyu, LI Zhiyi, CHANG Liang, et al (3546)
Morphological characteristics and microsatellite DNA genetic diversity of Nigeria African honey bee, Anhui <i>Apis mellifera</i> and theirs hybrid generation II	YU Linsheng, XIE Wenfei, WU Houchang, et al (3555)
Effects of social-demographic factors on the recreational service of park wetlands in Beijing	LI Fen, SUN Ranhao, CHEN Liding (3565)
Co-integration theory-based analysis on relationships between economic growth and eco-environmental changes: taking the south-east district in Chongqing city as an example	XIAO Qiang, HU Dan, XIAO Yang, et al (3577)
The cooperative environmental game model in the Tidal River Network Regions and its empirical research	LIU Honggang, CHEN Xingeng, PENG Xiaochun (3586)

Review and Monograph

Review of eco-efficiency accounting method and its applications	YIN Ke, WANG Rusong, ZHOU Chuanbin, et al (3595)
Overview on the 6th international symposium on modern ecology series of 2011	WEN Teng, XU Delin, XU Chi, et al (3606)

Discussion

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin	LIU Xingcai, XU Zongxue, ZHANG Shurong, et al (3613)
--	--

Scientific Note

Effects of different light intensities on activities of the primary defense proteins in needles of <i>Larix gmelinii</i>	LU Yifang, SHI Lei, YAN Shanchun (3621)
An analysis of photosynthetic parameters among <i>Schima superba</i> provenances	XIONG Caiyun, ZENG Wei, XIAO Fuming, et al (3628)
Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis	YANG Zhuoxiang, GAO Yang, ZHAO Zhiqiang, et al (3635)

《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 11 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 11 (June, 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