

干旱区引种竹柳(*Salix fragilis*)适宜的灌溉咸水矿化度研究

窦晓静<sup>1,2</sup>, 韩 炜<sup>1,2\*</sup>, 武胜利<sup>1,2,3</sup>, 房 靓<sup>1,2</sup>, 刘强吉<sup>1,2</sup>

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054;  
3. 新疆师范大学 国际合作与交流处, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘 要:**竹柳(*Salix fragilis*)具有较强的抗逆性,在干旱区新疆引种是较好的城市绿化举措。探明竹柳引种克拉玛依市过程中的光合特性变化规律,寻找适宜的灌溉咸水矿化度,可为干旱区竹柳及其他先锋植物的引种积累经验并提供理论依据。2014 年 6 月,在克拉玛依市乌尔禾区选定样地,设置了 3 个灌溉咸水矿化度:0.5 g·L<sup>-1</sup>和 10 g·L<sup>-1</sup>,沟灌嫁接竹柳(砧木为旱柳)2 年生健康幼株,次日,自 8:00 起至 20:00,间隔 2 h,用 Li-6400 便携式气体交换系统测定其成熟叶片的光合生理参数(净光合速率、蒸腾速率等)。结果表明:灌溉咸水矿化度处理 0.5 g·L<sup>-1</sup>和 10 g·L<sup>-1</sup>,竹柳的净光合速率( $P_n$ )差异极显著( $F=60.822, p=0.000<0.01$ );按照  $P_n$  对光合有效辐射的积分,竹柳的  $P_n$  积分值排序依次为 5 g·L<sup>-1</sup>(102.35)>0 g·L<sup>-1</sup>(84.87)>10 g·L<sup>-1</sup>(64.37);按照水分利用率(WUE)对光合有效辐射的积分值排序为:5 g·L<sup>-1</sup>(14.54)>0 g·L<sup>-1</sup>(12.01)>10 g·L<sup>-1</sup>(11.41);5 g·L<sup>-1</sup> 竹柳  $P_n$  积分值在 3 个处理中最大,WUE 积分值也最高。说明在新疆北部克拉玛依,春季(5—6 月)引种竹柳(2 年生嫁接苗)适宜的灌溉咸水矿化度是 5 g·L<sup>-1</sup>。

**关键词:**干旱区;引种竹柳;光合特性;咸水灌溉

中图分类号:S792.120.2      文献标志码:A      文章编号:1001-7461(2016)02-0154-06

Suitable Saline Water Irrigated on Introduced *Salix fragilis* in Arid Area of Northwest China

DOU Xiao-jing<sup>1,2</sup>, HAN Wei<sup>1,2\*</sup>, WU Sheng-li<sup>1,2,3</sup>, FANG Liang<sup>1,2</sup>, LIU Qiang-ji<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographic Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China;  
2. Key Laboratory of Arid Area of Lake Environment and Natural Resources of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830054, China;  
3. International Cooperation and Exchange Department of Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

**Abstract:** *Salix fragilis* is one of the tree species with strong anti-stress capability. To introduce it in arid area in Xinjiang is a good initiative for urban greening. In order to understand the adaptability and the characteristics of photosynthesis of the introduced species to local conditions in Karamay, where is rich in salty water, 2-year-old introduced plant seedlings were irrigated by salty water with different salt contents (0.5 g·L<sup>-1</sup> and 10 g·L<sup>-1</sup>), relative physiological parameters were measured on the next day after irrigation every two-hour from 8:00 to 20:00. The results showed that the order  $P_n$  value integrated from 1 to 7 of  $P_n$  was 5 g·L<sup>-1</sup>(102.35)>0 g·L<sup>-1</sup>(84.87)>10 g·L<sup>-1</sup>(64.37), and the order value of integrated WUE was 5 g·L<sup>-1</sup>(14.54)>0 g·L<sup>-1</sup>(12.01)>10 g·L<sup>-1</sup>(11.40), according to the regression equations in all the treatments, while the water use efficiency (WUE) was also the highest one(14.54). It was concluded that the optimal saline concentration of *S. fragilis* was 5 g·L<sup>-1</sup>.

收稿日期:2015-04-27    修回日期:2015-06-17

**基金项目:**国家自然科学基金-新疆联合基金重点项目子课题“博斯腾湖生态环境对区域气候变化的响应机制研究”(U1138302-2);新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室开放基金“博斯腾湖生态环境特征对区域气候变化的响应机制研究”(XJDX0909-2012-07);乌尔禾区竹柳引种技术及适应性研究,乌尔禾区大树容器苗技术研究联合资助;新疆师范大学地理学博士点支撑学科研究生开放基金项目(XJNU-DL-201310)。

**作者简介:**窦晓静,女,硕士研究生,研究方向:干旱区植物生理生态学。E-mail:douxiaojing0805@163.com

\* **通信作者:**韩 炜,男,博士后,研究方向:干旱区植物生理生态学。E-mail:hanweiaaa@163.com

**Key words:** arid area; introduced *Salix fragilis*; photosynthetic parameter; saline water irrigation

克拉玛依市是较为年轻的绿洲城市,地处新疆准噶尔盆地西北边缘。乌尔禾区是克拉玛依市的一个区,在其规划建设“乌尔禾生态旅游新城”的过程中,园林绿化建设就显得尤为重要。园林绿化树种的选择方式有 2 种:一种是利用本地的乡土树种,另一种就是引进区外的优良树种加以驯化而适应当地生态环境。竹柳是一种新型的柳树品种,具有耐寒<sup>[1]</sup>、耐旱<sup>[2-3]</sup>、耐水淹<sup>[4]</sup>、耐盐碱<sup>[5-8]</sup>等优点,是目前适宜于盐碱地种植的丰产速生林树种之一。乌尔禾区地下咸水分布广泛,灌溉中,为植物生长提供所需水分的同时也将盐分带入土壤,往往会造成土壤次生盐渍化,对植物的生长发育造成危害<sup>[9]</sup>。因此,探寻引种竹柳生长的适宜咸水矿化度,可以为干旱区城市绿化奠定基础。

植物对咸水灌溉的响应和适应性研究,已有部分文献。在新疆南部,韩炜<sup>[10]</sup>等从生理生态角度,研究不同咸水矿化度灌溉下红花罗布麻(*Apocynum venetum*)幼苗光合生理响应,结果表明,塔克拉玛干沙漠南缘红花罗布麻幼苗期宜采用  $5\sim 10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  矿化度的咸水灌溉。闫海龙<sup>[11]</sup>等研究地下水矿化度对塔克拉玛干沙漠沙拐枣(*Calligonum taklimakanensis*)气体交换特性的影响,得出沙拐枣在矿化度高达  $16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的环境中依然能正常存活生长。王鹏<sup>[12]</sup>等在阿克苏研究了不同矿化度( $<1.00\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 淡水,  $1.0\sim 3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水,  $3.0\sim 10.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水)对多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)幼苗光合特征及生长的影响,可知咸水矿化度为  $3.0\sim 10.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  条件下,多枝柽柳幼苗能够适应生境变化迅速生长。史军辉<sup>[13]</sup>等在巴州尉犁县,以 2 年生胡杨(*Populus euphratica*)幼苗为试验材料,进行盐胁迫( $0, 3, 6, 9, 12\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )处理,生理生化指标表明胡杨幼苗对盐分具有一定的适应性。在新疆北部,郭永昌<sup>[14]</sup>和汪宗飞<sup>[15]</sup>等在准噶尔南缘地区,同样以 2 年生柽柳为对象,测定 3 种矿化度( $1, 3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )微咸水灌溉后的光合特性,得出微咸水矿化度  $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 对柽柳有一定的促进作用。以上是西北干旱区植物对盐分的抗逆性研究,而竹柳作为引种新疆的树种,研究多集中在华东、华北等地区。邵志广<sup>[5]</sup>和郝姗姗<sup>[6]</sup>等均在华东地区,选取 1 年生竹柳扦插苗为对象,分别从光合、生理特性方面研究竹柳对不同浓度盐处理的响应,综合得出竹柳具有一定的耐盐性,有向滩涂引种的潜力。金婷<sup>[16]</sup>等进一步对竹柳幼株进行盐处理( $0\%$ 、 $0.3\%$ 、 $0.6\%$ 和  $0.9\%$ ),通过叶绿素荧光

参数和抗乳化酶活性的响应规律,得出浓度低于  $0.6\%$ (换算后约为  $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的 NaCl 有助于竹柳幼株的生长,而浓度高于  $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 则抑制生长。王文成<sup>[7]</sup>等在华北地区,采用砂基培养法,研究不同浓度 NaCl 胁迫对竹柳种苗形态及生理指标的影响,综合分析推断出竹柳的耐盐阈值是  $0.5\%$ (换算后约为  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),存活阈值是  $0.8\%$ (换算后约为  $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )。以上研究寻找植物的适宜灌溉咸水矿化度,但是并没有涉及到竹柳以及引种竹柳,尤其是新疆引种竹柳适宜灌溉咸水矿化度问题研究几乎不见文献。

通过春季野外控制试验,设置不同咸水灌溉处理,测定竹柳幼株光合特性对不同灌溉咸水矿化度的响应变化差异,比较光合参数,以此寻找乌尔禾区春季引种竹柳的适宜灌溉咸水矿化度,以期制定科学的咸水灌溉制度,为干旱区竹柳的引种及抚育提供操作性强的生产实践和科学根据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及处理

乌尔禾区( $85^{\circ}12'\sim 86^{\circ}02'\text{E}$ 、 $45^{\circ}42'\sim 46^{\circ}15'\text{N}$ )地处准噶尔盆地西部,位于克拉玛依市最北部。属温带大陆性干旱荒漠气候,年平均气温  $8.7^{\circ}\text{C}$ ,全年  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为  $3\,968.1^{\circ}\text{C}$ 。干旱少雨,年平均降水量  $102\text{ mm}$ 。年蒸发量  $3\,545.2\text{ mm}$ ,蒸降比高达  $27.6$ ,多年平均空气相对湿度  $48\%$ <sup>[17-18]</sup>。试验地点选择克拉玛依市乌尔禾区苗圃,土壤质地以砂质壤土为主,使用 HH2 型土壤湿度计测定土壤初始体积含水量为  $12(\pm 0.05)\%$ 。竹柳(砧木为旱柳)幼株于 2013 年 9 月 7 号在东北嫁接,2014 年 4 月 30 日引进种植,行距  $0.4\text{ m}$ ,株距  $0.2\text{ m}$ 。竹柳幼株生长前期需水量较大,至试验时间 6 月 8 日已漫灌 5 次。为了简单隔离防渗,消除边缘效应,随机选取 3 块样地,每块面积约  $9\text{ m}^2$ ,采取大面积灌溉方式,选定最中间面积约  $1\text{ m}^2$ 为试验样地。准噶尔盆地分布有较为丰富的咸水,矿化度多在  $1\sim 10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[19-20]</sup>,因此设定 3 个灌溉咸水矿化度: $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (S1)、 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (S2)和  $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (S3),灌溉所用咸水是根据井水化学组成成分(化学类型为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 型)<sup>[20]</sup>用 NaCl 进行现场配制。2014 年 6 月 8 日分区域沟灌不同矿化度咸水,6 月 9—12 日连续测定 4 d。

### 1.2 气体交换参数日变化测定

自然光照下,选择株高为  $50\text{ cm}$ 左右,地径与长势一致的 2 年生健康引种竹柳幼株,用 Li-6400XT

便携式气体交换系统(Li-COR,USA)测定,配 2 cm ×3 cm 标准透明叶室,每个处理选取 5 株生长良好的竹柳中部外围的成熟功能叶进行测定,自 8:00 起至 20:00,每隔 2 h 测定 1 次,每片叶测定 3 次,分析数据取算数平均值。

直接输出参数:净光合速率( $P_n, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ );气孔导度( $G_s, \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );蒸腾速率( $T_r, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )等光合生理参数。光合有效辐射( $PAR, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、温度( $T_a, ^\circ\text{C}$ )、大气  $\text{CO}_2$  浓度( $C_a, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、大气相对湿度( $RH, \%$ )等环境因子参数。计算参数:叶片水分利用效率( $WUE, \%$ ),水分利用效率( $WUE$ )=净光合速率( $P_n$ )/蒸腾速率( $T_r$ )。

1.3 数据处理

试验数据使用 Microsoft Excel 2007(Microsoft 公司,美国)进行预处理,Origin 8.0(OriginLab 公司,美国)制图,SPSS 17.0(IBM 公司,美国)进行单因素方差分析(One-way ANOVA),Mathematica 5.2(Wolfram Research Inc. 公司,美国)进行数值积分。

2 结果与分析

2.1 环境因子的日变化

2014 年 6 月 11 日,光合有效辐射( $PAR$ )与大气温度( $T_a$ )呈现早晚都处于较小值(图 1-A), $PAR$ 在 14:00 达到最大值  $1\,874.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , $T_a$ 在 16:00 达到最大值  $34.5^\circ\text{C}$ ,属于干热晴好天气。大气  $\text{CO}_2$  浓度( $C_a$ )清晨处于较大值,下降到 10:00 后至 18:00 时趋于平稳,后有所上升,大气相对湿度( $RH$ )大致呈正弦型变化(图 1-B)。

2.2 典型测定日选取

处理后次日开始测定,即 6 月 9 日、6 月 10 日、6 月 11 日和 6 月 12 日,灌溉咸水矿化度为  $0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S1)、 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S2)和  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S3)竹柳 12:00 时刻的净光合速率( $P_n$ ,图 2)。不同处理(S1、S2 和 S3)间竹柳的  $P_n$  平均值差异极显著( $F=28.312, p=0.000<0.01$ );而同一处理下,6 月 9 日、6 月 10 日、6 月 11 日和 6 月 12 日竹柳 12:00 时刻的  $P_n$  差异也是极显著( $F=70.556, p=0.000<0.01$ ),但是 6 月 11 日和 6 月 12 日 12:00 时刻的  $P_n$  差异不显著( $F=0.015, p=0.901>0.05$ )。

不同测定日不同处理间 12:00 时刻的  $P_n$  值比较结果如下:6 月 9 日与 6 月 10 日相比较,S1、S2 和 S3 分别增加了 110%、67.6%和 23.1%;6 月 10 日与 6 月 11 日比较,S1、S2 和 S3 分别增加了

—22.3%、20.7%和 7.9%,6 月 11 日与 6 月 12 日比较,S1、S2 和 S3 分别增加了一 1.9%、—2.5%和 3.3%。如上分析,处理后的第 2 天  $P_n$  值最大,从第 3 天  $P_n$  值开始下降,趋于平稳状态。因此,本试验选定 6 月 11 日作为典型测定日,探讨引种竹柳光合特性对不同咸水灌溉梯度的响应。

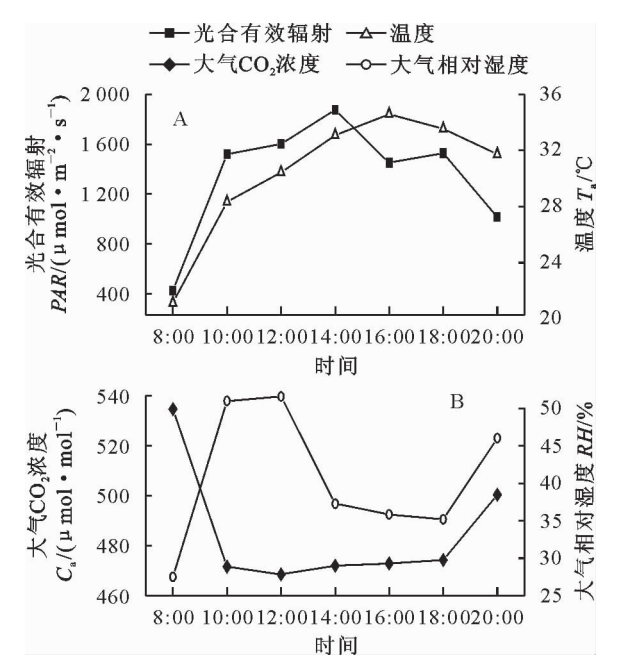
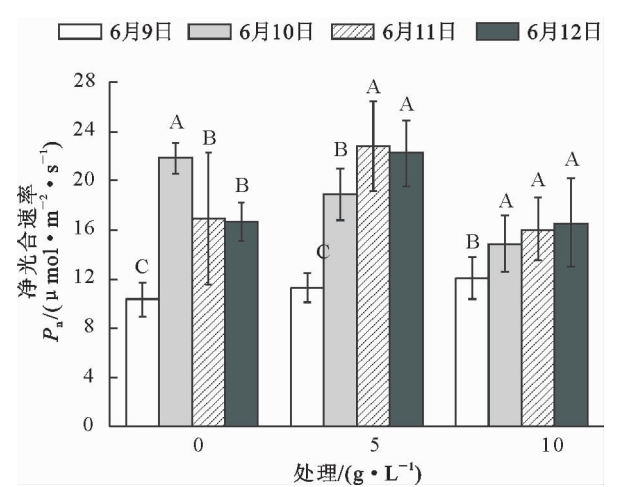


图 1 环境因子日变化

Fig. 1 Diurnal variations of environmental factors



注:不同字母表示差异极显著( $p=0.01$ )。

图 2 12:00 时刻不同矿化度咸水灌溉下竹柳净光合速率( $P_n$ )变化

Fig. 2 Variations of net photosynthetic rate( $P_n$ ) of *S. fragilis* in different saline water irrigation gradient at 12:00

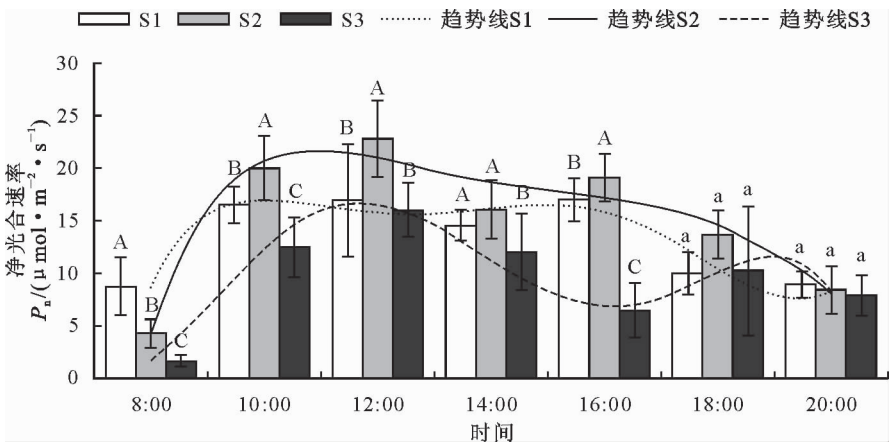
2.3 不同矿化度咸水灌溉下竹柳净光合速率( $P_n$ )日变化

单因素方差分析结果表明,8:00—20:00 时段,处理 S1、S2 和 S3 竹柳  $P_n$  的平均值差异极显著( $F=60.822, p=0.000<0.01$ ),说明存在极大  $P_n$

值,因此相应地存在最佳矿化度咸水。

如图 3 所示,强光时段 10:00—16:00,处理 S2 的  $P_n$  极显著高,可以初步得出,引种竹柳生长的适宜的咸水灌溉矿化度是  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (S2)。在 Excel 中对不同处理下竹柳的  $P_n$  添加多项式趋势线,从而形成各处理下的回归方程(图 3 中的表)。根据形成的回归方程,计算  $P_n$  对 PAR 从 1~7 定积分可得,

不同处理下竹柳的  $P_n$  积分值排序依次为  $102.35(5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1},\text{S2}) > 84.87(0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1},\text{S1}) > 64.37(10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1},\text{S3})$ 。说明灌溉咸水矿化度  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  对竹柳的光合速率有最好的促进作用,其次为  $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,也较为适合引种竹柳的生长,最差的是  $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由上可知, $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  是本研究最适宜的灌溉咸水矿化度。



咸水灌溉	回归方程	相关系数 $R^2$	积分值
$0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$y=0.110\ 8x^5-2.258\ 2x^4+17.294x^3-62.113x^2+104.08x-48.479$	0.929	84.87
$5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$y=0.045\ 4x^5-1.131\ 1x^4+10.703x^3-48.242x^2+101.96x-59.209$	0.944	102.35
$10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$y=-0.136\ 1x^5+2.587\ 4x^4-17.525x^3+49.521x^2-49.861x+17.087$	0.993	64.37

注:不同字母表示差异显著,大写字母表示差异极显著( $p=0.01$ ),小写字母表示性差异显著( $p=0.05$ )。变量  $y$  代表  $P_n$ , $x$  代表 PAR。

图 3 不同矿化度咸水灌溉下竹柳净光合速率( $P_n$ )日变化及回归方程

Fig. 3 Diurnal variations of net photosynthetic rate( $P_n$ ) and regression equations of *S. fragilis* in different saline water irrigation gradients

## 2.4 不同矿化度咸水灌溉下竹柳水分利用率(WUE)日变化

单因素方差分析结果表明,8:00—20:00 时段,处理 S1、S2 和 S3 竹柳水分利用效率(WUE)的平均值差异极显著( $F=6.110, p=0.003<0.05$ ),说明存在极大 WUE 值,因此相应地存在最佳矿化度咸水。

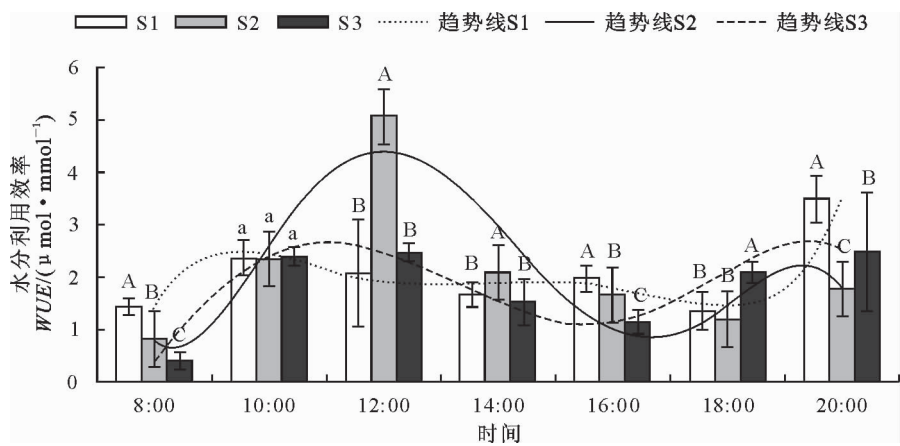
单因素方差分析的多重比较结果表明,S1、S2 和 S3 处理下 8:00—20:00 的 WUE 平均值差异极显著,则按照 WUE 回归方程对 PAR 从 1~7 的积分值也差异显著。在 Excel 中对不同处理下竹柳的 WUE 添加多项式趋势线,从而形成各处理下的回归方程(图 4 中的表)。根据形成的回归方程,计算 WUE 对 PAR 从 1~7 定积分可得,积分值排序依次为  $14.54(5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1},\text{S2}) > 12.01(0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1},\text{S1}) > 11.41(10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1},\text{S3})$ ,推定  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  应为本研究的目标灌溉咸水矿化度。

## 3 讨论

盐碱是干旱地区典型的生态环境特征,所以需要找到引种竹柳适宜的灌溉咸水矿化度,以此为基础才能在新疆后续寻找适宜的引种栽植区工作中有

的放矢。在植物、林木抗盐性研究中<sup>[21-22]</sup>,盐胁迫对其光合特性的影响是必不可少的内容,因此将净光合速率、水分利用率等值作为量化标准进行探究。结合图 3、图 4,处理 S2 同时具有较高的  $P_n$  值和 WUE 值,由此可知, $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  是本研究寻找的适宜引种竹柳的咸水矿化度。竹柳的  $P_n$  随着咸水灌溉矿化度从  $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  而增加,又随着咸水灌溉矿化度增加到  $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而显著下降。

本次试验找到了适宜引种竹柳生长的最适宜咸水矿化度为  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,研究结果与李菊艳<sup>[23]</sup>等探讨在新疆不同盐分梯度下胡杨幼株的光合特征有所相似,在适宜盐分浓度范围内(换算后的矿化度约为  $0-13\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),盐分对于胡杨幼苗的作用不显著,但是盐分浓度增加,则会造成抑制,这说明胡杨幼苗也存在着适宜的灌溉咸水矿化度。季琳琳<sup>[24]</sup>等在安徽合肥(亚热带湿润季风气候区)进行了 NaCl 胁迫对 2 种 1 年生柳树幼苗光合特征的影响研究。其结果表明,随着盐处理浓度( $0\%$ 、 $0.3\%$  和  $0.5\%$ ,换算后约为  $0.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )增加,竹柳净光合速率分别下降  $4.7\%$  和  $34.5\%$ ,这与本文研究结果不同,有可能是研究区域气候差异、土壤条件、栽培



咸水灌溉	回归方程	相关系数 $R^2$	积分值
$0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$y=0.0232x5-0.4528x4+3.3519x3-11.63x2+18.493x-8.3489$	0.968	12.01
$5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$y=-0.048x5+0.9692x4-7.1069x3+22.715x2-29.599x+13.842$	0.848	14.54
$10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$y=-0.014x5+0.2416x4-1.3597x3+2.4158x2+1.0895x-1.979$	0.999	11.41

注:不同字母表示差异显著,大写字母表示差异极显著( $p=0.01$ ),小写字母表示性差异显著( $p=0.05$ )。变量  $y$  代表  $WUE$ ,  $x$  代表  $PAR$ 。

图 4 不同矿化度咸水灌溉下竹柳水分利用效率(WUE)日变化及回归方程

Fig. 4 Diurnal variations of water use efficiency (WUE) and regression equations of *S. fragilis* in different saline water irrigation gradients

技术和测定时间不同等的影响。在金婷<sup>[16]</sup>等对竹柳幼株抗盐性的研究中发现,进行 NaCl 处理(0%、0.3%、0.6%和 0.9%,换算后的矿化度约为 0、3、6  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 9  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )后,NaCl 浓度低于 6  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 有助于竹柳幼株的生长,而浓度高于 6  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 产生抑制效应。此结果(6  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )与本研究得到的最适宜咸水矿化度(5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )相近。王文成<sup>[7]</sup>等采用砂基培养法,于 2011 年 6—8 月在河北,从形态指标和生理生化指标两个方面研究了不同 NaCl 浓度对 1 年生扦插竹柳苗的影响,发现盐浓度>0.5%(换算后约为 5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )时,竹柳叶片的生长受到抑制,这与本研究结果较为相似。以上文献得到与本研究相近的结果,但是所用的指标多为形态等宏观指标,而本研究采用直接表现植物光合特性的光合参数加以阐述,有更实时、更准确的优点。

根据以上结果,寻找的竹柳的适宜咸水矿化度为 5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,但是根据前人的研究结果,可能最佳的矿化度还要细化 0~10  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 间的梯度才可以进一步确认,但在克拉玛依市乌尔禾区的实际生产中,1~10  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水的分布较广<sup>[19-20]</sup>,且根据本研究可知,引种竹柳对 0~10  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 灌溉咸水均保持了相对较高的  $P_n$  值。因此,研究结果在实际生产中亦可推广。

4 结论

此次试验初步表明,5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉下竹柳的净光合速率( $P_n$ )积分值在 3 个咸水灌溉梯度中最大(102.35),水分利用效率(WUE)积分值也最高

(14.54),春季(5—6 月),克拉玛依市乌尔禾区引种竹柳的适宜灌溉咸水矿化度是 5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

参考文献:

[1] 张捷,杨淑梅,王玲. 低温胁迫下 2 个“竹柳”品系的抗寒性[J]. 林业科学,2013,49(9):158-164.  
ZHANG J, YANG S M, WANG L. Cold resistance of two “Zhuliu” varieties under low temperature stress[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(9): 158-164. (in Chinese)

[2] 潘昕,谢德新,邱权,等. 干旱胁迫对两种速生树种苗木生理指标的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(10):84-88.  
PAN X, XIE D X, QIU Q, et al. Effects of drought stress on seedlings physiological indexes of two fast-growing tree species [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(10): 84-88. (in Chinese)

[3] 邱权,潘昕,李吉跃,等. 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率[J]. 生态学报,2014,34(6):1401-1410.  
QIU Q, PAN X, LI J Y, et al. Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus surophylla* × *Eucalyptus grandis* and *bamboo-willow* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1401-1410. (in Chinese)

[4] 刘俊龙,吴中能,欧阳海言,等. 竹柳持续淹水后的生长状况及耐水性调查研究[J]. 安徽林业科技,2012,38(1):20-22.  
LIU J L, WU Z N, OUYANG H Y, et al. Research on the growth and flooding tolerance of American *Bamboo willow* after prolonged flooding[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2012, 38(1): 20-22. (in Chinese)

[5] 邵志广. NaCl 处理对竹柳苗光合特性的影响[J]. 安徽农业科学,2014,42(19):6139-6141.  
SHAO Z G. Effects of NaCl treatment on photosynthetic characteristics of *Bamboo willow* seedlings[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2014, 42(19): 6139-6141. (in Chinese)



[6] 郝姗姗,宰学明. NaCl 处理对竹柳苗根系活力及抗氧化酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(15): 6587-6588, 6670.  
HAO S S, ZAI X M. Effects of NaCl treatment on antioxidant enzyme activity and *Bamboo willow* seedling root vigor[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2013, 41(15): 6587-6588, 6670. (in Chinese)

[7] 王文成,郭艳超,李克晔,等. 盐胁迫对竹柳种苗形态及生理指标的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(S1): 143-146.  
WANG W C, GUO Y C, LI K Y, *et al.* Effects of NaCl stress on the morphological and physiological indexes of Zhuliu plants[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2011, 26(S1): 143-146. (in Chinese)

[8] 杨升,张华新,刘涛. 盐胁迫对 16 种幼苗渗透调节物质的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 269-277.  
YANG S, ZHANG H X, LIU T. Effect of salt stress on osmotic adjustment substances in plants[J]. Forest Research, 2012, 25(3): 269-277. (in Chinese)

[9] 喻方圆,徐锡增. 植物逆境生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 6-11.  
YU F Y, XU X Z. A review on plant stress physiology[J]. World Forestry Research, 2003, 16(5): 6-11. (in Chinese)

[10] 韩炜,曹玲,海米提·依米提,等. 咸水灌溉对沙漠中罗布麻适应性的调控[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 756-762.  
HAN W, CAO L, HAMID Y, *et al.* Adaption of *Apocynum venetum* to saline water irrigation [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 756-762. (in Chinese)

[11] 闫海龙,张希明,梁少民,等. 地下水埋深及水质对塔克拉玛干沙拐枣气体交换特性的影响[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1146-1152.  
YAN H L, ZHANG X M, LIANG S M, *et al.* Effect of groundwater depth and quality on gas exchange characteristics of *Calligonum taklimakanensis* [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5): 1146-1152. (in Chinese)

[12] 王鹏,赵成义,李君. 地下水埋深及矿化度对多枝柽柳幼苗光合特征及生长的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 84-89.  
WANG P, ZHAO C Y, LI J. Effects of groundwater depth and mineralization degree on phand growth of *Tamarix ramosissima* seedlings[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 84-89. (in Chinese)

[13] 史军辉,王新英,刘茂秀,等. NaCl 胁迫对胡杨幼苗叶主要渗透调节物质的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6): 6-11.  
SHI J H, WANG X Y, LIU M X, *et al.* Effect of NaCl stress on main osmotic adjustment substances in the seedling leaves of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(6): 6-11. (in Chinese)

[14] 郭永昌. 不同矿化度微咸水灌溉条件下柽柳的耗水规律试验研究[J]. 节水灌溉, 2012(7): 14-17.  
GUO Y C. Experimental study on water consumption rule of *Tamarxi ramossisima* under brackish water irrigation with different mineralization degree[J]. Water Saving Irrigation, 2012(7): 14-17. (in Chinese)

[15] 汪宗飞,何新林,张明. 幼年期柽柳对不同矿化度微咸水灌溉响应的初步研究[J]. 节水灌溉, 2011(1): 6-9.  
WANG Z F, HE X L, ZHANG M. Priliminary study on respond of *Tamarxi ramossisima* in young period to irrigation with different salinity slightly saline water[J]. Water Aving Irrigation, 2011(1): 6-9. (in Chinese)

[16] 金婷,郝振萍,游佳,等. 竹柳苗耐盐性生理指标研究[J]. 中国园艺文摘, 2014(5): 26-28.

[17] 潘峰,田长彦,邵峰,等. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1497-1507.  
PAN F, TIAN C Y, SHAO F, *et al.* Evaluation of ecological sensitivity in Karamay, Xinjiang, Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1497-1507. (in Chinese)

[18] 潘英. 基于土地利用变化的生态系统服务价值评估[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学, 2012.

[19] 何新林,陈书飞,王振华,等. 咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响[J]. 生态学报, 2012(11): 3449-3459.  
HE X L, CHEN S F, WANG Z H, *et al.* Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of *Populus euphratica* oliv. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3449-3459. (in Chinese)

[20] 张全庆,张新科,任满船. 准噶尔盆地乌尔禾地区铀成矿水文地质条件分析[J]. 世界核地质科学, 2009, 26(2): 76-80.  
ZHANG Q Q, ZHANG X K, REN M C. Analysis on hydrological condition for uranium ore formation in Wuerhe district, Junggar Basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2009, 26(2): 76-80. (in Chinese)

[21] 杨升,张华新,张丽. 植物耐盐生理生化指标及耐盐植物筛选综述[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 59-65.  
YANG S, ZHANG H X, ZHANG L. Physiological and biochemical indices of salt tolerance and scanning of salt-tolerance plants; a review[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3): 59-65. (in Chinese)

[22] 教忠意,王保松,施士争,等. 林木抗盐性研究进展[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(5): 60-64, 73.  
JIAO Z Y, WANG B S, SHI S Z, *et al.* Advances in salt resistance of trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(5): 60-64, 73. (in Chinese)

[23] 李菊艳,赵成义,闫映宇,等. 不同盐分梯度下胡杨幼苗的光合-光响应特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 728-733.  
LI J Y, ZHAO C Y, YAN Y Y, *et al.* Response of the *Populus euphratica* seedlings to photosynthetic-light under salt stress [J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4): 728-733. (in Chinese)

[24] 季琳琳,吴中能,刘俊龙,等. NaCl 胁迫对 2 种柳树幼苗光合特征的影响[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(1): 50-54.  
JI L L, WU Z N, LIU J L, *et al.* Effect of salt stress on phoyosynthetic characteristics of two *Willow* species at seedling stage[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2013, 36(1): 50-54. (in Chinese)