

地下水矿化度对黄河三角洲柽柳光合 及耗水特征的影响

赵自国^{1,2}, 赵凤娟^{1,2}, 夏江宝², 王月海³

(1. 滨州学院山东省黄河三角洲野生植物资源开发利用工程技术研究中心, 滨州 256603; 2. 滨州学院
山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603; 3. 山东省林业科学研究院, 济南 250014)

摘要: 为了解黄河三角洲地下水浅埋区柽柳 (*Tamarix chinensis* Lour.) 对地下水矿化度的适应特征, 运用叶片气体交换和树干液流技术, 测定了地下水埋深为 0.9 m 时淡水、微咸水 ($3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、咸水 ($8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 和盐水 ($20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 四种矿化度下柽柳的光合作用和水分利用等参数。结果表明: 随地下水矿化度升高: (1) 土壤水、盐含量和土壤溶液绝对浓度均逐渐升高。(2) 叶片最大净光合速率和光饱和点在咸水下最高; 表观量子效率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度、树干液流速率等在微咸水下最高; 以上指标均在盐水矿化度下最低。水分利用效率和气孔限制值在微咸水下最低, 盐水下最高。在地下水埋深 0.9 m 时, 咸水矿化度下柽柳光合效率高, 光照生态幅宽, 水分利用效率高, 适于柽柳幼苗的生长。

关键词: 地下水矿化度; 光合作用; 水分利用效率; 蒸腾作用; 树干液流; 柽柳

黄河三角洲生物多样性丰富, 具有重要的生态功能和科学研究价值。但随着黄河三角洲地区人类生产和经济活动加剧, 加上气候干旱、土壤次生盐渍化严重等问题, 导致该区出现森林植被稀少, 植被退化严重及水土流失加剧等现象, 生态系统较为脆弱。柽柳 (*Tamarix chinensis* Lour.) 是黄河三角洲盐碱地的建群种, 也是泥质海岸水土保持防护林建设优先选用的主要树种, 具有较强的降盐改土、防风固沙和保持水土等功能。水分和盐分是影响柽柳林生长、退化严重及低质低效的主要因素^[1]; 浅层地下水是黄河三角洲盐渍化湿地生境柽柳生长的主要水源^[2-3], 而地下水埋深及矿化度的不同是导致土壤贮水量和盐分差异的主要因素^[4-5], 进而影响柽柳的生长。

随着植物生理生态测试技术的快速发展, 叶片气体交换、蒸腾耗水测试及尺度提升技术能够诊断植物光合机构运转状况及水分生理生态过程对逆境胁迫的响应规律^[6-8]。目前, 关于地下水与植物生理生态过程关系的研究已经取得了大量的成果, 包括不同地下水条件下植物的水势变化^[9]、水分利用^[10]、光合生理生态过程^[5, 11-14]等。闫海龙等研究发现, 沙拐枣的适宜地下水埋深范围是 1.5~2.5 m^[5]。陈亚鹏等^[12]研究发现, 随地下水埋深从 4.91 m 增加到 6.93 m, 胡杨遭受的干旱胁迫程度升高, 光合速率下降。张佩等研究发现, 不同的地下水埋深 (1~7 m) 下, 多枝柽柳的光合作用效率差异不显著, 但随着地下水埋深增加, 气孔导度和蒸腾速率下降, 水分利用效率升高^[13]。王鹏等^[14]研究发现,

收稿日期: 2019-02-26; 修订日期: 2019-06-22

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2014CL032); 国家自然科学基金项目 (31370702); 山东省重点研发计划项目 (2017GSF17104); 山东省农业科技资金项目 (2019LY006); 泰山学者工程专项

作者简介: 赵自国 (1977-), 男, 河南民权人, 博士, 讲师, 研究方向为植物逆境生理生态。

E-mail: heiseguoguo@163.com

通讯作者: 夏江宝 (1978-), 男, 山东潍坊人, 博士, 教授, 研究方向为植被恢复与生态重建。

E-mail: xiajb@163.com

在地下水埋深0.2 m时,多枝柽柳在咸水矿化度($3\sim 10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)下的光合能力高于微咸水($1\sim 3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和淡水。柽柳可以通过调节体内渗透调节剂和保护酶的含量来适应地下水埋深增加导致的干旱胁迫^[15]。

在黄河三角洲地区,柽柳灌丛呈聚集型分布,土壤含盐量、地下水埋深等是影响其分布的主要因素^[16]。盐水矿化度下,地下水埋深0.9 m时,柽柳的光合效率最高^[17]。地下水矿化度显著影响土壤含盐量,栽植柽柳可以降低土壤含盐量,改良土壤^[18]。Xia等^[19]研究发现,在地下水埋深1.5 m时,柽柳在微咸水矿化度($3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)下的光合作用效率高于淡水和盐水($20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)。黄河三角洲地区地下水埋深较浅,其中滨海地带普遍小于1.0 m,丰水期平均为0.9 m^[3],在该地下水埋深条件下,适宜柽柳生长的地下水矿化度条件尚不清楚,限制了黄河三角洲滨海地区柽柳栽植管理和植被恢复。因此,本文在地下水埋深0.9 m条件下,模拟设置淡水、微咸水、咸水和盐水等四个地下水矿化度,测定柽柳叶片气体交换参数的光响应和柽柳茎干液流参数,探讨柽柳光合作用及树干液流对地下水矿化度的响应规律,明确柽柳维持较好光合生理活性的地下水矿化度,研究柽柳光合生理参数和水分利用策略对地下水矿化度的响应规律,以期为黄河三角洲盐碱类湿地植被修复柽柳的栽培管理提供理论依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 试验材料

本试验在滨州学院黄河三角洲生态中心科研温室进行。试验材料为3年生柽柳实生苗,栽植时树干截至高度0.5 m。试验用土壤取自黄河下游河滩,自然风干、粉碎、过2 mm筛后混匀,其初始pH值7.54,含盐量0.1%。不同矿化度的地下水用自来水和海盐配制。

1.2 试验设计

模拟设置地下水埋深0.9 m,具体实施办法如下:柽柳栽植于内径0.3 m、高1.48 m的PVC管中,在PVC管内装土至高1.45 m,顶端留3 cm的空间;PVC管置于上口内径0.47 m、底部内径0.57 m、高0.7 m的水桶中,水桶内装0.55 m深的模拟地下水;水桶埋于土中,以保持模拟地下水温度的均一性。在PVC管壁四周打孔,从0.55 m高度处(模拟地下水水面高度)开始向下每0.1 m打4个直径1 cm的孔(均匀分布在PVC管壁四周同一高度处),PVC管底部及外围打孔处用透水布封住,防止泥土外漏。根据设置的土壤取样深度,在PVC管壁0.55 m高度以上打孔(孔径2 cm)作为土壤取样口,平时用塞子封口。

试验设置4个不同的地下水矿化度:A为淡水,含盐量0;B为微咸水,含盐量 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;C为咸水,含盐量 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;D为盐水,含盐量 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。每个矿化度处理设置3个重复。

试验开始阶段,每个PVC管种植3株柽柳幼苗,并从土壤表面浇灌淡水(4 L/次×3次)。40天后,每个PVC管内随机留下1株成活幼苗,开始进行不同矿化度的地下水模拟处理,并且不再从土壤表面浇水。为保持地下水水位及矿化度的稳定,整个试验期间对模拟用地下水的盐度及水位每3天检测一次,并对水和盐做相应的补给。不同地下水矿化度处理90天后,测定土壤水盐含量、柽柳光合生理参数和树干液流特征。

1.3 土壤水盐特征的测定

土壤样品取自模拟土柱深度0.1~0.6 m处,这是柽柳根系分布的主要深度范围。土壤含水量的测定采用烘干法;土壤含盐量的测定采用质量法;土壤溶液绝对浓度为土壤含盐量和土壤质量含水量的比值。

1.4 光合作用参数的测定

在晴朗天气的上午8:30~11:30,利用Li-6400 XT便携式光合仪(Li-COR Inc., Lincoln, NE, USA)测定柽柳光合作用光响应过程,光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)梯度设置为 $1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、0。光合仪能够记录净光合速率(Net Photosynthetic Rate, P_n)、胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 Concentration, C_i)、气孔导度(Stomatal Conductance, G_s)、蒸腾速率(Transpiration Rate, T_r)等参数。每株柽柳测定三个叶片,求平均值。对不同处理的柽柳光合参数采用交替法测定,以避免系统误差,提高数据的可比性,共测定7天。由于柽柳叶片形状不规则,对测定的叶片进行拍照,利用软件Image J 1.46r(Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA)测算实际测定的叶面积,并对光合作用参数进行校正。水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)为 P_n 与 T_r 的比值^[20];气孔限制值(Stomatal Limitation, L_s)用公式 $L_s=1-C_i/C_a$ 计算^[21],其中 C_a 为样品室 CO_2 浓度。

1.5 树干液流测定

利用热平衡包裹式茎流计(Flow 32, Dynamax, USA)对不同地下水矿化度处理的柽柳树干液流进行连续监测7天,用茎流计自带的数采器(Delta-T Logger, Cambridge, UK)进行数据采集,采集时间间隔为30 min。

1.6 数据处理

运用直角双曲线修正模型^[22]对光合作用光响应过程进行拟合,公式为:

$$P_n(I) = \alpha \times \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} \times (I - I_c) \quad (1)$$

式中: $P_n(I)$ 为净光合速率(P_n); I 是光合有效辐射(PAR); I_c 为光补偿点(Light Compensation Point, LCP); α 、 β 、 γ 是独立于 I 的系数。根据该公式拟合结果可以求解LCP、光饱和点(Light Saturation Point, LSP)、最大净光合速率(maximum Net Photosynthetic Rate, $P_{n\max}$)、暗呼吸速率(Dark Respiration Rate, R_d)等。表观量子效率(Apparent Quantum Yield, AQY)通过对 $\text{PAR} < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的 P_n -PAR进行直线回归得到。

利用统计分析软件PASW statistics 18.0.0(IBM, 美国)对不同矿化度处理下的参数进行单因素方差分析($P=0.05$)和多重比较(Duncan's multiple range test);用Excel 2010(Microsoft, 美国)进行作图。

2 结果分析

2.1 栽植柽柳土柱的土壤水盐特征

在0.9 m地下水埋深条件下,随地下水矿化度升高,土壤含水量、含盐量和土壤溶液绝对浓度均有逐渐增加的趋势(表1)。微咸水、咸水和盐水矿化度下土壤含盐量分别是淡水条件下的1.74倍、3.72倍和6.98倍。与淡水地下水相比,咸水和盐水矿化度下土

表1 不同地下水矿化度下土壤水盐参数
Table 1 Soil water and salt parameters under different groundwater mineralization (%)

地下水矿化度	土壤含盐量	土壤含水量	土壤溶液绝对浓度
淡水	0.08±0.02 ^a	18.25±0.92 ^a	0.46±0.11 ^a
微咸水	0.14±0.01 ^b	19.15±0.94 ^{ab}	0.76±0.09 ^a
咸水	0.31±0.02 ^c	20.90±0.95 ^{bc}	1.48±0.14 ^b
盐水	0.58±0.04 ^d	21.12±1.22 ^c	2.75±0.34 ^c

注：表中数据为平均值±标准误，n=3，同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05），下同。

壤含水量分别增加了14.5%和15.8%，土壤溶液绝对浓度分别增加了2.24倍和5.04倍。地下水矿化度显著影响了土壤的水盐特征（P<0.05）。

2.2 柽柳光合作用的光响应过程

根据柽柳叶片在四种地下水矿化度条件下的光合作用光响应曲线（图1）可以看出，在不同地下水矿化度条件下，随着光合有效辐射的增加，柽柳叶片的净光合速率均先快速升高（低光强），随后增速变缓；当达到一定的光合有效辐射强度后，柽柳叶片净光合速率达到一个最高值不再增加，甚至逐渐下降，这表明柽柳幼苗光合作用存在光饱和现象。在淡水、微咸水、咸水矿化度下，柽柳净光合速率快速升高的低光强范围为0~400 μmol·m⁻²·s⁻¹，而盐水矿化度下为0~200 μmol·m⁻²·s⁻¹。随地下水矿化度的升高，柽柳叶片净光合速率整体表现为先升高后降低，其中在咸水和盐水矿化度条件下，分别达最高和最低水平。柽柳叶片净光合速率光响应均值在咸水矿化度条件下最高（19.30 μmol·m⁻²·s⁻¹），淡水、微咸水和盐水矿化度条件下，柽柳叶片净光合速率光响应均值分别是咸水条件下的77.5%、88.7%和40.4%。可见适当的地下水矿化度可以提高柽柳的光合作用水平，而过高的含盐量则会导致盐胁迫，抑制柽柳的生长。

地下水矿化度对柽柳光合光响应参数有显著影响（表2）。随着地下水矿化度的升高，柽柳叶片P_{max}、AQY均先升高后降低。P_{max}最大值出现在咸水矿化度条件下（32.11 μmol·m⁻²·s⁻¹），其后依次是微咸水和淡水，最小值出现于盐水矿化度；淡水、微咸水和咸水矿化度下的P_{max}分别是盐水矿化度下的1.99倍、2.51倍和2.81倍。AQY在微咸水矿化度条件下最高，盐水矿化度下最低，在淡水和咸水矿化度下差异不显著（P>0.05），淡水、微咸水和咸水矿化度下的AQY分别是盐水矿化度下的1.41倍、1.68倍和1.44倍。结果表明，过高的地下水矿化度（盐水）不但降低了柽柳对弱光的利用能力，而且严重抑制了其在高光强下的光合作用潜能。与淡水和盐水矿化度相比，微咸水和咸水矿化度下柽柳的LSP更高，LCP更低，光照生态幅更宽。微咸水和咸水矿化度下柽柳的R_d显著低于淡水和盐水矿化度（P<0.05）。

2.3 柽柳叶片的气孔导度、胞间二氧化碳浓度和气孔限制值的光响应

在不同的地下水矿化度条件下，柽柳叶片G_s的光响应过程有显著差异（P<0.05）

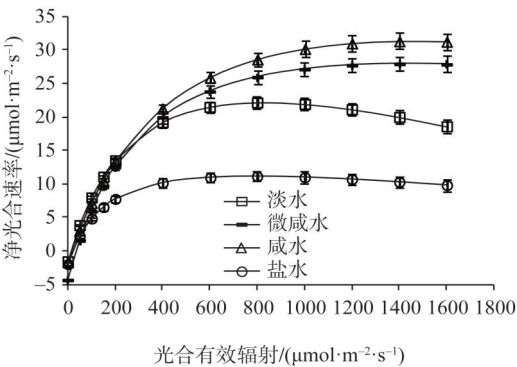


图1 不同地下水矿化度下柽柳叶片光合光响应
Fig. 1 Light response of net photosynthetic rate in leaves of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

表2 不同地下水矿化度下柽柳叶片光合作用参数

Table 2 Photosynthetic parameters of <i>Tamarix chinensis</i> leaves under different groundwater salinities					
矿化度	最大净光合速率 $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光饱和点 $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光补偿点 $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	表观量子效率 $/(\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	暗呼吸速率 $/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
淡水	22.17 ± 1.07^c	832 ± 22^a	35.9 ± 1.4^d	0.0817 ± 0.003^b	4.37 ± 0.18^c
微咸水	27.92 ± 1.20^b	1439 ± 47^b	13.1 ± 0.6^a	0.0972 ± 0.0038^c	1.58 ± 0.13^a
咸水	31.30 ± 1.35^a	1462 ± 49^b	16.7 ± 0.7^b	0.0832 ± 0.0027^b	1.71 ± 0.12^a
盐水	11.14 ± 0.84^d	792 ± 26^a	20.5 ± 0.9^c	0.0579 ± 0.0024^a	2.00 ± 0.15^b

(图2)。在较低矿化度下(淡水、微咸水、咸水),柽柳叶片 G_s 在弱光($PAR\leq 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)下,随 PAR 增强而迅速升高;当 $PAR\geq 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, G_s 随 PAR 的升高趋于平稳。在盐水矿化度下, G_s 在试验 PAR 范围内($0\sim 1600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)对 PAR 的变化均不敏感,始终保持较低水平 $[0.073\sim 0.133\ \text{mol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$,表明在较高的矿化度下,柽柳气孔开放程度低,开闭调节能力弱。在气孔导度相对稳定的 PAR 范围内($PAR>400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),地下水矿化度对 G_s 均值的影响显著($P<0.05$), G_s 均值在微咸水矿化度下最高,其后依次是咸水和淡水,盐水矿化度下最低,说明较低的地下水矿化度有利于气孔的开放。

在四种地下水矿化度下,随 PAR 增加, C_i 逐渐降低,而 L_s 逐渐升高;当 $PAR>400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,这种变化的幅度变小,趋于平稳(图3、图4)。在 $PAR>400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, C_i 的光响应均值随地下水矿化度的升高先升高后降低,在微咸水矿化度下最高,其后依次是咸水和淡水,盐水矿化度下最低,这与 G_s 的变化规律一致;而 L_s 的光响应均值则随着地下水矿化度的升高先降低后升高,在盐水矿化度下最高,其后依次是淡水和咸水,微咸水下最低,变化规律与 C_i 和 G_s 相反。

2.4 柽柳叶片蒸腾速率的光响应

不同地下水矿化度条件下,柽柳叶片 T_r 光响应过程具有明显差异(图5)。随 PAR 增加,在微咸水和咸水矿化度下, T_r 先快速升高($PAR\leq 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),随后($PAR> 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)缓慢上升;在淡水处理下, T_r 先快速升高($PAR<200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),

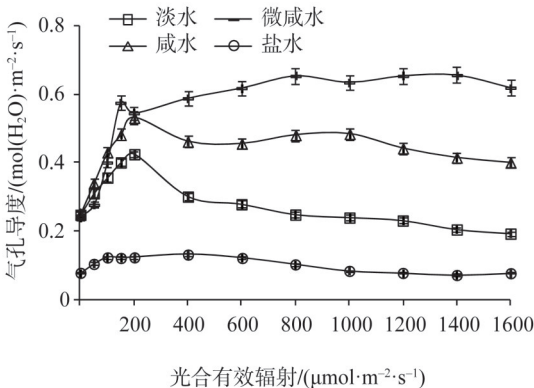


图2 不同地下水矿化度下柽柳叶片气孔导度光响应
Fig. 2 Light response of stomatal conductance in leaves of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

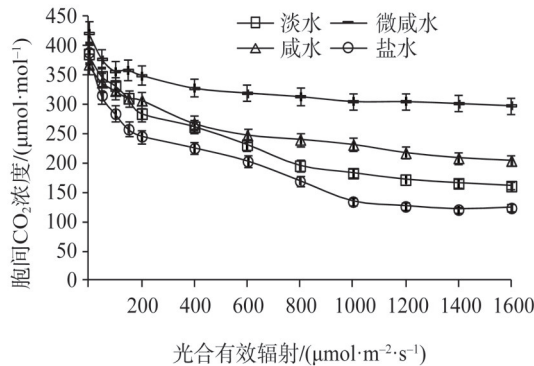


图3 不同地下水矿化度条件下柽柳叶片
胞间CO₂浓度光响应
Fig. 3 Light response of intercellular CO₂ concentration in leaves of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

随后趋于平稳,当光照强度大于饱和光强(约 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)时 T_r 逐渐降低;在盐水矿化度下, T_r 对 PAR 变化不敏感,一直保持在较低的水平 $[1.38\sim 2.33\ \text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ 。 T_r 光响应极值($T_{r\max}$)在微咸水矿化度下最高 $8.06\ \text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其后依次是咸水和淡水,盐水矿化度下 $T_{r\max}$ 最低;淡水、微咸水和咸水矿化度下桤柳叶片 $T_{r\max}$ 分别是盐水矿化度下的2.30倍、3.45倍和3.04倍。 T_r 光响应均值在微咸水 $[6.03\ \text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ 和咸水 $[5.87\ \text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ 矿化度下差异不显著($P>0.05$),但显著高于淡水处理,盐水矿化度下的 T_r 光响应均值最低。结果表明,在较低的地下水矿化度条件下(微咸水、咸水矿化度),桤柳叶片的蒸腾作用水平较高,而过高的地下水矿化度会抑制蒸腾作用。

2.5 桤柳叶片水分利用效率的光响应

不同地下水矿化度下桤柳叶片 WUE 的光响应过程相似(图6)。在 $PAR<400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内, WUE 随 PAR 增加而快速升高,对 PAR 比较敏感;当 $PAR>400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,随着 PAR 的继续增加, WUE 变化比较平缓,仅在盐水矿化度下当 PAR 超过 $1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有明显的下降趋势。 WUE 光响应极值(WUE_{\max})在盐水矿化度下最高,为 $6.52\ \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})^{-1}$,淡水、微咸水和咸水矿化度下的 WUE_{\max} 比盐水矿化度下分别低33.9%、40.6%和28.8%。 WUE 的光响应均值在盐水矿化度下最高,其次是淡水和咸水,微咸水矿化度下最低,淡水、微咸水和咸水矿化度下的 WUE 光响应均值比盐水矿化度下分别低22.7%、38.7%和23.9%。盐水矿化度下,桤柳 P_n 、 G_s 、 T_r 最低, WUE 最高,气孔开放程度低,降低了蒸腾耗水。在较高的地下水矿化度条件下,桤柳可以通过提高叶片的 WUE ,来适应盐胁迫环境。

2.6 桤柳树干液流特征

在四种地下水矿化度下,桤柳液流速率均表现出白天高、晚上低的特点(图7)。在淡水、微咸水和咸水矿化度下,液流速率从上午6:30开始快速上升,下午15:30之后下降至较低水平;而盐水矿化度下,液流速率从上午8:30才开始快速上升,中午12:30~13:30有“午休”现象,液流速率日变化呈“双峰”曲线。不同矿化度下桤柳液流速率最大值在微咸水处理下最高($65.88\ \text{g h}^{-1}$),其后依次是咸水和淡水,盐水矿化度下最低($20.77\ \text{g h}^{-1}$)。

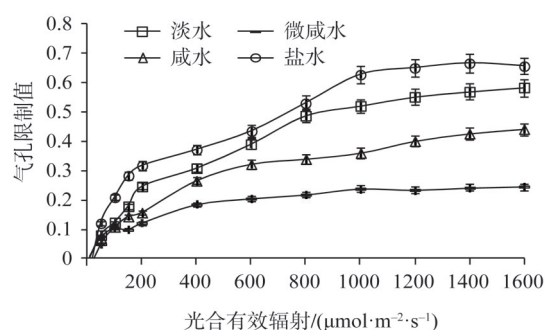


图4 不同地下水矿化度下桤柳叶片气孔限制值光响应

Fig. 4 Light response of stomatal limitation in leaves of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

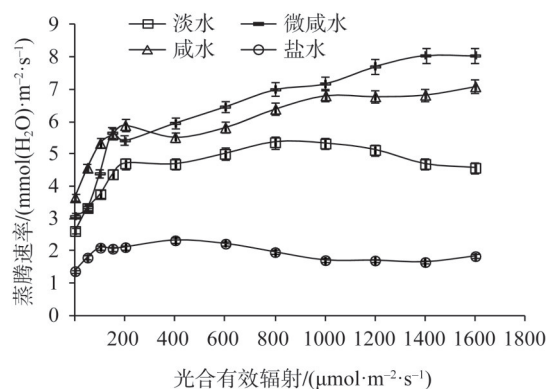


图5 不同地下水矿化度条件下桤柳叶片蒸腾速率光响应

Fig. 5 Light response of transpiration rate in leaves of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

随地下水矿化度的升高, 柽柳日累积液流量先升高后减低, 在微咸水矿化度下最高 (371.02 g), 其后依次是咸水和淡水, 盐水矿化度下最低 (图8), 咸水、淡水和盐水矿化度下的日累积液流量分别比微咸水下低 18.0%、47.2% 和 55.1%。结果表明, 高矿化度地下水 (盐水) 条件下, 柽柳树干液流白天提速启动时间晚, 高水平液流持续时间短, 日累积液流量显著小于低矿化度处理。

3 结论与讨论

3.1 结论

在地下水埋深 0.9 m 条件下, 地下水矿化度显著影响土壤水盐特征, 随地下水矿化度的升高, 土壤含水量、含盐量和土壤溶液绝对浓度均显著增加。土壤是柽柳水、盐的直接来源, 土壤水、盐含量的增加, 尤其是土壤溶液绝对浓度的增加, 进一步影响了植物的光合作用效率 and 水分利用策略。适度的地下水矿化度可以提高柽柳的光合能力, 但过高的矿化度则会造成盐胁迫, 降低柽柳的光合作用水平。柽柳在盐水矿化度 ($8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 下的光合作用效率最高, 其后依次是微咸水、淡水和盐水。较低的地下水矿化度 (微咸水) 可以提高柽柳的气孔导度、蒸腾速率和净光合速率, 但对净光合速率的影响小于蒸腾速率, 故水分利用效率反而下降; 随地下水矿化度的继续升高, 气孔导度、蒸腾速率逐渐降低, 水分利用效率逐渐升高, 以此来适应盐胁迫导致的生理干旱。在咸水矿化度下, 柽柳具有较高的光合效率 and 水分利用效率, 是柽柳生长的适宜地下水矿化度条件。研究成果可为植物光合生理生态过程与水盐关系的深入研究提供理论基础, 对黄河三角洲盐碱地退化水土保持防护林的恢复与重建具有重要的理论意义和参考价值。

3.2 讨论

3.2.1 地下水矿化度对土壤水盐特征的影响

由于土壤表面水分的蒸发, 浅层地下水及其中溶解的盐分可以通过毛管作用进入土壤, 影响土壤的含水量和含盐量, 进而影响植物的生长^[19,23]。本研究发现, 在地下水埋深

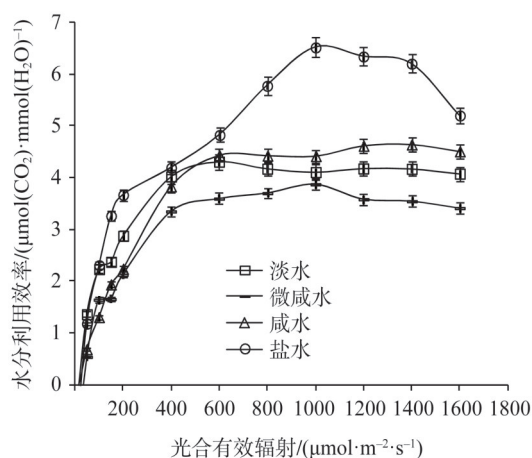


图6 不同地下水矿化度条件下柽柳叶片水分利用效率光响应

Fig. 6 Light response of water use efficiency in leaves of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

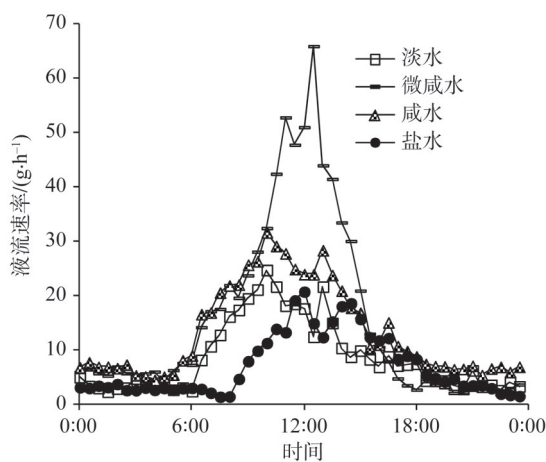


图7 不同地下水矿化度下柽柳液流速率日变化

Fig. 7 The daily change of stem sap flow in *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

0.9 m条件下,淡水、微咸水、咸水和盐水四个地下水矿化度下,土壤含水量和含盐量均随地下水矿化度的升高而增加,表明地下水矿化度可以促进水分在土壤中通过毛管作用向上迁移,并带动盐分在土壤中的向上运移,这与前人研究结果一致^[19,24-25]。但也有研究发现,土壤中盐分运移与地下水矿化度无显著相关性^[26],这可能是因为地下水矿化度只是影响土壤盐分众多因素中的一个,土壤固有的理化性质、外部微气候条件等都可能对土壤盐分的吸收和运移产生重要影响。

3.2.2 地下水矿化度对柽柳光合作用的影响

地下水可以通过改变土壤水盐特征,影响植物的光合作用,而光合作用是探究植物在盐胁迫环境下生理适应机制的一个重要指标^[27]。孔庆仙等研究发现,在地下水埋深1.2 m时,柽柳在咸水矿化度($8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)下的光合作用效率高于淡水和盐水($20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)^[25]。王林等研究表明,重度土壤盐碱胁迫能显著降低柽柳的光合效率和气孔开度^[28]。孟阳阳等研究发现土壤含水量、含盐量过高或过低都会降低柽柳的光合效率^[29]。本研究发现,在地下水埋深0.9 m条件下,地下水矿化度对柽柳叶片光合作用有显著影响:适度的地下水矿化度水平(微咸水、咸水)可以提高柽柳的光合作用效率,而过高的矿化度水平(盐水)则显著抑制光合作用。与淡水、盐水处理相比,柽柳在微咸水、咸水处理下,具有更高的 P_{max} 、 LSP 、 AQY 和更低的 LCP 和 R_d 值,说明此时柽柳对强光和弱光的利用能力都更强,光照生态幅更宽,更有利于干物质的积累和植株的生长。这与其他研究者在柽柳、多枝柽柳等盐生植物中的研究结果相似^[14,19,25,30]。柽柳属于泌盐型盐生植物,可以通过盐腺将多余的盐分排出体外,并通过激活抗氧化酶系统来清除体内因盐分水平高产生的活性氧^[31-34],所以对盐渍环境具有较强的适应能力^[35]。由于长期的适应性演化,盐生植物的最适生长环境往往是具有一定盐度的土壤;过高的矿化度水平会产生严重的盐胁迫,影响植物对水分和营养物质的吸收,破坏叶绿素合成系统,产生大量活性氧使细胞产生氧化损伤,并降低渗透调节能力^[34,36]。

根据气孔限制理论^[37-38],植物在胁迫环境下光合作用水平下降的原因可以分为气孔限制和非气孔限制。哪种因素占主导,主要取决于 G_s 、 C_i 和 L_s 值变化的方向:若随着 P_n 下降, G_s 和 C_i 下降, L_s 上升,则气孔限制占主导;反之,则非气孔因素占主导。王伟华等^[36]的研究表明,在较强的盐胁迫处理下(盐水浓度 $>12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),多枝柽柳光合作用水平下降主要是受气孔因素限制。本研究中,咸水矿化度下柽柳光合效率最高;从咸水到盐水随矿化度升高,柽柳 G_s 和 C_i 降低, L_s 升高,光合作用水平下降的主要原因是气孔限制,这与王伟华等^[36]的研究结果一致。在盐水矿化度下,土壤含盐量和土壤溶液绝对浓度达到最高(表1),在柽柳根系形成渗透胁迫导致吸水困难;柽柳通过降低气孔开度(G_s 最低)来减少蒸腾耗水(T_r 最低);但这同时限制了叶片对 CO_2 的吸收(C_i 最低),降低了光合作用的水平(P_n 最低)。但王鹏等^[39]对多枝柽柳的研究得到了不同的结果,认为

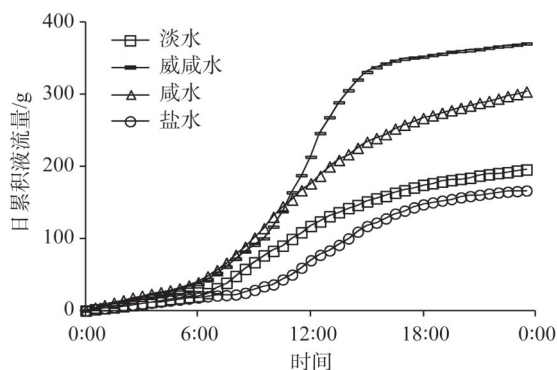


图8 不同地下水矿化度下柽柳日累积液流量

Fig. 8 The daily cumulative sap flow in *Tamarix chinensis* under different groundwater salinities

随地下水矿化度增大, P_n 下降主要是非气孔限制的结果, 这可能和该研究设计的地下水埋深(0.2 m)不同有关, 而地下水埋深又会影响到土壤的水盐特征。从咸水到微咸水, 随矿化度降低, G_s 和 C_i 升高, L_s 降低, 其光合效率下降主要是受非气孔因素限制, 即柽柳的光合作用系统在咸水矿化度下具有更高的光能利用效率, 这是柽柳光合作用系统对盐生环境长期适应的结果。从微咸水到淡水, 随矿化度降低, G_s 和 C_i 降低, L_s 升高, 光合效率降低的主导因素是气孔限制。在微咸水矿化度下, 柽柳 G_s 值最高, L_s 值最低, 最有利于气孔的开放, 气孔限制对光合作用的影响最小。

3.2.3 地下水矿化度对柽柳水分利用及耗水特征的影响

树木生长过程中需要的水分主要从根系吸收, 通过茎干向上运输到叶片, 99%以上通过气孔蒸腾作用耗散到空气中, 只有少部分用于植物生理过程, 所以树干液流日变化能够反应植物生理用水规律和瞬时蒸腾耗水特征^[14,40]。本研究发现, 地下水矿化度对柽柳日累积液流量和液流速率日变化均有显著影响。日累积液流量在微咸水矿化度下最高, 随矿化度的升高逐渐降低, 盐水矿化度下最低, 微咸水和咸水矿化度下的日累积液流量高于淡水处理, 这与 G_s 和 T_r 的变化规律一致。这可能是因为微咸水矿化度下柽柳气孔开放程度最大, 蒸腾速率最高, 所以树干日累积液流量也最高; 而盐水矿化度下, 由于渗透胁迫导致的生理干旱, 柽柳气孔开放程度最低以减少蒸腾耗水, 故日累积液流量也最低。米文精等^[41]研究也发现, 随盐胁迫强度增加, 柽柳蒸腾速率呈下降趋势。

PAR 是影响树木蒸腾耗水的主要因素之一, 蒸腾耗水与 PAR 表现出一定程度的正相关^[42-43]。本研究发现, 柽柳树干液流速率日变化呈现明显的周期性, 上午随 PAR 升高而升高, 白天维持较高的液流速率; 下午随 PAR 降低而降低。这是因为随 PAR 升高, 气孔开放程度增加, 植物叶片光合作用增强, 蒸腾耗水和生理用水都增加, 故树干液流速率逐渐升高, 这与前人研究结果相一致^[42-43]。在盐水矿化度下, 柽柳树干液流启动时间晚于其他较低矿化度处理, 可能是因为过高的盐分导致了渗透胁迫, 柽柳通过降低气孔开度和减少气孔开放时间减少蒸腾耗水, 以适应这种生理干旱逆境。

WUE 是衡量植物对环境胁迫适应性的关键指标^[46-47]。刘玉娟等^[46]研究发现, 盐胁迫可以提高柽柳的 WUE 。本研究发现, 地下水矿化度可以显著影响柽柳的 WUE , 从微咸水到盐水, 随地下水矿化度升高, 土壤含盐量和柽柳 WUE 均逐渐升高, 在盐水处理下达到最高水平。根据气孔最优化理论^[47], 植物可以通过气孔的短时变化, 在保持最高 CO_2 同化速率的同时降低水分损耗, 提高水分利用效率, 从而更好地适应盐胁迫环境。从咸水到盐水, 随矿化度升高, 柽柳 P_n 降低的幅度小于 T_r , 所以柽柳在盐水矿化度下 WUE 更高, 以此来应对高盐度导致的渗透胁迫和生理干旱。

参考文献(References):

- [1] 夏江宝, 孔雪华, 陆兆华, 等. 滨海湿地不同密度柽柳林土壤调蓄水功能. 水科学进展, 2012, 23(5): 628-634. [XIA J B, KONG X H, LU Z H, et al. Capacity of soil water storage and regulation under different density forests of *Tamarix chinensis* Lour. in coastal wetland. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 628-634.]
- [2] 赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 等. 不同生境条件下中国柽柳空间分布点格局分析. 生态科学, 2011, 30(2): 142-149. [ZHAO X S, CUI B S, SUN T, et al. Analysis of spatial point pattern of *Tamarix chinensis* in different habitats. Ecological Science, 2011, 30(2): 142-149.]
- [3] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应. 水科学进展, 2011, 22(5): 689-694.

- [AN L S, ZHAO Q S, YE S Y, et al. Water-salt interactions factors and vegetation effects in the groundwater ecosystem in Yellow River Delta. *Advances in Water Science*, 2011, 22(5): 689-694.]
- [4] 赵新风, 李伯岭, 王炜, 等. 极端干旱区 8 个绿洲防护林地土壤水盐分布特征及其与地下水关系. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 75-79. [ZHAO X F, LI B L, WANG W, et al. Characteristic of soil moisture and salinity distribution in eight forests and its relationship with groundwater in extreme arid area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 75-79.]
- [5] 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. *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*. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(5): 1146-1152.]
- [6] 马宁, 王乃昂, 王鹏龙, 等. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 975-989. [MA N, WANG N A, WANG P L, et al. Temporal and spatial variation characteristics and quantification of the affect factors for reference evapotranspiration in Heihe River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 975-989.]
- [7] 段利民, 董新, 吕杨, 等. 固沙植被黄柳、小叶锦鸡儿蒸腾耗水尺度提升研究. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 52-62. [DUAN L M, TONG X, LYU Y, et al. Upscaling of the transpiration and water consumption of sand-fixing vegetation *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla*. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 52-62.]
- [8] 夏江宝, 赵西梅, 赵自国, 等. 不同潜水埋深下土壤水盐运移特征及其交互效应. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 93-100. [XIA J B, ZHAO X M, ZHAO Z G, et al. Migration characteristics of soil water and salt and their interaction under different groundwater levels. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(15): 93-100.]
- [9] HORTON J L, HART S C, KOLB T E. Physiological condition and water source use of Sonoran desert riparian trees at the Bill Williams River, Arizona, USA. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2003, 39: 69-82.
- [10] NIPPERT J B, BUTLER J J, KLUITENBERG G J, et al. Patterns of *Tamarix* water use during a record drought. *Oecologia*, 2010, 162(2): 283-292.
- [11] ANTONELLINI M, MOLLEMA P N. Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy. *Ecological Engineering*, 2010, 36(9): 1201-1211.
- [12] 陈亚鹏, 陈亚宁, 徐长春, 等. 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响. *生态学报*, 2011, 31(2): 344-353. [CHEN Y P, CHEN Y N, XU C C, et al. Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 344-353.]
- [13] 张佩, 袁国富, 庄伟, 等. 黑河中游荒漠绿洲过渡带多枝柽柳对地下水位变化的生理生态响应与适应. *生态学报*, 2011, 31(22): 6677-6687. [ZHANG P, YUAN G F, ZHUANG W, et al. Ecophysiological responses and adaptation of *Tamarix ramosissima* to changes in groundwater depth in the Heihe River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6677-6687.]
- [14] 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. *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 photosynthesis and growth of *Tamarix ramosissima* seedlings. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(2), 84-89.]
- [15] 陈敏, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河中游地区柽柳对地下水埋深的生理响应. *西北植物学报*, 2008, 28(7): 1415-142. [CHEN M, CHEN Y N, LI W H. Physiological response of *Tamarix* spp. for different groundwater depths in the middle reaches of Tarim River in China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(7): 1415-142.]
- [16] 夏江宝, 赵西梅, 刘俊华, 等. 黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(15): 4801-4808. [XIA J B, ZHAO X M, LIU J H, et al. Environmental factors influencing the distribution of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay wetland of the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4801-4808.]
- [17] 王晓, 任丽丽, 夏江宝, 等. 不同潜水埋深下黄河三角洲柽柳光合作用参数变化规律研究. *湿地科学*, 2018, 16(6): 749-755. [WANG X, REN L L, XIA J B, et al. Change regulation of photosynthetic parameters of *Tamarix chinensis* at different groundwater depths in the Yellow River Delta. *Wetland Science*, 2018, 16(6): 749-755.]
- [18] 宋战超, 夏江宝, 赵西梅, 等. 不同地下水矿化度条件下柽柳土柱的水盐分布特征. *中国水土保持科学*, 2016, 14(2): 41-48. [SONG Z C, XIA J B, ZHAO X M, et al. Distribution characteristics of soil moisture and salinity in the soil col-

- umns with planting *Tamarix chinensis* under different groundwater mineralization. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(2): 41-48.]
- [19] XIA J B, ZHAO X M, REN J Y, et al. Photosynthetic and water physiological characteristics of *Tamarix chinensis* under different groundwater salinity conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 138: 173-183.
- [20] PRIOR S A, RUNION G B, ROGERS H H, et al. Elevated atmospheric carbon dioxide effects on soybean and sorghum gas exchange in conventional and no-tillage systems. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 596-608.
- [21] BERRY J A, DOWNTON W J S. Environmental regulation of photosynthesis. In: Govindjee. *Photosynthesis Vol II*. New York: Academia Press, 1982: 263-343.
- [22] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 2007, 45(4): 637-640.
- [23] GOU S, MILLER G. A groundwater-soil-plant-atmosphere continuum approach for modelling water stress, uptake, and hydraulic redistribution in phreatophytic vegetation. *Ecohydrology*, 2014, 7: 1029-1041.
- [24] 宋战超, 夏江宝, 赵西梅, 等. 不同地下水矿化度条件下柽柳土柱的水盐分布特征. *中国水土保持科学*, 2016, 14(2): 41-48. [SONG Z C, XIA J B, ZHAO X M, et al. Distribution characteristics of soil moisture and salinity in the soil columns with planting *Tamarix chinensis* under different groundwater mineralization. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(2): 41-48.]
- [25] 孔庆仙, 夏江宝, 赵自国, 等. 不同地下水矿化度对柽柳光合特征及树干液流的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(12): 1298-1309. [KONG Q X, XIA J B, ZHAO Z G, et al. Effects of groundwater salinity on the characteristics of leaf photosynthesis and stem sap flow in *Tamarix chinensis*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(12): 1298-1309.]
- [26] 刘显泽, 岳卫峰, 贾书惠, 等. 内蒙古义长灌域土壤盐分变化特征分析. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(5): 503-507. [LIU X Z, YUE W F, JIA S H, et al. Variation of soil salinity in the Yichang irrigation district Inner Mongolia. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2014, 50(5): 503-507.]
- [27] PEYKANPOUR E, GHEHSAREH A M, FALLAHZADE J, et al. Interactive effects of salinity and ozonated water on yield components of cucumber. *Plant Soil and Environment*, 2016, 62: 361-366.
- [28] 王林, 刘宁, 王慧, 等. 盐碱胁迫下枸杞和柽柳的水力学特性和碳代谢. *植物科学学报*, 2017, 35(6): 865-873. [WANG L, LIU N, WANG H, et al. Hydraulic characteristics and carbon metabolism of *Lycium chinense* Miller and *Tamarix chinensis* Lour. under saline-alkali stress. *Plant Science Journal*, 2017, 35(6): 865-873.]
- [29] 孟阳阳, 刘冰, 刘婵. 水盐梯度下湿地柽柳(*Tamarix ramosissima*)光合响应特征和水分利用效率. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 568-577. [MENG Y Y, LIU B, LIU C. Photosynthetic response characteristics and water use efficiency of *Tamarix ramosissima* under water and salt gradients in wetlands. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(3): 568-577.]
- [30] 王伟华, 张希明, 闫海龙, 等. 盐处理对多枝柽柳光合作用和渗透物质的影响. *干旱区研究*, 2009, 26(4): 561-568. [WANG W H, ZHANG X M, YAN H L, et al. Effects of salt stress on photosynthetic and osmoregulation substances of *Tamarix ramosissima* Ledeb. *Arid Zone Research*, 2009, 26(4): 561-568.]
- [31] GOEDHART, C M, PATAKI D E, BILLINGS S A. Seasonal variations in plant nitrogen relations and photosynthesis along grassland to shrubland gradient in Owens Valley, California. *Plant Soil*, 2010, 327: 213-223.
- [32] HEJNÁK V, HNILIČKOVÁ H, HNILIČKA F. Physiological response of juvenile hop plants to water deficit. *Plant, Soil and Environment*, 2015, 61: 332-338.
- [33] 苏华, 李永庚, 苏本营, 等. 地下水位下降对浑善达克沙地榆树光合及抗逆性的影响. *植物生态学报*, 2012, 36(3): 178-186. [SU H, LI Y G, SU B Y, et al. Effects of groundwater decline on photosynthetic characteristic and stress tolerance of *Ulmus pumila* in Hunshandake Sandy Land, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(3): 178-186.]
- [34] 朱金方, 刘京涛, 陆兆华, 等. 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响. *生态学报*, 2015, 35(15): 5140-5146. [ZHU J F, LIU J T, LU Z H. Effects of salt stress on physiological characteristics of *Tamarix chinensis* Lour. seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5140-5146.]
- [35] ANDERSON G L, GARRUTHERS R I, GE S K, et al. Monitoring of invasive *Tamarix* distribution and effects of biological control with airborne hyperspectral remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26: 2487-

2489.

- [36] 朱金方, 陆兆华, 夏江宝, 等. 盐旱交叉胁迫对柽柳幼苗渗透调节物质含量的影响. 西北植物学报, 2013, 33(2): 357-363. [ZHU J F, LU Z H, XIA J B, et al. Changes of osmotic adjusting substances in leaves of *Tamarix chinensis* seedlings under salt and drought stress. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(2): 357-363.]
- [37] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [38] HEJNÁK V, HNILÍČKOVÁ H, HNILÍČKA F, et al. Gas exchange and *Triticum* sp. with different ploidy in relation to irradiance. Plant, Soil and Environment, 2016, 62: 47-52.
- [39] 赵西梅, 夏江宝, 陈为峰. 蒸发条件下潜水埋深对土壤—柽柳水盐分布的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 1-8. [ZHAO X M, XIA J B, CHEN Y P. Effect of groundwater depth on the distribution of water and salinity in the soil-*Tamarix chinensis* system under evaporation conditions. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 1-8.]
- [40] 金鹰, 王传宽, 桑英. 三种温带树种树干储存水对蒸腾的贡献. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1310-1317. [JIN Y, WANG C K, SANG Y. Contribution of stem water storage to daily transpiration of three temperate trees in Northeastern China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(12): 1310-1317.]
- [41] 米文精, 刘克东, 赵永刚, 等. 大同盆地盐碱地生态修复利用植物的初步选择. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 49-54. [MI W J, LIU K D, ZHAO Y G, et al. Initial selection of plant species for ecological restoration in salinized soil in Datong Basin. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(1): 49-54.]
- [42] 倪广艳, 赵平, 朱丽薇, 等. 荷木整树蒸腾对干湿季土壤水分的水力响应. 生态学报, 2015, 35(3): 652-662. [NI G Y, ZHAO P, ZHU L W, et al. Hydraulic responses of whole tree transpiration of *Schima superba* to soil moisture in dry and wet seasons. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 652-662.]
- [43] 徐世琴, 吉喜斌, 金博文. 典型固沙植物梭梭生长季蒸腾变化及其对环境因子的响应. 植物生态学报, 2015, 39(9): 890-900. [XU S Q, JI X B, JIN B W. Dynamics and responses of sap flow of typical sand binding plants *Haloxylon ammodendron* to environmental variables. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(9): 890-900.]
- [44] ZHANG S Y, XIA J B, ZHANG G C, et al. Threshold effects of photosynthetic efficiency parameters of wild jujube in response to soil moisture variation on shell beach ridges, Shandong, China. Plant Biosystems, 2014, 148: 140-149.
- [45] TRÄNKNER M, JÁKLI B, TAVAKOL E, et al. Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants. Plant and Soil, 2016, 406: 409-423.
- [46] 刘玉娟, 贺康宁, 王伟璐, 等. 盐胁迫对柽柳和白刺光合日变化的影响. 中国农学通报, 2015, 31(28): 6-12. [LIU Y J, HE K N, WANG W L, et al. Effect of salt stress on diurnal variation of photosynthesis of *Nitraria tangutorum* and *Tamarix chinensis*. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(28): 6-12.]
- [47] COWAN I R, FARQUHAR G D. Stomatal function in relation to leaf metabolism and environment. In: Jennings D H. Integration of Activity in the Higher Plant. Cambridge: Cambridge University Press, 1977: 471-505.

Effects of groundwater salinities on photosynthesis and water consumption characteristics of *Tamarix chinensis* in the Yellow River Delta

ZHAO Zi-guo^{1,2}, ZHAO Feng-juan^{1,2}, XIA Jiang-bao², WANG Yue-hai³

(1. Shandong Provincial Engineering and Technology Research Center for Wild Plant Resources Development and Application of Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, Shandong, China;

2. Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, Shandong, China; 3. Shandong Academy of Forestry, Jinan 250014, China)

Abstract: *Tamarix chinensis* Lour. is a constructive species of the saline-alkali wetland in the Yellow River Delta, and shallow groundwater is the main water source for the growth of *T. chinensis* in this area. To explore the response mechanism of *T. chinensis* to groundwater salinity in shallow groundwater area in the Yellow River Delta, parameters of photosynthesis and water consumption were determined under 4 groundwater salinity gradients of fresh ($0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), brackish ($3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), saline ($8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) and salt ($20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) water at simulated groundwater level of 0.9 m via leaf gas-exchange and stem sap flow (*SF*) techniques. The results showed that: (1) With increasing groundwater salinity, soil water content, soil salt content and absolute concentration of soil solution increased gradually; (2) Parameters of the max net photosynthetic rate (P_{max}), apparent quantum yield (*AQY*), light saturation point (*LSP*), stomatal conductivity (G_s), transpiration rate (T_r), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stem *SF* rate increased first and then decreased with the increase of groundwater salinities, reaching the maximum values respectively under brackish groundwater (G_s , *AQY*, T_r , C_i , and *SF* rate) and saline groundwater (P_{max} and *LSP*) treatments, while all values of the above parameters reached the minimum values under salt groundwater treatment; (3) With the increase of groundwater salinity, the water use efficiency (*WUE*) and stomatal limitation value (L_s) of *T. chinensis* decreased before increasing, achieving the lowest level under brackish groundwater and the highest under salt groundwater. Under the condition of groundwater depth of 0.9 m, the salinity of groundwater significantly affects the characteristics of soil water and salt contents. The increase of soil water and salt contents, especially the absolute concentration of soil solution, further affects the photosynthetic efficiency and water use strategy of *T. chinensis*. Moderate groundwater salinity (brackish and saline groundwater) could improve photosynthetic capacity and reduce *WUE* of *T. chinensis*, while excessive high groundwater salinity (salt groundwater) would inhibit photosynthesis severely and improve *WUE*. *T. chinensis* has high photosynthetic capacity, wide light ecological amplitude and high *WUE* under saline groundwater conditions at the groundwater level of 0.9 m. This research can be used for the further study of the relationship between plant photosynthetic processes and soil water and salt contents, and can provide theoretical reference for the restoration and reconstruction of soil and water conservation shelterbelts in the Yellow River Delta.

Keywords: groundwater salinity; photosynthesis; water use efficiency; transpiration; stem sap flow; *Tamarix chinensis*