



引用格式: 黄婉媛, 戴岳, 安外尔·阿卜杜热伊木. 塔克拉玛干沙漠腹地桉柳年轮宽度对地下水埋深的响应[J]. 西北植物学报, 2024, 44(1): 0134-0141. [HUANG W Y, DAI Y, Anwaier Abudureyimu. Response of annual ring width of *Tamarix* spp. to groundwater depth in the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(1): 0134-0141.] DOI: 10. 7606/j. issn. 1000-4025. 20230100

塔克拉玛干沙漠腹地桉柳年轮宽度对地下水埋深的响应

黄婉媛^{1,2}, 戴岳^{2,3*}, 安外尔·阿卜杜热伊木^{1,2}

(1 新疆大学 生态与环境学院, 乌鲁木齐 830046; 2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3 新疆大学 地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要 【目的】桉柳作为干旱荒漠生态系统的典型物种, 研究其年轮宽度对地下水响应的保护有重要价值。【方法】研究基于沙漠腹地达里雅博依绿洲地下水埋深资料, 利用年轮测定方法分析不同地下水埋深状况下桉柳年轮宽度的变化, 探讨其与地下水埋深变化的关系。【结果】样地一地下水埋深随时间逐年增加, 埋深范围是 1.2~2.6 m, 桉柳的年轮宽度在 2001—2020 年呈显著增加趋势, 变化范围为 0.98~5.80 mm, 年轮宽度年际间差异显著; 样地二地下水埋深随时间增长呈现先增加后减小的趋势, 埋深范围是 2.7~4.5 m, 桉柳年轮宽度在 1977—2020 年整体呈正弦函数变化, 范围为 1.46~4.41 mm, 年轮宽度年际间差异性不显著; 样地一桉柳标准年表振幅范围是 0.502~1.641, 大于样地二桉柳标准年表振幅范围为 0.577~1.331。【结论】样地一地下水埋深向着桉柳生长适宜的范围增加时, 有利于桉柳的生长, 表现为年轮宽度增加, 样地二的桉柳年轮宽度变化和地下水埋深之间无显著相关性。

关键词 桉柳; 年轮宽度; 地下水埋深; 塔克拉玛干沙漠

中图分类号 Q948.118

文献标志码 A

Response of annual ring width of *Tamarix* spp. to groundwater depth in the hinterland of the Taklimakan Desert

HUANG Wanyuan^{1,2}, DAI Yue^{2,3*}, Anwaier Abudureyimu^{1,2}

(1 College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China; 3 College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract [Objective] *Tamarix* spp. is a typical species in the arid desert ecosystem, which is important to study the response of *Tamarix* spp. to groundwater for its protection. [Methods] Based on the data of groundwater depth in the Daliyaboyi oasis at the hinterland of the Taklimakan Desert, this study analyzed the variation of tree-ring width of *Tamarix* spp. and discussed the relationship between tree-ring width and groundwater depth. [Results] The groundwater depth of the first sample site was increased year by year, ranging from 1.2-2.6 m. Tree-ring width of *T.* spp. was increased significantly from 2001 to 2020 with a range of 0.98-5.80 mm at the first sample site, and the interannual difference of tree-ring width was significant. The range of the groundwater depth of the second sample site was 2.7-4.5 m, which was increased first and then decreased with time. The tree-ring width of *T.* spp. at the second sample site changed as a sine function from 1977 to 2020, ranging from 1.46 mm to 4.41 mm, with no significant in-

收稿日期: 2023-02-25; 修改稿收到日期: 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160260)

作者简介: 黄婉媛(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区植物与环境研究。E-mail: nhwysy@163.com

* 通信作者: 戴岳, 博士, 讲师, 主要从事荒漠植物的水分响应与适应研究。E-mail: daiyue@xju.edu.cn

terannual difference. The standard chronological amplitude of *T. spp.* was ranging from 0.502 to 1.641 at the first sample site, which was larger than the second site that was ranging from 0.577 to 1.331. [Conclusion] A moderate increase in groundwater depth was beneficial to *T. spp.* growth at the first sample site, supported by the increase of tree-ring width. There was no significant correlation between tree-ring width and groundwater depth at the second sample site. These results are helpful to understand the radial growth of *T. spp.* with the changes in groundwater depth.

Key words *Tamarix spp.*; tree-ring width; groundwater depth; Taklimakan Desert

怪柳(*Tamarix spp.*)是中国西北干旱地区分布广泛的植物,具有耐旱耐盐碱的特性,是干旱区、半干旱区的优势种和建群种,作为关键植物种维持干旱区荒漠生态系统^[1]。研究显示,怪柳由于受极端生境、自身遗传特性及动物采食等影响,导致树盘生长存在偏心现象,年轮均在单侧优先生长并形成多个生长区,普遍存在伪轮、缺轮和楔形轮等变异轮,采样时一般采集灌木茎干基部的圆盘为样本^[2-4]。学者利用怪柳的树轮宽度变化,分析了干旱区多枝怪柳(*T. ramosissima*)的生长特性,基于怪柳径向生长主要受到河道径流和地下水位限制,重建了过去近百年西居延海5—8月水位变化^[2,5]。研究发现博斯腾湖滨怪柳的年轮指数与当年和前1年的湖水水位变化有显著的相关性,离湖滨带远地区的怪柳主要受地下水位的影响^[6]。怪柳的径向生长受到许多环境因素的影响,如气候、土壤、水分、风沙活动^[7]。怪柳蒸腾作用强且水分需求量大,为保证正常的生命活动,其通过发达的根系吸收土壤水与地下水^[8-10]。在干旱地区,降雨稀少,地下水和地表水是维持荒漠植物生存的主要水源^[11-12]。研究发现,怪柳直径年生长量即年轮宽度变化随着地下水埋深的减小而增加^[13]。湖岸怪柳在地下水位满足其生长条件时,地下水位变化与怪柳轮宽生长显著正相关^[14]。在怪柳生长季,地下水埋深与年轮宽度显著正相关^[15]。因此,地下水是干旱区怪柳生长的重要因素。有研究表明,干旱区怪柳等多年生植物的生长发育由浅层地下水埋深决定^[16]。怪柳的年轮宽度受到其利用水源的影响,因而对不同水分条件地区怪柳年轮的研究是有必要的。达理雅博依绿洲位于塔克拉玛干沙漠腹地,是典型的原始荒漠绿洲,深层土壤水和地下水是成熟怪柳重要的水源^[17],且研究区内地下水埋深存在年内和年际的显著波动^[18-19],面对波动的地下水埋深,怪柳的年轮宽度如何响应值得进一步研究。本研究利用怪柳年轮资料,结合地下水埋深信息,探讨沙漠腹地怪柳的年轮宽度在不同的地下水埋深条件下的变化,丰富了怪柳年轮宽度对地下水埋深变化响应的认识,也

为当地的生态系统保护提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国最大的流动性沙漠塔克拉玛干沙漠腹地的达理雅博依绿洲(图1)。达理雅博依绿洲是克里雅河下游的尾间绿洲,该地区纵伸塔克拉玛干沙漠腹地250 km,南北长365 km,东西宽96 km,总面积2 326.98 km²。该地区属于典型的暖温带干旱沙漠气候,年均降水量不足20 mm,年均蒸发量达2 480 mm,年均气温12.1℃,昼夜温差大,气候极端干旱,风沙天气频繁^[18-19]。植物群落组成贫乏,结构简单,优势种单一,植物组成主要有胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、芦苇(*Phragmites communis*)等^[18-20]。绿洲从南到北地下水埋深逐渐变浅,范围为2~9 m^[21]。土壤pH值范围为8.49~9.15,呈碱性^[22]。地下水呈弱碱性,pH由西向北逐渐降低,范围为7.71~9.19^[23],矿化度较高,范围为4~6 g/L^[24]。

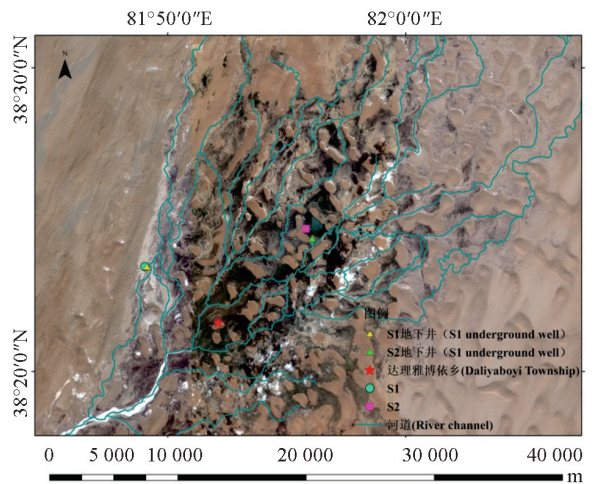


图1 研究区概况

Fig. 1 Map of study area

1.2 样地调查

2021年6月,根据地下水埋深和怪柳生长状况,在达理雅博依绿洲2口生态监测井附近设置样地。研究区河流主要由冰雪融水补给,占71%,地

下水补给主要来源为地表水渗漏^[25]。样地一(S1)位于河道附近,样地二(S2)位于湖泊附近。S1 样地距地下水位观测井(38°23′19.01″N,81°49′14.88″E)约 132 m,距河道约 575 m;S2 样地距地下水位观测

井(38°23′19.01″N,81°49′14.88″E)约 718 m,距河道约 1 134 m。以无人机和人工调查相结合方式进行调查,调查样地内植被覆盖度和怪柳的株高、冠幅和年龄,记录其生长状况(表 1)。

表 1 样地和采样怪柳信息
Table 1 Information of sample sites and *Tamarix* spp. samples

样地 Sample site	样本量(丛/盘) Sample capacity	经纬度 Latitude and longitude	株高 Height/m	冠幅 Crown width/m	采样圆盘年龄 Sampling disc age/a	植被覆盖度 Vegetation coverage/%
S1	6/10	38°23′26″N 81°49′10″E	3.77±0.49	6.22±1.32	7~20	30.1
S2	6/9	38°24′41″N 81°55′58″E	3.68±0.76	5.39±1.24	12~44	32.8

1.3 数据采集

1.3.1 地下水埋深

基于地下水监测井内的 Oneset HOBO 水位自动记录仪获取每日地下水埋深数据,数据按北京时间整点记录,每 4 h 监测 1 次。S1 样地 2013—2020 年平均地下水埋深为 1.74 m,S2 样地 2015—2020 年平均地下水埋深为 3.78 m。

1.3.2 土壤含水量

在植物附近用土钻取 0—160 cm 土层的土壤样品,每 20 cm 一层,每层取 3 个重复,用烘干法测量土壤含水量。

1.3.3 怪柳年轮样品采集与年轮宽度

在每个样地内选取长势较好的怪柳 6 丛,在每丛怪柳中选取 1~2 个基径较大者,S1 样地采集圆盘平均基径为(8.69±1.86) cm,S2 样地采集圆盘平均基径为(14.2±4.46) cm,沿地表用锯子截取怪柳树盘,并对其进行编号,带回实验室。在中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所树木年轮实验室对树盘进行打磨、抛光、交叉定年和轮宽测量。年轮宽度采用 LINTAB 树轮宽度仪(Velmex system, Velmex Inc., Bloomfiled, NY, USA)测量,测量精度 0.001 mm,每个树盘沿 2 个不同方向测定,由于部分

怪柳树盘存在偏心现象,只选择最大半径进行测量。

1.4 数据处理与分析

为排除树木自身生理年龄的影响,本研究标准化处理年轮宽度的实测数据,将树轮宽度序列转换成新的指数序列,用年轮宽度指数反映年轮生长^[26]。本次采集怪柳样本数据用 COFECHA 交叉定年质量控制程序进行交叉定年检验,确保交叉定年的准确性,最后用 ARSTAN 程序建立标准年表。

利用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析,使用独立样本 *t* 检验比较相同年份 2 个样地间怪柳年轮宽度的差异显著性,使用单因素方差分析比较同一样地年际间怪柳年轮宽度的差异显著性,用 Pearson 相关分析对地下水埋深和年轮宽度进行相关性分析。用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深年变化特征

2013—2020 年,S1 样地的地下水埋深变化范围为 1.2~2.6 m,平均值为 1.74 m,在 2013 年地下水埋深最浅,在 2020 年地下水埋深最深,地下水埋深变化与时间变化之间存在显著正相关($P=0.008$),随着时间的增长呈现增加趋势(图 2)。

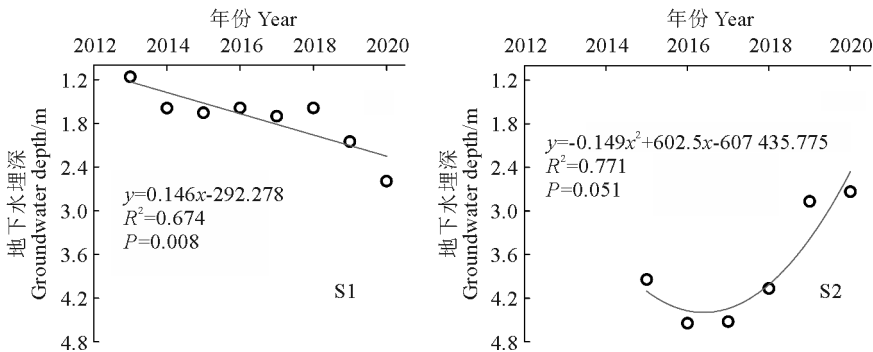


图 2 两样地的地下水埋深变化
Fig. 2 Changes of groundwater depth at the two sample sites

2015—2020 年,S2 样地的地下水埋深变化范围为 2.7~4.5 m,平均值为 3.78 m,在 2020 年地下水埋深最浅,在 2016 年地下水埋深最深,地下水埋深变化与时间变化之间存在非线性关系,随着时间增长呈现先增加后减小的趋势。整体上看,S1 样地地下水埋深浅于 S2 样地,2016—2020 年,两样地的地下水埋深随时间的变化趋势相反,S1 样地呈现增加趋势而 S2 样地呈现减小趋势。

2.2 不同深度土壤含水量

2 个样地的土壤含水量均表现为随土层深度的增加而增加(图 3)。S1 样地土壤含水量变化范围为 0.44%~16.80%,0—80 cm 土层土壤含水量极低,不足 5%;S2 样地较 S1 样地土壤含水量高,变化范围为 12.73%~37.17%,土壤含水量在 80 cm 深度处上升至 31.48%后变化不明显。

2.3 桉柳年轮生长的变化特征

2 个样地桉柳年轮宽度的变化趋势不同(图 4):2001—2020 年,S1 样地桉柳的年轮宽度呈显著增

加趋势($P<0.001$),而 S2 样地桉柳的年轮宽度呈先增加后减小的波动性变化(图 4)。从整体上看,S1 样地桉柳年轮宽度在 2001—2020 年整体呈增加趋势,变化范围为 0.98~5.80 mm,在 2017 年年轮宽度最大,在 2003 年年轮宽度最小;S2 样地桉柳年轮宽度在 1977—2020 年整体呈正弦函数变化,范围为 1.46~4.14 mm,在 1978 年年轮宽度最大,在 1984 年年轮宽度最小。

不同地下水埋深条件下桉柳年轮宽度在相同年份的差异性分析结果(图 5)为:在 2012,2017,2018,2019 年两样地桉柳年轮宽度均具有显著性差异($P_{2012}=0.003,P_{2017}<0.001,P_{2018}<0.001,P_{2019}<0.001$),2012,2017,2018,2019 年桉柳年轮宽度均表现为 S1 样地显著大于 S2 样地;不同年份条件下桉柳年轮宽度在同一样地的差异性分析结果为:S1 样地桉柳年轮宽度年际间差异性显著($P<0.001$),S2 样地桉柳年轮宽度年际间差异性不显著($P=0.283$)。

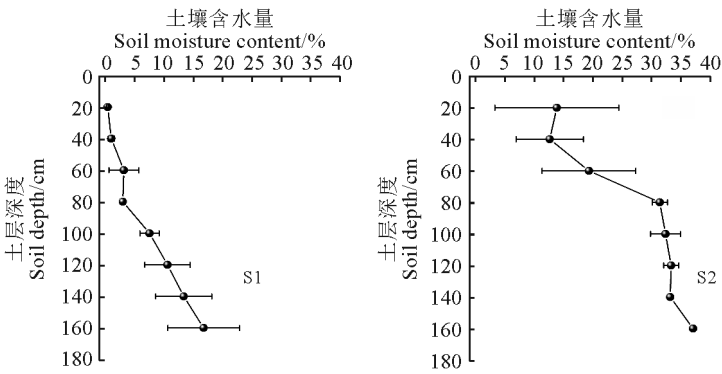


图 3 两样地不同深度土壤含水量
Fig. 3 Soil moisture content of the vertical soil profile at the two sample sites

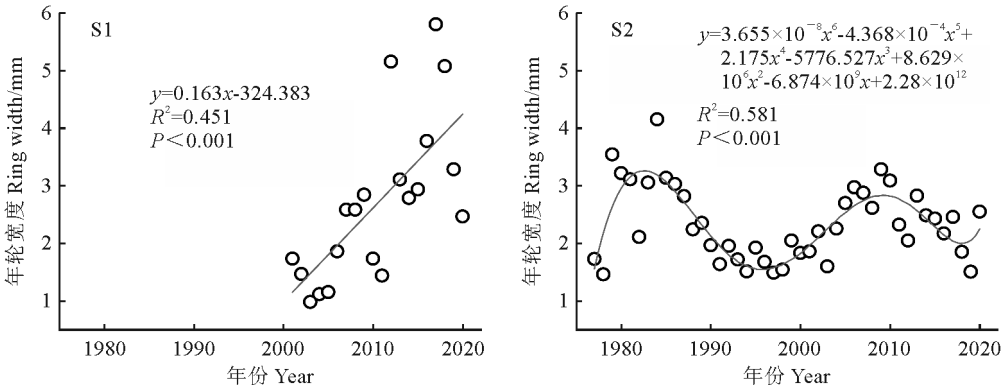
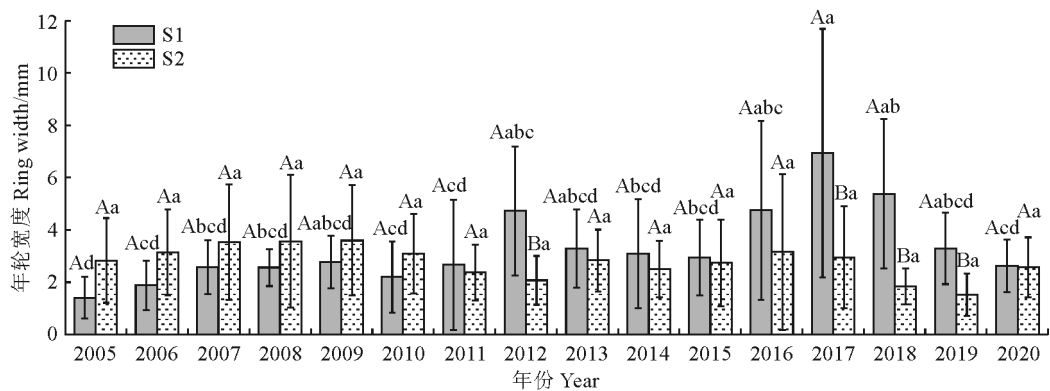


图 4 两样地桉柳年轮宽度的变化
Fig. 4 Changes in the width of tree-ring of *Tamarix* spp. at the two sample sites



不同大写字母代表相同年份不同样地间年轮宽度差异显著($P<0.05$),不同小写字母代表同一样地年际间年轮宽度差异显著($P<0.05$)。

图5 两样地怪柳年轮宽度对比

Different capital letters represent significant difference in the width of tree-ring of the same year between the different sample sites ($P<0.05$), while different lowercase letters represent significant difference in the width of tree-ring at the same sample site in different years ($P<0.05$).

Fig. 5 Comparison of tree-ring widths of *Tamarix* spp. at two sample sites

从怪柳年轮指数变化趋势(图6)看,随着时间延续,两样地怪柳年轮指数呈现波动性变化。2001—2020年,S1样地怪柳年轮宽度指数在2004年最小,为0.502,在2012年最大,为1.641;1977—2020年,S2样地怪柳年轮宽度指数在2019年最小,为0.577,在2009年最大,为1.331。S1样地怪柳标准年表振幅大于S2样地怪柳标准年表。

著($P=0.443$)。2015—2020年,S2样地的地下水埋深变化与怪柳年轮指数之间呈正相关关系,相关性不显著($P=0.616$)。

表2 两样地怪柳年轮指数与地下水埋深之间的相关性分析

Table 2 Correlation between *Tamarix* spp. tree-ring index and groundwater depth at two sample sites

样地 Site	S1	S2
相关系数 Correlation coefficient	-0.318	0.262
显著度 Significance	0.443	0.616

3 讨论

怪柳在不同的生境下能够通过调整水分利用策略来适应变化的环境^[27-28]。付昕宇等^[29]在岱海湖滨带的研究中发现,靠近湖边的怪柳主要吸收0—30 cm浅层土壤水,远离湖边则利用更深层次的土壤水;胡士可等^[30]在塔里木河下游英苏断面距河道不同距离的研究表明,怪柳主要吸收50—100 cm中层土壤水,且随距河道距离的增加转利用更深层次土壤水;王玉阳等^[31]在塔里木河下游的库姆塔格的研究表明,怪柳在生长季不同月份主要利用200 cm以下的深层土壤水和地下水;陈小丽等^[32]在黑河下游荒漠的研究表明,怪柳主要利用200—300 cm的深层土壤水。在达理雅博依绿洲的研究显示,当河道没有河水流经时,生长在河岸旁的成熟怪柳主要利用深层土壤水和地下水^[17],且怪柳的水分利用效

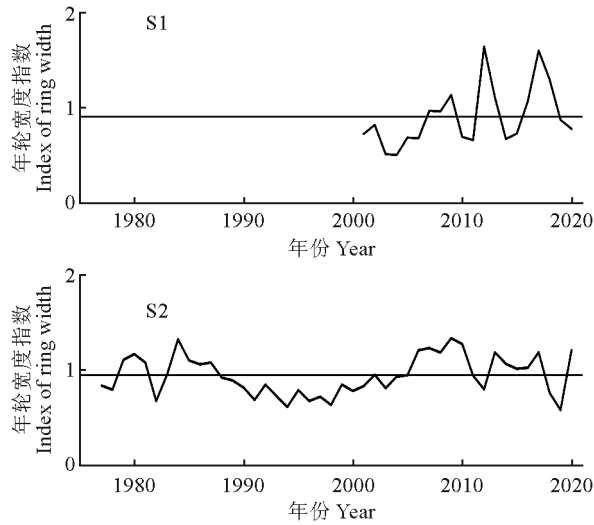


图6 两样地怪柳标准年轮宽度年表

Fig. 6 Chronology of standard ring width of *Tamarix* spp. at the two sample sites

2.4 地下水埋深与年轮指数相关性

地下水埋深和怪柳年轮指数相关性分析结果表明(表2),2013—2020年,S1样地的地下水埋深变化与怪柳年轮指数之间呈负相关关系,相关性不显

率对地下水埋深和深层(250—300 cm)土壤水的变化高度敏感^[19]。以上研究表明在水资源缺乏的荒漠生态系统中,不同区域地理环境下的桉柳可以通过自身调节水分利用策略最大程度地获取水分^[33]。而不同水分条件会导致桉柳生长的环境因素有所变化^[14]。达理雅博依绿洲由于地处沙漠腹地,地下水埋深主要受地表水的影响,而该绿洲受洪水淹没的地区与面积年际变化很大^[34],土壤含水量差异也较大,因此2个样地地下水埋深和桉柳年轮宽度随时间呈现不同的变化趋势。

干旱区桉柳的生长发育与地表水和地下水密切相关,年轮中包含有较多水文环境信息^[35-36]。地下水是桉柳可以利用的重要水源,埋深过深或埋深过浅均不利于桉柳的生长^[35]。地下水埋深2~4 m是桉柳生长的适宜生态水位,而地下水埋深在1~2 m时,桉柳的生长受到抑制,地下水埋深大于4 m时,桉柳的生长也会受到影响^[37]。在达理雅博依绿洲,由于克里雅河河水的补给和人工调控的影响,地下水埋深年内和年际存在多次升降交替的波动变化^[18]。本研究中,S1样地地下水埋深在1.2~2.6 m,且逐年增加,桉柳的年轮宽度在2004—2020年呈显著上升趋势,年轮宽度年际间差异显著,表明地下水埋深的适当加深有利于桉柳的生长。S2样地整体地下水埋深为2.7~4.5 m,在桉柳生长适宜的范围内变化,这可能是桉柳年轮宽度在1977—2020年呈现波动变化,但年际间差异不显著,且标准年表振幅较小的原因。由于S2样地附近存在湖泊,具有较充沛的地表水补给,地下水埋深自2016年起逐年上升,而桉柳的年轮宽度则相应呈下降趋势,表明地下水埋深的变浅可能对桉柳根系的呼吸产生抑制^[38],不利于桉柳的生长。若地下水埋深进一步变浅,桉柳年轮宽度如何变化有待进一步研究。

地下水埋深的变化和桉柳年轮宽度之间的相关性受到环境的影响。石鑫鑫^[13]的研究表明生态输

水后,多枝桉柳年轮宽度随地下水埋深减小而增加,可能是地下水变化与桉柳径向生长的相关性所受干旱/水涝胁迫程度和受水量共同决定。本研究对地下水位的观测年限较短,且影响桉柳年轮宽度生长的主要因素在不断变化,导致2个样地桉柳年轮宽度和地下水埋深的相关性不显著。肖生春等^[14]对内蒙古西居延海湖岸阶地上桉柳的研究显示,在地下水位不足以满足桉柳生长的条件下,地下水位的变化同桉柳轮宽生长作用呈微弱的负相关关系,这与本研究S1样地研究结果相似。有研究显示,桉柳年轮宽度对1年中不同时段浅层地下水埋深变化敏感度不同^[34],也有研究表明,桉柳年轮宽度仅和某段特定月份的地下水埋深显著相关^[28]。侯佳文等^[6]研究显示,湖岸桉柳的生长与湖水位变化显著正相关,离湖滨带远的地区的桉柳主要受地下水位的影响;Xiao等^[39]研究也表明,在生长季(5—8月)湖泊水位的波动是桉柳径向生长变化的主要原因。本研究探讨的是地下水埋深年际变化与桉柳生长的关系,在年内不同时段可能受到其他因素(湖泊水位、微地形、土壤盐度、动物采食)的影响^[7,39]。S2样地位于湖泊附近,除了地下水对桉柳径向生长的影响,也可能与成熟桉柳自身具有复杂交错的根系网,可以很好地吸收地表水流经后的浅层土壤水分以保证充足的水分供应有关^[1]。本研究地下水埋深数据观测年限较短,后续研究可在更长年限地下水埋深数据基础上,考虑桉柳年轮宽度对地下水环境变化的响应。

4 结 论

地下水埋深的增加或降低对桉柳年轮宽度的影响具有不确定性。地下水埋深在合理的范围增加,有利于桉柳生长,表现为年轮宽度增加。研究结果有助于理解研究区地下水埋深变化对桉柳径向生长的影响。

参考文献:

- [1] 张道远,尹林克,潘伯荣. 桉柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 252-256.
ZHANG D Y, YIN L K, PAN B R. Study on drought-resisting mechanism of *Tamarix* L. and assessing of its potential application[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(3): 252-256.
- [2] 肖生春,肖洪浪,周茂先,等. 近百年来西居延海湖泊水位变

化的湖岸林树轮记录[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 557-562.

XIAO S C, XIAO H L, ZHOU M X, *et al.* Water level change of the west Juyan Lake in the past 100 years recorded in the tree ring of the shrubs in the lake banks[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 557-562.

- [3] XIAO S C, XIAO H L, SI J H, *et al.* Lake level changes recorded by tree rings of lakeshore shrubs: A case study at the lake west-Juyan, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Inte-*

grative Plant Biology, 2005, 47(11): 1303-1314.

[4] XIAO S C, XIAO H L, DONG Z B, *et al.* Dry/wet variation recorded by shrub tree-rings in the central Badain Jaran Desert of northwestern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 87: 85-94.

[5] 肖生春, 肖洪浪, 司建华, 等. 干旱区多枝怪柳的生长特性[J]. 西北植物学报, 2005, 25(5): 1012-1016.

XIAO S C, XIAO H L, SI J H, *et al.* Growth characteristics of *Tamarix ramosissima* in arid regions of China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(5): 1012-1016.

[6] 侯佳文, 海米提·依米提, 叶茂. 博斯腾湖滨怪柳(*Tamarix ramosissima*)生长对湖水位的敏感性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 667-673.

HOU J W, Haimit Yimiti, YE M. The sensitivity of ring width of *Tamarix ramosissima* to lake level of the Bosten Lake[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(3): 667-673.

[7] 孟祥彪. 罗布泊地区红柳灌丛树轮宽度特征及与环境要素的响应[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2021.

[8] GAY L W, FRITSCHEN L J. An energy budget analysis of water used by Saltcedar[J]. *Water Resources Research*, 1979, 15(6): 1589-1592.

[9] 刘铭庭. 新疆怪柳属植物研究及推广应用[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 428-429.

LIU M T. *Tamarix* L. and its extending in the desert region of Xinjiang[J]. *Journal of Desert Research*, 1996, 16(4): 428-429.

[10] 曾凡江, 张希明, 李小明. 怪柳的水分生理特性研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 611-614.

ZENG F J, ZHANG X M, LI X M. A review on the water physiological characteristics of *Tamarix* and its prospect[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 611-614.

[11] WEBB R H, LEAKE S A. Ground-water surface-water interactions and long-term change in riverine riparian vegetation in the southwestern United States[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 320(3/4): 302-323.

[12] SHAFROTH P B, SCHLATTER K J, GOMEZ-SAPIENS M, *et al.* A large-scale environmental flow experiment for riparian restoration in the Colorado River Delta[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 645-660.

[13] 石鑫鑫. 塔里木河下游水环境历史变化及多枝怪柳茎直径生长对生态输水的响应[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.

[14] 肖生春, 肖洪浪. 极端干旱区湖岸怪柳径向生长对水环境演变的响应[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 39-45.

XIAO S C, XIAO H L. Response of radial growth of lake-shore *Tamarix* to changes in the water environment in extreme and arid regions[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(2): 39-45.

[15] XIAO S C, XIAO H L, PENG X M, *et al.* Intra-annual stem diameter growth of *Tamarix ramosissima* and association with hydroclimatic factors in the lower reaches of China's Heihe River[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(4): 498-510.

[16] 宋郁东, 樊自立, 雷志栋, 等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 202-260.

[17] WAN Y B, SHI Q D, DAI Y E, *et al.* Water use characteristics of *Populus euphratica* Oliv. and *Tamarix chinensis* Lour. at different growth stages in a desert oasis[J]. *Forests*, 2022, 13(2): 236.

[18] 唐敏, 张峰, 师庆东. 克里雅河尾间绿洲浅层地下水位埋深变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 80-88.

TANG M, ZHANG F, SHI Q D. Variations in groundwater table depth at Daliyaboyi Oasis, Keriya River, China[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(1): 80-88.

[19] 比拉力·依明. 沙漠腹地达理雅博依绿洲浅层地下水特征及其对天然植被的影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.

[20] 尼加提·卡斯木, 师庆东, 刘素红, 等. 基于卷积网络的沙漠腹地绿洲植物群落自动分类方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 217-225.

Nijat Kasim, SHI Q D, LIU S H, *et al.* Automatic classification method of oasis plant community in desert hinterland based on VGGNet and ResNet models[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 217-225.

[21] 史浩伯, 师庆东, 戴岳, 等. 克里雅河尾间绿洲胡杨种群年龄结构对地下水埋深的响应[J]. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1401-1408.

SHI H B, SHI Q D, DAI Y, *et al.* Response of age structure of *Populus euphratica* population to groundwater depth in the oasis at the end of Keriya River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(8): 1401-1408.

[22] TAYIR M, DAI Y, SHI Q D, *et al.* Distinct leaf functional traits of *Tamarix chinensis* at different habitats in the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13: 1094049.

[23] 彭磊, 比拉力·依明, 万彦博, 等. 沙漠腹地达理雅博依绿洲浅层地下水水化学特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(3): 88-95.

PENG L, Bilali Yiming, WAN Y B, *et al.* Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Dali yaboyi oasis in the hinterland of the desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(3): 88-95.

[24] 李文鹏, 焦培新, 赵忠贤. 塔克拉玛干沙漠腹地地下水化学及环境同位素水文地质研究[J]. 水文地质工程地质, 1995, 22(4): 22-24.

LI W P, JIAO P X, ZHAO Z X. Study on groundwater chemistry and environmental isotope hydrogeology in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1995, 22(4): 22-24.

[25] 陈荷生. 水在克里雅河流域生态地理环境中的作用[J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 38-53.

- CHEN H S. Effect of water in eco-geographic environment of the Keriya River valley[J]. *Journal of Desert Research*, 1988, 8(2): 38-53.
- [26] 郭佩芸, 潘进军, 邓晓东, 等. 树木年轮指数序列年表的研制技术和原理研究[J]. 内蒙古气象, 2001(1): 18-20.
GUO P Y, PAN J J, DENG X D, *et al.* Study on the development technology and principle of chronology of tree ring index series[J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2001(1): 18-20.
- [27] 万彦博, 师庆东, 戴岳, 等. 沙漠腹地天然绿洲不同林龄胡杨水分利用来源[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 353-359.
WAN Y B, SHI Q D, DAI Y, *et al.* Water sources of *Populus euphratica* with different tree ages in the oasis of desert hinterland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 353-359.
- [28] 麦尔哈巴·尼加提, 比拉力·依明, 师庆东, 等. 沙漠腹地达里雅布依绿洲柽柳幼苗的水分利用来源[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 159-166.
Marhaba Nijat, Bilal Emin, SHI Q D, *et al.* Water sources of *Tamarix* sp. seedlings at the Daryaboyi oasis in the hinterland of desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(8): 159-166.
- [29] 付昕宇, 刘华民, 于晓雯, 等. 岱海湖滨带湿地植物水分来源及利用策略研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 42-49.
FU X Y, LIU H M, YU X W, *et al.* Water sources and use strategies of plants in Lake Daihai wetland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(12): 42-49.
- [30] 胡士可, 叶茂. 基于氢氧稳定同位素的柽柳水分来源分析[J]. 广东农业科学, 2020, 47(2): 54-60.
HU S K, YE M. Analysis of water source of *Tamarix* spp. based on hydrogen and oxygen stable isotope[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(2): 54-60.
- [31] 王玉阳, 陈亚鹏, 李卫红, 等. 塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1150-1157.
WANG Y Y, CHEN Y P, LI W H, *et al.* Water sources of typical desert riparian plants in the lower reaches of Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(6): 1150-1157.
- [32] 陈小丽, 陈亚宁, 陈亚鹏. 黑河下游荒漠河岸林植物水分利用关系研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 972-979.
CHEN X L, CHEN Y N, CHEN Y P. Relationship among water use of different plants in Heihe River riparian forests[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 972-979.
- [33] 周海, 郑新军, 唐立松, 等. 准噶尔盆地东南缘多枝柽柳、白刺和红砂水分来源的异同[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 665-673.
ZHOU H, ZHENG X J, TANG L S, *et al.* Differences and similarities between water sources of *Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica* in the southeastern Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(7): 665-673.
- [34] WANG J H, ZHANG F, LUO G M, *et al.* Factors influencing seasonal changes in inundation of the daliyaboyi oasis, lower Keriya River valley, central Tarim Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 5050.
- [35] 王建刚. 塔里木河下游胡杨、柽柳对输水的生态响应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007.
- [36] 王振锡, 潘存德. 利用柽柳年轮资料重建塔里木河下游英苏1958—2006年3—6月份浅层地下水埋深[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(4): 1-8.
WANG Z X, PAN C D. Reconstruction of Mar.-Jun. Shallow water table depths from 1958 to 2006 in the lower reaches of Tarim River, Yingsu by use of *Tamarix hispida* Willd. tree-ring width data[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2009, 32(4): 1-8.
- [37] 樊自立, 马英杰, 张宏, 等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 8-13.
FAN Z L, MA Y J, ZHANG H, *et al.* Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River drainage basin[J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 8-13.
- [38] 黄湘, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河中下游柽柳群落土壤碳通量及其影响因子分析[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1934-1940.
HUANG X, CHEN Y N, LI W H, *et al.* Analysis of carbon flux of soil and its related factors from *Tamarix* spp. community in the middle and lower reaches of Tarim River[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10): 1934-1940.
- [39] XIAO S C, XIAO H L. Radial growth of *Tamarix ramosissima* responds to changes in the water regime in an extremely arid region of northwestern China[J]. *Environmental Geology*, 2007, 53(3): 543-551.