

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.014

论文标题： 乌兰布和沙漠河岸旱柳水分来源及其对黄河水位的响应

作　　者： 马迎宾，郝需婷，崔 健，等

收稿日期： 2025-09-15

引文格式： 马迎宾,郝需婷,崔健,等.乌兰布和沙漠河岸旱柳水分来源及其对黄河水位的响应[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):138-146.

Ma Y B, Hao X T, Cui J, et al. Water sources of *Salix matsudana* and its response to the water level of the Yellow River in the riparian of Ulan Buh desert[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):138-146.

相关论文推荐

Recommended articles

乌兰布和沙漠不同平茬强度梭梭叶功能性状

Study on functional traits of *Haloxylon ammodendron* leaves with different stubble strength in Ulanbuhe desert

乌兰布和沙漠绿洲3种杨树叶片性状研究

Study on leaf trait of three kinds of poplar in Ulan Buh desert oasis

黑河中游绿洲荒漠过渡带降水-土壤水-地下水相关性分析

Correlation analysis among precipitation and soil water and groundwater in oasis-desert transitional belt in Heihe river middle reaches

黑河中游荒漠区植物生长与水分变化关系分析

The correlation analysis between plant growth and changes of water in desert areas in Heihe middle reaches

塔里木河上游荒漠河岸林土壤水盐空间变化与生态影响

Spatial variation and effects of soil water-salt content of desert riparian forest in upper reaches of Tarim river

塔河源荒漠河岸灰胡杨与多枝柽柳种群空间格局与空间关联性

Spatial distribution and association between *Populus pruinosa* and *Tamarix ramosissima* population along Tarim river mainstream

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.014 http: //qks.csuft.edu.cn

乌兰布和沙漠河岸旱柳水分来源及其对黄河水位的响应

马迎宾，郝需婷，崔　健，王浩伊，韩春霞，白钦文，黄雅茹

（中国林业科学研究院沙漠林业实验中心 内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站，内蒙古 磴口 015200）

摘　要：【目的】探究黄河流域乌兰布和沙漠河岸林的水分来源及其对黄河水位的响应，揭示旱柳的水分利用策略及其在干旱条件下的适应性，为黄河流域荒漠区生态保护和修复提供理论依据。【方法】以黄河“几字弯”乌兰布和沙漠河岸旱柳为对象，在 2022—2023 年生长季期间，采集植物茎，同时采集林地土壤水、地下水及黄河水等植物潜在水分。植物、土壤样品中的水分采用冷冻真空水分提取装置提取。测定各水样品的稳定氢氧同位素，分析植物及各潜在水源的稳定氢氧同位素组成特征，利用 MixSIAR 模型计算不同潜在水源对植物的贡献率。【结果】旱柳的水分来源具有明显的季节变化。2022 年 5 月，旱柳主要吸收深层土壤水，吸收比例达 84.1%；6、7、8、9 月旱柳吸收深层土壤水的比例减少，分别为 44.6%、36.9%、26.0%、54.1%，对中层土壤水吸收比例分别增加 24.3%、13.7%、8.6% 和 7.2%，对地下水的吸收比例分别增加 6.9%、21.5%、38.3% 和 19.1%。2023 年 5—9 月，旱柳主要吸收深层土壤水和地下水，吸收深层土壤水的比例分别为 65.6%、38.9%、63.3%、52.3% 和 30.2%，吸收地下水的比例分别为 14.3%、31.6%、18.6%、29.1% 和 48.2%。2022 年和 2023 年不同潜在水源对旱柳的贡献比例差异不显著。随着河水位的升高，旱柳吸收地下水的比例增加，吸收黄河水的比例降低。【结论】黄河“几字弯”乌兰布和沙漠河岸旱柳的主要水分来源是相对较稳定的深层土壤水和地下水。黄河水位在一定程度上影响旱柳的水分来源，尤其影响旱柳对地下水和黄河水的吸收比例，体现了旱柳对干旱的适应性。

关键词：水分来源；稳定氢氧同位素；河岸植物；黄河水位；乌兰布和沙漠

中图分类号：S715　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)08-0138-09

Water sources of *Salix matsudana* and its response to the water level of the Yellow River in the riparian of Ulan Buh desert

Ma Yingbin, Hao Xuting, Cui Jian, Wang Haoyi, Han Chunxia, Bai Qinwen, Huang Yaru

(Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Observation Research Station, Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract:【Objective】To explore the water sources of riparian forests and their response to the water level of the Yellow River in the Ulan Buh desert section of the Yellow River basin, reveal the water use strategies of *Salix matsudana*, understand their adaptability under drought conditions, and to provide a theoretical basis for ecological protection and restoration in the desert area of the Yellow River basin.【Method】*Salix matsudana* was selected from the river bank of the Ulan Buh desert of Yellow River “Jizi bend”. In the growing season of 2022-2023, plant stems were collected, as well as forest soil, groundwater, Yellow River water and other potential water sources of plants. Water was extracted from plant and soil samples by a freeze-vacuum water extraction device, and the stable hydrogen and oxygen isotopes of each water sample were determined and analyzed. The contribution ratio of different potential water sources to plants was calculated using MixSIAR model.【Result】The water source of *Salix matsudana* had obvious seasonal changes. In May 2022, *Salix matsudana* mainly absorbed deep soil water, accounting for 84.1%. In June, July, August and September, the absorption proportion of deep soil water decreased (44.6%, 36.9%, 26.0%, 54.1%). Concurrently, the proportion of water absorbed from the middle

收稿日期（Received）：2025-09-15　　**修订日期**（Revised）：2025-12-04

基金项目：内蒙古自治区防沙治沙科技创新重大示范工程项目（2024JBGS0013）；中央引导地方科技发展资金（2021ZY0058）；内蒙古自治区自然科学基金项目（2024MS03038）。

第一作者：马迎宾（mayingbin1988@126.com），副研究员，博士。　**通信作者：**黄雅茹（hu_angyaru@126.com），高级工程师。

引文格式：马迎宾 , 郝需婷 , 崔健 , 等 . 乌兰布和沙漠河岸旱柳水分来源及其对黄河水位的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(8):138-146.

Ma Y B, Hao X T, Cui J, et al. Water sources of *Salix matsudana* and its response to the water level of the Yellow River in the riparian of Ulan Buh desert[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):138-146.

soil increased by 24.3%, 13.7%, 8.6% and 7.2%, respectively. Additionally, the proportion of groundwater absorption increased by 6.9%, 21.5%, 38.3% and 19.1% respectively during these months. From May to September 2023, *Salix matsudana* mainly absorbed deep soil water and groundwater. The proportion of deep soil water absorption was 65.6%, 38.9%, 63.3%, 52.3% and 30.2%, and the proportion of groundwater absorption was 14.3%, 31.6%, 18.6%, 29.1% and 48.2%, respectively. There was no significant difference between 2022 and 2023 in the contribution ratio of different potential water sources ($P > 0.05$). The proportion of groundwater absorbed by *Salix matsudana* increased with the water level of the Yellow River, and the proportion of Yellow River water to the water source of *Salix matsudana* decreased.【Conclusion】The main water source of *Salix matsudana* is relatively reliable deep soil water and groundwater. The water level of the Yellow River will affect the water source of *Salix matsudana* to a certain extent, especially the absorption ratio of groundwater and Yellow River water, which reflects the adaptability of *Salix matsudana* to drought.

Keywords: water source; stable isotopes of hydrogen and oxygen; riparian plants; Yellow River water level; Ulan Buh desert

河岸带是河流与陆地生态系统交换物质和能量的重要过渡带。河岸植被在维持河岸带生态系统稳定性等方面发挥重要作用[1-2]。荒漠河岸林作为干旱区生态系统的重要组成部分，维持着区域能量与物质的循环过程[3]。它不仅可以保护干旱区生物多样性，还具有维护生态系统稳定、防治荒漠化及维持荒漠生态安全等重要意义[4]。水是干旱区植物生存的关键因子。河岸植被在长期的演化过程中形成了特有的适应机制和水分利用方式。植物更替水分利用来源是适应环境的重要方式，有利于其生存、竞争和繁育[5]。水分来源连接水文、生态过程，是河岸带相关研究中的关键科学问题[6]。因此，研究干旱区河岸带植物水分来源，了解其水分利用策略，对揭示植物生存策略及其对水文等环境条件的响应具有重要意义，也是生态保护与修复的先决条件[7]。

稳定氢氧同位素（δD、$\delta^{18}O$）可以用来定量揭示植物水分来源[8-10]。根系吸收水分之后，在植物体内的运输过程中一般不会发生同位素分馏[11]，同时稳定同位素技术具有较高的准确性和灵敏性，对植物破坏程度较小[12]，因此在生态学领域得到了广泛应用。国内外诸多学者进行稳定同位素研究发现，不同区域河岸植物水分来源不尽相同。不同时期美国犹他州红丘峡谷河岸树木的主要水分来源并非河水[13-15]。塔里木河流域胡杨 *Populus euphratica* 的主要水分来源是深层土壤水（＞ 120 cm）和地下水[16]。黑河河岸胡杨的主要水分来源为河水和地下水，因雨水少且入渗浅，降水可忽略不计[17]。黄河兰州段河漫滩多枝柽柳 *Tamarix ramosissima* 和旱柳 *Salix matsudana* 对各潜在水源的利用比较平均[18]，焦作段芦苇 *Phragmites australis* 和柽柳 *Tamarix chinensis* 水分主要来源于土壤水补给[19]，黄河支流河岸柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* 和花棒 *Hedysarum scoparium* 等灌木类植物主要利用深层和浅层的土壤水，很少利用河水[20]。目前，对黄河“几字弯”乌兰布和沙漠河岸植物水分来源的研究尚未见相关报道。

研究干旱区荒漠河岸林植物水分来源对制定有效的生态保护与恢复策略具有重要意义[21]。旱柳是黄河“几字弯”西岸主要乔木树种，是乌兰布和沙漠和黄河之间的一道屏障，对于稳定该区域生态平衡、防风固沙等具有重要作用。该区域旱柳的水分来源尚不明晰，本研究运用稳定氢氧同位素技术和相关混合模型对旱柳的水源进行研究。通过测定旱柳木质部水及其潜在水源的稳定氢氧同位素，计算不同潜在水源对旱柳木质部水的贡献比例，探究旱柳水分来源的季节变化动态，揭示黄河乌兰布和沙漠河岸旱柳的水分利用策略，了解其在干旱条件下的适应性，为黄河流域荒漠区生态保护和修复提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北缘的刘拐沙头，紧邻黄河西岸，地理坐标为 40°09′59″N，106°50′28″E。该区域属中温带干旱季风气候，降水较少且蒸发较强，多年平均降水量仅 142.7 mm，而年平均蒸发量高达 2 397.6 mm，年平均气温 8.0 ℃。区域内风沙天气频繁，以 3—5 月最多[22]，年平均风速 3.7 m/s，主风向为西北风，每年大风日数 10 ～ 32 d，扬沙日数 75 ～ 79 d，沙尘暴日数 19 ～ 22 d。该区域大风季产生的风沙会直接进入黄河，是黄河沿岸风沙危害最严重的区域之一。该区域植物覆盖程度较低，植被以灌草为主，在沙漠沿岸有旱柳分布。旱柳是高大乔木，大枝斜上，树冠广圆形，枝细长，直立或斜展，耐干旱、水湿、寒冷，为固沙保土和四旁绿化树种，分布范围较广。研究区内沙生与旱生植物还有沙枣 *Elaeagnus angustifolia*、梭梭 *Haloxylon ammodendron*、沙拐枣 *Calligonum mongolicum*、黑沙蒿 *Artemisia ordosica* 和沙蓬 *Agriophyllum squarrosum* 等。土壤以细砂为主（表 1）。

表 1 研究样地土壤粒径组成
Table 1 Soil particle size composition of the study plot

土层深度 Soil depth /cm	颗粒含量 Granule content /%				
	粗砂 Coarse sand	中砂 Medium sand	细砂 Fine sand	极细砂 Very fine sand	黏粉粒 Silt and clay
0 ～ 20	2.23±1.71	24.66±1.61	66.32±0.99	6.30±0.14	0.46±0.03
20 ～ 40	0.43±0.30	25.23±2.55	69.79±3.05	4.29±0.20	0.26±0.06
40 ～ 60	2.16±1.53	19.74±0.45	71.21±1.09	6.46±0.37	0.40±0.03
60 ～ 80	—	25.83±2.55	65.89±2.52	6.95±0.32	1.33±0.09
80 ～ 100	—	25.00±6.68	62.82±6.25	9.11±1.33	3.07±0.43
100 ～ 120	—	26.60±3.98	66.21±4.24	6.41±0.31	0.79±0.14

1.2 样品采集与测定

1.2.1 样品采集

选择黄河乌兰布和沙漠段河岸旱柳林为对象，于 2022 年和 2023 年 5—9 月进行样品采集。采集样品包括样地内旱柳、土壤、地下水及黄河水，8:00—11:00 完成采集。

植物及土壤样品采集：选择 3 株与平均值相近的旱柳作为固定样株，采集直径 3 ～ 5 mm 的 2 年生以上枝条，每株采集 3 个重复，将韧皮部剥离，木质部样品装入 8 mL 玻璃样品瓶中，拧紧瓶盖，用封口膜密封。在样株附近采集土壤样品，利用土钻采集 200 cm 深度范围内土壤，共采集 10 层，每层 20 cm，土壤样品装入 8 mL 样品瓶中，拧紧瓶盖，用封口膜密封。将样品带回实验室，置于冰箱中 −18 ℃低温保存。

降水、地下水及黄河水采集：降水样品于中国林业科学研究院沙漠林业实验中心雨量筒中采集，每次降水后立即采集降水样品；在研究区附近的监测井中采集地下水；利用带长绳不锈钢水样采集器在黄河岸边采集黄河水样品。降水、地下水和黄河水样品均装入 4 mL 采样瓶中，拧紧瓶盖，利用封口膜密封。水样品带回实验室后置于冰箱中 0 ℃冷藏保存。

1.2.2 样品测定

所有采集样品送至深圳市华科精信检测科技有限公司进行测定，采用冷冻真空水分提取装置提取植物枝条和土壤中的水，所有水样品采用 Finnigan Delta V Advantage 同位素比率质谱仪（Isotope ratio mass spectrometer）和 Flash 2000 HT 元素分析仪（Elemental analyzer）测定，测定精度为 δD：± ＜ 1.0‰，$\delta^{18}O$：± ＜ 0.2‰。

国际上规定水同位素比值用相对维也纳标准平均海洋水（V-SMOW）的千分差（‰）表示，将采集到的样品的同位素比值（R_{sample}）与标准物质的同位素比值（$R_{standard}$）作比较，比较结果称为样品的 δ 值，计算公式为：

$$\delta = (R_{sample} / R_{standard} - 1) \times 1\,000 。 \quad (1)$$

式中：R_{sample} 是采集的水样品中重同位素 D、^{18}O 和轻同位素 ^{1}H、^{16}O 的丰度之比，$R_{standard}$ 是国际通用标准物的重轻同位素丰度之比。

1.3 数据分析

黄河水位数据采用离研究区最近的巴彦高勒水文站数据，数据来源于黄河网（http://www.yrcc.gov.cn/）。利用 MixSIAR 模型计算不同潜在水源对植物的贡献率，该模型是 R 语言中的 R 包，可以计算不同水源的贡献比例。运行 R 语言，在模型中输入各潜在水源的 δD、$\delta^{18}O$ 值，木质部水的 δD、$\delta^{18}O$ 值，分馏数据设置为 0，运行步长设置为“long”，模型误差设置为“Residual only”[23]，应用 Gelman 和 Geweke 判断收敛，不收敛则增加步长，输出结果为各潜在水源贡献率的平均值 [24]。潜在水源分为浅层土壤水（0 ～ 60 cm）、中层土壤水（60 ～ 120 cm）、深层土壤水（120 ～ 200 cm）、地下水和黄河水。利用 SPSS 18.0 软件对数据进行描述统计及单因素方差分析，利用 Origin 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水体稳定氢氧同位素特征

不同水体的稳定氢氧同位素值特征如图 1 所示。由降水的 δD、$\delta^{18}O$ 值得出区域大气降水线方程（LMWL）：$\delta D=7.74\delta^{18}O+2.90$（$R^2=0.971$），全球大气降水线方程（GMWL）：$\delta D=8\delta^{18}O+10$[25]，区域大气降水线方程截距和斜率均低于全球大气降水线方程。降水的 δD、$\delta^{18}O$ 值分别为 −109.1‰～ 21.5‰、−14.5‰～ 2.2‰；旱柳木质部水的 δD、$\delta^{18}O$ 值分别为 −89.8‰～ −69.7‰、−12.6‰～ −8.2‰；土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值分别为 −90.5‰～ −26.9‰、−14.4‰～ −0.2‰；地下水的 δD、$\delta^{18}O$ 值分别为 −75.8‰～ −66.0‰、−10.4‰～ −8.2‰；黄河水的

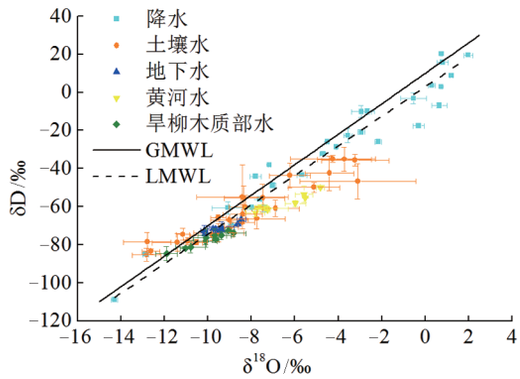


图 1　研究区各水体 δD、$\delta^{18}O$ 值特征

Fig. 1　Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ values of each water body in the study area

δD、$\delta^{18}O$ 值分别为 −65.5‰～−48.8‰、−8.4‰～−4.6‰。各水体的 δD、$\delta^{18}O$ 值的特征表现为：土壤水整体上波动较大，黄河水次之，旱柳木质部水变化较小，地下水变化最小。旱柳木质部水、黄河水的 δD、$\delta^{18}O$ 值主要分布在当地大气降水线（LMWL）的右下方，表明存在强烈的蒸发；土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值分布于大气降水线附近，表明大气降水对土壤有一定的补给作用；地下水则比较稳定。

2.2　旱柳木质部水与潜在水源的 δD、$\delta^{18}O$ 变化

旱柳木质部水、土壤水、地下水和黄河水的 δD、$\delta^{18}O$ 值存在明显的年际变化（图 2）。浅层土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值较中层、深层土壤水均偏正，表明其受到强烈蒸发的影响。随着土壤深度的增加，土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值逐渐偏负。深层土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值变化较小，表明其相对稳定。黄河水的 δD、$\delta^{18}O$ 值较地下水、旱柳木质部水整体偏正，表明其受蒸发影响较大。旱柳木质部水和地下水的 δD、$\delta^{18}O$ 值与土壤水和黄河水相比整体偏负。旱柳木质部水、地下水和深层土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值相近，表明旱柳主要水分来源可能是深层土壤水和地下水。

不同年份旱柳木质部水、土壤水、地下水和黄河水的 δD、$\delta^{18}O$ 值具有不同的年内、年际变化特征（表 2）。旱柳木质部水和地下水的 δD、$\delta^{18}O$ 值年内变化较小：2022、2023 年旱柳木质部水的 δD 值变异系数分别为 6.23% 和 4.47%，$\delta^{18}O$ 值的变异系数分别为 10.39% 和 7.46%；2022、2023 年地下水的 δD 值变异系数分别为 3.68% 和 3.02%，$\delta^{18}O$ 值的变异系数分别为 5.54% 和 6.32%。2022、2023 年旱柳木质部水的 δD、$\delta^{18}O$ 值均差异显著（$P < 0.05$），表明其年际变化均较大；2022、2023 年地下水的 δD、$\delta^{18}O$ 差异不显著，表明其年际变化较小。土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值年内、年际变化均较大，δD、$\delta^{18}O$ 值变异系数最小为 22.17%，最大为 38.64%，且不同年份的 δD、$\delta^{18}O$ 值差异显著（$P < 0.05$），表明土壤水受外界环境影响较

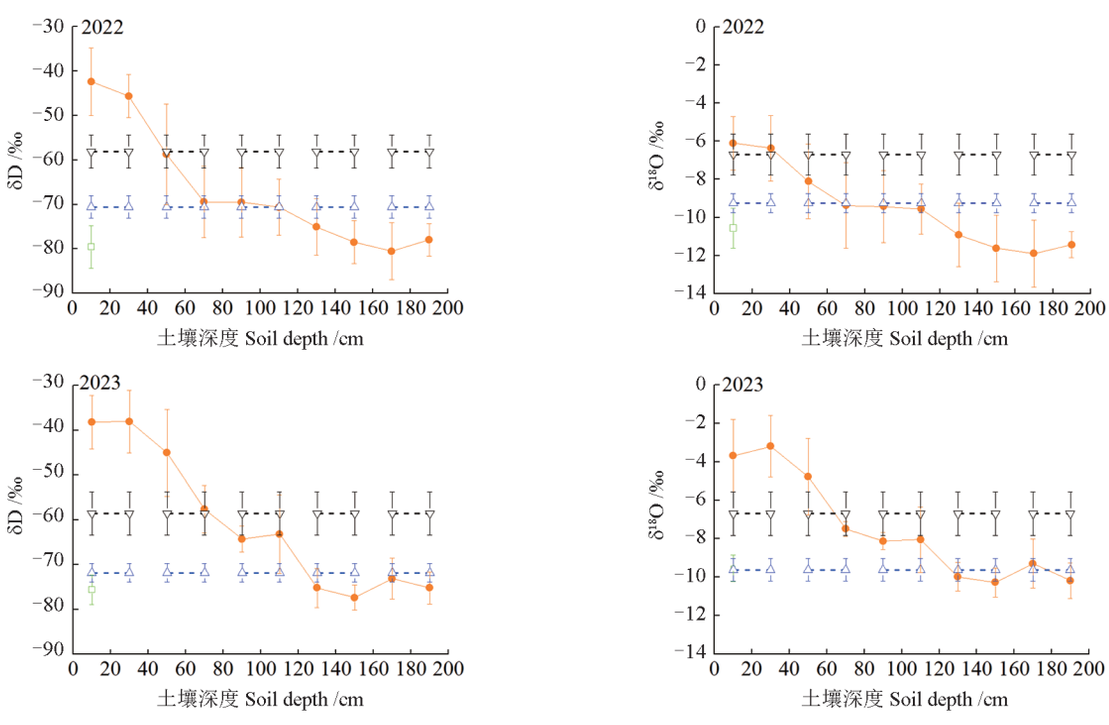


图 2　不同年份各潜在水源与旱柳木质部水的 δD、$\delta^{18}O$ 值变化特征

Fig. 2　Variation characteristics of δD and $\delta^{18}O$ values of potential water sources and xylem water of *Salix matsudana* in different years

大。2022、2023 年黄河水的 δD、$\delta^{18}O$ 值变异系数较大，但不同年份间差异不显著，表明黄河水的 δD、$\delta^{18}O$ 值具有明显的季节变化，但年际间变化相对较稳定。

表 2 各潜在水源与旱柳木质部水的 δD、$\delta^{18}O$ 值年内、年际变化特征 †

Table 2 Variation characteristics of δD and $\delta^{18}O$ values of potential water sources and xylem water of *Salix matsudana*

变化特征 Variation characteristics	年份 Year	旱柳木质部水 Xylem water of *Salix matsudana*		土壤水 Soil water		地下水 Groundwater		黄河水 Yellow River water	
		δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$
平均值 Mean /‰	2022	−79.6±4.8 a	−10.6±1.1 a	−66.8±14.7 a	−9.5±2.6 a	−70.6±2.5 a	−9.2±0.5 a	−58.1±3.7 a	−6.7±1.1 a
	2023	−75.6±3.3 b	−9.5±0.7 b	−60.7±15.8 b	−7.5±2.9 b	−71.8±2.1 a	−9.6±0.6 a	−58.6±4.8 a	−6.7±1.1 a
变异系数 Cofficient of variation /%	2022	6.23	10.39	22.17	27.75	3.68	5.54	6.59	16.74
	2023	4.47	7.46	26.31	38.64	3.02	6.32	8.54	17.81

† 不同小写字母表示 2022 年和 2023 年差异显著（$P < 0.05$）。Different lower case letters mean significant differences between 2022 and 2023 ($P < 0.05$).

2.3 各潜在水源对旱柳水分来源的贡献率

潜在水源对旱柳水分的贡献率如图 3 所示。结果表明，旱柳的水分来源具有明显的季节变化。2022 年 5 月，旱柳主要吸收深层土壤水，吸收比例达 84.1%，对浅层土壤水、中层土壤水、地下水和黄河水的吸收比例分别为 2.1%、5.2%、4.8% 和 3.7%。6、7、8、9 月旱柳吸收深层土壤水的比例相对减少，分别为 44.6%、36.9%、26.0% 和 54.1%；6、7、8、9 月旱柳对中层土壤水和地下水的吸收比例增加幅度较大，对中层土壤水的吸收比例分别为 29.5%、18.9%、13.8% 和 12.4%。这可能与生长季降水有一定关系，降水入渗导致旱柳对浅中层土壤水的吸收比例均有所增加。6、7、8、9 月旱柳对地下水的吸收比例分别为 11.7%、26.3%、43.1% 和 23.9%。同时，6、7、8、9 月旱柳对浅层土壤水和黄河水的吸收比例相较于 5 月小幅增加。2023 年 5—9 月，旱柳主要吸收深层土壤水和地下水，吸收深层土壤水的比例分别为 65.6%、38.9%、63.3%、52.3% 和 30.2%，吸收地下水的比例分别为 14.3%、31.6%、18.6%、29.1% 和 48.2%。中层土壤水和黄河水对旱柳的贡献比例均比较低，浅层土壤水对旱柳的贡献比例最小，仅有 1.7% ～ 5.6%。这可能是由于降水未能有效补给浅中层土壤水，导致旱柳吸收浅中层土壤水比例较低。

2.4 旱柳水分来源对黄河水位的响应

生长季黄河水位（高程）具有明显的动态变化（图 4）。2022 年和 2023 年同一时期内黄河水位差异极显著（$P < 0.01$）。2022 年生长季平均水位为 1 048.88 m，2023 年同期水位为 1 049.14 m。2022、2023 年生长季最高水位均为 1 050.10 m，2022 年水位变化 1.96 m，2023 年水位变化 1.52 m。

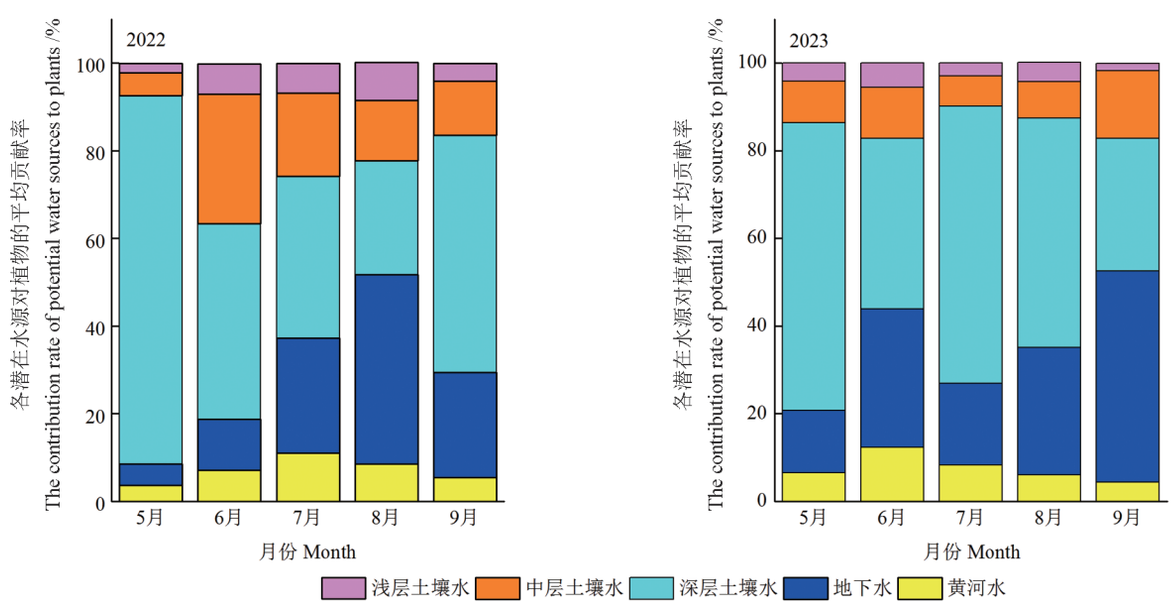


图 3 旱柳对各潜在水源的利用比例

Fig. 3 Utilization ratio of *Salix matsudana* to each potential water source

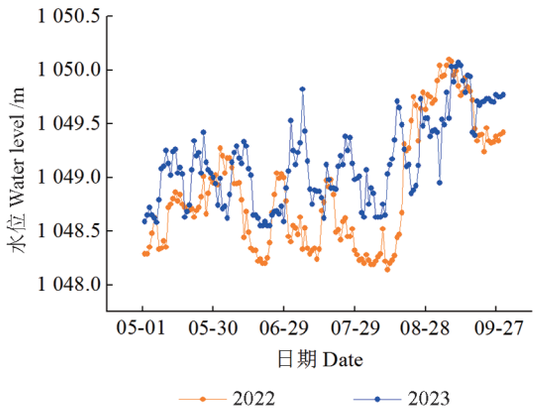


图 4　生长季黄河水位变化

Fig. 4　Water level changes of the Yellow River during the growing season

不同潜在水源对旱柳水分的贡献率与黄河水位的关系如图 5 所示。黄河水位升高，浅中层土壤水对旱柳水分的贡献率有所降低（r=−0.234）。地下水对旱柳的贡献率与黄河水位呈正相关。随着黄河水位的升高，地下水对旱柳水分来源的贡献率有所提升（r=0.350），黄河水对旱柳水分来源的贡献率降低（r=−0.409）。

3　讨　论

3.1　不同水体氢氧稳定同位素特征

研究区大气降水线方程（LMWL）为 δD=7.74δ^{18}O+2.90（R^2=0.971），与全球大气降水线方程（GMWL）相比，当地大气降水线方程的斜率和截距均较小，表明研究区气候比较干燥，蒸发较为强烈。旱柳木质部水的 δ^{18}O 值为 −12.6‰～−8.2‰，与准噶尔盆地（−11.930‰～−3.980‰）[8] 和艾比湖流域（−13.993‰～−3.404‰）[26] 的研究结果相符，这表明干旱区植物体内 δ^{18}O 呈现相对一致的变化规律。

地下水的 δD、δ^{18}O 值比较稳定，季节变化较小。相关研究的稳定氢氧同位素特征表明，黄河流域内蒙古段地下水更新较慢，没有明显的季节变化 [27]。本研究生长季黄河水的 δD、δ^{18}O 值分别为 −65.5‰～−48.8‰、−8.4‰～−4.6‰，较裴森森等 [27] 的研究结果（−76.9‰～−54.1‰、−11.0‰～−7.1‰）偏正。在气温较高的生长季，地表水在蒸发分馏作用下会产生同位素富集现象 [28]。本研究中，地下水与黄河水的同位素分布证明两者之间存在水力联系，这与前人研究结果一致 [27]。

研究区浅层土壤水的 δD、δ^{18}O 值较深层土壤水偏正，表明其受到强烈蒸发的影响，土壤水的 δD、δ^{18}O 富集，这与黄河焦作段浅层土壤水 δD、δ^{18}O 值变化较为一致 [19]。降水入渗、土壤蒸发、植物蒸腾、地表水与地下水补给都会影响土壤水的 δD，使其处于动态变化的状态。随着土壤深度

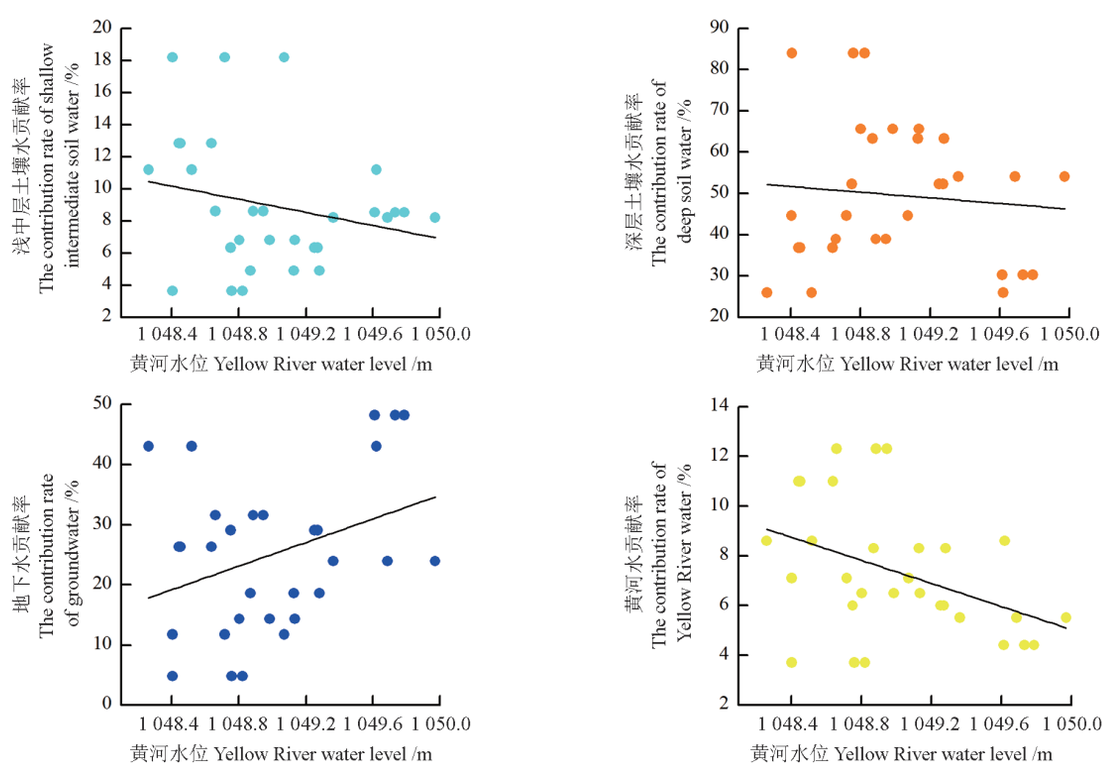


图 5　旱柳水分来源对黄河水位的响应

Fig. 5　Response of water source of *Salix matsudana* to water level of Yellow River

的增加，土壤水的 δD 受到的蒸发分馏作用逐渐减弱，其值逐渐偏负，这与艾比湖流域土壤水 δD 的垂直分布情况一致 [26]。深层土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值变化较小，表明深层土壤水 δD、$\delta^{18}O$ 较稳定。黑河流域显著变异层以下，土壤水与地下水的 $\delta^{18}O$ 值的变化规律相似 [29]。塔里木河下游相关研究表明，地下水通过水分提升作用补给深层土壤水，弱化了同位素分馏作用，使得土壤水的 δD、$\delta^{18}O$ 值趋向于稳定 [30]。

3.2 河岸植物水分来源

旱柳的水分来源具有明显的季节变化，且以深层土壤水和地下水为主要水分来源。旱柳水分来源在 2022 和 2023 年生长季之间差异不显著，表明其具有相对较稳定的水分来源。这符合干旱区荒漠河岸林乔木的水分利用策略，如石羊河流域旱柳主要利用 20 ～ 100 cm 土壤水（43.99%）和地下水（23.16%）[31]。该区域旱柳生长在湿地上，与本研究区河岸地下水位差距较大，且采样深度有所不同，导致结果有一定差异，但两个区域旱柳主要水分来源均比较稳定。同为河岸乔木的胡杨在不同研究区的水分来源比较一致；黑河下游和塔里木河流域胡杨的主要水源为深层土壤水和地下水 [16,29-30,32-33]；北美西部干旱地区的杨树十分依赖地下水和深层土壤水，尤其在生长季后期利用更多的是深层水源 [34]。研究区降水有限，2022 年和 2023 年 5—9 月降水量分别为 43.1、39.3 mm，浅层土壤水补给来源受限，同时由于气候干燥和强烈蒸发，浅层土壤水分含量较低（0.91% ～ 2.64%），浅层土壤水对旱柳水分来源的贡献比例极低，旱柳为了生存只能依赖稳定的深层土壤水和地下水。

3.3 河岸植物水分来源与河流水位的关系

黄河水位在一定程度上会影响旱柳的水分来源，尤其影响旱柳对地下水和黄河水的利用比例，这也是旱柳适应性的体现。本研究中，旱柳水分来源存在明显的年内、年际差异，但是对河水的吸收比例较低。黄河兰州段水位下降后，旱柳和多枝柽柳水分来源会向更深层转变，增加对深层土壤水、河水和地下水的利用率 [18]。不同时期美国犹他州红丘峡谷河岸植物 *Acer negundo* 和 *Acer grandidentatum* 对河水的直接利用比例较低 [13-15]。类似的结论也在我国黑河流域的胡杨 [29] 和法国西南部锡龙河峡谷的 *Fagus sylvatica* 等河岸植物水分来源上有所体现 [35]。但是，河水有效补给地下水成为间接水源，使得河岸带树木对河水的吸收量在枯水年和丰水年有显著差异，例如黑河的胡杨 [29] 和潮白河岸的垂柳 *Salix babylonica*[36]。本研究发现，随着黄河水位的升高，旱柳对地下水的吸收比例增加，证明地下水与黄河水之间存在水力联系。这一结果与以往在黄河流域内蒙古段的研究结果类似 [27]。从利用比例角度分析，黄河水位对植物吸收地下水的比例影响最大。由此可见，黄河水位对于河岸地下水稳定与河岸植物的生存至关重要。

在人为因素和气候变化的影响下，地下水供应减少造成的水资源压力，可能威胁主要依赖地下水的河岸林地的健康和功能 [37]。塔里木盆地的河岸林生态系统受到过度利用的威胁，只有实施引水工程，才能保持其生态功能 [38]。目前，在河岸带水资源管理决策中很少考虑到黄河干流河岸植物的水需求。黄河水流状况及人为因素影响河岸植被水分来源，若河岸植物无法适应快速的水文变化，可能导致河岸林退化。黄河干流人为引水比较困难，因此还需深入研究河岸林植物水分来源对黄河水位的响应机制，进一步从水分利用角度揭示其对干旱的适应性。

4 结 论

在黄河“几字弯”乌兰布和沙漠河岸带，生长季旱柳木质部水、土壤水、黄河水的 δD、$\delta^{18}O$ 值具有明显的年内、年际变化，而地下水的 δD、$\delta^{18}O$ 值相对较稳定。旱柳的水分来源具有明显的季节变化。中层土壤水的贡献比例变化较为明显，主要受生长季降水的影响。旱柳水分来源的年际变化不显著，以相对较稳定的深层土壤水为主要水分来源，地下水次之。随着黄河水位的升高，旱柳增加了对地下水的吸收比例，但是对黄河水的吸收比例降低，这是旱柳适应性的体现。黄河水位对于河岸地下水稳定与河岸植物的生存至关重要。因此，在黄河“几字弯”乌兰布和沙漠河岸带开展生态修复，要充分考虑不同水分来源植物的混交配置，达到合理利用水资源的目的。

参考文献：

[1] Pettit N E, Froend R H. How important is groundwater availability and stream perenniality to riparian and floodplain tree growth?[J]. Hydrological Processes,2018,32:1502-1514.

[2] Cole L J, Stockan J, Helliwell R. Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: a review[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2020,296:106891.

[3] Chen Y N, Chen Y P, Zhou H H, et al. Research advances in plant

physiology and ecology of desert riparian forests under drought stress[J]. Forests,2022,13:619.

[4] 朱绪超 , 袁国富 , 邵明安 , 等 . 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征 [J]. 植物生态学报 ,2015,39(11):1053-1061.
Zhu X C, Yuan G F, Shao M A, et al. Spatial pattern of riparian vegetation in desert of the lower Tarim river basin[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2015,39(11):1053-1061.

[5] 曾巧 , 马剑英 . 黑河流域不同生境植物水分来源及环境指示意义 [J]. 冰川冻土 ,2013,35(1):148-155.
Zeng Q, Ma J Y. Plant water sources of different habitats and its environmental indication in Heihe river basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(1):148-155.

[6] 龙翔 , 孙自永 , 周爱国 , 等 . 黑河中游河岸带柽柳水分来源的 ^{18}O 同位素示踪研究 [J]. 干旱区资源与环境 ,2014,28(7):150-155.
Long X, Sun Z Y, Zhou A G, et al. Using ^{18}O stable isotopes to trace the water sources of riparian *Tamarix* in middle reaches of Heihe river[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014,28(7):150-155.

[7] Wu H W, Zhao G Q, Li X Y, et al. Identifying water sources used by alpine riparian plants in a restoration zone on the Qinghai-Xizang Plateau: evidence from stable isotopes[J]. Science of the Total Environment,2019,697:134092.

[8] 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.

[9] Ogle K, Tucker C, Cable J M. Beyond simple linear mixing models: process-based isotope partitioning of ecological processes[J]. Ecological Applications,2014,24(1):181-195.

[10] 王艳莉 , 刘立超 , 高艳红 , 等 . 基于较大降水事件的人工固沙植被区植物水分来源分析 [J]. 应用生态学报 ,2016,27(4):1053-1060.
Wang Y L, Liu L C, Gao Y H, et al. Analysis of water sources of plants in artificial sand-fixation vegetation area based on large rainfall events[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(4):1053-1060.

[11] Penna D, Hopp L, Scandellari F, et al. Ideas and perspectives: tracing terrestrial ecosystem water fluxes using hydrogen and oxygen stable isotopes: challenges and opportunities from an interdisciplinary perspective[J]. Biogeosciences,2018,15:6399-6415.

[12] 周海 , 赵文智 , 何志斌 . 两种荒漠生境条件下泡泡刺水分来源及其对降水的响应 [J]. 应用生态学报 ,2017,28(7):2083-2092.
Zhou H, Zhao W Z, He Z B. Water sources of *Nitraria sibirica* and response to precipitation in two desert habitats[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(7):2083-2092.

[13] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water[J]. Nature,1991,350:335-337.

[14] Bowling D R, Schulze E S, Hall S J. Revisiting streamside trees that do not use stream water: Can the two water worlds hypothesis and snowpack isotopic effects explain a missing water source?[J]. Ecohydrology,2017,10:e1771.

[15] Oerter E J, Siebert G, Bowling D R, et al. Soil water vapour isotopes identify missing water source for streamside trees[J]. Ecohydrology,2019,12:e2083.

[16] 周天河 , 赵成义 , 吴桂林 , 等 . 塔里木河上游胡杨 *Populus euphratica*、柽柳 *Tamarix ramosissima* 水分来源的稳定同位素示踪 [J]. 中国沙漠 ,2017,37(1):124-131.
Zhou T H, Zhao C Y, Wu G L, et al. Application of stable isotopes in analyzing the water sources of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in the upstream of Tarim river[J]. Journal of Desert Research,2017,37(1):124-131.

[17] 李亚飞 , 于静洁 , 陆凯 , 等 . 额济纳三角洲胡杨和多枝柽柳水分来源解析 [J]. 植物生态学报 ,2017,41(5):519-528.
Li Y F, Yu J J, Lu K, et al. Water sources of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in Ejina Delta, the lower reaches of the Heihe river, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2017,41(5):519-528.

[18] 苏鹏燕 , 张明军 , 王圣杰 , 等 . 基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河岸植物水分来源 [J]. 应用生态学报 ,2020,31(6):1835-1843.
Su P Y, Zhang M J, Wang S J, et al. Water sources of riparian plants based on stable hydrogen and oxygen isotopes in Lanzhou section of the Yellow River, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(6):1835-1843.

[19] 王继华 , 郑凯 , 豆敬峰 , 等 . 黄河焦作段河岸植物水分来源同位素水文学解析 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版),2024,43(4):87-95.
Wang J H, Zheng K, Dou J F, et al. Isotope hydrological analysis of water source for riparian plants in Jiaozuo Section of the Yellow River[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2024,43(4):87-95.

[20] 于晓雯 , 刘华民 , 王立新 , 等 . 基于稳定同位素技术的黄河支流河岸植被水分来源解析 [J]. 水土保持通报 ,2021,41(5):75-82,91.
Yu X W, Liu H M, Wang L X, et al. Analysis on water sources of riverbank vegetation in tributary of Yellow River based on stable isotope technique[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,

2021,41(5):75-82,91.

[21] Chen Y N, Li W H, Zhou H H, et al. Analysis of water use strategies of the desert riparian forest plant community in inland rivers of two arid regions in northwestern China[J]. Biogeosciences Discussions,2014,11:14819-14856.

[22] 刘芳 , 郝玉光 , 辛智鸣 , 等 . 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征 [J]. 中国沙漠 ,2014,34(5):1200-1207.
Liu F, Hao Y G, Xin Z M, et al. The surface aeolian-sand flow structure in the northeastern margin of the Ulanbuh desert[J]. Journal of Desert Research,2014,34(5):1200-1207.

[23] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2017,609:27-37.

[24] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, et al. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models[J]. PeerJ,2018,6:e5096.

[25] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961,133:1702-1703.

[26] 李文静 , 吕光辉 , 张磊 , 等 . 干旱区荒漠植物体内潜在水源差异及利用策略分析 [J]. 生态环境学报 ,2019,28(8):1557-1566.
Li W J, Lyu G H, Zhang L, et al. Analysis of potential water source differences and utilization strategies of desert plants in arid regions[J]. Ecology and Environmental Sciences,2019,28(8): 1557-1566.

[27] 裴森森 , 罗艳云 , 潘浩 , 等 . 基于稳定氢氧同位素的黄河流域内蒙古段水体转化关系 [J]. 环境科学 ,2024,45(11):6604-6615.
Pei S S, Luo Y Y, Pan H, et al. Water transformation relationship in Inner Mongolia section of the Yellow River basin based on stable hydrogen and oxygen isotopes[J]. Environmental Science, 2024,45(11):6604-6615.

[28] 张炎炎 . 基于同位素和水化学方法的党河流域径流来源示踪研究 [D]. 兰州 : 西北师范大学 ,2024:39-40.
Zhang Y Y. Trace study of runoff source in the Dang river basin based on isotope and water chemistry methods[D]. Lanzhou: Northwest Normal University,2024:39-40.

[29] Si J H, Feng Q, Cao S K, et al. Water use sources of desert riparian *Populus euphratica* forests[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2014,186:5469-5477.

[30] 张江 , 李桂芳 , 贺亚玲 , 等 . 基于稳定同位素技术的塔里木河下游不同林龄胡杨的水分利用来源 [J]. 生物多样性 , 2018,26(6):564-571.
Zhang J, Li G F, He Y L, et al. Water utilization sources of *Populus euphratica* trees of different ages in the lower reaches of Tarim river[J]. Biodiversity Science,2018,26(6):564-571.

[31] 王蕾 . 民勤绿洲不同生境优势种植物的水分利用及生态恢复研究 [D]. 兰州 : 西北师范大学 ,2023:29.
Wang L. Study on water use and ecological restoration of dominant plants in different habitats of Minqin oasis[D]. Lanzhou: Northwest Normal University,2023:29.

[32] 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.

[33] Li E G, Tong Y Q, Huang Y M, et al. Responses of two desert riparian species to fluctuating groundwater depths in hyperarid areas of northwest China[J]. Ecohydrology,2019,12:e2078.

[34] Flanagan L B, Orchard T E, Tremel T N, et al. Using stable isotopes to quantify water sources for trees and shrubs in a riparian cottonwood ecosystem in flood and drought years[J]. Hydrological Processes,2019,33(24):3070-3083.

[35] Barbeta A, Jones S P, Clavé L, et al. Unexplained hydrogen isotope offsets complicate the identification and quantification of tree water sources in a riparian forest[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2019,23:2129-2146.

[36] Li Y, Ma Y, Song X F, et al. Quantifying river water contributions to the transpiration of riparian trees along a losing river: lessons from stable isotopes and an iteration method[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2023,27:3405-3425.

[37] Kibler C L, Schmidt E C, Roberts D A, et al. A brown wave of riparian woodland mortality following groundwater declines during the 2012-2019 California drought[J]. Environmental Research Letters,2021,16(8):084030.

[38] Thomas F M, Lang P. Growth and water relations of riparian poplar forests under pressure in Central Asia’s Tarim river basin[J]. River Research and Applications,2021,37(2):233-240.

[本文编校：戴欧琳]