应用生态学报 2020年6月 第31卷 第6期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jun. 2020, 31(6): 1835-1843 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202006.022

基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河岸植物水分来源

苏鹏燕 张明军* 王圣杰 邱 雪 王家鑫 杜勤勤 郭 蓉 车存伟
(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘 要 多枝柽柳和旱柳是北方地区河岸生态修复的良好树种,具有护河防洪、调节区域气候的作用和营造河岸地带植被景观的功能。本研究选取黄河兰州段沿岸2处样点,采集了多枝柽柳和旱柳木质部以及各潜在水源的样品,利用氧同位素直接对比法、贝叶斯混合模型MixSIAR和相似性比例指数(PS指数),分析了多枝柽柳和旱柳对各潜在水源的利用率以及两者之间的水分利用关系。结果表明:在整个生长季,浅层土壤水(0~30 cm)是多枝柽柳和旱柳的主要水分来源,利用率分别为28.3%和24.4%,多枝柽柳对河水的利用率最小(16.6%),旱柳对地下水的利用率最小(17.9%);在土壤含水量较低的月份,植物会增加对河水和地下水的利用比例,样点S_1和S_2的PS指数分别为91.0%和87.7%,两个样点均在5月的PS指数最大,不同月份的水分利用关系存在一定的差异;处于河漫滩这一特殊地理位置,多枝柽柳和旱柳对各潜在水源的利用比较平均,最大程度地获取各潜在水源的水分,是一种最优的吸水模式。本研究可为开展黄河兰州段河岸休闲旅游活动和黄河流域生态环境保护中植物水分管理提供一定的理论基础。

关键词 河岸植物; 氢氧稳定同位素; MixSIAR模型; 水分来源; PS指数

Water sources of riparian plants based on stable hydrogen and oxygen isotopes in Lanzhou section of the Yellow River, China. SU Peng-yan, ZHANG Ming-jun*, WANG Sheng-jie, QIU Xue, WANG Jia-xin, DU Qin-qin, GUO Rong, CHE Cun-wei (*College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *China*).

Abstract: As plant species for riparian ecological restoration in northern China, *Tamarix ramosissima* and *Salix matsudana* play an important role in river protection, flood control, regional climate regulation, and landscape construction of riparian vegetation. Two sampling sites were selected in the riparian zones along the Lanzhou section of Yellow River, where plant xylems and potential water sources were collected. The direct comparison method, Bayesian mixture model MixSIAR and the proportional similarity index (PS index) were used to determine the proportions of water utilization for each potential water source and the relationship of two species in water utilization. The results showed that shallow soil (0-30 cm) was the main water source during growing season, with utilization ratio being 28.3% for *T. ramosissima* and 24.4% for *S. matsudana*. For *T. ramosissima*, river water had the lowest contribution (16.6%), and for *S. matsudana*, groundwater contributed the least (17.9%). In the months with low soil moisture, plants increased the utilization ratios of river water and groundwater. The PS index at the sampling site S_1 and S_2 was 91.0% and 87.7%, respectively. On a monthly basis, the index in May was the highest, indicating an inter-month divergence in water use relationship. At the floodplain, there were even utilization ratios for each potential water source, which is an optimal strategy to obtain water from each potential source to the maximum extent. Our results provided theoretical basis for riparian tourism development along the

本文由国家自然科学基金项目(41771035)和甘肃省高等学校科研项目(2018C-02)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41771035) and Scientific Research Program of Higher Education Institutions of Gansu Province (2018C-02).
2019-12-19 Received, 2020-03-31 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mjzhang2004@163.com

Lanzhou section of the Yellow River and plant water management in environment protection in the Yellow River Basin.

Key words: riparian plant; stable hydrogen and oxygen isotopes; MixSIAR model; water source; PS index.

黄河是我国第二大河流,黄河流域是我国重要的生态屏障。河岸带处于水陆交错地带,是河流生态系统和陆地生态系统进行物质、能量和信息交换的重要过渡带,对水循环的变化比较敏感[1]。对于干旱半干旱地区,河岸带能够调蓄洪水,防止自然灾害,调节区域气候,对维持生物多样性和生态系统稳定性均具有重要意义[2]。河岸植被是河流的基本结构和生态组成部分[3],黄河兰州段河岸植被蕴涵了具有较高开发潜力的植物资源,应对其加强保护,以更好地发挥黄河兰州段河岸植被在城市生态建设中的作用。因此,研究黄河河岸植物水分来源意义重大。1991 年 Dawson 等[4]首次发现河水不是河岸成熟树木的水分来源,之后,不同学者就河岸植物是否使用河水及其形成机制开展了诸多研究。

2017 年 Bowling 等[5]重新研究了 Dawson 等[4]在 1991 年的采样点,发现双同位素方法不能确定这些河岸树木的水源,尽管树木离河流很近,但土壤水可能是最接近的水源;2019 年 Oerter 等[6]利用氢氧同位素技术再次研究了这一采样点,发现木质部水的同位素组成与水蒸气的同位素组成相似,证实了这些河岸树木不以河水作为水分来源的结论;在其他的研究地区也得出了类似的结论[7-12],如法国西南部[7]、美国阿巴拉契亚山脉[8]和瑞士高原[9]等。然而,也有一些学者研究发现,一些干旱区和高寒区的河岸植物会以河水作为水分来源[13-15],如李亚飞等[13]研究发现,额济纳三角洲河水为多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)和胡杨(*Populus euphratica*)的主要补给水源,胡杨对河水的利用比例为 68%;周天河等[14]研究发现,塔里木河上游靠近河岸的胡杨和柽柳(*Tamarix chinensis*)均能直接利用河水,胡杨和柽柳对河水的利用比例分别为 14.2%和 35.2%;赵国琴等[15]研究发现,青海湖流域河岸边的具鳞水柏枝(*Myricaria squamosal*)对地下水和河水的依赖程度较高。

氢氧稳定同位素被称为“水的指纹”,近年来在生态学的诸多领域中得到广泛应用[16-17],在研究植物水分来源时具有较高的灵敏性和准确性,且与根系调查法相比,对植物的破坏程度较小[18]。植物根系吸收的水分通过木质部运输到叶片之前一般不发生氧同位素的分馏现象,因此可以定量揭示植物的水分来源[19-20]。目前已有很多学者对河岸植物水分来源进行了研究,但国内关于河岸植物的研究大多集中在黑河、塔里木河和青海湖流域[13-15],而对城市河岸植物水分来源研究较少,同时,在模型上主要以 IsoSource 计算植物对各潜在水源的利用率[14,16,20]。

多枝柽柳和旱柳(*Salix matsudana*)为黄河兰州段的优势河岸植物,具有成活率高、生长迅速和适应性强等优点,不仅具有护河防洪、保护岸坡、调节区域气候的作用[21],而且还有美化环境、营造河岸植被景观的功能。但目前缺乏对这两种植物的水分来源的认识。为此,本研究将黄河兰州段作为研究区域,在植物生长期采集多枝柽柳和旱柳木质部及各潜在水源(土壤水、河水和地下水)样品,利用贝叶斯混合模型 MixSIAR 研究黄河兰州段典型河岸植物水分来源,以加深对河岸生态系统的认识,为城市生态建设提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃省兰州市(35°34′—37°07′ N, 102°35′—104°34′ E)位于黄土高原西北部,地处黄河上游,是黄河唯一穿城而过的省会城市,黄河自西南流向东北,横穿全境[22],切穿山岭,形成峡谷与盆地相间的串珠形河谷。兰州市(图 1)总体地势西南高东北低,呈东西狭长带状盆地特征,南北群山对峙[23],平均海拔 1500 m。年均气温 10.3 ℃,年均降水量 324 mm,年均蒸发量 1676 mm,年均日照时数 2447 h,无霜期 180 d,属于温带大陆性气候[24]。土壤以灰钙土为主,成土母质为黄土。自然植被主要是多年生禾草、旱生灌木和小乔木,其中河岸植物主要有旱柳、多枝柽柳、榆树(*Ulmus pumila*)、芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)、酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)和地肤(*Kochia scoparia*)等[25]。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 样品采集 考虑到研究区植被的分布状况以

及采样的便利性，于 2019 年植物生长季在黄河兰州段河岸选取了人为干预较少的金牛街码头（36°09′ N，103°73′ E，S_1）和西沙大桥（36°14′ N，103°61′ E，S_2）两个样点进行样品采集（图 1），为了避免光照、温度等对试验的影响，每次采样尽量保证在08:00—10:00（北京时间）完成。7 月由于刘家峡水库泄洪，河水上涨，样点 S_1 封锁河道，未能采集到样品，样点 S_2 被河水淹没，所以只采集到 6 月。

在对多枝柽柳和旱柳进行样品采集时，选取直径为 3~5 mm 的非绿色枝条作为植物木质部的采集对象，将植物的韧皮部迅速剥离，将木质部装入 10 mL 的玻璃瓶中，拧紧瓶盖，并用封口膜密封冷藏保存，每种植物采集 3 个平行样。在植物旁边进行土壤样品的采集，人工挖取 150 cm 的土壤剖面，对深层土壤样品采集时用土钻协助取样，由于采样时土壤条件及工具的限制，样点 S_1 和 S_2 处 4 月土壤深度取到了 130 cm，样点 S_1 处 5 月取到了 120 cm，土壤样品采样间隔为 10 cm，每层土壤样品分别采集两份，一份装入铝盒，用于土壤含水量的测定，每层取 2 个平行样；另一份装入 10 mL 的玻璃采样瓶中，用于土壤水同位素的测定，每层取 2 个平行样。

在每个样点采集河水样品时，先用河水清洗聚乙烯塑料样品瓶 3 次，再进行河水样品的收集，拧紧瓶盖，并用封口膜密封瓶口，冷藏保存。每个样点河水取 3 个平行样，共收集河水样品 27 个。

降水样品取自西北师范大学新校区放置的标准雨量桶，每次降水结束后立即对降水样品进行收集，以减少样品的蒸发。降水样品直接装入 50 mL 塑料瓶中，拧紧瓶盖，并用封口膜密封瓶口，冷藏保存，共收集降水样品 35 个。

地下水样品取自甘肃农业大学南门黄河河岸附近的监测水井，每月采集 1 次，每次取 3 个平行样，共收集 15 个地下水样品。

1.2.2 样品测定　在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室，采用 LI-2100 全自动真空冷凝抽提系统，提取土壤和植物木质部中的水分，利用 Los Gatos Research 公司研发的 T-LWIA-45-EP 型液态水同位素分析仪测定所有样品的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$，$\delta^{18}O$ 的测量精度为±0.3‰，$\delta^{2}H$ 的测量精度为±1‰。

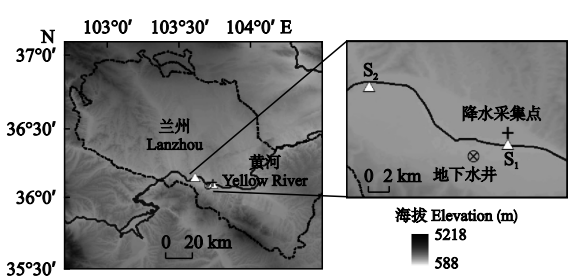


图 1　黄河兰州段河岸植物研究区位置及样点示意图

Fig.1　Location of the study area and sampling sites of riparian plants in Lanzhou section of the Yellow River.

分析得出的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 以相对维也纳标准平均海洋水（Vienna Standard Mean Ocean Water，简称 VSMOW）的千分差值表示：

$$\delta=(R_{sa}/R_{st}-1)\times 1000‰ \quad (1)$$

式中：R_{sa} 为水样中重同位素与轻同位素的比值，即同位素比率，$\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 分别为 $^{18}O/^{16}O$ 和 $^{2}H/^{1}H$；R_{st} 为 VSMOW 中的同位素比率。当 δ 值大于 0 时，表示样品中的重同位素值比标准值富集；当 δ 值小于 0 时，则表示重同位素比标准值贫化。

土壤样品和植物木质部的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 采用经光谱污染校正后的值，光谱污染校正采用 LGR 公司提供的校正方法，降水、河水和地下水直接采用仪器测定的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 值。

1.3　研究方法

1.3.1 MixSIAR 模型　贝叶斯混合模型 MixSIAR 是运用于 R 语言里的一个安装包，用以定量确定各潜在水源对植物水分的贡献率。该模型主要通过选择固定/随机效应、源数据类型、先验分布和误差项来更准确地估算源的贡献比例，融合了贝叶斯混合模型的最新成果。MixSIAR 模型输入数据包括源数据（各潜在水源的 $\delta^{18}O$ 平均值）、混合物数据（木质部 $\delta^{18}O$ 平均值）和分馏数据（设置为 0），马尔卡夫链蒙特卡罗（MCMC）运行步长设置为“long”，模型误差选取“Process only”，在接受模型最终的输出前，需要判断模型是否收敛，Gelman-Rubin 和 Geweke 诊断测试用于确定模型是否接近收敛。

1.3.2 PS 指数　相似性比例指数（PS 指数）是表示生物之间生态位重叠的指标[26]。本研究利用 PS 指数来计算多枝柽柳和旱柳的水分利用情况[27]，PS 指数越大，表明多枝柽柳和旱柳的主要水分来源相同，且对同一水源的竞争越大；PS 指数越小，表明多枝柽柳和旱柳对同一水源的利用比例较小。

$$PS = 1 - 0.5\sum_{i=1}^{n} |p_{1i} - p_{2i}| \quad (2)$$

式中：p_{1i} 和 p_{2i} 分别表示相比较的两种植物对第 i 种水源的利用比例。

1.4　数据处理

采用烘干称重法测定土壤含水量[27]，采用 SPSS 分析各层土壤水分 $\delta^{18}O$ 的差异，运用最小显

著差数(LSD)法对数据进行多重比较,在0.05水平上检验其显著性[19],合并相似的相邻土层,并取平均值,作为划分新土层的同位素值[13]。用 SigmaPlot 12.5 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同水体氢氧稳定同位素特征

图 2 为两个样点不同水体的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 值,由降水氢氧稳定同位素值得出区域大气降水线方程(LMWL): $\delta^{2}H = 7.05\delta^{18}O + 4.60$ ($R^2 = 0.944$, $P < 0.0001$),与全球大气降水线方程(GMWL) $\delta^{2}H = 8\delta^{18}O+10$ 相比[28],研究区大气降水线方程的斜率和截距均较小,表明了该区较为干燥的气候和较强蒸发现象的存在[23]。样点 S_1 土壤水的波动整体小于样点 S_2。样点 S_1 多枝柽柳和旱柳的 $\delta^{18}O$ 小于样点 S_2,样点 S_1 多枝柽柳和旱柳 $\delta^{18}O$ 分别为(−8.92±0.75)‰和(−9.36±0.98)‰;$\delta^{2}H$ 分别为(−70.18±4.03)‰和(−71.6±6.23)‰,样点 S_2 多枝柽柳和旱柳的 $\delta^{18}O$ 分别为(−8.84±0.10)‰和(−8.93±1.33)‰,$\delta^{2}H$ 分别为(−69.57±2.76)‰和(−72.55±5.99)‰。地下水和河水整体上 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 值波动范围较小,样点 S_1 河水 $\delta^{18}O$ 为(−10.61±0.59)‰,$\delta^{2}H$ 为(−73.56±3.34)‰,样点 S_2 河水 $\delta^{18}O$ 为(−10.67±0.23)‰,$\delta^{2}H$ 为(−75.57±1.76)‰;而地下水的 $\delta^{18}O$ 为(−10.6±0.18)‰,$\delta^{2}H$ 为(−72.08±0.41)‰。植物水、土壤水的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{2}H$ 基本位于大气降水线的右下方,说明该地区存在强烈的蒸发作用,与降水相比,同位素富集明显,与植物水相比,土壤水、河水和地下水分布于大气降水线附近,体现了该地区降水对河水、地下水和土壤水具有补给作用。

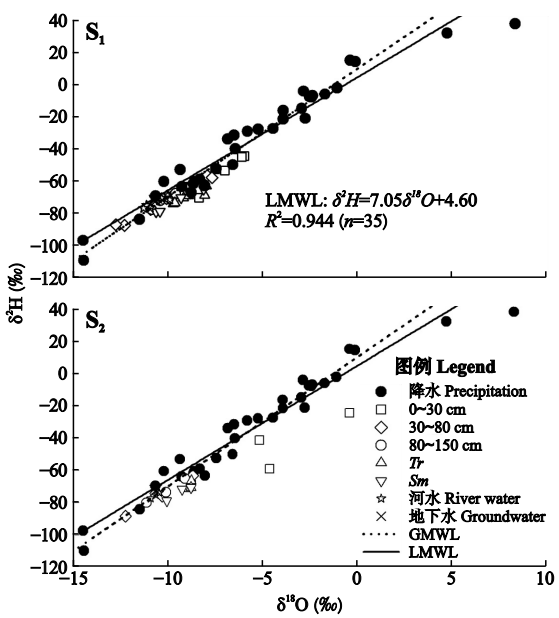


图 2 黄河兰州段大气降水线及植物木质部水、土壤水、河水和地下水 $\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 分布特征

Fig.2 Local meteoric water line and distribution characteristics of $\delta^{2}H$ and $\delta^{18}O$ of stem water, soil water, river water and groundwater in Lanzhou section of the Yellow River.

GMWL: 全球大气降水线 Global meteoric water line; LMWL: 当地大气降水线 Local meteoric water line; *Tr*: 多枝柽柳 *Tamarix ramosissima*; *Sm*: 旱柳 *Salix matsudana*. 下同 The same below.

2.2 植物的主要吸水层位

对土壤水 $\delta^{18}O$ 的差异性进行分析,合并相邻土层,根据结果将土壤水划分为浅层(0~30 cm)、中层(30~80 cm)和深层(80~150 cm)。如图 3 所示,从不同月份来看,样点 S_1 与 S_2 基本保持相同的变化趋势,样点 S_1 处 9 月浅层土壤含水量最大,为(21.7±4.4)%,6 月与 8 月浅层土壤含水量基本一致,4 月与 10 月浅层土壤含水量明显小于其他月份;样点 S_2 处 4 月和 5 月浅层土壤含水量都在 11%左右,而 6 月浅层土壤含水量最小,为(8.0±2.2)%。

总体上,样点 S_1 和 S_2 土壤水 $\delta^{18}O$ 从浅层到深层均呈现出先减少再增加的趋势。样点 S_1 浅层土壤水 $\delta^{18}O$ 为(−7.31±1.90)‰,中层为(−10.26±0.46)‰,深层为(−9.92±0.38)‰;而样点 S_2 土壤水 $\delta^{18}O$ 从浅层到深层依次为(−3.39±3.19)‰、(−10.42±0.65)‰和(−9.90±0.81)‰。由于蒸发作用导致表层的土壤水同位素值偏大,且样点 S_2 表层

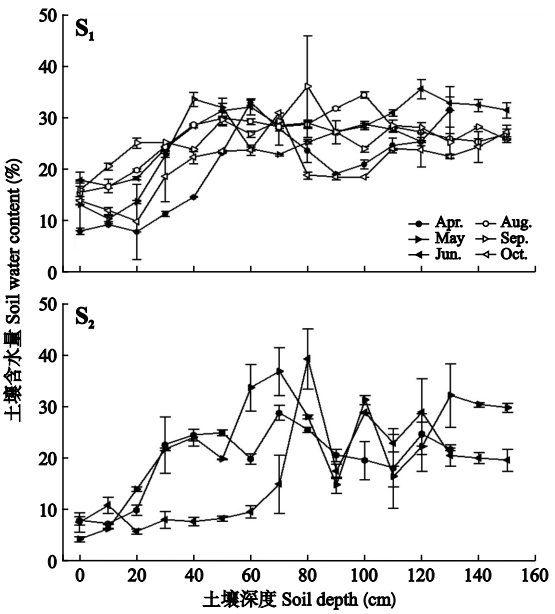


图 3 黄河兰州段河岸植物不同样点土壤剖面含水量变化

Fig.3 Variation of soil profile water content at different sampling sites of riparian plants in Lanzhou section of the Yellow River (mean±SE, $n=2$).

蒸发作用大于 S_1。与多枝柽柳和旱柳木质部水分 $\delta^{18}O$ 有交点的土壤层位,即为多枝柽柳和旱柳的主要吸水层位(图 4)。样点 S_1 多枝柽柳的吸水层位为浅层土壤水,而旱柳为中层和深层土壤水;样点 S_2 多枝柽柳和旱柳的吸水层位均为中层和深层土壤水。样点 S_1 处 4、5 和 6 月多枝柽柳和旱柳的主要吸水层位为浅层和深层土壤水,主要在 20 和 120 cm 埋深处,8 月多枝柽柳和旱柳 $\delta^{18}O$ 与土壤水 $\delta^{18}O$ 相交点在 35 cm 左右,两者的吸水层位为中层土壤水,9 月多枝柽柳和旱柳与各个土壤层都有交点,表明多枝柽柳和旱柳 9 月能从整个土壤剖面吸收水分,而 10 月多枝柽柳和旱柳的吸水层位主要在 70 和 130 cm 附近。样点 S_2 处 4 月多枝柽柳和旱柳的吸水层位与样点 S_1 一致,多枝柽柳的吸水层位为 20 cm,旱柳的为 20 和 130 cm 附近,5 月两者的吸水层位均为中层和深层土壤水,6 月多枝柽柳与土壤水 $\delta^{18}O$ 的交点在 60 和 130 cm 附近,而旱柳的吸水层位为中层土壤水。

2.3　植物对各潜在水源的利用率

利用直接对比法只能初步确定植物的吸水层位,而植物对各潜在水源的利用率需要模型的计算来获得。河岸植物的潜在水源包括土壤水、河水和地下水,因此,本研究区植物的潜在水源为浅层土壤水、中层土壤水、深层土壤水、地下水和河水。利用贝叶斯混合模型 MixSIAR 计算河岸植物多枝柽柳和旱柳对各潜在水源的利用率[29]。如图 5 所示,从整个生长季来看,多枝柽柳和旱柳以浅层土壤水和深层土壤水为主要水源,多枝柽柳对两者的利用率分别为 28.3% 和 19.6%,旱柳分别为 24.4% 和 20.9%;多枝柽柳对河水的利用率最少(16.6%),而旱柳对地下水的利用率最少(17.9%)。整体上,多枝柽柳和旱柳对各水源的利用率比较平均,但在不同样点和不同月份存在差异。样点 S_1 处 4 月和 5 月多枝柽柳对浅层(26.7%)和深层土壤水(38.8%)的利用率最大,而 6 月多枝柽柳对浅层土壤水的利用率减少,利用最多的为中层土壤水,8月和9月随着

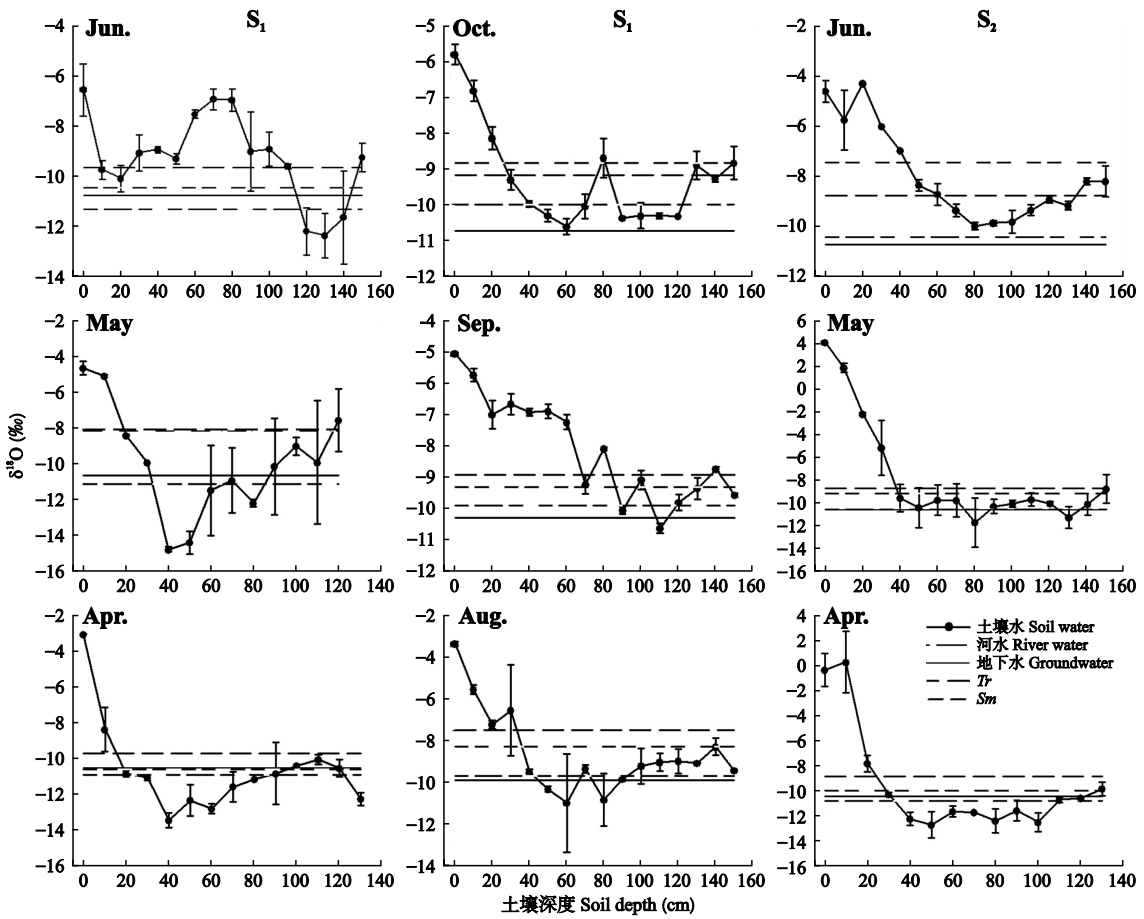


图 4　不同样点土壤水、河水、地下水和不同植物木质部水的 $\delta^{18}O$ 值比较

Fig.4　Comparison of $\delta^{18}O$ of soil water, river water, groundwater and xylem water of different plants at different sampling sites (mean± SD, $n=3$).

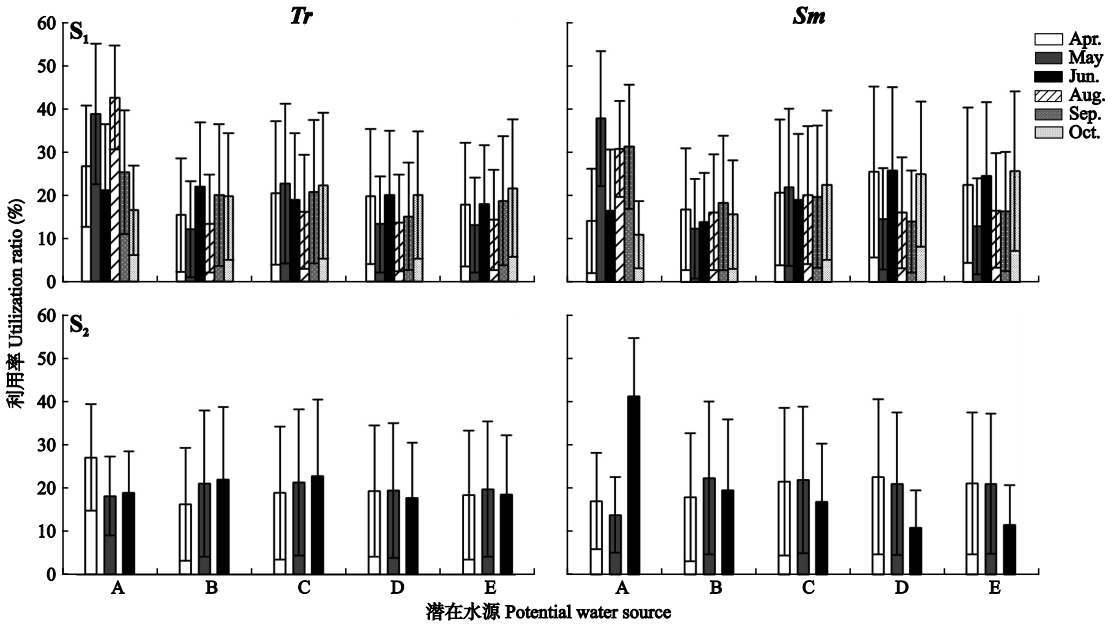


图 5 黄河兰州段河岸植物对各潜在水源的利用率

Fig.5 Proportion of potential water source for riparian plants in Lanzhou section of the Yellow River (mean±SE, $n=3$).

A: 0~30 cm 土壤水 0-30 cm soil water; B: 30~80 cm 土壤水 30~80 cm soil water; C: 80~150 cm 土壤水 80-150 cm soil water; D: 地下水 Groundwater; E: 河水 River water.

黄河水位上涨,浅层土壤含水量增大,多枝柽柳对浅层土壤水的利用率增大,分别为 42.6%和25.3%,10 月多枝柽柳增加了对河水和地下水的利用率,对浅层土壤水的利用率最小;除 4 月外,样点 S_1 旱柳和多枝柽柳的主要水分来源表现一致,4 月旱柳对地下水和河水的利用率最大,而对浅层土壤水的利用最小。这与多枝柽柳的水分来源刚好相反。样点 S_2 处 4 月多枝柽柳以浅层土壤水为主,利用率为 27.1%,而 5 月和 6 月多枝柽柳的水分来源转向更深土层,利用率最多的为深层土壤水,分别为 21.4%和 21.1%;旱柳 4 月和 5 月对各潜在水源的利用率较为平均,对深层土壤水、地下水和河水的利用率基本在 21%左右,而 6 月旱柳对浅层土壤水的利用率达到了 41.2%,对地下水的利用率最小,为10.9%。

2.4 植物间水分利用关系

植物对水资源的竞争是一种普遍存在的现象,通过对两个样点的统计分析发现,样点 S_1 与 S_2 水分利用关系并没有显著差异。对多枝柽柳和旱柳的水分利用关系研究发现,在整个生长季,样点 S_1 的 PS 指数为 91.0%,样点 S_2 的 PS 指数为 87.7%,表明两样点多枝柽柳和旱柳对同一水源的利用较多。不同月份水分利用关系存在差别(表 1),两个样点均在 5 月 PS 指数最大,分别为 98.3%和 95.6%,表明 5 月多枝柽柳和旱柳的主要水分来源一致,都对浅层土壤水的利用最多;样点 S_1 处 4 月和 6 月 PS 指数为 87%左右,表明多枝柽柳和旱柳的主要水分来源不同,两种植物间水分利用模式存在差异,样点 S_2 处 6 月 PS 指数最小,说明两者之间的水分利用模式不同,存在较弱的水分竞争关系,除 4 月和 6 月外,多枝柽柳与旱柳的主要水分来源相同。

表 1 不同月份多枝柽柳和旱柳的相似性比例(PS)指数

Table 1 Proportional similarity (PS) index between *Tamarix ramosissima* and *Salix matsudana*

样点 Sampling site	月 份 Month	PS 指数 PS index (%)
S_1	4	87.6
	5	98.3
	6	87.4
	8	88.3
	9	94.0
	10	90.5
S_2	4	89.9
	5	95.6
	6	77.7

3 讨 论

本研究结果表明,同一生境下的多枝柽柳和旱柳具有相同的潜在水源,利用贝叶斯混合模型 MixSIAR 得出两者的主要水分来源是浅层土壤水。这与 Wang 等[11]对热带季风区河岸植物以浅层土壤水为主要利用水源的结论一致。李亚飞等[13]研究表明,河岸带的土壤含水量较高,植物吸水层位相对

较浅。尹力等[30]研究也表明,黑河下游河岸林生态系统中多枝柽柳的吸水层位较浅。样点 S_1 处 8 月和 9 月降水增多,黄河水位上涨,土壤含水量明显大于其他月份,多枝柽柳和旱柳的主要水分来源为浅层土壤水,而 4 月和 10 月处于黄河非汛期,黄河水位下降,土壤含水量较低,4 月样点 S_1 和 S_2 的旱柳增加了对深层土壤水、河水和地下水的利用比例,10 月样点 S_1 多枝柽柳和旱柳的主要水分来源也向更深层转变。这表明多枝柽柳和旱柳都有一定的适应机制,水源转变可使植物获得更稳定的水源。赵国琴等[15]研究表明,当土壤含水量较低时,具鳞水柏枝以河水和地下水为主要水源,这与本研究结果一致。而一些研究表明,多枝柽柳是深根系植物,主要利用深层土壤水[19];周辰昕等[31]也发现,黑河中游生长的柽柳在 7 月主要利用 185 cm 以下的土壤水;徐贵青等[32]认为,柽柳主要利用深层土壤水和地下水,植物水分生理参数对降水无响应。这表明在不同的生境下,同种植物的水分来源不同,即使在同一河岸带,植物的水分来源也会因水文环境、距河岸的距离、林龄及植物种类的不同而有所差异[14,33-34]。

植物生长于土壤之中,不同深度的土壤水是植物的直接水源[19],而降水、河水和地下水等为植物的间接水源[13]。本研究将植物的潜在水源划分为浅层土壤水、中层土壤水、深层土壤水、地下水和河水。由于采样选择晴天进行,而且采样前一周内未发生降水事件,所以并未考虑将降水作为多枝柽柳和旱柳的潜在水源。因为研究区位于河岸边,河水与地下水交互作用强烈,导致两者的同位素值较接近[13],河水与地下水对多枝柽柳和旱柳的水分贡献率也接近。研究区土壤水分状况较好,整体上,河岸植物对浅层土壤水的利用率最大,主要是因为浅层土壤含水量较大,而且浅层土壤水距离植物最近,吸收水分所需要的时间最短,更容易被植物吸收利用;但在浅层土壤含水量较低时,植物会向更深层吸收水分,增大对河水和地下水的利用比例。两种植物对潜在水源的利用率比较平均,主要是因为处于河漫滩这一特殊的地理位置,植物对各种水源均匀利用,是一种最优的吸水模式,而当浅层土壤水分较低时会加大对河水和地下水的利用率,水源转变,从而使植物获得更稳定的水源[15]。本研究对黄河兰州段典型河岸植物水分来源进行初步分析,将为深入了解黄河流域植物水分利用的关系及河岸生态系统稳定性提供理论基础。但本研究对植物水源的研究具有局限性,对植物的种类、距河岸的距离等未进行细化,今后需进行进一步研究,以对黄河流域的植物水分来源有更清晰的认识。

4　结　　论

在生长季尺度上,浅层土壤水是多枝柽柳和旱柳的主要水分来源,所占的比例分别为 28.3% 和 24.4%,多枝柽柳对河水的利用率最少(16.6%),而旱柳对地下水的利用率最少(17.9%),但由于处于河漫滩这一特殊的地理位置,两种植物整体上对各水源的利用率比较平均。不同月份植物水分来源存在差异,土壤含水量较高的月份,植物的主要水分来源为浅层土壤水;而当黄河水位下降,土壤含水量较低的月份时,植物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;两个样点间植物水分利用关系并没有显著差异。本研究将会为深入了解黄河流域河岸植物水分利用策略提供一些理论基础。若黄河兰州段开展一些休闲旅游活动时,应注意浅层土壤的保护,同时,由于多枝柽柳和旱柳水分利用模式相似,需考虑将两种植物分开种植或与其他植物进行混交,从而实现河岸生态系统的稳定性。

参考文献

[1] Apan AA, Raine SR, Paterson MS. Mapping and analysis of changes in the riparian landscape structure of the Lockyer Valley catchment, Queensland, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 2002, **59**: 43-57

[2] White JC. Water Sources and Ecophysiology of Selected Riparian Species of the Southern Appalachian Mountains. PhD Thesis. Winston-Salem: Wake Forest University, 2015

[3] Pettit NE, Froend RH. How important is groundwater availability and stream perenniality to riparian and floodplain tree growth? *Hydrological Processes*, 2018, **32**: 1502-1514

[4] Dawson TE, Ehleringer JR. Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 1991, **350**: 335

[5] Bowling DR, Schulze ES, Hall SJ. Revisiting streamside trees that do not use stream water: Can the two water worlds hypothesis and snowpack isotopic effects explain a missing water source? *Ecohydrology*, 2017, **10**: e1771

[6] Oerter EJ, Siebert G, Bowling DR, *et al*. Soil water vapour isotopes identify missing water source for streamside trees. *Ecohydrology*, 2019, **12**: e2083

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

[8] White JC, Smith WK. Seasonal variation in water

sources of the riparian tree species *Acer negundo* and *Betula nigra*, southern Appalachian foothills, USA. *Botany*, 2015, **93**: 519-528

[9] Brinkmann N, Eugster W, Buchmann N, *et al*. Species-specific differences in water uptake depth of mature temperate trees vary with water availability in the soil. *Plant Biology*, 2019, **21**: 71-81

[10] Qian J, Zheng H, Wang P-F, *et al*. Water sources of riparian plants during a rainy season in Taihu Lake Basin, China: A stable isotope study. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2017, **29**: 153-160

[11] Wang PY, Liu WJ, Zhang JL, *et al*. Seasonal and spatial variations of water use among riparian vegetation in tropical monsoon region of SW China. *Ecohydrology*, 2019, **12**: e2085

[12] 徐庆, 王海英, 刘世荣. 变叶海棠及其伴生植物峨眉小檗的水分利用策略. 生态学报, 2011, **31**(19): 5702-5710 [Xu Q, Wang H-Y, Liu S-R. Water use strategies of *Malus toringoides* and its accompanying plant species *Berberis aemulan*. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5702-5710]

[13] 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. 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, **41**(5): 519-528]

[14] 周天河, 赵成义, 吴桂林, 等. 塔里木河上游胡杨、柽柳水分来源的稳定同位素示踪. 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 *Tamarixra mosissima* in the upstream of Tarim River. *Journal of Desert Research*, 2017, **37**(1): 124-131]

[15] 赵国琴, 李小雁, 吴华武, 等. 青海湖流域具鳞水柏枝植物水分利用氢同位素示踪研究. 植物生态学报, 2013, **37**(12): 1091-1100 [Zhao G-Q, Li X-Y, Wu H-W, *et al*. Study on plant water use in *Myricaria squamosa* with stable hydrogen isotope tracer in Qinghai Lake basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, **37**(12): 1091-1100]

[16] Brooks JR, Barnard HR, Coulombe R, *et al*. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geoscience*, 2010, **3**: 100-104

[17] 吕斯丹, 宋贤威, 温学发. 降水与土壤水混合过程的生态水文分离现象及其研究进展. 应用生态学报, 2019, **30**(6): 1797-1806 [Lyu S-D, Song X-W, Wen X-F. Ecohydrologic separation of the mixing process between precipitation and soil water: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(6): 1797-1806]

[18] 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. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(7): 2083-2092]

[19] 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. 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, **37**(7): 665-673]

[20] 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. 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 paints in artificial sand-fixation vegetation area base on large rain-fall events. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(4): 1053-1060]

[21] 钱斌天, 石磊, 高甲荣, 等. 柽柳在河岸生态修复中的应用——以西宁市湟水河为例. 中国水土保持科学, 2014, **12**(2): 35-39 [Qian B-T, Shi L, Gao J-R, *et al*. Application of *Tamarix chinensis* Lour in riparian ecological restoration: A case study of Huangshui River in Xining City. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, **12**(2): 35-39]

[22] 赵培培. 兰州市植物水稳定氢氧同位素特征及常见植物吸水深度研究. 硕士论文. 兰州: 西北师范大学, 2017 [Zhao P-P. The Characteristics of Plants Water Stable Isotopic and the Depth of Water Uptake of Common Plants in Lanzhou City. Master Thesis. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017]

[23] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}O$ 特征及其水汽来源. 环境科学, 2013, **34**(10): 3755-3763 [Chen F-L, Zhang M-J, Ma Q, *et al*. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor sources in Lanzhou City and its surrounding area. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3755-3763]

[24] 周盼盼, 张明军, 王圣杰, 等. 兰州城区绿化植物稳定氢氧同位素特征. 生态学杂志, 2016, **35**(11): 2942-2951 [Zhou P-P, Zhang M-J, Wang S-J, *et al*. The characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes of greening plants in Lanzhou downtown. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(11): 2942-2951]

[25] 张瑜, 吴永华, 赵峰. 黄河兰州段湿地典型植物群落物种多样性研究. 草原与草坪, 2016, **36**(1): 65-71 [Zhang Y, Wu Y-H, Zhao F. Study on species diversity of typical plant community in wetland along Yellow River in Lanzhou. *Grassland and Turf*, 2016, **36**(1): 65-71]

[26] Trogisch S, Salmon Y, He JS, *et al*. Spatio-temporal water uptake patterns of tree saplings are not altered by interspecific interaction in the early stage of a subtropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2016, **100**: 52-61

[27] 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. 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. *Journal of Desert Research*,

2017, **37**(6): 1150-1157]
[28] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, **133**: 1702-1703
[29] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林, 等. 采用稳定同位素技术判定喀斯特地区植物水分来源的挑战与可能应对方案. 应用生态学报, 2017, **28**(7): 2361-2368 [Nie Y-P, Cheng H-S, Wang K-L, *et al*. Challenges and probable solutions for using stable isotope techniques to identify plant water sources in karst regions: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(7): 2361-2368]
[30] 尹力, 赵良菊, 阮云峰, 等. 黑河下游典型生态系统水分补给源及优势植物水分来源研究. 冰川冻土, 2012, **34**(6): 1478-1486 [Yin L, Zhao L-J, Ruan Y-F, *et al*. Study of the replenishment sources of typical ecosystems water and dominant plant water in the lower reaches of the Heihe, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(6): 1478-1486]
[31] 周辰昕, 孙自永, 余绍文. 黑河中游临泽地区沙丘植物水分来源的 D、δ^{18}O 同位素示踪. 地质科技情报, 2011, **30**(5): 107-113 [Zhou C-X, Sun Z-Y, Yu S-W. Using D and δ^{18}O stable isotopes to determine the water sources of sand dune plants in Linze, middle reaches of Heihe River. *Geological Science and Technology Information*, 2011, **30**(5): 107-113]
[32] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应. 生态学报, 2009, **29**(1): 130-137 [Xu G-Q, Li Y. Roots distribution of three desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(1): 130-137]
[33] 赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 等. 黑河下游河岸林植物水分来源初步研究. 地球学报, 2008, **29**(6): 709-718 [Zhao L-J, Xiao H-L, Cheng G-D, *et al*. Preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, **29**(6): 709-718]
[34] 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. 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. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(6): 564-571]

作者简介　苏鹏燕, 女, 1996 年生, 硕士研究生。主要从事寒旱区生态水文过程研究。E-mail: pysu1996@126.com

责任编辑　张凤丽
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



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. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(6): 1835-1843