

许秀丽,李云良,郭强.黄河中游湿地优势植物水分利用的同位素研究[J].中国环境科学,2023,43(11):6079-6089.

Xu X L, Li Y L, Guo Q. Stable isotopes research on water sources of dominant plants in a river wetland at the middle reaches of the Yellow River [J]. China Environmental Science, 2023,43(11):6079-6089.

黄河中游湿地优势植物水分利用的同位素研究

许秀丽^{1,2},李云良^{3*},郭强²(1.江苏第二师范学院地理科学学院,江苏南京210008;2.太原理工大学水利科学与工程学院,山西太原030024;3.中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏南京210008)

摘要:在黄河流域生态保护和高质量发展战略背景下,探究沿黄湿地植物水分利用来源是揭示黄河湿地生态系统演替机制的重要基础.本文以汾河入黄典型河口湿地为研究区,分析旱季(5月)和雨季(9月)不同水源(降水、土壤水、地下水和河水)和优势植物的氢氧同位素特征,辨析湿地水分的补给来源和植物水分利用比例,探讨植物干湿季水分利用策略.结果发现,湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值同当地降水和汾河水相比明显贫化,地下水接受当地降水的有效补给仅在雨季,地下水主要来自黄河水侧渗并向汾河排泄.浅层土壤水(0~20cm)主要受降水补给,深层土壤水(20~80cm)则来自毛细地下水和汾河水补给.旱季,不同植物出现了水分利用的生态位分离现象,小型草本小香蒲(*Typha minima*,46%±7%)和假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*,95%±1%)对浅层土壤水利用率最高,大型草本水莎草(*Juncellus serotinus*)主要利用深层土壤水和地下水(89%±23%),而芦苇(*Phragmites australis*)主要利用河水、地下水和深层土壤水(86%±19%);雨季草本植物均主要利用深层土壤水、地下水和河水,表现出水分利用的生态位重叠.灌木柽柳(*Tamarix chinensis*)的水源存在季节转换,旱季均衡利用多种水源,雨季主要利用浅层土壤水(68%±5%).在未来暖干气候背景下,柽柳灵活的水分利用模式具有更大的生存优势,而草本植物间的水分竞争可能加剧.研究结果可加强对黄河中游湿地生态系统演变机制的认识,为湿地生态环境建设提供科学依据.

关键词:黄河中游;植物水分利用;水源补给;氢氧同位素;河口湿地

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)11-6079-11

Stable isotopes research on water sources of dominant plants in a river wetland at the middle reaches of the Yellow River. XU Xiu-li^{1,2}, LI Yun-liang^{3*}, GUO Qiang² (1.School of Geography, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, China; 2.College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3.Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *China Environmental Science*, 2023,43(11): 6079-6089

Abstract: Plant water source along the Yellow River is considered to be a foundation to reveal mechanisms of regional wetland evolution, due to the national strategy of ecological protection and high quality development of the Yellow River basin. This study investigated the characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of rainfall, river water, groundwater, soil water and the xylem water for five dominant plants in the typical dry and rainy seasons during 2019, taking the Fen River estuary wetland as an example. The replenishment water sources of the Fen River wetland were explored using the relationship of $\delta^{18}\text{O}$ and δD . The proportions of water uptake by different plants were further quantified using a direct inference method and the IsoSource mixing model. Results show that the isotope values of the wetland groundwater were much lower than those of rainfall and the Fen River. Wetland groundwater was rarely replenished by the local rainfall and mainly supplied by the Yellow River water. The shallow soil water at 0~20cm depth was mainly supplied by rainfall, while the deep soil water at 20~80cm depth was recharged by upward fluxes of groundwater and Fen River water. The proportions of plant water source were different among species. In the dry season, herbaceous plants showed niche separation of water use. The *Typha minima* and *Calamagrostis pseudophragmites* mainly used shallow soil water, while the *Juncellus serotinus* mainly used deep soil water and groundwater (89%±23%). The *Phragmites australis* mainly used the Fen River water, groundwater and deep soil water (86%±19%). However, all of the three herbaceous plants used deep soil water, groundwater and river water in the rainy season, demonstrating a niche overlap of the plant water use. Additionally, water sources of *Tamarix chinensis* exhibited a seasonal shift, characterizing by multiple sources in the dry season and shallow soil water (68%±5%) in the rainy season. Under future warm and dry climate conditions, *T. chinensis* is likely to exhibit distinctly survive advantages because of the strong plasticity of water use, while the herbaceous plants may be influenced by intense water competition. The findings of this study could

收稿日期: 2023-03-30

基金项目: 江苏第二师范学院引进人才科研启动项目(928201/030);中国科学院青年创新促进会项目(Y9CJH01001);山西省应用基础研究项目(201801D221052)

* 责任作者, 研究员, yunliangli@niglas.ac.cn

provide significant scientific references for the wetland ecosystem construction in the Yellow River basin, contributing to an improved understanding of the wetland evolution mechanism.

Key words: middle reaches of the Yellow River; plant water source; water recharge; hydrogen and oxygen isotope; estuary wetland

水分利用策略是植物生存、适应与发展的关键,也是植被生态系统发挥保持水土、涵养水源等生态功能的基础^[1].黄河流域是我国重要的生态屏障,随着黄河流域生态保护与高质量发展战略的实施,如何在水资源短缺的黄河流域,保证生态系统健康和稳定是一个重大问题^[2].湿地是黄河流域生态系统的重要组成部分,具有调节黄河水量、维护生物多样性和生态平衡的功能,是黄河流域生态保护的基础和关键^[3].然而,湿地系统发育与植被演替对水分条件变化尤为敏感^[4-5],黄河流域大部分处于半干旱和半湿润区,水资源先天不足,过去 30a 沿黄湿地退化已成为不争的事实^[5],湿地植被与水分关系问题极为突出.因此,探究沿黄湿地水分补给来源与植物水分利用方式,是揭示水分条件变化下湿地生态系统响应机制的关键,对预测湿地生态系统的稳定性和开展湿地生态环境保护有重要的理论和实践意义.

黄河流域湿地主要分布在黄河源区、中下游河岸带及黄河三角洲地区,国内对黄河湿地的研究多集中在重点区域^[6-7],中游湿地的研究和保护空缺最为严重^[5,8].黄河中游是河流湿地的集中分布区,经济快速发展导致区域水资源对湿地的支撑压力极大^[5].大量研究通过湿地生态跟踪调查和遥感影像反演,发现黄河上游上世纪 90 年代以来水量持续减少,导致湿地物种多样性明显降低,景观结构破碎化严重^[10-11],花园口湿地植被盖度下降近 20%^[12-13].以往研究侧重湿地植被特征变化,对植被与水分之间的作用关系仅以定性认识和统计分析为主.研究发现黄河中下游近 50a 洪峰流量和洪水频率明显减小,河流与湿地间横向水文连通的中断导致湿地补给水源下降^[13],湿地面积的年际波动与年降雨量和径流量呈明显正相关关系^[14].这些研究说明降水与河流水文过程是黄河中游湿地植被演变的主要影响因素.但是河岸湿地水体相互转化过程复杂,植被与水分的关系始终难以量化.目前,并未有学者从植物水分利用的内在角度对黄河中游湿地植被演替做深入的机理解释,仍然缺乏对湿地不同优势植物水分利用方式的全面认识,尚不能为沿黄省区生态保护提供有力支撑.

自然界中植物所能利用的潜在水源多样,受植被类型、根系分布、水分条件等因素影响,植物的水分利用方式具有极大的不确定性^[15-16].氢、氧同位素是自然界一种天然示踪剂,不同水源在水分运移和相态转化过程中会发生同位素分馏^[17],因而,植物的潜在水源具有不同的氢氧同位素组成.植物根系在吸收水分的过程中一般不会发生同位素分馏,所以,借助不同水源和植物根茎水中同位素组成的差异判别植物的水分利用,已经成为植物水分溯源的重要方法^[18].过去此类研究多聚焦于干旱、半干旱地区,重点探究植物如何应对干旱胁迫,发现植物具有根据降水的季节变化调整吸水水源^[16],以及浅根植物主要利用浅层水,中深根植物吸收深层土壤水和地下水的适应机制^[15,19].这种多变的水分利用方式对维持缺水条件下生态系统健康有重要作用.然而湿地生态系统的研究则指出,植物的水分利用具有一定的稳定性,相较于不稳定的降水,植物优先利用能够稳定获得的水源^[20-21].那么在多水源补给的条件下,湿地植物的水源利用是否还有主次之分?在湿地周期性干、湿交替过程中,植物采取怎样的水分利用机制应对水分的动态变化?这些问题的研究有助于深入剖析湿地植物与水分的作用机制.

基于此背景,为全面认识黄河流域湿地植物的水分利用机理,深入剖析黄河中游湿地植被演化的驱动机制,本文选择黄河中游汾河入黄河口湿地为研究区,应用氢氧稳定同位素技术,分析湿地大气降水、地下水、河水、土壤水以及不同优势植物氢氧同位素特征,研究河口湿地系统水分补给途径,定量阐明不同优势植物的水分利用模式,揭示植物对水分条件变化的适应策略.研究结果可为河口区湿地生物多样性保护和生态建设中物种选择提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汾河是山西第一大河流,黄河第二大支流,干流自北向南流经山西省 6 市 29 县,最终从西南部运城市万荣县庙前村汇入黄河(图 1).研究区选定于万荣

县境内的汾河入黄口河段及其沿岸湿地,地理坐标为 35.35154°N,110.47413°E,是自明清以来黄河泛滥、东倒夺汾和汾河入黄口不断迁移形成的冲淤河漫滩湿地^[10].湿地地势起伏较小,东西宽 1.4~2.5km,南北长近 2km,土壤为粉砂壤土,属于半湿润暖温带

大陆性季风气候,四季分明,年平均气温 14°C,7 月最热,月平均气温 27°C,1 月最冷,月平均气温-2°C^[16].多年平均降雨量 515mm,主要集中在夏季 7~9 月,占全年降雨量的 51%,11 月~次年 3 月降雨量较小,年平均潜在蒸散量为 1240mm.

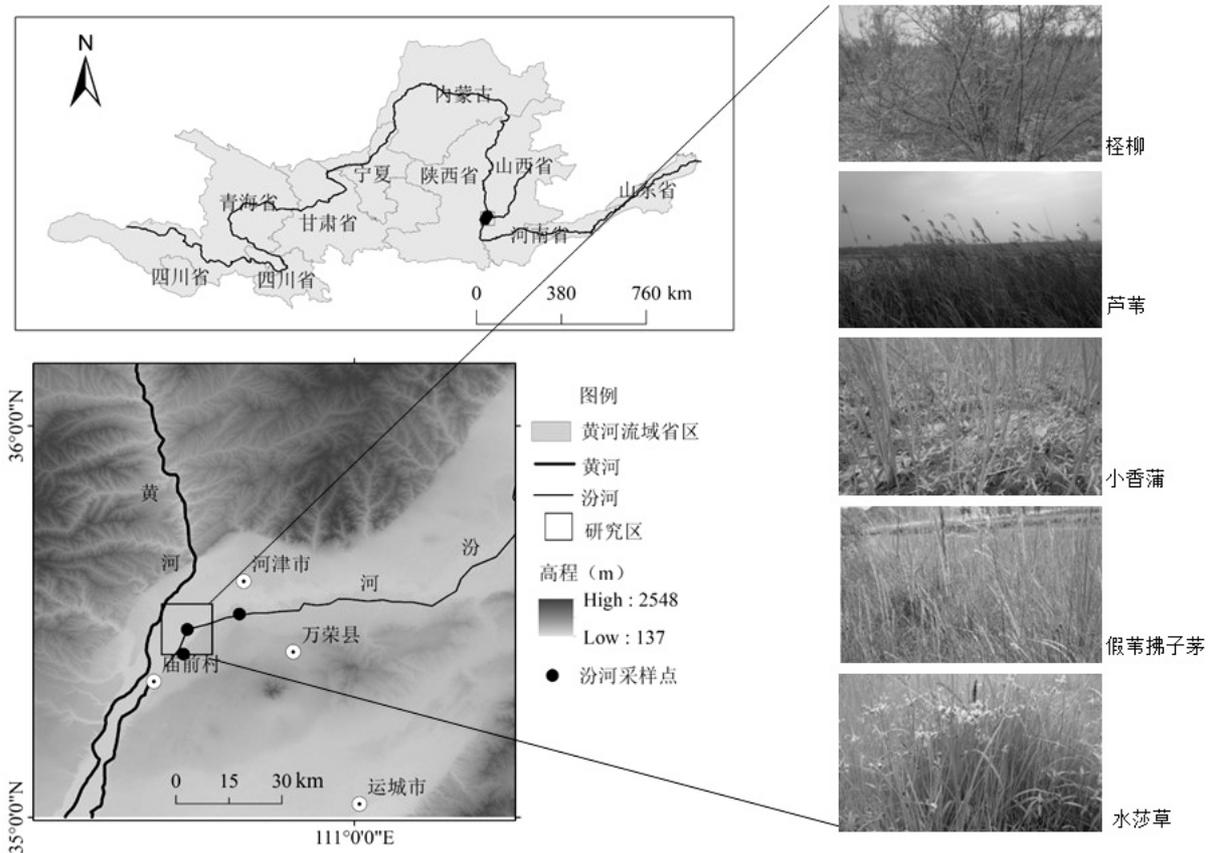


图 1 黄河流域以及研究区位置示意

Fig.1 Schematic map of the Yellow River basin and the location of the study area

研究区的选择综合考虑了湿地类型、水文特征、植被类型和保护状况等多个方面,具有很好的典型性、代表性.受水资源匮乏的限制,黄河中游湿地通常仅发育于流量较大的干支流河段^[4],汾河入黄湿地分布于黄河出禹门口以后与汾河交汇的河段,是受两河水情共同影响的交汇区,水资源丰富,也是黄河中游发育面积较大的内陆河口湿地^[11],主要由近岸滩地、低洼沼泽和高位河漫滩组成.研究区的地表水主要为汾河和黄河,汾河下游多年平均流量 24m³/s,径流年内分配不均,10 月~次年 5 月流量较小,整体变化较为平缓,6 月以后流量不断增加,至 7~8 月达到最大^[22].黄河龙门段全年平均流量约 800m³/s,峰值出现在 8 月^[4].受两河水情季节变化的影响,湿

地呈现明显干湿交替,非汛期滩地裸露,地下水埋深约 60~130cm,植被生长茂盛,汛期河流水位上涨,低滩地经历不同程度淹水,积水深度 20~50cm,部分地带地下水出露地表.根据作者野外踏勘和前人植被区系调查^[11],研究区发育的典型湿地植被主要有芦苇 (*Phragmites australis*)、水莎草 (*Juncus serotinus*)、小香蒲 (*Typha minima*)、假苇拂子茅 (*Calamagrostis pseudophragmites*) 和灌木桉柳 (*Tamarix chinensis*),它们分属于挺水植被、沼生草本、潮润土草本、陆生性草本以及木本群落,正是黄河中游现存的 5 种天然湿地植被类型中的代表性植物群落^[11].其中芦苇、小香蒲和 3a 生桉柳分布于汾河近岸的低滩地,水莎草分布于离岸较远的洼

地,地下水埋深较浅,汛期地面积水约 20cm,假苇拂子茅分布在远离河岸的河漫滩地带,植物生长与分布情况见表 1.此外,研究区分布于汾河西岸,离居民点较远,周围无工业设施和农业活动,属于 2001 年成立的山西省运城市沿黄河湿地自然保护区,能够作为黄河中游内陆河口湿地生态水文过程研究的代表性区域.

表 1 不同植被类型植物生长特征与土壤属性

Table 1 Soil texture and plant growth characteristics for different vegetation communities

植被类型	优势种均高(cm)		根系深度(cm)		离岸最近 距离(m)	土壤属性
	5月	9月	5月	9月		
小香蒲	40	82	45	68	150	粉砂壤土
芦苇	155	193	80	85	30	粉砂壤土
水莎草	67	-	60	-	320	粉砂壤土
柽柳	180	185	70	77	40	粉砂壤土
假苇拂子茅	45	74	40	65	450	粉砂壤土

注:- 表示因淹水未获得采集数据.

1.2 样品采集

为探究植物水分利用来源干湿季节变化,本研究结合当地气候、水文条件和植物生长过程,于 2019 年旱季 5 月和雨季 9 月进行样品采集.采样在晴朗天气环境进行,旱季采样前半个月内无降水,河流处于低水位期,雨季采样选择在 8 月集中降雨期后,采样日为中雨后 2d(17.5mm),河流处于汛期高水位,两个时段能够反映典型干旱、湿润环境.为避免强蒸发影响,采样时间均在上午 7:00~9:00,选择分布典型、生长状况良好的优势种芦苇、小香蒲、水莎草、假苇拂子茅和柽柳样地采集样品,每种植物设 2 个重复.草本采集地面以下根基径,柽柳采集已栓化的枝条,去除外皮和韧皮部.将植株剪成 3~4cm 小段,装于 8mL 螺纹玻璃瓶中密封保存,共收集植物样品 18 组(9 月因积水,莎草群落未采集样品).在植被采样点附近挖掘土壤剖面采集土样,野外调查发现不同季节植物最大根系深度分别为 40~80cm 和 65~85cm(表 1),雨季芦苇部分根系处于地下水位之下,故结合根系范围和地下水位,最大采样深度设为 80cm,采样间隔 20cm.采集的土样一份装入 8mL 螺纹玻璃瓶中用于同位素检测,一份装入铝盒中进行土壤含水量测定.河水取自汾河万荣段上、中、下游的中心河床处,采样前先用原水充分润洗采样瓶,再收集水面 0.5m 以下深处水样.地下水样品于湿地不同植被群落内

采集,通过挖掘法直至地下水出露,最大挖掘深度 130cm,收集无泥沙的水样.降雨样品依托万荣气象局在 2019 年 4~10 月收集,基本覆盖了当地的有雨时段,主要收集大于 5mm 的次降水,共收集降雨样品 21 个.所有水样采集后迅速装于 20mL 塑料瓶中,共收集水样 33 个.将样品置于冰箱内,迅速运回实验室并冷藏保存.

1.3 实验室测试分析

样品水分提取和测试在清华大学研究生院稳定同位素实验室完成,利用 LI-2100 全自动真空冷凝抽提系统提取出土壤和植物样品中的水分,每个样品均保证充分抽提.抽提完的水样与其他液态水样用同位素比率质谱仪(MAT253,USA)测定 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的含量, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的测试精度分别为 $\pm 0.5\%$ 和 $\pm 2\%$.测定结果以 V-SMOW(维也纳标准海洋水)为标准的千分差表示:

$$\delta R(\text{‰})=(R_{\text{sam}}/R_{\text{sta}}-1)\times 1000 \quad (1)$$

式中: R_{sam} 代表样品中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值; R_{sta} 为 V-SMOW 标准物质中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值.

此外,用称重法称取铝盒土样的鲜重和烘干后恒重,计算不同深度土壤含水量.

1.4 数据处理

采用两种方法识别植物水源,首先利用直接对比法,比较植物茎水同位素与各潜在水源(不同深度土壤水、河水、地下水同位素),判别植物种潜在水源和主要吸水深度.然后利用 IsoSource 混合模型计算不同水源的贡献比例^[23].模型里植物茎水同位素被看作是混合值,输入数据为各潜在水源氢氧同位素平均值,模型增幅设为 1%,容差设为 0.2%,计算时将所有可能的水源贡献率组合全部列出,与植物茎水同位素比较,如果差值小于容差,则认为是一组可行解^[23].具体计算方法如下:

$$\delta_s = f_1 \delta_1 + f_2 \delta_2 + \dots + f_n \delta_n \quad (2)$$

$$\lambda_s = f_1 \lambda_1 + f_2 \lambda_2 + \dots + f_n \lambda_n \quad (3)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (4)$$

式中: δ_s 、 λ_s 分别为植物茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值; δ_1 、 δ_2 、 δ_n 分别第 1、2 和第 n 种潜在水源 $\delta^{18}\text{O}$ 值; λ_1 、 λ_2 、 λ_n 分别为第 1、2 和第 n 种潜在水源 δD 值; f_1 、 f_2 、 f_n 分别为不同水源对植物用水的贡献比例.

本研究中不同深度土壤水是植物的潜在水源,为了更直观了解植物的水分利用,根据不同深度土

壤的含水量和同位素组成差异,将土壤水分重新划分为两层,依据为:(1)浅层土壤水(0~20cm),土壤含水量较低,且同位素显著富集;(2)深层土壤水(20~80cm),土壤含水量和土壤水同位素组成随土层深度增加不存在显著差异.合并以后的土壤水同位素值利用土壤含水量加权平均法计算^[8].采用 SPSS 13.0 单因素方差分析和 LSD 多重比较,分析比较不同季节、不同植被群落的土壤含水量和土壤水同位素差异,并在 0.05 水平上检验其显著性.

2 结果与分析

2.1 降雨量与土壤含水量变化特征

研究区 1980~2019 年多年平均降雨量为 515mm, 2019 年降雨总量为 583mm,属于多雨年份(设计频率 $P=29\%$).降雨量年内分布不均,旱季 3~5 月降雨量 86mm,占全年降雨量的 15%,雨季 7~9 月降雨量 313mm,占全年降雨量的 54%,从全年降雨分布格局来看,呈现出明显干旱和湿润的交替(图 2).湿地不同深度土壤水分变化范围为 13%~38%,随土层深度的增加呈现出先减小后增大的趋势,旱季和雨季各层土壤含水量均没有明显差异($n=36, P>0.05$,图 3),说明湿地土壤水分受降雨季节变化的影响较小.比较不同植被群落的土壤含水量发现,近岸带芦苇、怪柳和小香蒲群落土壤平均含水量最高,为 28%~32%,离岸较远的水莎草、假苇拂子茅群落土壤含水量为 21%~24%,极显著低于近岸带植被群落($P<0.01$,图 3),不同植被群落土壤水分的差异可能受补给水源的影响.

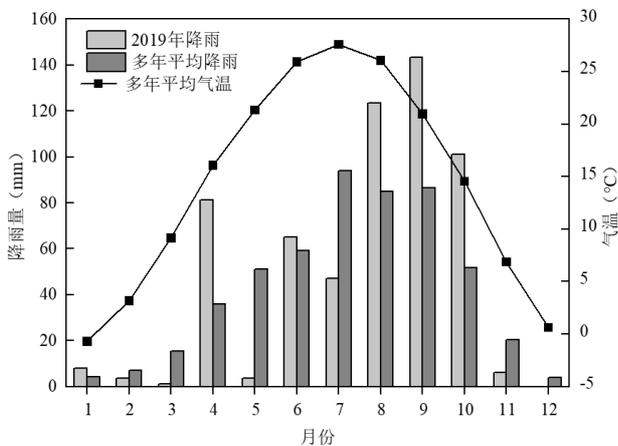


图 2 研究区降雨与气温季节变化

Fig.2 Seasonal variations of precipitation and temperature in the study area

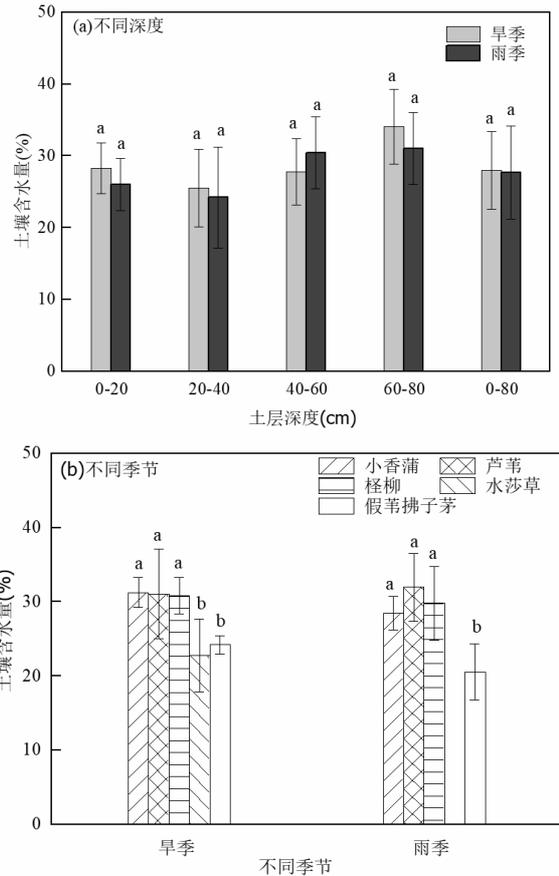


图 3 研究区不同深度和季节各植被群落土壤含水量变化
Fig.3 Seasonal variations of soil water content at different depths and different vegetation communities
a、b 代表各组数据有显著差异

2.2 湿地不同水源同位素组成特征

研究区降雨同位素组成的波动较大,月降雨量加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变化范围分别为 -1.9‰ ~ 13.0‰ 和 -1.6‰ ~ -88.6‰ .本文对该区历次降雨中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 组成进行线性回归,得出当地大气雨水线(LMWL)方程 $\delta\text{D}=7.73\times\delta^{18}\text{O}+11.73(n=21, R^2=0.94)$ (图 4),该 LMWL 的斜率相对于全球大气雨水线($\delta\text{D}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$)较小,表明研究区降雨受蒸发分馏的影响.湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值变化范围分别为 -9.0‰ ~ 10.6‰ 和 -68.9‰ ~ -78.2‰ ,不存在显著季节差异($n=3, P>0.05$,表 2),说明汾河湿地地下水较为稳定.地下水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系点集中分布于当地大气雨水线的右下侧区域,地下水同位素比大部分降雨样品明显贫化,可知地下水受当地降雨入渗的补给有限,可能仅存在于雨季集中降雨期间,因为该期间雨水经多次冷凝后重同位素明显贫化.河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变化范围分别为 -7.4‰ ~ -9.5‰ 和 -54.0‰ ~ -67.3‰ ,受蒸发分馏影响,

重同位素比地下水略富集。

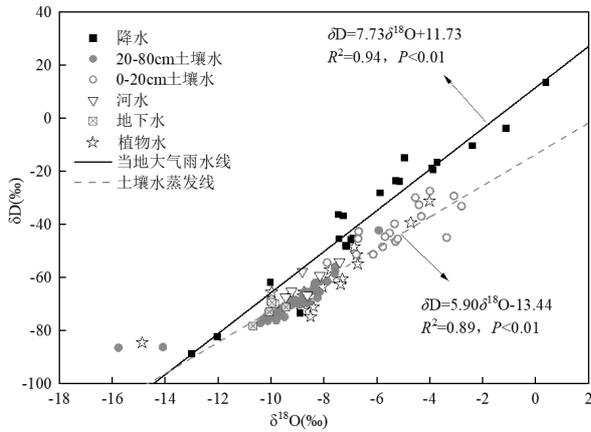


图4 研究区不同水源和植物水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系

Fig.4 Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ and δD values for various water sources and the plant xylem water

土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值分别介于 -15.8‰ ~ 2.8‰ 和 -86.3‰ ~ -27.3‰ 之间,土壤水蒸发线方程为 $\delta\text{D} = 5.90 \times \delta^{18}\text{O} - 13.44$ ($n=74, R^2=0.89$),位于当地大气雨水线下方,说明土壤水接受降雨补给并经历了蒸发分馏作用的影响,重同位素有所富集.此外,土壤水剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化均不存在显著季节差异($\delta^{18}\text{O}: P=0.11, \delta\text{D}: P=0.96$,表 2),表现出随土层深度减小而增大的变

化规律,由此体现了土壤蒸发强度由表层至深层逐渐减小.0~20cm 表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值最高,比同期降雨同位素略富集,说明土壤表层接受降水入渗补给和蒸发影响.然而 20~80cm 各层土壤水同位素不存在显著差异($P>0.05$,表 2),且明显贫化于降雨同位素,与汾河水、地下水同位素接近(图 4),这表明相较于当地降雨补给,湿地深层土壤水与地下水、河水之间的水力联系更为紧密。

表 2 干湿季节各潜在水源氢氧同位素组成

Table 2 $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of various water sources during different seasons

水源类	旱季(5月)		雨季(9月)	
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$
土壤水				
0~20cm	$-5.9 \pm 1.4\text{a}$	$-43.8 \pm 10.7\text{a}$	$-5.0 \pm 1.4\text{a}$	$-41.8 \pm 7.2\text{a}$
20~40cm	$-9.0 \pm 0.6\text{b}$	$-67.3 \pm 5.0\text{b}$	$-8.9 \pm 0.7\text{b}$	$-68.0 \pm 5.3\text{b}$
40~60cm	$-8.9 \pm 1.2\text{b}$	$-66.3 \pm 9.8\text{b}$	$-9.1 \pm 0.4\text{b}$	$-69.8 \pm 2.8\text{b}$
60~80cm	$-10.1 \pm 0.5\text{b}$	$-74.4 \pm 3.1\text{b}$	$-10.4 \pm 2.4\text{b}$	$-73.3 \pm 7.4\text{b}$
0~80cm	-8.2 ± 1.9	-60.9 ± 14.0	-8.3 ± 2.5	-63.3 ± 13.9
降雨	-6.3	-38.8	-7.1	-47.3
地下水	-10.1 ± 0.6	-74.1 ± 3.6	-9.5 ± 0.8	-71.6 ± 4.6
汾河水	-9.2 ± 0.3	-63.3 ± 5.1	-8.1 ± 0.6	-59.9 ± 6.3

注: a、b不同字母代表存在显著性差异。

2.3 湿地植物茎水同位素特征与潜在水源分析

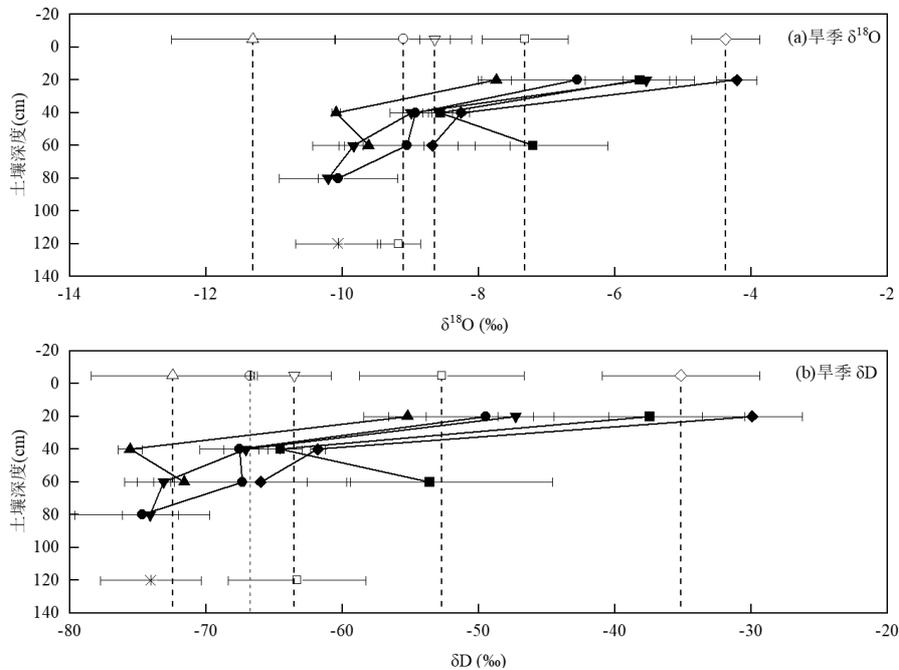


图5 旱季汾河湿地植物茎水与不同水源同位素关系

Fig.5 Variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in different water sources and xylem water during the dry season

- □ 小香蒲土壤水、茎水
- ○ 芦苇土壤水、茎水
- ▲ △ 水莎草土壤水、茎水
- ▼ ▽ 柽柳土壤水、茎水
- ◆ ◇ 假苇拂子茅土壤水、茎水
- 河水
- * 地下水

汾河湿地 5 种优势植物茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化范围分别为 -14.8‰ ~ -4.0‰ 和 -84.4‰ ~ -31.1‰ ,平均值为 -8.0‰ 和 -61.3‰ ,植物茎水同位素全部分布于土壤水同位素范围内,部分植物水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系点与地下水和河水同位素关系点的位置接近(图 4)。由此推断,研究区植物生长的潜在水源为浅层、深层土壤水、地下水和河水。

利用直观对比法判断不同植物种吸水深度和主要水源的季节变化。旱季,不同优势种 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 排序为:假苇拂子茅(-4.4‰ , -35.2‰)>小香蒲(-7.3‰ , -52.7‰)>芦苇(-8.6‰ , -66.7‰)>柽柳(-9.1‰ , -63.5‰)>水莎草(-11.3‰ , -72.4‰)(图 5),说明不同植物种的水分利用来源不同,物种存在水分利用的生态位分离,有利于种群共存。假苇拂子茅茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 与 0~20cm 土壤水同位素非常接近,说明主要利用受降雨补给的浅层土壤水。小香蒲茎水同位素与 0~40cm 土壤水同位素剖面有交点,且与 40~60cm 土壤水同位素接近,可以推断其对不同深度土

壤水均有吸收。芦苇、水莎草和柽柳的茎水同位素除了与土壤水同位素剖面有交点,还与地下水、河水同位素接近,说明 3 种深根系植物对土壤水、河水和地下水均有不同程度的利用,主要水源与两种小型草本假苇拂子茅和小香蒲有较大不同。

雨季灌木柽柳茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值最大(-7.0‰ 、 -56.0‰),明显富集于芦苇(-8.4‰ 、 -64.4‰)、小香蒲(-8.8‰ 、 -71.0‰)和假苇拂子茅(-8.5‰ 、 -72.8‰)(图 6),说明柽柳与草本植物的利用水源有较大差异。柽柳茎水同位素与土壤水同位素剖面的交点为 20~40cm,且与降雨同位素(-7.1‰ 、 -47.3‰)非常接近,推断柽柳在雨季主要吸收来自降雨补给的浅层土壤水,与旱季的水分利用方式明显不同。芦苇、小香蒲和假苇拂子茅三者的茎水同位素接近,与土壤水同位素剖面的交点在 40cm 及以下土层,且茎水的 $\delta^{18}\text{O}$ 介于地下水、河水同位素之间,说明雨季三种草本植物的水源相似,均为深层土壤水、地下水和河水。

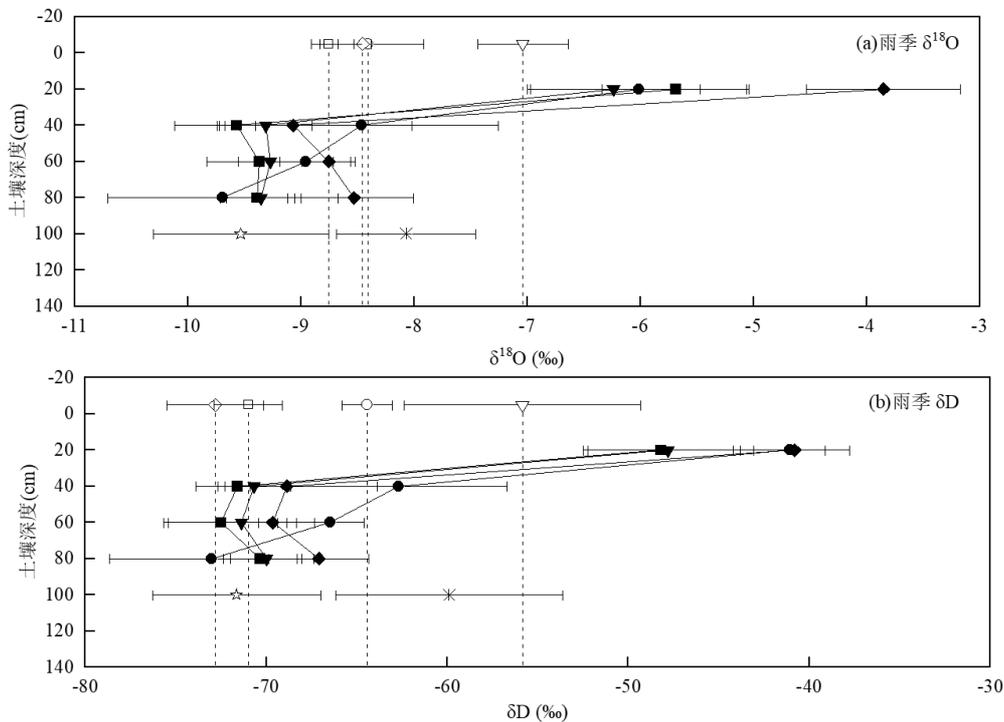


图 6 雨季汾河湿地植物茎水与不同水源同位素关系

Fig.6 Variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in different water sources and xylem water during the rainy season

- □ 小香蒲土壤水、茎水
- ○ 芦苇土壤水、茎水
- ▼ ▽ 柽柳土壤水、茎水
- ◆ ◇ 假苇拂子茅土壤水、茎水
- * 河水 ☆ 地下水

2.4 湿地植物水分利用来源解析

不同植物种水源利用来源的季节变化不同(图

7).近岸带芦苇的水分利用模式不存在季节变化,旱季和雨季芦苇均很少利用浅层土壤水($14\% \pm 7\%$),对河水的利用比例最高($32\% \pm 20\%$),其次为深层土壤水($30\% \pm 20\%$)和地下水($24\% \pm 17\%$).灌木柽柳旱季对4种水源的利用大体相当($23\% \sim 28\%$),雨季对深层水源的利用明显减少,主要利用浅层土壤水,利用比例为($68\% \pm 5\%$),吸水模式表现出较强的可塑性.小香蒲的主要水源存在季节变化,旱季主要利用浅层土壤水,利用比例为($47\% \pm 8\%$),其次为深层土壤水($25\% \pm 18\%$),很少利用地下水和河水.随着雨季水位的上升,小香蒲对浅层土壤水的利用减少($10\% \pm 5\%$),更加依赖稳定的深层水源,对深层土壤水、地下

水和河水的利用比例分别为($33\% \pm 20\%$)、($33\% \pm 20\%$)、($24\% \pm 15\%$).假苇拂子茅的水分利用模式与小香蒲有一定的相似性,旱季高度依赖浅层土壤水($95\% \pm 1\%$),雨季转向深层水源,主要利用深层土壤水和地下水,对两者的利用比例合计($65\% \pm 19\%$),对河水的利用比例也增加至($28\% \pm 19\%$).同样离岸较远的水莎草旱季也极少利用浅层土壤水和河水,主要利用深层土壤水($43\% \pm 23\%$)和地下水($46\% \pm 23\%$).上述结果可以看出,地下水和深层土壤水是优势种生长的重要水源,河水在旱季仅是近岸带芦苇和柽柳种群($<100\text{m}$)的重要水源,在雨季则影响到高位河漫滩处分布的假苇拂子茅种群(450m).

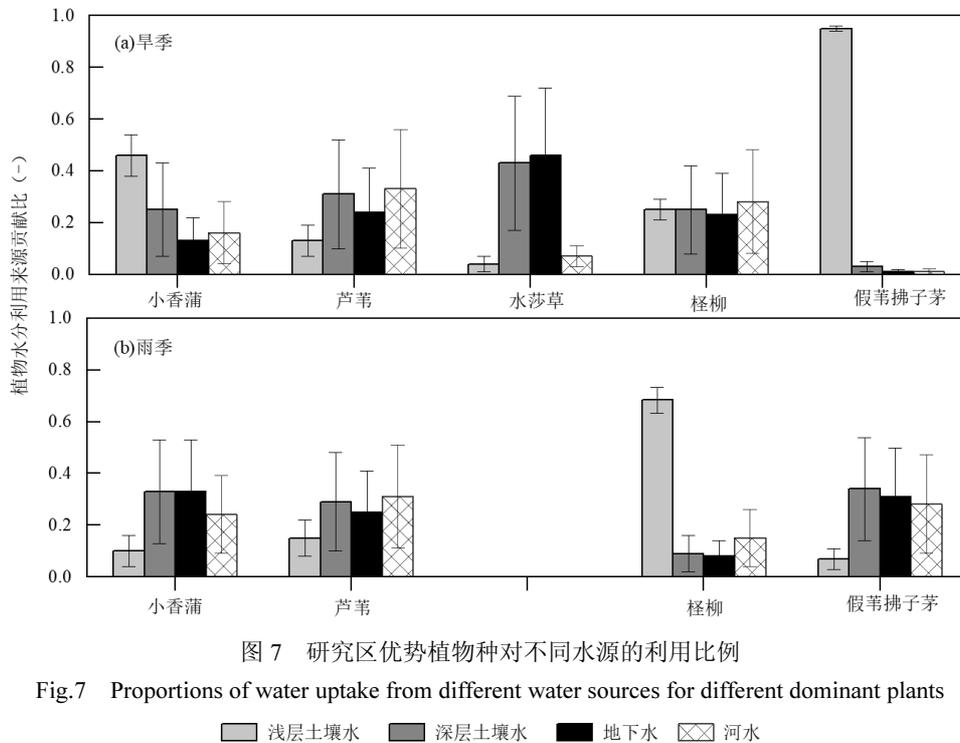


图7 研究区优势植物种对不同水源的利用比例

Fig.7 Proportions of water uptake from different water sources for different dominant plants

浅层土壤水 深层土壤水 地下水 河水

3 讨论

3.1 湿地水分补排关系分析

水源补给与转化是决定湿地生态系统发育与演变的关键,汾河河口湿地水分补排过程受地形和河流水文过程的共同影响.黄河出龙门后,河床由峡谷骤然展宽,泥沙大量淤积,导致黄河河床天然高于汾河^[11].本研究发现,旱季和雨季汾河湿地地下水同位素($-10.1\text{‰} \sim -9.5\text{‰}$ 、 $-74.1\text{‰} \sim -71.6\text{‰}$)差异不大,相比于大气降水($-7.1\text{‰} \sim -6.3\text{‰}$ 、 $-47.3\text{‰} \sim -38.8\text{‰}$)和汾河同位素($-9.2\text{‰} \sim -8.1\text{‰}$ 、 $-63.3\text{‰} \sim -59.9\text{‰}$)均

要明显贫化.一般认为,初始水源同位素相对较负,沿着水分补给路径,受蒸发分馏影响,同位素逐渐富集^[24].据此判断,当地大气降水对湿地地下水的补给较弱,其它具有同位素贫化特征的外源水可能是湿地的主要补给水源.本文前期调查显示,黄河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值($-9.7\text{‰} \sim -10.0\text{‰}$)与湿地地下水同位素非常接近,2019~2020年黄河龙门站水位($377 \sim 379\text{m}$)始终高于汾河河津站水位($369 \sim 372\text{m}$),两河之间存在明显水力梯度.结合地形和水文过程,说明旱季和雨季黄河水均稳定侧渗补给汾河湿地地下水.有学者分析了近30a黄河中下游湿地面积与年降水量的变化规

律,发现虽然年降水量的增加对湿地面积的增加有一定促进作用,但是两者之间的正相关关系并不显著^[14],说明降水对黄河河岸湿地演变的影响有限.综上所述可知,黄河水资源的支撑是沿黄湿地发育的决定因素,上世纪黄河频繁断流和水利工程建设导致黄河水量降低^[4,13],大幅减少了地表水对沿岸湿地的补给强度,导致中下游河岸带湿地退化.

土壤水同位素受降水入渗、地表蒸发、地下水和河水补给的影响,在垂直方向上表现出不同的变化特征^[25].研究区表层的土壤水同位素最富集,与降水同位素较接近,深层土壤水相差较小却明显贫化,接近地下水和河水同位素(表 2).这说明汾河湿地浅层土壤水主要受降水补给,深层土壤水主要受毛细地下水和河水侧渗补给,并在蒸发作用下,水分不断向上传输补给浅层.这与学者对黄河内蒙段河岸带土壤水同位素的研究一致,他们发现由于河水对土壤水存在侧向补给,近岸河漫滩土壤水同位素从浅层到深层变化不大,与河水同位素接近^[25].研究区土壤水分的垂向运移过程与不同深度土壤含水量的变化规律可以相互佐证,本研究湿地土壤含水量随着土层深度的增加呈增大趋势(图 3),通常来说土壤含水量与土水势呈正相关,在土水势的作用下,土壤水分由高含水量区向低含水量区传输^[16].

3.2 植物水分利用来源

植物水分利用来源受植物类型、根系分布、水分条件等多种因素的影响,这也导致不同物种的水分利用情况存在差别进而可以共存^[15-16].本研究发现,旱季汾河湿地植物呈现出水分利用的生态位分离,假苇拂子茅和小香蒲主要利用浅层土壤水,芦苇和水莎草则将深层土壤水和地下水作为主要水源,而怪柳同时利用多种水源.这可能是由于生长初期小型草本根系深度浅(40~45cm),只能吸收浅层水,而中深根植(60~80cm)可以获取深层水分.这与于晓雯等的研究一致,她们利用同位素端元混合模型评估了黄河上游河岸植物的水源利用,发现在水分不足时,草本植物倾向于利用浅中层土壤水,而灌木和高大草本由于具有二态根系主要利用深层土壤水^[25].物种间水分利用来源不同的现象称为水分利用的生态位分离^[26],这种分离减弱了物种对有限水分的竞争,是植物共存的重要机制^[25,27].然而,随着雨季水位上涨,汾河湿地草本植物水源趋同,都主要利用深

层土壤水、地下水和河水.本文野外植物根系挖掘也发现,雨季 5 种植物的根系主要分布在 65~85cm 土壤范围,能够获取到深层水源.Zhao 等^[28]比较了以往植物茎水同位素的文献,发现植物具有优先利用稳定且连续水源的特性.马辉英等^[15]分析了艾比湖湿地植物和潜在水源的同位素,发现地下水持续向上补给土壤水,深根植物体内地下水的贡献比例最高.这说明湿地植物的水分需求高,在多水源供给充足的情况下,深根草本更倾向于利用稳定的深层水源.

植物根系分布深度并不一定是植物水分吸收的活跃区,根系吸水活性会随着外界条件的刺激而发生变化^[16,29].研究区芦苇和怪柳的根系分布深度相近,两者的水分利用方式却明显不同.这与水分条件和根系结构有关,芦苇根系具有强大的通气组织,始终能保持较高的吸水活性,在不同季节均集中利用河水、深层土壤水和地下水.比较而言,怪柳的水分利用方式更加灵活,它们在旱季采取均衡的吸水策略,最大限度的保持全部根系的活力,充分获取水源,在雨季地下水浅埋时,又增大浅根系统的吸水活性,以减少缺氧胁迫的限制.周海等分析了干旱荒漠植物和各水源的氢氧同位素,发现成年怪柳的茎水同位素及其水分来源没有季节波动,怪柳主要利用深层土壤水和地下水维持生存^[29].朱林等^[30]利用 IsoSource 估算了地下水浅埋区的植物水分利用率,发现 3a 生怪柳主要利用浅层土壤水,特别是强降水时段,利用率更高^[31].这些研究说明,怪柳的水分来源存在区域差异,这与它们所处的生境水分条件密切相关,在极端干旱条件下充分调动深根吸水,在水分充足时又能激发浅根系统的强吸水活性,怪柳可以通过环境刺激不断调节自身的水分利用方式,向着最有利的方向发展.

此外,河岸带湿地作为地表水-地下水交互作用区^[32],湿地植物对河水的利用还受离岸距离和水文条件季节变化影响.本研究发现,旱季仅近岸分布(<100m)的芦苇、怪柳对汾河水的利用比例较高,远离河岸(150~450m)的小香蒲、水莎草、假苇拂子茅很少利用河水,而雨季它们对河水的利用比例均明显增加(图 7).这说明旱季汾河对湿地的水源补给主要集中在离岸 100m 范围内,洪水期河水与湿地含水层的连通性增强,补给强度加大,最大补给范围可扩展至离岸 450m.这与徐华山等^[32]在孟津湿地研究结

果类似,他们通过野外水位观测,发现河岸湿地地下水受河水影响显著,随着离岸距离增加,地下水位波动幅度减小.因此,维持汛期的水量和洪水脉冲频率对黄河沿岸湿地生态系统的发育面积和植物生长有重要作用.

3.3 植物水分利用的生态意义

水文过程是影响湿地系统发育和植被演替的决定性因子^[4],本研究发现黄河水是汾河口湿地地下水的主要补给水源.因此,河口区自然湿地生态建设必须高度重视黄河径流的保护,流域水库“蓄丰”同时应适当保证洪水脉冲的作用频率,扩大地表水对河口湿地的补水范围,这对维持湿地面积为重要.有研究表明,气候变化会导致未来黄土高原呈暖干趋势,河川径流量降低^[33].这无疑将削弱黄河与湿地系统间水力作用的强度和范围,导致湿地补给水量减少,生境变干,湿地面积可能萎缩.灌木柽柳可以利用多种水源,水分利用方式灵活,干旱环境下具有更强的生存竞争力,可能形成优势灌木群落.芦苇高度依赖深层土壤水和地下水,水分利用方式较单一,特别是生长旺季草本植物间水源趋同,种间水分竞争可能造成芦苇种群面积萎缩,优势种地位降低.因此,沿黄湿地修复和植被重建,建议考虑将芦苇种植于近岸带,使其充分发挥集中利用稳定水源的优势成长为建群种.

4 结论

4.1 汾河口湿地的地下水受当地大气降水的补给有限,主要来自黄河水补给;湿地浅层土壤水(0~20cm)主要受大气降水补给,深层土壤水(20~80cm)主要接受地下水、汾河水渗透补给.

4.2 河水对湿地植物的水源贡献与离岸距离和水文条件有关,旱季汾河对湿地的水源补给集中在近岸带(<100m),雨季的补给范围扩大到高位河漫滩(约450m).

4.3 小香蒲和假苇拂子茅的水分利用存在季节变化,旱季主要利用浅层土壤水,雨季利用深层土壤水和地下水(>60%).芦苇不同季节都主要利用河水、深层土壤水和地下水,很少利用浅层土壤水.灌木柽柳在旱季均衡利用各种水源,雨季则主要吸收浅层土壤水.

4.4 在未来黄河流域暖干化趋势下,柽柳灵活的水

分利用方式使其具有较强的水分竞争能力,可能形成优势灌木群落,而草本植物表现出水分利用的生态位重叠,芦苇种群可能面临更严重的水源竞争.

河岸带湿地降水、河水与地下水动态转化复杂,本研究仅分析了典型干旱、湿润时期的植物水分利用,受采样次数限制,尚不能全面揭示植物水分来源的完整季节变化,研究结果有一定的不确定性.未来工作将通过时空加密观测,结合水化学和水文观测等手段,全面揭示汾河湿地系统的水分传输规律及其对典型植物水分利用的影响机理.

参考文献:

- [1] Xu H, Zhang Z Q, Xiao J F, et al. Environmental and canopy stomatal control on ecosystem water use efficiency in a riparian poplar plantation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020,287(C): 107953.
- [2] 牛玉国,张金鹏.对黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的几点思考 [J]. *人民黄河*, 2020,42(11):1-4.
Niu Y G, Zhang J P. Thoughts on the national strategy of ecological protection and high quality development in the Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2020,42(11):1-4.
- [3] 张金良.黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考 [J]. *人民黄河*, 2020,42(4):1-6.
Zhang J L. Water strategy for ecological protection and high quality development in the Yellow River basin [J]. *Yellow River*, 2020,42(4): 1-6.
- [4] 黄文海,高 熠,席春辉,等.黄河下游湿地演变与实测径流相关性研究 [J]. *水生态学杂志*, 2022,45(3):1-7.
Huang W H, Gao Y, Xi C H, et al. Correlation analysis of wetland evolution and measured runoff in the lower Yellow River [J]. *Journal of Hydro-ecology*, 2022,45(3):1-7.
- [5] 仇志强,毛德华,相恒星,等.5 个时期黄河流域湿地格局及其变化研究 [J]. *湿地科学*, 2021,19(4):518-526.
Qiu Z Q, Mao D H, Xiang H X, et al. Patterns and changes of wetlands in the Yellow River basin for 5 periods [J]. *Wetlands*, 2021,19(4):518-526.
- [6] 张一然,文小航,罗斯琼,等.近 20 年若尔盖湿地植被覆盖变化与气候因子关系研究 [J]. *高原气象*, 2022,41(2):317-327.
Zhang Y R, Wen X H, Luo S Q, et al. Study on the relationship between vegetation cover change and climate factors in Zoige wetland in recent 20 Years [J]. *Plateau Meteorology*, 2022,41(2):317-327.
- [7] 洪 佳,卢晓宁,王玲玲.1973~2013 年黄河三角洲湿地景观演变驱动力 [J]. *生态学报*, 2016,36(4):924-935.
Hong J, Lu X N, Wang L L. Quantitative analysis of the factors driving evolution in the Yellow River delta wetland in the past 40 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(4):924-935.
- [8] 郭 云,梁 晨,李晓文.基于系统保护规划的黄河流域湿地优先保护格局 [J]. *应用生态学报*, 2018,29(9):3024-3032.
Guo Y, Liang C, Li X W. Priority conservation pattern of wetlands in the Yellow River basin based on systematic conservation planning [J].

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(9):3024–3032.
- [9] Yu D H, Guang X, Wang X J, et al. The impact of runoff flux and reclamation on the spatiotemporal evolution of the Yellow River estuarine wetlands [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2021,212: 105804.
- [10] 上官铁梁,宋伯为,朱 军,等.黄河中游湿地资源及可持续利用研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2005,19(1):7–13.
ShangGuan T L, Song B W, Zhu J, et al. A study on the wetland resources of the mid-Yellow River and their sustainable utilization [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005,19(1):7–13.
- [11] 郭东罡,上官铁梁,白中科,等.黄河中游连片滩湿地景观格局变化 [J]. *生态学报*, 2011,31(18):5192–5198.
Guo D G, ShangGuan T L, Bai Z K, et al. Wetland landscape transition pattern of Lianbo beach along the middle Yellow River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(18):5192–5198.
- [12] Guo H L, He X H, Chen J, et al. Research of the distribution of natural vegetation under different disturbances in wetland of lower Yellow River [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011,10:313–318.
- [13] He X H, Hörmann G, Strehmel A, et al. Natural and anthropogenic causes of vegetation changes in riparian wetlands along the lower reaches of the Yellow River, China [J]. *Wetlands*, 2015,35:391–399.
- [14] 王鸿祥,黄朴凡,郭文献,等.黄河中下游湿地动态演变及影响因素分析 [J]. *水电能源科学*, 2022,40(6):14–18.
Wang H X, Huang P F, Guo W X, et al. Analysis of wetland dynamic evolution and influencing factors in the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. *Water Resources and Power*, 2022,40(6):14–18.
- [15] 马辉英,杨晓东,吕光辉,等.新疆艾比湖湿地自然保护区荒漠优势种体内的水分来源 [J]. *生态学报*, 2017,37(3):829–840.
Ma H Y, Yang X D, Lü G H, et al. Water sources of dominant desert species in Ebinur lake wetland nature reserve, Xinjiang, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(3):829–840.
- [16] Zhang C C, Li X Y, Wu H W, et al. Differences in water-use strategies along an aridity gradient between two coexisting desert shrubs (*Reaumuria soongorica* and *Nitraria sphaerocarpa*): Isotopic approaches with physiological evidence [J]. *Plant Soil*, 2017,419:169–187.
- [17] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water [J]. *Nature*, 1991,350:335–337.
- [18] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotopes composition [J]. *Plant Cell and Environment*, 1992,15:1073–1082.
- [19] Ward D, Wiegand K, Getzin S. Walter's two-layer hypothesis revisited: Back to the roots [J]. *Oecologia*, 2013,172(3):617–630.
- [20] Zhang X, Xiao Y, Wan H, et al. Using stable hydrogen and oxygen isotopes to study water movement in soil-plant-atmosphere continuum at Poyang Lake wetland, China [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2017,25:221–234.
- [21] Geris J, Tetzlaff D, McDonnell J J, et al. Spatial and temporal patterns of soil water storage and vegetation water use in humid northern catchments [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,595:486–493.
- [22] 邵鹏飞.汾河下游河川径流变化特性分析 [J]. *山西水利科技*, 2012, 2:90–94.
Shao P F. Analysis on runoff variation characteristics at lower Fen river [J]. *Shanxi Hydraulic Science and Technology*. 2012,2:90–94.
- [23] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. *Oecologia*, 2003,136(2):261–269.
- [24] 翟远征,王金生,滕彦国,等.北京市不同水体中 D 和 ^{18}O 组成的变化及其区域水循环指示意义 [J]. *资源科学*, 2011,33(1):92–97.
Zhai Y Z, Wang J S, Teng Y G, et al. Variations of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in water in Beijing and their implications for the local water cycle [J]. *Resources Science*, 2011,33(1):92–97.
- [25] 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, Dong S G, 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.
- [26] Silvertown J, Araya Y, Growing D. Hydrological niches in terrestrial plant communities: A review [J]. *Journal of Ecology*, 2015,103(1): 93–108.
- [27] Wu J E, Liu W J, Chen C F. How do plants share water sources in a rubber-tea agroforestry system during the pronounced dry season [J]? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017,236:69–77.
- [28] Zhao Y, Wang L. Plant water use strategy in response to spatial and temporal variation in precipitation patterns in China: A stable isotope analysis [J]. *Forests*, 2018,9(3):123.
- [29] 周 海,郑新生,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.
- [30] 朱 林,许 兴,毛桂莲.宁夏平原北部地下水埋深地区不同灌木的水分来源 [J]. *植物生态学报*, 2012,36(7):618–628.
Zhu L, Xu X, Mao G L. Water sources of shrubs grown in the northern Ningxia Plain of China characterized by shallow groundwater table [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012,36(7):618–628.
- [31] 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 N, Bilal E M, 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.
- [32] 徐华山,赵同谦,孟红旗,等.滨河湿地地下水水位变化及其与河水响应关系研究 [J]. *环境科学*, 2011,32(2):362–367.
Xu H S, Zhao T Q, Meng H Q, et al. Relationship between groundwater level in riparian wetlands and water level in the river [J]. *Environmental Science*, 2011,32(2):362–367.
- [33] Wang L, Shu Z K, Wang G Q, et al. Analysis of future meteorological drought changes in the Yellow River basin under climate change [J]. *Water*, 2022,14(12):1896–1896.

作者简介: 许秀丽(1987-),山西忻州,副教授,博士,主要研究湿地水文过程及生态效应.发表论文 10 余篇.xlxu1987@163.com.