

基于稳定同位素技术的黄河支流 河岸植被水分来源解析

于晓雯¹, 刘华民^{1,2,3}, 王立新^{1,2,3}, 王奇¹,
刘旭华¹, 温璐^{1,2,3}, 董少刚^{1,2,3}, 潘保柱⁴

(1.内蒙古大学 生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2.草原生态安全省部
共建协同创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010021; 3.蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室,
内蒙古 呼和浩特 010021; 4.西安理工大学 西北旱区及生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: [目的] 分析比较不同水分梯度下植物水的氢氧同位素特征, 为黄河流域生态保护与防蚀控沙中适宜物种的筛选提供一定的理论基础。[方法] 采用氢氧稳定同位素技术, 基于 HYSPLI4 气团轨迹模型和贝叶斯混合模型 MixSIAR, 分析黄河主要支流—西柳沟河流河岸不同水分梯度下优势植物对潜在水源利用率, 进而提出不同植物的水分利用策略。[结果] 研究区在采样期间降水的水汽主要来源于西北季风输送和局地蒸发。在水分充足的河漫滩样地, 植物以浅层土壤水(0—30 cm)为主要水源。距离河道较远的河谷阶地上, 草本类植物主要利用浅层和中层土壤水(0—70 cm), 灌木类和高大草本类植物转而吸收更深层的土壤水(70—100 cm), 出现水文生态位分离的现象。[结论] 当水分缺乏时, 灌木类植物会因为吸水模式的优势具有更强的生存竞争力。灌木类植物是黄河流域生态保护与防蚀控沙的适宜物种。

关键词: 氢氧稳定同位素; 河岸植被; 植物水分来源; MixSIAR 模型; 黄河支流

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2021)05-0075-08 **中图分类号:** Q945.17⁺1, S124⁺.2

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.011; Yu Xiaowen, Liu Huamin, Wang Lixin, 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.

Analysis on Water Sources of Riverbank Vegetation in Tributary of Yellow River Based on Stable Isotope Technique

Yu Xiaowen¹, Liu Huamin^{1,2,3}, Wang Lixin^{1,2,3}, Wang Qi¹,
Liu Xuhua¹, Wen Lu^{1,2,3}, Dong Shaogang^{1,2,3}, Pan Baozhu^{4,5}

[1. College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China; 2. Collaborative Innovation Center for Grassland Ecological Security (Jointly Supported by the Ministry of Education of China and Inner Mongolia Autonomous Region), Hohhot, Inner Mongolia 010021, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China; 4. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China]

Abstract: [Objective] The hydrogen and oxygen isotope characteristics of plant water under different water gradients were analyzed and compared in order to provide a theoretical basis for the selection of suitable species for ecological protection, erosion control, and sand control in the Yellow River basin. [Methods]

收稿日期: 2021-04-01

修回日期: 2021-06-07

资助项目: 内蒙古科技重大专项项目“内蒙古‘一湖两海’水污染控制与综合治理关键技术研发与集成示范”(ZDZX2018054); 国家自然科学基金项目(31560146), (31960249); 内蒙古科技计划项目(201802100); 内蒙古自然科学基金面上项目(2021MS04009)

第一作者: 于晓雯(1991—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士研究生, 研究方向为生态水文过程。Email: yxw@mail.imu.edu.cn。

通讯作者: 王立新(1975—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事湿地科学研究。Email: lx_wimu@163.com。

Using hydrogen and oxygen stable isotope technology, based on the HYSPLIT4 air mass trajectory model and the Bayesian mixed model MixSIAR, the potential water utilization efficiency of dominant plants under different water gradients along the banks of a major tributary of the Yellow River, was analyzed, and water utilization strategies of different plants were then proposed. [Results] The atmospheric vapor was mainly affected by the local evaporation air mass and northwest monsoonal transport during the sampling period. Shallow soil water (0—30 cm) was the main water source for plants in the floodplain. On terraces of the river valley, herbaceous plants mainly used shallow and middle soil water (0—70 cm), while shrubs and tall herbs used water from deeper soil layers (70—100 cm). The phenomenon of ecohydrologic niche separation between plants was apparent. [Conclusion] When water is scarce, shrubs are more competitive because of their water use patterns. Shrubs are suitable species for ecological protection, erosion control, and sand control in the Yellow River basin.

Keywords: stable hydrogen and oxygen isotopes; riparian vegetation; plant water source; MixSIAR model; tributaries of the Yellow River

水是干旱半干旱区影响植被生长以及生态系统稳定性的重要环境因子,植被作为河流生态系统重要的组成部分,在区域水循环中起着不可忽视的作用^[1],对于蓄洪拦沙,维持河岸绿洲环境以及流域生态安全具有重要意义。为合理利用水资源,需要了解植被与水分的关系,掌握不同水分梯度下植被对潜在水源的利用率,确定同一生态系统中不同物种间水分利用和竞争关系。在自然界中,植物可以利用的水分主要来自大气降水、土壤水、地表径流和地下水^[2],干旱半干旱区,降雨较少,地表径流多指内陆河流。河岸生态水文过程复杂,各水体之间存在相互转化相互影响的关系,且植被分布具有空间异质性与不均匀性,增加了研究难度,使植被与水分的关系难以量化^[3]。研究发现,除了一些盐生和旱生植物外,大部分植物根系在吸水及向茎部运输的过程中,不与外界环境发生交换作用,不存在同位素分馏现象^[4],因此稳定性同位素技术作为一种天然的示踪剂,可以用于定量示踪植被水分来源,为研究土壤—植被—大气连续体(SPAC)中植物水分利用来源和贡献率的解析提供了一种新的解决途径。

稳定同位素技术最早在 20 世纪 40 年代末应用于地球化学和生态学的研究,Urey 等^[5]在 1947 年提出同位素分馏理论,1965 年 Craig 和 Gordon^[6]用经验公式的方式解释水分在蒸发过程中氢氧同位素的分馏过程,并提出著名的 Craig-Gordon 模型,1976 年 Libby 等^[7]发表了一篇有关树木同位素气候参数的文章,引起各国学者对稳定同位素研究的热烈讨论,这些学者的研究成果极大促进了稳定同位素技术的发展,稳定同位素生态学应运而生,这对现代生态学的研究有着重要的意义^[2,8]。20 世纪 90 年代初,美国^[9-10]、澳大利亚等^[11]学者对河岸植物水分来源进行

研究并取得重要成果。近些年,中国学者对高寒区^[12]、干旱区的黑河流域^[13]、塔里木河流域等^[14]河岸植被水分来源开展大量研究,而对于干旱半干旱区季节性河流河岸植物水分来源研究较少。

在 20 世纪 90 年代初,西柳沟流域实施退耕还林还草政策及一系列生态工程措施,希望以此改善河流的生态环境,虽然已有研究表明,植被对于蓄水拦沙有明显的效果^[15],但是不合理的植被恢复措施可能会导致水土流失^[16-17]、水分缺乏等^[18]生态负反馈。以往对西柳沟河流的研究主要集中在河流径流量变化^[19]、水沙防治^[20]、水沙过程的影响因素等^[21]方面,缺乏对植被与水分之间关系的认识。

基于以上内容,本研究选择具有代表性的西柳沟河流为研究对象,应用氢氧稳定同位素技术,分析比较不同水分梯度下植物水的氢氧同位素特征,掌握植物生长季降雨水汽的传输途径,定量阐明优势植物对水分的利用模式,以此加深对干旱半干旱区河流生态水文过程的认识,利用生态措施通过改变下垫面环境的方式改善流域生态环境,进而达到黄河流域生态保护与防蚀控沙目的。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

西柳沟(109°24′—110°00′E, 39°47′—40°30′N)是位于内蒙古境内直接穿过库布齐沙漠流入黄河的十大孔兑(蒙语中译为洪水沟)之一,发源于鄂尔多斯高原北缘的丘陵沟壑区^[22],流域面积为 1 356 km²,海拔 1 000~1 500 m。位于黄河右岸的“十大孔兑”,属季节性河流,由于河流处于特殊的地形地貌,虽然在植物生长季降雨少,但常形成洪水将大量的泥沙冲入到黄河中,因此也成为黄河内蒙古段产沙最多的支流,其中最严重的就是西柳沟^[23]。研究区从南到北

表现出不同的地貌特征,上游为水土流失严重的丘陵沟壑区,中游为穿越库布齐沙漠的风沙区,下游为地势相对平坦的黄土高原冲积区^[23]。属于半干旱大陆性气候,季节性差异较明显,降雨集中在植物生长季的 6—9 月,年平均降雨量 267.7 mm 之间,年均温在 5.3~6.1 °C 之间。土壤类型以栗钙土为主;区域内植被稀疏,植被覆盖度较低,由于河流所处地貌类型多样,水文条件存在差异,导致上、中、下游的植被类型不同。研究区受风水两相侵蚀条件的影响,多年平均侵蚀模数 5 000 t/(km²·a)^[20]。

1.2 样地设计与样品采集

1.2.1 样点设置 为全面考虑西柳沟河岸植被的水分来源,基于河流景观生态学原理,本文主要分为横向和纵向两个方面设置样点。首先横向上,在垂直河道方向设置不同水分梯度下的样地;纵向上,考虑到研究区被 3 种不同的地貌类型划分为面积大小不等的上、中、下游,在整条河流的河岸从上游到下游均匀布点(表 1)。每个采样点设置 1~2 个 10 m×10 m 的样地,每个样地在对角线方向设置 3 个 1 m×1 m 的样方。采样时间为 2018 年 8 月和 2020 年 8 月。

表 1 黄河支流西柳沟河岸不同样地优势植物组成

样地	科名	属名	物种名	生长型
上游	禾本科(Poaceae)	芦苇属(<i>Phragmites</i>)	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	PH
		拂子茅属(<i>Calamagrostis</i>)	拂子茅(<i>Calamagrostis epigeios</i>)	PH
		狗尾草属(<i>Setaria</i>)	狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	AH
		隐子草属(<i>Cleistogenes</i>)	糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	PH
	毛茛科(Ranunculaceae)	碱毛茛属(<i>Halerpestes</i>)	金戴戴(<i>Halerpestes ruthenica</i>)	PH
	藜科(Chenopodiaceae)	碱蓬属(<i>Suaeda</i>)	碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)	AH
		虫实属(<i>Corispermum</i>)	虫实(<i>Corispermum hyssopifolium</i>)	AH
	怪柳科(Tamaricaceae)	怪柳属(<i>Tamarix</i>)	怪柳(<i>Tamarix chinensis</i>)	AB
	豆科(Fabaceae)	锦鸡儿属(<i>Caragana</i>)	柠条锦鸡儿(<i>Caragana korshinskii</i>)	SP
	菊科(Asteraceae)	蒿属(<i>Artemisia</i>)	黄蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)	PH
中游	莎草科(Cyperaceae)	莎草属(<i>Cyperus</i>)	密穗莎草(<i>Cyperus eragrostis</i>)	AH
	灯心草科(Juncaceae)	灯心草属(<i>Juncus</i>)	灯心草(<i>Juncus effusus</i>)	PH
	禾本科(Poaceae)	早熟禾属(<i>Poa</i>)	小糠草(<i>Poa nemoralis</i>)	PH
		芦苇属(<i>Phragmites</i>)	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	PH
		沙鞭属(<i>Psammochloa</i>)	沙鞭(<i>Psammochloa villosa</i>)	PH
	香蒲科(Typhaceae)	香蒲属(<i>Typha</i>)	香蒲(<i>Typha orientalis</i>)	AM
	豆科(Fabaceae)	岩黄耆属(<i>Hedysarum</i>)	花棒(<i>Hedysarum scoparium</i>)	SP
	杨柳科(Salicaceae)	柳属(<i>Salix</i>)	沙柳(<i>Salix cheilophila</i>)	AB
	菊科(Asteraceae)	—	沙地旋覆花(<i>Inula salsoloides</i>)	PH
	下游	莎草科(Cyperaceae)	莎草属(<i>Cyperus</i>)	褐穗莎草(<i>Cyperus fuscus</i>)
		藨草属(<i>Scirpus</i>)	水葱(<i>Scirpus validus</i>)	WP
禾本科(Poaceae)		芦苇属(<i>Phragmites</i>)	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	PH
菊科(Asteraceae)		旋覆花属(<i>Inula</i>)	欧亚旋覆花(<i>Inula britannica</i>)	PH
		苍耳属(<i>Xanthium</i>)	苍耳(<i>Xanthium sibiricum</i>)	AH
		风毛菊属(<i>Saussurea</i>)	碱地风毛菊(<i>Saussurea runcinata</i>)	PH
		蒿属(<i>Artemisia</i>)	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)	PH
藜科(Chenopodiaceae)		沙蓬属(<i>Agriophyllum</i>)	沙蓬(<i>Agriophyllum squarrosum</i>)	AH
		雾冰藜属(<i>Bassia</i>)	雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)	AH

注:PH 为多年生草本植物;AH 为一年生草本植物;WP 为水生或湿生植物;SP 为灌木;AB 为灌木或小乔木;AM 为水生或沼生草本植物。

1.2.2 采样方法

(1) 植物样品采集。在所设样地中选取长势良好、植株大小相似的灌木层和草本层优势植物,每种植物设有 3 个重复。将采集的植物样品快速放入带有盖子的 5 ml 玻璃样品瓶中,用于后续植物水分的提取。

(2) 土壤样品采集。在所取植物旁侧同时进行

土壤样品的采集,使用土钻取 0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 70—100 cm 层土样,每层取 3 个重复,放入 5 ml 玻璃样品瓶中,用于土壤水氢氧稳定同位素的测定。同时测定土壤含水率(SWC,%)。

(3) 地下水 and 地表水收集。河水样品取自样地附近的河流,地下水样品取自样地附近居民家井水。共采集河水 12 个,地下水 21 个。

所有植物样品、土壤样品和水样装入样品瓶内立即用 parafilm 封口膜密封,在野外放入保温箱保存后带回实验室分析。

1.3 稳定性氢氧同位素测定

用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100, LGR, Beijing, China)提取水分,使用 $0.22 \mu\text{m}$ 有机相针式滤器进行过滤,抽提效率达到 98% 以上。

水分氢氧稳定同位素值使用液态水同位素分析仪(TIWA-45-EP, ABB-Los Gatos Research)进行测定, δD 的测量精度为 $\pm 1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 的测量精度为 $\pm 0.3\text{‰}$ 。氢氧同位素比值以相对于维也纳平均海洋水(VSMOW)的千分差值表示:

$$\delta X = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中: X 代表 D 或 ^{18}O ; R_{sample} 为水样中重同位素与轻同位素的比值($^2\text{H}/^1\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$),即同位素比率; R_{standard} 为维也纳平均海洋水(VSMOW)的同位素比率。

1.4 数据分析

1.4.1 植物水分来源 为消除植物水和土壤水中有机物污染对结果所带来的影响,应用 LWIA Post Analysis (Version 3.1.0.9)数据后处理软件对测得的数据进行分析、检测、校准。应用贝叶斯混合模型 MixSIAR (Version 3.1.7)对筛选过的数据进行植物水分来源分析^[24]。潜在水源包括地下水、河水和土壤水。为使后续分析更清晰,将土壤水分为 3 层,分别为浅层(0—30 cm)、中层(30—70 cm)和深层(70—100 cm),并将模拟结果合并。

1.4.2 水汽来源模型 为得到降水水汽的传输途径和过程,选取美国国家海洋和大气管理局(NOAA)所开发的基于拉格朗日算法的 HYSPLIT4 气团轨迹模型对研究区的水汽来源进行后向轨迹模拟。模型中所需要的气象数据来源于美国国家气象局的国家环境预测中心(NCEP)提供的 GDAS (global data assimilation system)数据,以西柳沟上游最远的采样点为观测终点,分别回溯气团到达观测点前 168 h 的轨迹。

1.4.3 数据统计分析 本文应用 SPSS 软件进行的数据统计分析有 Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验和方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 植物水氢氧同位素组成及变化特征

植物种类和采样地点不同,使得植物水氢氧同位素的组成存在差异(图 1)。在上游,距离河岸 50—200 m 范围生长的植物水氢氧同位素值变化范围

最大,其 δD 值的变化范围为 $-74.90\text{‰} \sim -58.55\text{‰}$,平均值为 -69.19‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为 $-10.92\text{‰} \sim -5.42\text{‰}$,平均值为 -8.52‰ ;其次为距河岸大于 200 m 的样地生长的植物, δD 平均值为 -66.85‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -7.43‰ ;距河岸 $< 50\text{ m}$ 区域的植物 δD 平均值为 -48.92‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -5.40‰ 。分析中游样地优势植物水同位素可知,距河岸 200 m 的样地植物水氢氧同位素值变化范围最大, δD 值的变化范围为 $-71.00\text{‰} \sim -59.73\text{‰}$,平均值为 -63.42‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为 $-10.51\text{‰} \sim -7.34\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -8.69‰ ;距河岸小于 50 m 和介于 50—200 m 区域的植物水氢氧同位素值变化范围相近, δD 平均值分别为 -63.42‰ 和 -66.37‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -9.12‰ 和 -9.24‰ 。下游和上游变化趋势相同,距河岸 $< 50\text{ m}$,50—200 m 和 $> 200\text{ m}$ 的植物水 δD 平均值分别为 -73.04‰ , -63.41‰ 和 -67.30‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -8.51‰ , -7.00‰ 和 -8.21‰ 。

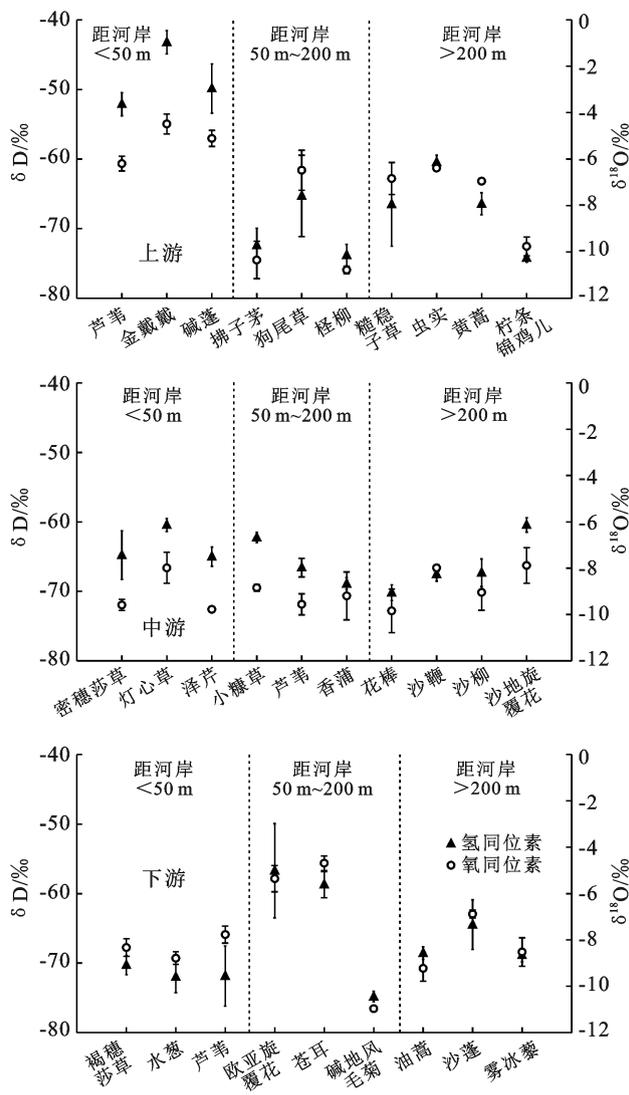


图 1 西柳沟河岸不同样地植物水稳定氢氧同位素变化特征

通过上述分析可知,距河道近的样地主要生长的植物以草本为主,随着距离的增加出现灌木类植物。其中在上、中、下游距离河道最近的样地,优势植物水同位素差距比较大,这可能是因为在这一样地中,土壤水分容易受到河水补给的影响导致植物对水分的吸收利用有所差异。在草本植物和灌木植物共存的样地中,同位素值变化范围大,且草本植物水同位素值大于灌木植物,这可能是由于草本植物根系较短,主要利用浅层容易获得的水分,而灌木类植物根系更深,在水分不充足时,吸收更深层的水分。研究区上、中、下游距河岸不同距离的植物水氢氧同位素值均存在显著差异($p < 0.05$),以上表明植物对水分的吸收具有空间上的差异,且灌木植物和草本植物具有不同的水分来源。

2.2 基于 MixSAIR 模型分析植物的水分来源

为定量分析植物水分来源,选用 MixSAIR 模型计算潜在水源(浅层土壤水、中层土壤水、深层土壤水、河水和地下水)对植物水的贡献率(图2)。河流上中下游所处的地形地貌、水分条件存在差异,因此优势植物有所不同,距离河道最近样地的优势植物分别为芦苇、金戴戴、碱蓬、密穗莎草、灯心草、小糠草、褐穗莎草、水葱和芦苇,这些植物所利用的都是浅层土壤水分,利用率分别为 $(36.5 \pm 8.04)\%$ 、 $(57.1 \pm 12.30)\%$ 、 $(45.7 \pm 9.57)\%$ 、 $(50.9 \pm 10.55)\%$ 、 $(40.3 \pm 9.39)\%$ 、 $(50.2 \pm 10.80)\%$ 、 $(43.3 \pm 9.67)\%$ 、 $(45.4 \pm 9.83)\%$ 和 $(46 \pm 10.40)\%$ 。

随着距河道的距离增大,在上游出现了灌木类植物怪柳,对土壤水和地下水的利用率比较平均,很少利用河水,水分贡献率最高的就是深层土壤水,贡献率为 $(27 \pm 19.6)\%$,除怪柳外,优势植物还有植株较高的拂子茅和一年生植物狗尾草,拂子茅的水分来源与怪柳相似,利用最多的是深层土壤水,为 $(25.6 \pm 18.2)\%$,而狗尾草则主要利用浅层土壤水为 $(42.4 \pm 9.64)\%$;在这一样地,中游的优势植物为小糠草、芦苇、香蒲,虽然它们植株的大小存在差异,但都为湿生植物,所利用的主要是浅层土壤水,贡献率分别为 $(45.2 \pm 9.47)\%$ 、 $(52.2 \pm 11.49)\%$ 和 $(60.60 \pm 15.02)\%$,与上游不同的是,同样距离河道50~200 m的样地,中游水分条件更好,甚至出现淹水的情况,因此水分条件好可能是导致植物利用浅层土壤水的原因;下游的优势植物为欧亚旋覆花、苍耳和碱地风毛菊,其中植株高度相近的欧亚旋覆花和苍耳主要利用的浅层和中层土壤水,占有潜在水源的63.9%和60.7%,碱地风毛菊主要利用浅层土壤水,贡献率为 $(43 \pm 12.23)\%$ 。

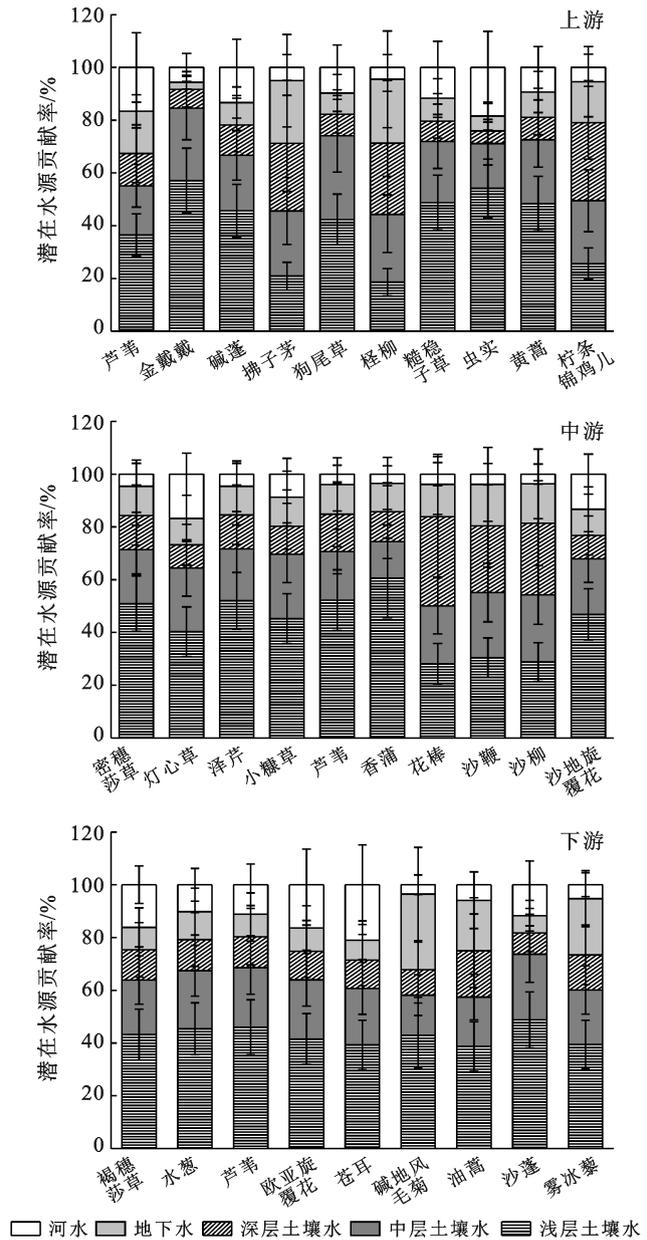


图2 西柳沟河岸潜在水源对优势植物水分的贡献率

距离河道大于200 m的样地以灌木类植物为主,如上游的柠条、中游的沙柳和花棒,以及下游的油蒿,其中柠条、沙柳和花棒主要利用浅层土壤水和深层土壤水,总利用率分别为55.2%、56%、62%,油蒿以浅层土壤水为主要水源 $(38.7 \pm 9.39)\%$,且除了河水外,对其他水源的利用都比较平均。除灌木外,每个样地的优势植物还包括草本植物,上游草本植物是糙隐子草、虫实和黄蒿,浅层土壤水为3种植物提供更多的水分,贡献率分别为 $(48.7 \pm 10.41)\%$ 、 $(54.2 \pm 11.09)\%$ 和 $(48.3 \pm 10.32)\%$;中游的沙鞭主要水源是土壤水,且每层土壤水对其贡献的水分比例相当,总贡献率为80.4%,沙地旋覆花主要利用浅层和中层土壤水,利用率分别为 $(46.8 \pm 9.74)\%$ 和 $(21.1 \pm 8.93)\%$ 。下游

的优势草本植物为沙蓬和雾冰藜,沙蓬在浅层和中层土壤中共吸收了 73.7% 的水分,而雾冰藜在浅层、中层土壤水以及地下水都吸收一定比例的水分,利用率分别为 $(39.4 \pm 9.28)\%$, $(20.7 \pm 9.11)\%$ 和 $(21.3 \pm 10.6)\%$ 。

综上可知,土壤水是植物优先选择的水源,当水分条件较好时,植物更倾向于吸收浅层土壤水;在同一生境中,灌木植物对各层土壤水分的利用比较均匀,植株较小的草本植物则主要利用浅层土壤水。潜在水源对距河道相同距离的上、中、下游样地植物的水分贡献率无显著差异 ($p > 0.05$);在相同样地中,优势植物都为草本植物时,潜在水源贡献率无显著性差

异 ($p > 0.05$),而在草本和灌木植被共存的样地中,水源贡献率具有显著性差异 ($p < 0.05$)。草本植物和灌木植物的灵活用水策略减少了对水和养分的竞争,增强了对干旱环境的适应性。

为确定优势植物利用的潜在水源,将植物水的氢氧同位素值与不同深度的土壤水、河水和地下水进行比较,以植物水同位素垂直线与土壤水同位素剖面的交点用于确定植物水分吸收的主要深度(图 3—4),这种图形推理法可以初步判断出不同样地的植物茎部水同位素的来源但不能量化植物水分的利用率。

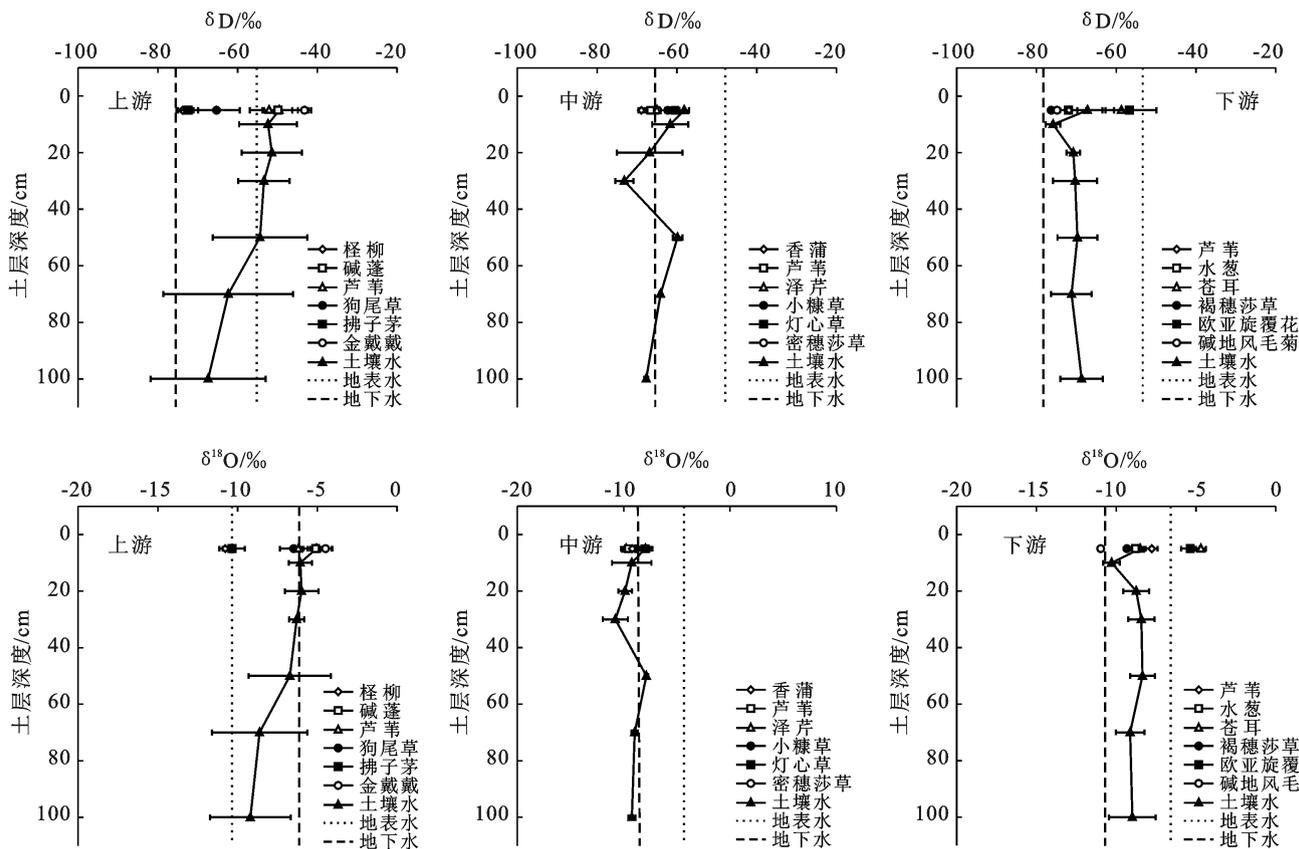


图 3 西柳沟河漫滩水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 值

3 讨论

3.1 土壤水垂直梯度变化特征

土壤水同位素受到降雨入渗、地表蒸发、地下水和地表水补给作用的影响,在垂直方向上呈现出不同的变化特征^[26]。通过图 3 可知,河漫滩上的中游和下游浅层土壤水同位素较贫化甚至接近地下水的同位素值,这可能是因为在采样期间,经历一次强度较小降雨事件,根据降雨水汽来源分析得知,研究区局地蒸发强烈,雨水在降落过程中发生同位素分馏,使得含有重同位素的水分渗入浅层土壤导致浅层土壤

水同位素值更贫化^[27]。河漫滩土壤水同位素值从浅层到深层变化不大,这可能是由于河水对土壤水的侧向补给导致,与周天河等^[28]研究结果一致。因此当靠近河道时,降雨入渗、河水补给是影响土壤水稳定同位素值变化的主要因素。

同样在降雨之后取样,却发现河谷阶地土壤水同位素值随土层深度增加而减小(图 4),表层土壤水同位素值更富集,接近河水同位素值,由于远离河岸的样地很难受到河水的补给,可以说明,降雨入渗后浅层土壤水经历了处于开阔环境的河水一样的强烈蒸发作用,但这种作用对深层土壤水影响较小,根据地

下水和河水同位素垂线与土壤水同位素节点的距离可初步判断,深层土壤水主要来源于地下水,随土层深度的增加变化比较稳定。研究学者对干旱半干旱

区土壤水的影响因素研究得出相同结论^[29-30]。当距离河岸较远时,土壤水受到降雨及地下水的补给,蒸发作用影响土壤水同位素的垂直变化。

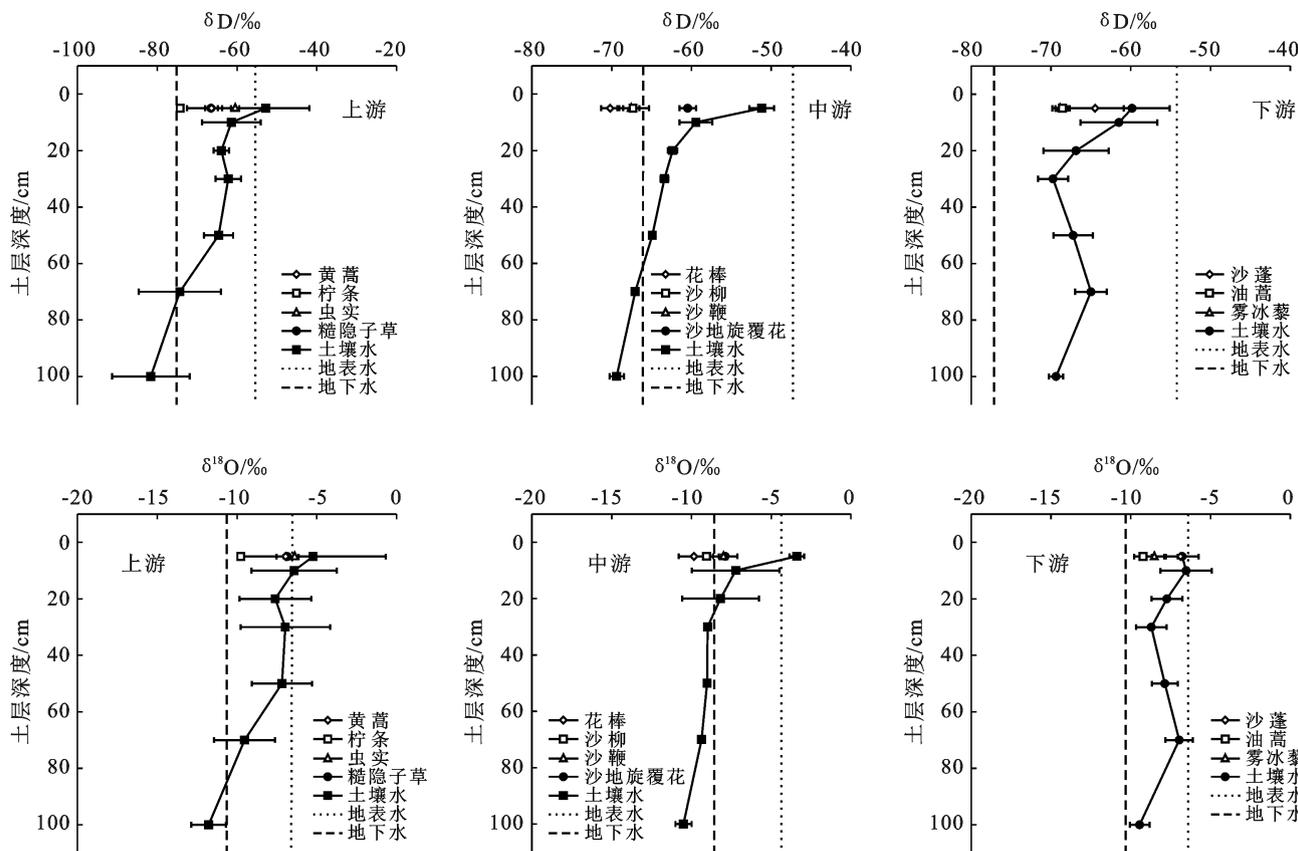


图 4 西柳沟河谷阶地水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 值

3.2 不同水分梯度下优势植物水分来源差异

河流生态系统具有纵向和横向的水文连通性,最明显和最有力的连接是河流的主河道和泛滥平原之间的联系,河流生态系统的水文连通性是季节性的,受到洪水的发生程度影响。实地考察发现西柳沟中游所处的环境比较特殊,可以形容为“沙漠中的绿洲”,中游左右两岸的风成沙在风蚀作用下将风沙带入河道之中,夏季遇到暴雨时形成洪水,在大量的径流冲泄之下把堆积在河道的泥沙带入黄河,有研究表明黄河内蒙古河段河道泥沙淤积其中一部分主要来源于十大孔兑的库布齐沙漠^[31]。植被作为一种天然的屏障,对防止水土流失、拦沙蓄水具有一定作用。根据河流景观生态学原理,河岸植被空间分布格局存在明显的时空异质性^[32],同时河岸植被也遵循河流连续体的特征呈现出连续分布的规律^[33]。MixSIAR模型计算结果可知,水分条件不同的样地,植物选择的水源有所差异,可见,水环境对植被群落分布和植物水分利用格局的空间异质性和连续性具有调控作用,因此掌握植被的水分利用策略对选择适宜的物

种,使其发挥河岸带植被作用显得尤为重要。

水文生态位(hydrological niches)在维持植物多样性方面发挥重要作用,尤其在水源不足的环境中水文生态位显得至关重要。基于 HYSPLIT4 后向轨迹模型对西柳沟样地的气水汽来源进行模拟发现,采样期间水汽大多来源于局地蒸发,气候干燥,且西柳沟河岸多为不同生态特征的草本植物以及灌木、草本植物组成的样地,在这样长期的水资源竞争环境下物种间依然能共存,这种共存机制可以用水文生态位分离(ecohydrologic separation)来解释^[34-35]。植物主要通过根系获取水分植物,因此根系在土壤中的空间分布特征对植物的水分利用策略起关键作用^[36-37]。本研究发现,在水分条件好的区域,尽管植株的大小、生活型、以及根系都不同,植物都会倾向于选择离植株更近的浅层土壤水;但浅层土壤水分不足时,怪柳、花棒、柠条、沙柳、油蒿等灌木类植物以及植株高大的草本植物更倾向于深层土壤水。这是由于灌木和高大草本植物具有二态型根系^[37-38],当不存在水分竞争时,侧根可以吸收浅层土壤水,与浅根系的草本植物

产生水分生态位重叠现象;但当水资源有限时,为了保证生存,灌木和高大草本类植物另一部分侧根可以向更深层的土壤中获得水分,由此呈现出水文生态位分离。植物对水源的均匀利用是最佳吸水模式,且具有更灵活的水分利用模式的植物在干旱的环境下生存能力强,更适用于防蚀控沙,保护流域生态环境。

4 结论

通过对植物水、土壤水、河水和地下水的氢氧稳定同位素特征以及降雨的水汽来源分析得到以下结论。

(1) 河岸带优势植物主要利用土壤水,很少利用河水。

(2) 在河漫滩上,灌木类和草本类植物都以浅层土壤水(0—30 cm)为主要水源,利用率达 40% 以上。

(3) 在河岸阶地上,草本类植物以浅中层土壤水为主要水源,而灌木类和高大草本类植物转而吸收深层土壤水,出现水文生态位分离现象,这类植物具有灵活的水分利用策略更适于干旱半干旱环境。

[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(10):1502-1514.

[2] 林光辉, 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

[3] 杨永刚, 肖洪浪, 赵良菊, 等. 流域生态水文过程与功能研究进展[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(5):1242-1246.

[4] Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 167(1/2/3/4): 351-368.

[5] Urey H C. The thermodynamic properties of isotopic substances [J]. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 1947:562.

[6] Roden J S, Lin G, Ehleringer J R. A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotope ratios in tree-ring cellulose [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1):21-35.

[7] Libby L M, Pandolfi L J, Payton P H, et al. Isotopic tree thermometers [J]. *Nature*, 1976, 261(5558):284-288.

[8] Newton J. *Stable Isotope Ecology* [M]. Springer, 2006.

[9] Busch D E, Ingraham N L, Smith S D. Water uptake in woody riparian phreatophytes of the Southwestern United States: A stable isotope study [J]. *Ecological Applications*, 1992, 2(4):450-459.

[10] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not

use stream water [J]. *Nature*, 1991, 350(6316):335-337.

[11] Costelloe J F, Payne E, Woodrow I E, et al. Water sources accessed by arid zone riparian trees in highly saline environments, Australia [J]. *Oecologia*, 2008, 156(1):43-52.

[12] 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[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(12):1091-1100.

[13] 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[J]. *地球学报*, 2008, 29(6):709-718.

[14] 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.

[15] Siriwardena L, Finlayson B L, McMahon T A. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 326(1/2/3/4):199-214.

[16] Stokes A, Sotir R, Chen W, et al. Soil bio- and eco-engineering in China: Past experience and future priorities [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(3):247-257.

[17] Chen Hongsong, Shao Mingan, Li Yuyuan. Soil desiccation in the loess plateau of China [J]. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91-100.

[18] Chen Liding, Huang Zhilin, Gong Jie, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China [J]. *Catena*, 2007, 70(2):200-208.

[19] 姚海芳, 师长兴, 邵文伟, 等. 基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(6):139-144.

[20] 冉大川, 张栋, 焦鹏, 等. 西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(5):146-152.

[21] Yao Haifang, Shi Changxing, Shao Wenwei, et al. Changes and influencing factors of the sediment load in the Xiliugou Basin of the upper Yellow River, China [J]. *CATENA*, 2016, 142:1-10.

[22] 阳辉, 师长兴, 姚海芳. 风水两相侵蚀条件下流域泥沙粒径分布分形维数特征: 以黄河上游内蒙古段西柳沟为例[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4):84-89.

[23] 刘通, 黄河清, 邵明安, 等. 气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2):17-22.

[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]. *Peer J*, 2018, 6(4):1-27.

[25] Yang Bin, Wen Xuefa, Sun Xiaomin. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201:218-228.

- 和强度对土壤粒度分布的影响[J]. 干旱区地理, 2005, 28(6): 800-804.
- [10] 王英芹, 李林立, 张海, 等. 岩溶高山区不同土地利用类型土壤粒度特征[J]. 人民长江, 2009, 40(3): 29-30, 34.
- [11] 张小萌, 李艳红, 赵明亮. 干旱区不同植物群落下土壤粒度特征研究[J]. 广东农业科学, 2015, 42(21): 45-49.
- [12] 袁杰, 曹广超, 鄂崇毅, 等. 环青海湖表层土壤沉积物粒度分布特征及其指示意义[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 150-154.
- [13] 闫玉春, 唐海萍, 张新时, 等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1263-1268.
- [14] 张正偲, 董治宝. 土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 86-89.
- [15] 张彩云, 庞奖励, 常美蓉, 等. 农业耕作土壤与人工经济林地土壤磁化率和质地特征对比[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(1): 91-94.
- [16] 周群英, 黄春长, 庞奖励. 泾河上游黄土高原全新世成壤环境演变与人类活动影响[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 142-147.
- [17] 阿依图尔荪·哈力穆拉提, 玉素甫江·买买提, 买合皮热提·吾拉木. 渭干河—库车河三角洲绿洲植棉土壤的粒度分布特征[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(23): 9580-9582, 9630.
- [18] 吴美榕, 李志忠, 靳建辉, 等. 新疆伊犁河谷新垦荒地土壤粒度特征[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 211-216.
- [19] 杨志勇, 陈新闻, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠不同土地利用类型粒度特征分析[J]. 中国水土保持, 2015(7): 50-53.
- [20] 唐艳, 刘连友, 杨志鹏, 等. 毛乌素沙地南缘灌丛沙丘土壤水分与粒度特征研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 6-9.
- [21] 李占宏, 海春兴, 丛艳静. 毛乌素沙地表土粒度特征及其空间变异[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 74-79, 92.
- [22] 陈国靖, 蔡进军, 马璠, 等. 宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(05): 49-53+60.
- [23] 袁杰, 曹生奎, 曹广超, 等. 祁连山南坡不同植被类型土壤粒度特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 76-82.
- [24] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地不同土地利用和管理方式对土壤质量性状的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1681-1686.
- [25] 王惠泽, 孙虎. 秦岭南麓小流域不同土地利用类型剖面粒度分析[J]. 河南科学, 2016, 34(12): 2118-2123.
- [26] 常美蓉, 庞奖励, 张彩云, 等. 关中东部不同土地利用方式对土壤质地影响探讨[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(1): 50-53.

(上接第 82 页)

- [26] Hsieh J C C, Chadwick O A, Kelly E F, et al. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration [J]. Geoderma, 1998, 82(1/2/3): 269-293.
- [27] Renée Brooks J, Barnard H R, Coulombe R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(2): 100-104.
- [28] 周天河, 赵成义, 吴桂林, 等. 塔里木河上游胡杨(*Populus euphratica*), 怪柳(*Tamarix ramosissima*) 水分来源的稳定同位素示踪[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 124-131.
- [29] Gazis C, Feng Xiahong. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths [J]. Geoderma, 2004, 119(1/2): 97-111.
- [30] Wu Huawu, Li Xiaoyan, Jiang Zhiyun, et al. Contrasting water use pattern of introduced and native plants in an alpine desert ecosystem, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 182-191.
- [31] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1641-1649.
- [32] 王立新, 刘华民, 刘玉虹, 等. 河流景观生态学概念、理论基础与研究重点[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 228-234.
- [33] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 550-559.
- [34] Silvertown J, Araya Y, Gowing D. Hydrological niches in terrestrial plant communities: A review [J]. Journal of Ecology, 2015, 103(1): 93-108.
- [35] Meißner M, Köhler M, Schwendenmann L, et al. Partitioning of soil water among canopy trees during a soil desiccation period in a temperate mixed forest [J]. Biogeosciences, 2012, 9(8): 3465-3474.
- [36] Nie Yunpeng, Chen Hongsong, Wang Kelin, et al. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 420/421: 264-274.
- [37] Wang Jian, Lu Nan, Fu Bojie. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning [J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 685-693.
- [38] Schenk H J, Jackson R B. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics [J]. , 2005, 126(1/2): 129-140.