

# 青藏高原东缘某隧道建设区典型植物水分利用策略

王鹏<sup>1</sup>, 陈果<sup>1,2</sup>, 裴向军<sup>1,3</sup>, 唐晓鹿<sup>1,2,3</sup>, 宋词<sup>4</sup>

(1.成都理工大学 生态环境学院, 四川 成都 610059; 2.成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 3.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 4.成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** [目的] 揭示青藏高原东缘隧道建设区植物的水分利用特征及其对环境变化的响应, 为自然和人为影响下的生态脆弱区水土保持工作提供科学参考。[方法] 通过测定海拔 3 230 m 的某隧道建设区 2020—2021 年不同月份典型植物木质部水和各潜在水源的  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值, 利用 MixSIAR 模型计算植物吸收各潜在水源的比例, 并计算每两种植物间的相似性比例指数 (PS 指数) 以比较不同物种的水分竞争关系。[结果] 紫羊茅 (*Festuca rubra*)、川西云杉 (*Picea likiangensis* var. *balfouriana*) 和刺叶高山栎 (*Quercus spinosa*) 以浅层土壤水 (0—40 cm) 作为主要水源; 川杨 (*Populus szechuanica*) 主要吸收中深层 (40—200 cm) 土壤水; 2021 年 8 月和 10 月植物对浅层土壤水的利用比例较 2020 年同时期明显降低; 川西云杉对 0—40 cm 和 40—80 cm 层土壤水的利用比例与相应层土壤含水量分别存在显著正相关和显著负相关关系 ( $p < 0.05$ ); 在时间尺度上, 川杨在 2020 年 10 月与其他 3 种植物的水分竞争关系较弱, PS 指数范围为 0.19~0.54。[结论] 土壤含水量及外界温度的改变是青藏高原东缘植被水分利用策略变化的主要因素, 且这两个因子的重要性因物种而异; 隧道建设会引起土壤和土壤水的流失, 从而导致隧道建设后土壤含水量的降低; 隧道建设后植物对浅层土壤水的依赖比隧道建设前低, 因此需关注生态脆弱区隧道建设对土壤水分及植被适应机制的影响。

**关键词:** 氢氧稳定同位素; MixSIAR 模型; 水分利用; 水分竞争; PS 指数; 青藏高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0137-09

中图分类号: Q945

**文献参数:** 王鹏, 陈果, 裴向军, 等. 青藏高原东缘某隧道建设区典型植物水分利用策略[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 137-145, 365. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230508.005; Wang Peng, Chen Guo, Pei Xiangjun, et al. Water use strategies of typical plants in a tunnel construction area at eastern margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 137-145, 365.

## Water Use Strategies of Typical Plants in a Tunnel Construction Area at Eastern Margin of Qinghai-Xizang Plateau

Wang Peng<sup>1</sup>, Chen Guo<sup>1,2</sup>, Pei Xiangjun<sup>1,3</sup>, Tang Xiaolu<sup>1,2,3</sup>, Song Ci<sup>4</sup>

(1.College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan 610059, China; 2.College of Earth Science, Chengdu University of

Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and

Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

4.College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** [Objective] The water use characteristics of plants and their responses to environmental changes in a tunnel construction area at the eastern margin of Qinghai-Xizang Plateau were studied in order to provide a reference for soil and water conservation in this ecologically fragile region influenced by both nature and human activity. [Methods] The  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of xylem water of typical plants and potential water sources in different months from 2020 to 2021 in a tunnel construction area with an altitude of 3 230 m were measured. The MixSIAR model was used to calculate the proportion of plants absorbing water from each potential water source. The proportional similarity index (PS index) between every two plants was calculated

收稿日期: 2022-12-08

修回日期: 2023-02-28

资助项目: 成都理工大学珠峰科学计划项目“青藏高原重大工程全生命周期: 工程挖填过程生态地质环境互馈原理与修复关键技术”(80000-2021ZF11410)

第一作者: 王鹏(1997—), 男(汉族), 重庆市人, 硕士研究生, 研究方向为生态地质环境保护与恢复。Email: wangpeng20@stu.cdut.edu.cn.

通讯作者: 陈果(1986—), 男(汉族), 湖北省随州市人, 博士, 副教授, 主要从事同位素生态水文方面的研究。Email: chenguo17@cdut.edu.cn.

to compare the water competition relationship between different species. [Results] Shallow soil water (0—40 cm) was the main water source for *Festuca rubra*, *Picea likiangensis* var. *balfouriana*, and *Quercus spinosa*. *Populus szechuanica* mainly absorbed middle and deep (40—200 cm) soil water. The uptake proportions from shallow soil water by plants in August and October 2021 were significantly lower than during the same period in 2020. For *P. likiangensis* var. *balfouriana*, there were significant positive and negative correlations ( $p < 0.05$ ) between soil water utilization ratio and soil water content in the 0—40 cm and 40—80 cm layers, respectively. The water competition relationships between *P. szechuanica* and the other three plants in October 2020 were weak, with the PS index ranging from 0.19 to 0.54. [Conclusion] Changes in soil moisture content and external temperature were the main factors influencing the variation of vegetation water use strategy at the eastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau, and the importance of these two factors varied among different species. Loss of soil and soil water due to tunnel construction resulted in a decrease in soil water content after tunnel construction. The contribution of shallow soil water to plants was lower after tunnel construction than before tunnel construction. Therefore, the impact of tunnel construction on soil water and vegetation adaptation mechanisms in ecologically fragile areas needs to be of concern.

**Keywords:** stable hydrogen and oxygen isotopes; MixSIAR model; water use; water competition; PS index; Qinghai-Xizang Plateau

青藏高原东缘是典型的生态脆弱区以及青藏高原生态屏障区的重要组成部分<sup>[1]</sup>,也是世界上最敏感、脆弱的地区之一<sup>[2-3]</sup>,该区域植被的生长状况直接影响着当地的水土保持功能,并潜在影响着长江中下游的生态安全。另外,由于该地区海拔落差较大,生态环境和气候系统变化显著<sup>[4]</sup>,隧道工程建设频繁,其引发的水位和土壤水的变化也潜在影响着该区域植被对水分的利用。因此在自然气候和人为活动的双重作用下,对该区域隧道建设区植被水分利用策略的研究是保护生态脆弱区生态平衡,维持植被水土保持能力的前提。

用传统的根系调查法及染色法判断植物的吸水深度存在破坏性大、耗时费力以及造成环境污染等问题<sup>[4,5-6]</sup>。稳定同位素作为理想的天然示踪剂,可用于无损追踪植物对潜在水源的利用状况<sup>[7-8]</sup>。一般情况下,除一些盐生植物外,大多数植物根系在水分吸收的过程中同位素不会发生分馏<sup>[9-10]</sup>,因此,应用氢氧稳定同位素技术量化植物水分来源已广泛应用于青藏高原不同生态系统<sup>[4,7-11]</sup>。例如,Wu Huawu 等<sup>[12]</sup>在青藏高原东北高寒荒漠生态系统的研究表明,当地草本植物(*Carex moorcroftii*, *Astragalus adsurgens*)和灌木(*Artemisia oxycephala*)在整个生长季的水分来源相似,而引种的灌木(*Hippophae rhamnoides*)与当地植物表现出不同的吸水策略。Xu Qing 等<sup>[13]</sup>在青藏高原东缘选取 3 个关键物种进行水源研究发现:岷江冷杉(*Abies faxoniana*)主要依赖地下水(66%~96%),并且对地下水的利用比例随季节的变换而不断变化;糙皮桦(*Betula utilis*)和冷箭竹(*Bashania fangiana*)对雨水吸收的比例范围分别

为 13%~94% 和 32%~93%,而在旱季水源紧张时主要吸收地下水。然而目前对隧道建设区的植被水分来源研究较少,且鲜有研究从竞争的角度解释高原地区植被对环境的适应机制。为此,本文选择青藏高原东缘某一隧道建设区为研究区,以该地区典型植物紫羊茅(*Festuca rubra*) (草本)、刺叶高山栎(*Quercus spinosa*) (灌木)、川杨(*Populus szechuanica*) 和川西云杉(*Picea likiangensis* var. *balfouriana*) (乔木)为研究对象,对植物木质部水、土壤水和地下水氢氧同位素值进行分析,结合 MixSIAR 模型的计算,探索该区域不同时期各植物对潜在水源的利用比例,明确同一生境中不同植物的水分来源与水分竞争关系,有助于理解脆弱区植物对环境的适应机制,为青藏高原隧道建设区水分的管理及高原地区水土保持工作提供科学参考。

## 1 研究区概况

研究区位于青藏高原东缘四川省甘孜州东部,海拔 3 230 m。该区域气候介于亚热带暖湿季风气候向青藏高原高寒气候区的过渡带<sup>[14]</sup>。区域年平均气温多在 8 °C 以下,最低气温在 -14 °C 以下,降雨主要集中在 5—9 月,年均降雨约为 800 mm,夏季多雨冬季多雪,无绝对无霜期,土壤类型主要为壤土<sup>[15]</sup>。采样区位于隧道入口正洞上方,隧道自 2020 年 11 月开始施工,海拔落差较大,地下水位线位于 2~4 m。该区域内第四系零星地散布在地表,下伏基岩主要为三叠系砂板岩为主的变质岩和侵入岩为主的花岗岩类。2021 年 5 月、8 月和 10 月采样时期该隧道入口正洞进尺分别约为 100, 230 和 300 m。研究区植物多样

性丰富,天然植物种类以多年生草本、常绿灌木、落叶乔木和常绿乔木为主,乔木主要有川杨和川西云杉,其中川杨为建群种,占乔木总株数60%以上,灌木主要有刺叶高山栎和毡毛栎叶杜鹃(*Rhododendron phaeochrysum*),草本主要有紫羊茅、车前(*Plantago asiatica*)和高山冷蕨(*Cystopteris montana*)等,两种乔木组成混交林,灌木与乔木聚集性生长,草本植物则是随机分布在研究区内。植物生长周期为150~180 d,生长周期内植被平均覆盖度超过80%。乔木和灌木的平均高度分别约为5.5和1.8 m,草本植物高度范围在20~60 cm。

## 2 材料与方法

### 2.1 植物、土壤和水样品采集

在研究区域内设置具有代表性的10 m×10 m样地,分别对植被、土壤、水样进行共计5次取样,采样时间分别为2020年8月和10月及2021年5月、8月和10月。

(1) 植物样品在样地内选择健康成熟的4种典型植物:紫羊茅、刺叶高山栎、川杨和川西云杉作为植物木质部的采集对象,每种植物分别选取长势相同的3株植物进行采样。对于草本植物紫羊茅,采取叶鞘包裹的生长区以避免蒸发造成的同位素分馏,刺叶高山栎、川杨和川西云杉3种木本植物选取直径约为3~5 mm的非绿色枝条将其韧皮部去除干净<sup>[6]</sup>,然后迅速装入12 ml的玻璃瓶中,用封口膜密封,并放入-20℃的便携式冰箱中冷冻保存,用于测量植物木质部水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 。

(2) 土壤样品在样地内植物生长区域附近用土钻取0—200 cm土壤,分为0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—200 cm共7层。土壤取样点离采样植物的距离均在2 m内。用土钻钻取的土壤每层分为2份,分别装入12 ml玻璃瓶中并用封口膜密封好,最后放入-20℃便携式冰箱中保存,用于测量土壤水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ,另一部分用铝盒密封好防止土壤水分的蒸发,用于测定土壤含水量。另外用100 cm<sup>3</sup>环刀取0—100 cm土壤共6层,然后用环刀法测各层土壤物理性质,例如土壤容重、饱和含水量、毛管持水量等。以上采样取三次重复。

(3) 水样品。地下水样品取自研究区的地下水检测钻井中;在研究区设置一个雨水收集器,用于每次采样期间前后两次降雨的收集。

### 2.2 样品的测定

采用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100)提取植物木质部和土壤中的水,然后用液态水同位素分析仪

(912-0050)测量氢氧稳定同位素比率。样品的氢氧稳定同位素比率( $\delta X$ )通过如下公式计算<sup>[16-17]</sup>:

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

式中: $R_{\text{sample}}$ 为样品中元素的重、轻同位素丰度比; $R_{\text{standard}}$ 为国际标准物质(V-SMOW)的重、轻同位素丰度比; $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量精度分别为 $\pm 0.15\text{‰}$ 和 $\pm 0.02\text{‰}$ 。

土壤含水量(SWC,%)采用烘干称重法进行测定,计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$\text{SWC} = (\text{土壤鲜重} - \text{土壤干重}) / \text{土壤干重} \times 100\% \quad (2)$$

### 2.3 研究方法

2.3.1 水源划分 应用贝叶斯混合模型 MixSIAR (版本3.1.7)计算植物对潜在水源的利用比例,将源数据(潜在水源 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值)和混合数据(植物木质部水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值)输入到 MixSIAR 模型中, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分馏数据取0,马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC)运行长度设置为“very long”,误差结构选择“residual \* process”,使用 Gelman-Rubin 和 Geweke 诊断方法来评估模型是否收敛,然后输出计算结果<sup>[18-20]</sup>。根据各层土壤含水量、土壤性质和土壤水同位素组成变化将0—200 cm土壤分为3层:浅层(0—40 cm);中层(40—80 cm);深层(80—200 cm)。本次试验将浅层、中层、深层土壤水和地下水共4种水源作为植物水分吸收的潜在来源。

2.3.2 相似性比例指数 相似性比例指数(PS指数)表示生物之间生态位重叠的指标<sup>[21-23]</sup>。PS指数越趋向于1,表明两个物种对某一资源的竞争越大;PS指数越趋向于0,表明两个物种对某一资源的竞争越小<sup>[4,24-25]</sup>。本研究利用PS指数计算紫羊茅、刺叶高山栎、川杨和川西云杉4种植物间水资源的竞争情况。

$$\text{PS} = 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |p_{1i} - p_{2i}| \quad (3)$$

式中: $p_{1i}$ 、 $p_{2i}$ 分别表示相对比的两种植物对第*i*种水资源的吸收比例。

2.3.3 数据分析与处理 运用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,分析方法有 Pearson 相关性分析和方差分析(ANOVA),采用 Origin 2021 进行图形绘制。气温和降水数据来自于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)(<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/access/>),潜在蒸散发数据来自于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 气象与土壤性质

2020年5月、8月和10月及2021年5月、8月和10月的降水量分别为172.7、132.1、22.4、247.4、192.8和70.6 mm,上述月份中不同年际间月平均降水量具有显著性差异( $p < 0.05$ ),当月平均温度分别为12.1、16.7、8.0、11.4、16.1和9.1 °C,当月平均潜在蒸散发量分别为103.2、130.1、69.4、102.6、120.5和72.8 mm,不同年际间月平均温度和潜在蒸散发量均无显著差异( $p > 0.05$ )。总体来看,2021年的逐月降水量大于2020年同时期,且2021年5月的降水量最大,2021年的逐月气温和潜在蒸散发量与2020年相近(图1)。不同采样时期的各层土壤含水量变化规律相似,随土层深度的增加呈逐渐降低的趋势

(表1)。在垂直变化上,浅层土壤(0—40 cm)的波动幅度较大,而中层(40—80 cm)和深层土壤(80—200 cm)的波动幅度较小,表明降雨对浅层土壤存在较大补给且该层土壤受到蒸发的影响较大,中层和深层土壤受到的蒸发影响较小。在时间尺度上,2021年8月和10月的0—200 cm共7层土壤的土壤含水量均值分别为21.1%和23.2%,均低于2020年同时期的28.3%和32.1%,2021年5月的平均值则为24.3%。样地0—20 cm层土壤容重 $0.62 \text{ g/cm}^3$ 明显低于20—100 cm层土壤容重 $1.04 \text{ g/cm}^3$ (表2)。0—20 cm层土壤饱和持水量和毛管持水量明显高于20—100 cm层,各层土壤的田间持水量位于毛管持水量与饱和持水量之间。各层土壤非毛管孔隙度变化较小,土壤毛管孔隙度在0—20 cm层大于20—100 cm层。

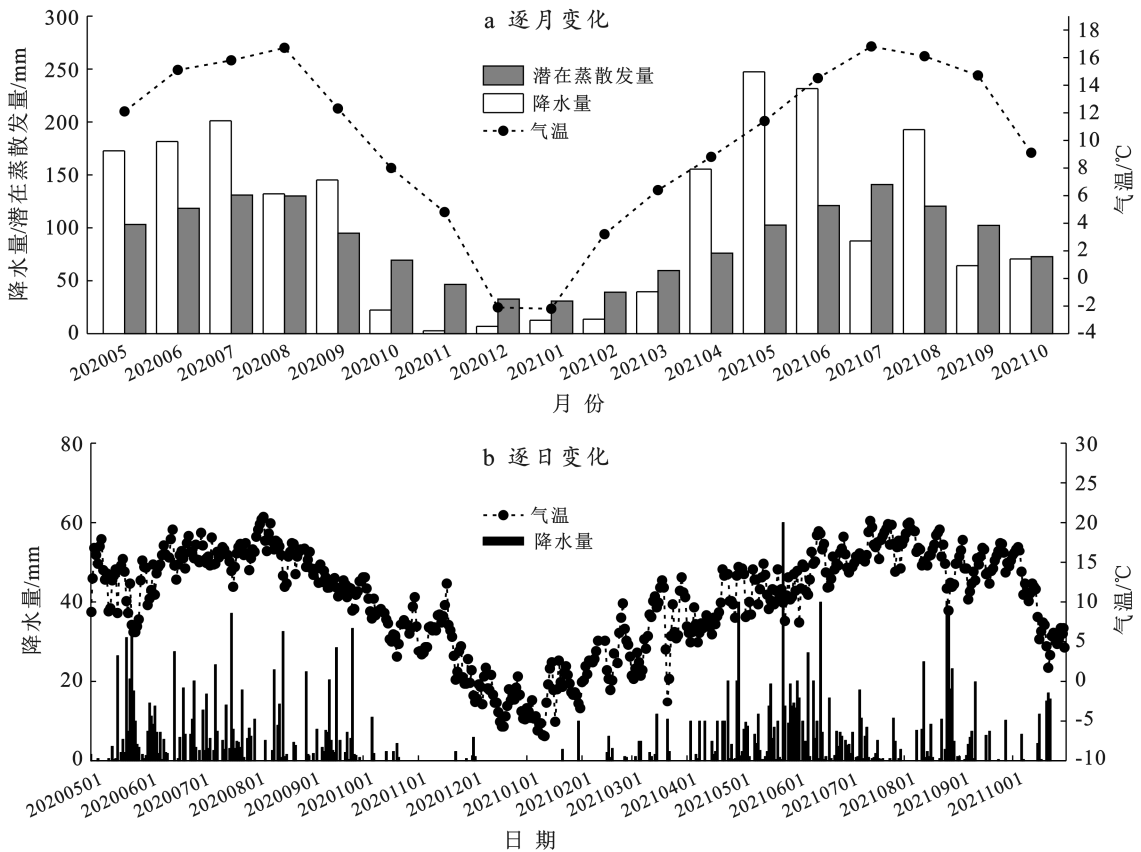


图1 研究区2020年5月至2021年10月降水、气温和潜在蒸散发的变化

Fig.1 Variations of precipitation, air temperature and potential evapotranspiration in study area from May 2020 to October 2021

#### 3.2 样品氢氧同位素变化特征

研究区当地大气降水线方程(LMWL)为: $\delta^2\text{H} = 7.06\delta^{18}\text{O} - 1.76$ 。与全球大气降水线方程(GMWL) $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 相比较<sup>[26]</sup>,LMWL的斜率和截距均降低(图2)。这表明研究地区降雨过程中可能存在云下二次蒸发富集现象。在整个研究期间,紫羊茅、刺叶高山栎、川杨和川西云杉的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变

化范围分别为 $-154.78\text{‰} \sim -40.49\text{‰}$ 和 $-19.40\text{‰} \sim -6.37\text{‰}$ 。4种植物木质部水在2021年5月的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值最大(均值分别为 $-59.25\text{‰}$ ,  $-8.40\text{‰}$ )。地下水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围分别为 $-111.22\text{‰} \sim -105.11\text{‰}$ ,  $-15.50 \sim 14.61\text{‰}$ 。地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动范围小,表明该区域地下水稳定,循环周期较慢。

表1 研究区不同月份土壤含水量的变化

Table 1 Variation of soil water content in different months in study area

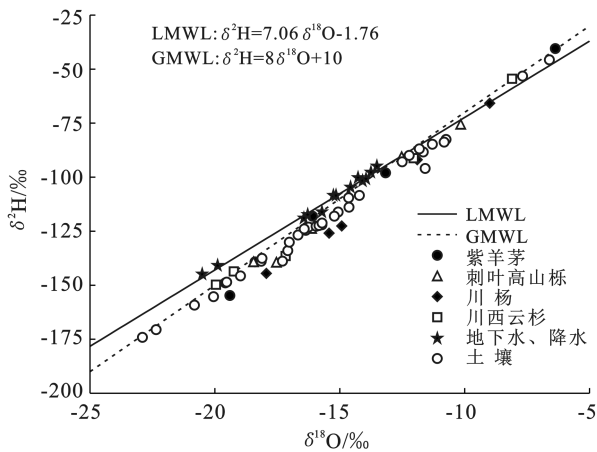
时间	不同土层深度土壤含水量/%						
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	100—200 cm
202008	44.6(5.1)	40.1(1.3)	29.6(6.3)	21.9(7.6)	26.1(0.9)	16.1(6.1)	19.9(6.8)
202010	72.4(18.6)	46.2(12.2)	33.3(9.0)	26.3(8.2)	18.7(2.3)	12.1(0.6)	16.0(2.6)
202105	58.6(5.0)	29.2(2.5)	18.8(6.6)	16.2(5.0)	18.6(4.4)	20.2(4.8)	8.2(1.5)
202108	40.9(3.6)	36.2(2.0)	18.2(2.2)	12.9(3.4)	13.8(1.9)	13.4(1.7)	12.3(0.3)
202110	80.7(11.1)	20.2(1.2)	17.2(2.7)	9.3(1.6)	9.9(0.1)	13.7(0.1)	11.7(1.6)

注:数值为平均值(标准差)( $n=3$ )。下同。

表2 研究区土壤物理性质

Table 2 Physical properties of soil in study area

指标	土层深度/cm					
	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
土壤容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	0.59(0.05)	0.64(0.05)	0.94(0.01)	1.11(0.18)	1.09(0.09)	1.00(0.14)
饱和持水量/( $g \cdot kg^{-1}$ )	1 063.48(97.42)	924.41(9.24)	471.38(21.03)	360.56(44.74)	401.08(57.43)	428.78(78.81)
毛管持水量/( $g \cdot kg^{-1}$ )	790.49(152.13)	566.60(20.34)	282.95(27.16)	245.53(46.93)	264.30(17.39)	267.53(73.59)
田间持水量/( $g \cdot kg^{-1}$ )	573.62(122.32)	321.96(17.44)	126.30(13.61)	92.84(26.90)	183.81(18.69)	94.50(10.18)
土壤非毛管孔隙度/%	16.30(4.47)	22.65(2.27)	17.67(0.64)	12.71(2.25)	14.52(3.19)	16.11(1.71)
土壤毛管孔隙度/%	45.77(5.33)	35.70(1.20)	26.52(2.46)	26.22(0.89)	28.57(0.36)	25.82(3.67)

图2 样品  $\delta^2H$  和  $\delta^{18}O$  的分布特征Fig.2 Distribution characteristics of  $\delta^2H$  and  $\delta^{18}O$  of samples

### 3.3 植物的水分来源比例

紫羊茅、刺叶高山栎、川杨和川西云杉在同一生境中的水分来源在季节变化规律上不一致(图3),4种植物在研究初期(2020年8月)主要吸收浅层土壤水(0—40 cm),比例分别为84.4%,67.9%,73.7%和58.8%;随着植物进入生长季末期(2020年10月),紫羊茅、刺叶高山栎和川杨对0—40 cm层土壤水利用比例减少,对40—80 cm和80—200 cm层土壤水的利用比例增加,相反的是,川西云杉对0—40 cm层土壤水吸收比例从58.8%增加到87.9%;生长季初期(2021年5月),紫羊茅和川杨的水分来源与2020年10月相比变化较小,刺叶高山栎和川西云杉吸收0—40 cm层土壤水的比例分别从56.5%降低到14.5%和从87.9%降低到32.1%。2021年8月和10月4种

典型植物对0—40 cm层土壤水的利用比例相较于2020年同时期显著减少(均值从61.1%下降到27.7%),各植物在2021年8月和10月的水源利用比例与2020年同时期相比具有显著性差异( $p < 0.05$ )。将植物对各层土壤水的吸收比例与相应层土壤含水量分析发现:川西云杉对0—40 cm和40—80 cm层土壤水的利用比例与相应层土壤含水量分别存在显著正相关( $p < 0.05$ )和显著负相关关系( $p < 0.05$ ),其余植物的水源利用比例与相应层土壤含水量无显著相关关系(图4)。

### 3.4 植物间水分利用关系

川杨与刺叶高山栎的PS指数均在0.81以上(2020年10月除外)且每两两植物间的PS指数不同(表3),然而在2020年10月由于两种植物水分竞争关系减弱,此时的PS指数降为0.50。两种乔木(川西云杉和川杨)在2021年10月的PS指数为0.19,而在2020年8月和2021年5月、8月的PS指数均大于0.84(表3)。乔灌木(川杨、川西云杉与刺叶高山栎)的PS指数范围分别为0.50~0.94和0.69~0.91,乔木草本(川西云杉、川杨与紫羊茅)的PS指数范围分别为0.60~0.80和0.54~0.89。灌木草本(刺叶高山栎与紫羊茅)的PS指数范围为0.63~0.96,意味两种植物水资源竞争较激烈。将每两种植物的PS指数与相应植物的水源利用比例做相关性分析发现:紫羊茅与川杨的PS指数与紫羊茅吸收40—80 cm层土壤水的比例和川杨吸收80—200 cm层土壤水的比例均存在显著负相关关系( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ )(图5),其余植物间的PS指数与相应植物水源利用比例未发现显著相关关系。

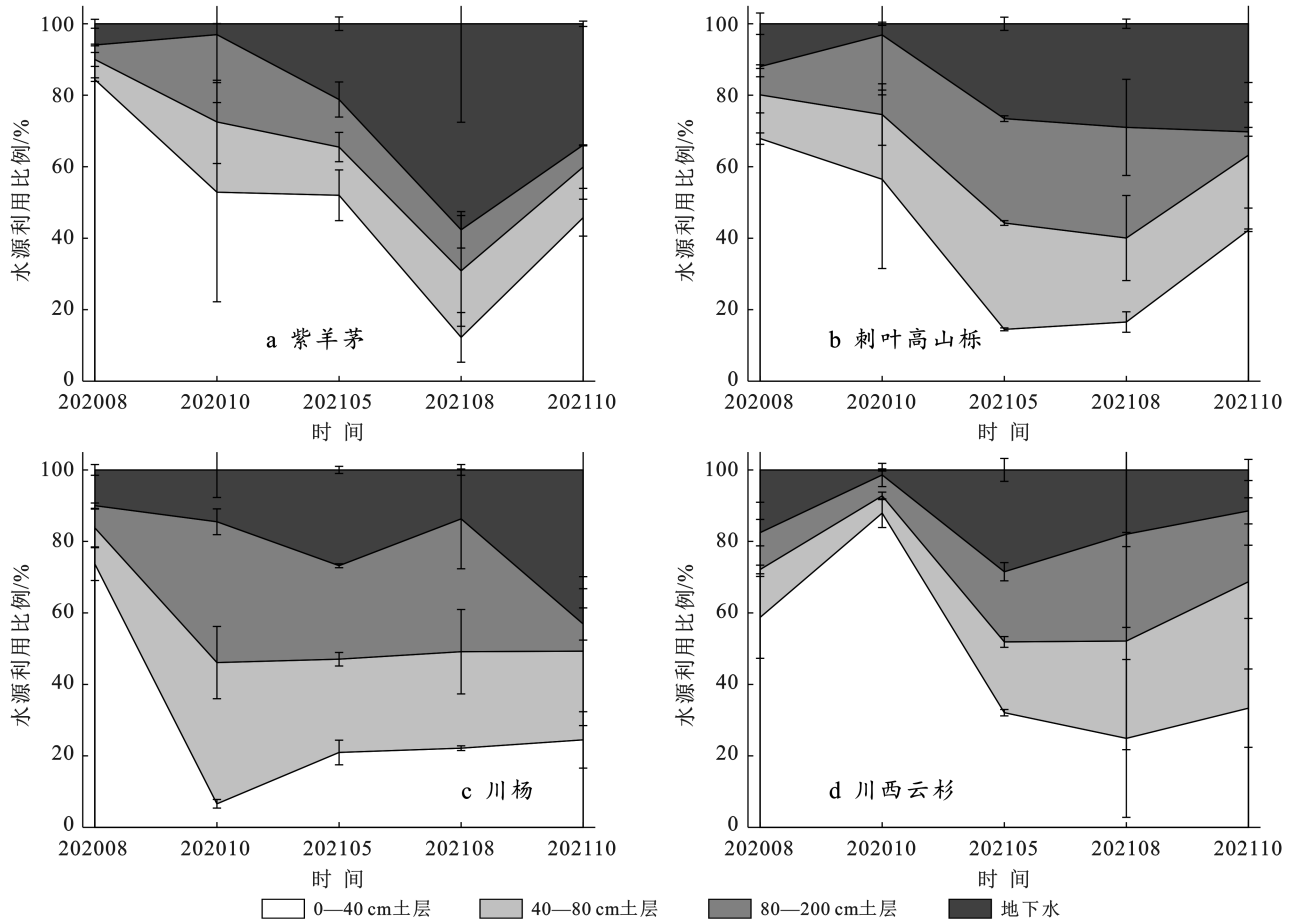
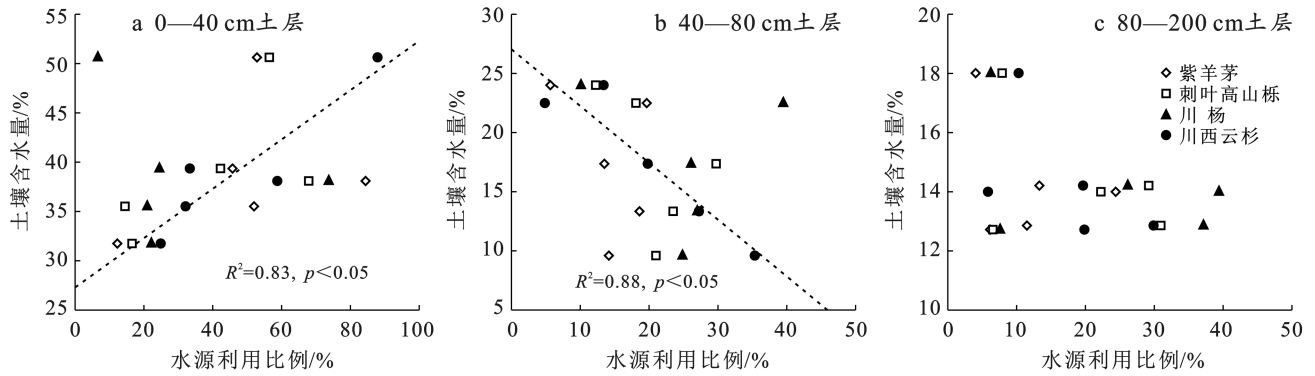


图 3 研究区 4 种典型植物水源利用比例(平均值±标准差)的季节性变化

Fig.3 Seasonal variation of water utilization ratio (mean±SD) of four typical plants in study area



注:图中仅对具有显著线性关系的植物进行了  $R^2$  及  $p$  值标注。虚线分别表示川西云杉对 0—40 cm, 40—80 cm 层土壤水的利用比例与相应层土壤含水量呈显著相关。

图 4 植物的水源利用比例与相应层土壤含水量的关系

Fig.4 Relationship between water utilization ratio by plants and corresponding soil water content

表 3 不同月份植物间的相似性比例指数

Table 3 Proportional similarity (PS) index between plants in different months

时间	川杨与刺叶高山栎	刺叶高山栎与紫羊茅	紫羊茅与川西云杉	川西云杉与川杨	川西云杉与刺叶高山栎	川杨与紫羊茅
202008	0.94	0.84	0.74	0.85	0.91	0.89
202010	0.50	0.96	0.65	0.19	0.69	0.54
202105	0.93	0.63	0.80	0.87	0.80	0.69
202108	0.85	0.71	0.60	0.93	0.88	0.56
202110	0.82	0.93	0.65	0.68	0.72	0.79

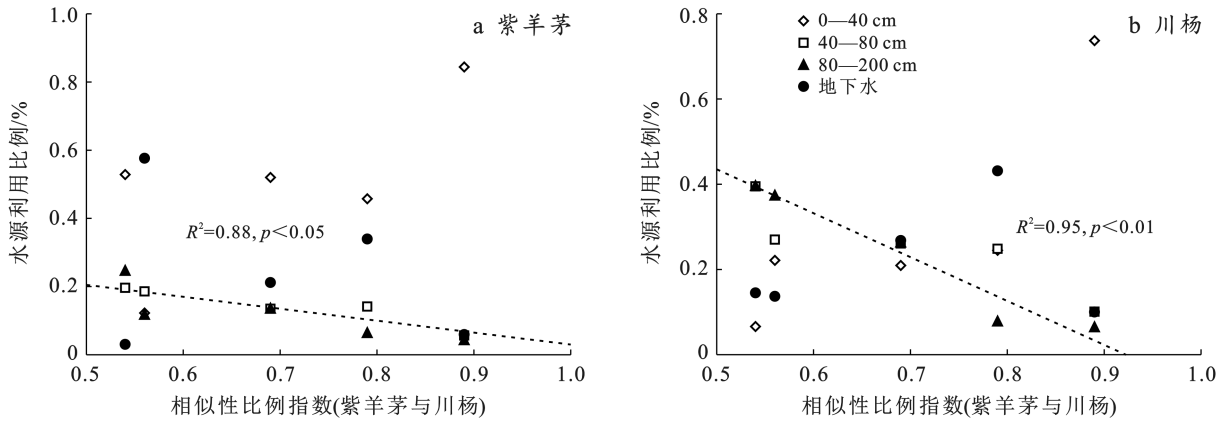


图 5 紫羊茅与川杨的 PS 指数与两者水源利用比例的关系

Fig.5 Relationship between PS index and water utilization ratio of *F. rubra* and *P. szechuanica*

## 4 讨论

### 4.1 植物的水分来源

植物在整个生命周期中的水源特征对生态水文循环起着至关重要的作用<sup>[25]</sup>。本研究紫羊茅、刺叶高山栎、川杨和川西云杉 4 种植物木质部的  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值有较明显的季节差异(图 2),表明植物在不同时期的水分来源存在差异。2020 年 8 月,4 种植物均以浅层土壤水作为主要水源(图 3),这是因为此月份降水量较大,浅层土壤水能够为植物提供足够的水分<sup>[6]</sup>,这与吴华武研究的青海湖流域植物主要利用浅层土壤水的结果一致<sup>[27]</sup>。植物对水分的利用会随着土壤水的变化产生竞争和适应机制,还会随着温度变化不断变换用水策略。2020 年 10 月土壤含水量较 2020 年 8 月增加,此时期紫羊茅、刺叶高山栎和川杨对 0—40 cm 浅层土壤水的利用减少,对 40—200 cm 中深层土壤水的吸收比例增加,导致该现象的原因是 10 月温度降低潜在抑制植物根系的呼吸,从而导致根系的营养吸收减少和根系生长缓慢<sup>[28]</sup>,该现象对川杨尤其明显。因为川杨具有二态根系且根系往往具有可塑性的特征<sup>[29]</sup>,研究区 10 月份温度较低可能导致川杨分布在浅层的细根和侧根生长较慢甚至死亡,此时川杨通过深根的生长或延伸来维持生长,因此川杨在此时期以 40—200 cm 土壤水作为主要水源。此结论与 Grossiord<sup>[30]</sup>的研究结论类似:温度会影响植物根系的生长乃至水分的利用。不同的是,川西云杉在 10 月对浅层土壤水的利用比例比 8 月份增加,这可能是因为川西云杉是根系发达的常绿浅根植物,其根系具有较强的抗寒性,因此,川西云杉浅层根系对浅层土壤水的利用会随着浅层土壤水的增加而增加。2021 年 5 月土壤含水量较 2020 年 10 月降低,刺叶高山栎和川西云杉对各层潜在水源的利

用比例随土壤含水量的变化比紫羊茅和川杨大,表明前两种植物对土壤水分的敏感性高于后两种植物,且此时期刺叶高山栎、川杨和川西云杉对各水源利用均匀,表现出一种较优的水分利用模式。Wu 等<sup>[17]</sup>研究表明,青藏高原高寒河岸植物具鳞水柏枝(*Myricaria squamosa*)在生长季早期(5 月)主要吸收浅层土壤水(68.5%),这与我们的研究结果不一致,具鳞水柏枝在 5 月受到的水分胁迫较小,其生长良好的侧根和细根主要吸收浅层土壤水<sup>[8]</sup>,而本研究区植物在 5 月受到的水分胁迫较大,因此植物产生了一定的适应机制从而使根系从不同层潜在水源均匀获取水分。

2021 年 8 月和 10 月土壤含水量比 2020 年同时期低,这可能是受到了自 2020 年 11 月以来隧道开挖的影响,因为 2021 年降水量大于 2020 年,且不同年际间相同月份的温度和潜在蒸散发量变化很小(图 1),降雨对土壤水进行补给后,隧道的建设可能会引起区域自然水文地质流系统发生变化,地下水流速增快,造成土壤和土壤水的流失,从而导致隧道建设后土壤含水量的降低<sup>[31]</sup>。在水资源供给变化的环境中,植物根系通常表现出可塑性<sup>[32]</sup>,植物在隧道建设后对浅层土壤水的利用比例(27.7%)低于隧道建设前(61.1%),但植物对地下水的吸收比例增加(从 8.5%增至 29.6%),这是因为在浅层土壤含水量降低的情况下植物根系生长或延伸至深处吸收更多地下水。隧道建设后研究区土壤含水量的非自然下降造成植物根系在不同深度土壤生长的变化,从而改变水分利用策略并产生适应机制<sup>[33]</sup>,这与 Liu 等<sup>[31]</sup>在重庆西北部的中梁山北部的研究结果类似。因此,隧道建设前后植物水分利用策略的变化不能用年际间降雨量的变化来解释,隧道工程建设导致土壤水的流失及根系的改变是植物水分利用策略年际变化的主要原因。川杨在 2021 年 10 月对浅层土壤水的利用比

例与 2021 年 8 月相比无明显变化,而在 2020 年 10 月吸收的浅层土壤水明显少于同年 8 月,这是因为隧道建设导致 2021 年土壤含水量的下降,使得川杨在 2021 年根系生长状况与 2020 年同时期不同,2021 年各时期川杨吸水策略改变主要受土壤含水量变化的影响,因此,2021 年 8 月和 10 月川杨吸水规律的变化特征与 2020 年表现不同。川西云杉对土壤水的吸收比例与相应层土壤含水量的关系说明川西云杉在 4 种植物中对水分变化最敏感,其水源利用比例波动幅度较大也证实了此结论(图 3)。川西云杉的水源利用比例在 0—40 cm 浅层和 40—80 cm 中层与相应层土壤含水量的显著相关关系相反,这可能与川西云杉在 0—40 cm 浅层和 40—80 cm 中层根系的分布状况不同有关。根据实地考察,研究区川西云杉的数量低于川杨和刺叶高山栎等木本植物,表明川西云杉对环境变化的敏感性更高,因此在当地遭受破坏的环境中进行生态恢复时,应更多地倾向于选取川杨、刺叶高山栎等植物。

#### 4.2 不同植物间的水分竞争关系

植物对资源的竞争主要表现为对土壤水分和养分的竞争<sup>[31-34]</sup>。PS 指数表征的是两种植物之间生态位重叠的指标,常用来评估两种植物间水分竞争的关系<sup>[24-25]</sup>。紫羊茅、刺叶高山栎、川杨和川西云杉每两种植物在大部分时期的 PS 指数偏大,表明不同植物在大部分时期存在较强的水分竞争,此结论与 Tang Yakun 等<sup>[35]</sup>的研究结果类似。2020 年 10 月川西云杉与川杨的 PS 指数极低(0.19),这表明两种植物在该时期几乎不存在水分竞争,川西云杉与川杨表现出水源分离的特征来促进两种植物共存<sup>[36]</sup>,并且此时期的 PS 指数与其他时期的 PS 指数相差较大,表明同一生境中川西云杉与川杨间的水分竞争关系随时间的变化而变化较大。同一生境中植物在不同时期对水源竞争程度不同,推测这是植物对土壤中水分条件变化的适应过程。许素寒等<sup>[10]</sup>研究发现沙棘、油松和山杏会根据不同潜在水源的可利用性来吸收不同层土壤水或雨水;许秀丽等<sup>[37]</sup>研究表明茵陈蒿适应能力强,能随着土壤中水分的变化而改变水分来源。此外,不同植物根系分布的差异以及气候环境因子等潜在因素都可能造成植物水源竞争程度的不同,还有待进一步的研究。乔灌木(川杨、川西云杉与刺叶高山栎)3 种植物间的 PS 指数大于乔木草本(川杨、川西云杉与紫羊茅)之间的 PS 指数,表明前者的水分竞争关系(水源重叠)要大于后者。因此,研究区川杨、川西云杉与刺叶高山栎出现的伴生现象少于川杨、川西云杉与紫羊茅出现的伴生现象。紫羊茅与

川杨的 PS 指数与紫羊茅、川杨的水源利用比例的关系表明,两种植物的水源竞争增大时,紫羊茅会减少对 40—80 cm 层土壤水的利用,川杨会减少对 80—200 cm 土壤水的利用。紫羊茅和川杨在不同深度土壤的吸水变化特征对植物间的水源竞争存在相似的响应,此现象可用生态位分离来解释,两种植物可在连续的水资源竞争情况下通过生态位分离来实现共存的目的。

## 5 结论

(1) 4 种植物在整个研究期的水分来源不同,紫羊茅主要利用 0—40 cm 浅层土壤水(49.5%),川西云杉和刺叶高山栎对 0—40 cm 浅层土壤水的利用比例均值分别为 47.4% 和 39.5%,川杨则是主要吸收 40—200 cm 中深层土壤水(48.8%)。

(2) 土壤含水量及外界温度是青藏高原东缘植被水分利用变化的主要因素,且这两个因子的重要性在不同物种中存在差异。

(3) 研究区植物的用水策略受到隧道建设的影响,表现为隧道建设后植物对浅层土壤水的利用比例较隧道建设前低。

(4) 2020 年 10 月川杨与其他植物水分竞争关系较弱,乔木与灌木之间的水分竞争大于乔木与草本之间的水分竞争。

本文为青藏高原隧道建设区植物水资源的利用以及指导该区域的水土保持工作提供参考,同时应注意隧道建设过程中生态脆弱区地下水流动系统的变化及土壤水分的变化,以防止隧道建设对区域生态系统稳定性的破坏。植物对隧道建设的响应是一个长期并不断适应的过程,因此在今后的研究中要长时间观测植物对隧道建设的响应。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘延国,邹强,逯亚峰,等.青藏高原东缘地形急变流域生态水文分区研究[J].水利学报,2022,53(2):243-252.
- [2] 曹建军,杨书荣,周俊菊,等.青藏高原草地存在价值研究:以玛曲为例[J].生态学报,2017,37(19):6415-6421.
- [3] 徐田伟,赵新全,张晓玲,等.青藏高原高寒地区生态草业可持续发展:原理、技术与实践[J].生态学报,2020,40(18):6324-6337.
- [4] 彭丽萍,戴岳,师庆东.新疆准东荒漠区 5 种典型植物水分来源[J].干旱区研究,2018,35(5):1146-1152.
- [5] 巩国丽,陈辉,段德玉.利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较[J].生态学报,2011,31(24):7533-7541.
- [6] 付昕宇,刘华民,于晓雯,等.岱海湖滨带湿地植物水分来



- 源及利用策略研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):42-49.
- [7] 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.
- [8] Qin Wenyi, Chen Guo, Wang Peng, et al. Climatic and biotic influences on isotopic differences among topsoil waters in typical alpine vegetation types [J]. Catena, 2021,203:105375.
- [9] 徐庆,王婷,高德强.碳氢氧稳定同位素在草地生态系统水循环研究中的应用[J].林业科学研究,2019,32(6):130-136.
- [10] 许素寒,朱雅娟,吴彩霞,等.鄂尔多斯高原3个水土保持树种的水分利用策略[J].应用生态学报,2020,31(9):2885-2892.
- [11] 温林生,邓文平,邓力维,等.庐山不同海拔植物季节水分利用策略[J].水土保持学报,2021,35(4):341-348.
- [12] 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.
- [13] Xu Qing, Li Harbin, Chen Ji Quan, et al. Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: The deuterium isotope approach [J]. Ecohydrology, 2011,4(2):236-244.
- [14] 杨舒然,杨玮琳,韩业松,等.四川康定折多山末次冰盛期古冰川重建及其气候意义[J].冰川冻土,2022,44(4):1119-1129.
- [15] 胡容平,龚国淑,张洪,等.四川甘孜州折多山与雀儿山地区土壤细菌的研究[J].西南农业学报,2010,23(5):1565-1570.
- [16] 秦雯怡,陈果,李小臻,等.基于机器语言的岷江上游流域表层土壤氢氧稳定同位素空间分布模式[J].应用生态学报,2021,32(12):4327-4338.
- [17] Wu Huawu, Zhao Guoqin, Li Xiaoyan, et al. Identifying water sources used by alpine riparian plants in a restoration zone on the Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from stable isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2019,697:134092.
- [18] 张宇,张明军,王圣杰,等.基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J].生态学杂志,2020,39(4):1356-1368.
- [19] 周艳清,高晓东,王嘉昕,等.柴达木盆地灌区枸杞根系水分吸收来源研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(2):400-409.
- [20] 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.
- [21] Parrish J A, Bazzaz F A. Underground niche separation in successional plants [J]. Ecology, 1976,57(6):1281-1288.
- [22] Schoener T W. Nonsynchronous spatial overlap of lizards in patchy habitats [J]. Ecology, 1970,51(3):408-418.
- [23] Trogisch S, Salmon Y, He J S, et al. Spatio-temporal water uptake patterns of tree saplings are not altered by interspecific interaction in the early stage of a subtropical forest [J]. Forest Ecology and Management, 2016,367:52-61.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961,133:1702-1703.
- [27] 吴华武,李小雁,蒋志云,等.基于  $\delta D$  和  $\delta^{18} O$  的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究[J].生态学报,2015,35(24):8174-8183.
- [28] Apostol K G, Jacobs D F, Wilson B C, et al. Growth, gas exchange, and root respiration of *Quercus rubra* seedlings exposed to low root zone temperatures in solution culture [J]. Forest Ecology and Management, 2007,253(1/3):89-96.
- [29] Rossatto D R, Silva L D C R, Villalobos V R, et al. Depth of water uptake in woody plants relates to groundwater level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012,77:259-266.
- [30] Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, et al. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees [J]. the New Phytologist, 2017,213(2):584-596.
- [31] Liu Jiuchan, Shen Licheng, Wang Zhengxiong, et al. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley [J]. Journal of Hydrology, 2019,571:485-493.
- [32] Sánchez-pérez J M, Lucot E, Bariac T, et al. Water uptake by trees in a riparian hardwood forest (Rhine Floodplain, France) [J]. Hydrological Processes, 2008,22(3):366-375.
- [33] 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.

- Sensing, 2002, 23(18): 3873-3878.
- [9] 杨胜天,刘昌明,孙睿.近20年来黄河流域植被覆盖变化分析[J].地理学报,2002,57(6):679-684.
- [10] 李春晖,杨志峰.黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J].地理研究,2004,23(6):753-759.
- [11] 刘绿柳,肖风劲.黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化[J].生态学杂志,2006,25(5):477-481.
- [12] 吴云,曾源,吴炳方,等.基于 MODIS 数据的三北防护林工程区植被覆盖度提取与分析[J].生态学杂志,2009,28(9):1712-1718.
- [13] 陈效述,王恒.1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J].地理学报,2009,64(1):84-94.
- [14] 王朗,傅伯杰,吕一河,等.生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2010,21(8):2109-2116.
- [15] Wang L, D'odorico P, Evans J P, et al. Dryland ecohydrology and climate change: critical issues and technical advances [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(160): 2585-2603.
- [16] 刘爽,官鹏.2000—2010 年中国地表植被绿度变化[J].科学通报,2012,57(16):1423-1434.
- [17] 高健翎,高燕,马红斌,等.黄土高原近 70 a 水土流失治理特征研究[J].人民黄河,2019,41(11):65-69,84.
- [18] 周璐红,王盼婷,曹瑞超.2000—2020 年延安市土壤侵蚀驱动因素分析及生态安全评价[J].生态与农村环境学报,2022,38(4):511-520.
- [19] 贾磊,姚顺波,邓元杰,等.渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):305-314.
- [20] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [21] 蔡博峰,于嵘.基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J].遥感学报,2009,13(6):1170-1186.
- [22] 王景才,郭佳香,徐蛟,等.近 55 年淮河上中游流域气候要素多时间尺度演变特征及关联性分析[J].地理科学,2017,37(4):611-619.
- [23] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.
- [24] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报,2013,33(24):7798-7806.
- [25] 龙慧灵,李晓兵,王宏,等.内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系[J].生态学报,2010,30(5):1367-1378.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [27] 张文琦,宋戈.三江平原典型区水田时空变化及驱动因素分析[J].农业工程学报,2019,35(6):244-252.
- [28] 赵瑞东.气候变化和人类活动对黄土高原植被 NDVI 的影响研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2018.
- [29] 刘宪锋,杨勇,任志远,等.2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J].中国沙漠,2013,33(4):1244-1249.
- [30] 李国亮.2000—2012 年黑河流域上游植被覆盖变化遥感监测与分析[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2015.
- [31] 张玉东,谭红兵.黄土高原典型干旱区退耕还林后植被覆盖变化研究[J].生态科学,2017,36(1):139-146.
- [32] 韩磊,火红,刘钊,等.基于地形梯度的黄河流域中段植被覆盖时空分异特征:以延安市为例[J].应用生态学报,2021,32(5):1581-1592.

(上接第 145 页)

- [34] 王政权,张彦东.水曲柳落叶松根系之间的相互作用研究[J].植物生态学报,2000,24(3):346-350.
- [35] Tang Yakun, Wu Xu, Chen Yunming, et al. Water use strategies for two dominant tree species in pure and mixed plantations of the semiarid Chinese Loess Plateau [J]. Ecohydrology, 2018,11(4), e1943.
- [36] Wang Jian, Fu Bojie, Wang Lixin, et al. Water use characteristics of the common tree species in different plantation types in the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,288/289: 108020.
- [37] 许秀丽,李云良,谭志强,等.鄱阳湖湿地典型中生植物水分利用来源的同位素示踪[J].湖泊科学,2020,32(6):1749-1760.