

DOI: 10.5846/stxb201811202520

吴超, 蒋勇军, 沈立成, 刘九缠, 何瑞亮. 喀斯特槽谷典型植物水分利用效率对隧道建设的响应. 生态学报, 2020, 40(12): 4032-4040.

Wu C, Jiang Y J, Shen L C, Liu J C, He R L. Response of water use efficiency of typical plants to tunnel construction in karst trough valley. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4032-4040.

喀斯特槽谷典型植物水分利用效率对隧道建设的响应

吴 超, 蒋勇军*, 沈立成, 刘九缠, 何瑞亮

西南大学地理科学学院, 喀斯特环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 隧道工程建设对喀斯特槽谷地区地下水循环系统的破坏, 引起地下水位下降, 可能影响周围生态环境。依托重庆中梁山喀斯特槽谷, 对旱、雨两季隧道影响区与无隧道影响区不同深度土层(0—20 cm、20—40 cm)土壤含水量以及典型植物(常绿乔木、常绿灌木)瞬时水分利用效率(Instantaneous Water Use Efficiency, WUE_{inst})进行对比分析, 探究植物水分利用效率对隧道建设的响应。结果表明: 在不同影响区, 主要由蒸发与降水引起土壤含水量在垂直和季节变化上的趋势相似, 但隧道影响区土壤含水量在旱、雨两季均显著高于无隧道影响区; 不同影响区植物 WUE_{inst} 存在明显的季节差异, 旱季各植物种 WUE_{inst} 显著高于雨季。而旱、雨两季隧道影响区植物叶片 WUE_{inst} 显著高于无隧道影响区; 此外, 植物 WUE_{inst} 与土壤含水量相关性分析结果表明, 不同影响区植物 WUE_{inst} 与土壤含水量均呈显著负相关关系, 但相对于无隧道影响区, 隧道影响区植物 WUE_{inst} 对土壤含水量的变化更加敏感。以上结果表明, 隧道建设导致地下水资源漏失, 土壤含水量减少, 进而改变了植物水分利用特性, 使隧道影响区植物种应对一定程度的水分胁迫时采取更保守的水分利用策略。

关键词: 喀斯特槽谷区; 隧道建设; 土壤含水量; 水分利用效率; 季节变化

Response of water use efficiency of typical plants to tunnel construction in karst trough valley

WU Chao, JIANG Yongjun*, SHEN Licheng, LIU Jiuchan, HE Ruiliang

School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, Chongqing 400715, China

Abstract: Tunnel construction undermines groundwater circulation system of karst areas and leads to groundwater level drop, which might exert influence on surrounding ecological environment. Taking karst valley area of Zhongliang Mountains in Chongqing as an example, we conducted a comparative analysis on soil water content at different depths soil layers (0—20 cm and 20—40 cm) and Instantaneous water use efficiency (WUE_{inst}) of typical plants (evergreen arbor and evergreen shrub) in areas affected and unaffected by tunnel in both dry and rainy seasons to explore responses of plants WUE_{inst} to tunneling works. The results showed that evaporation and precipitation mainly led to similarity of soil water content of different depths and in different seasons at both areas. However, soil water content of areas affected by tunnel was significantly higher than that of areas unaffected by tunnel in both dry and rainy seasons. The WUE_{inst} of plants varied greatly with seasons at both areas and the WUE_{inst} of various plants in dry season was significantly higher than that in rainy season. The WUE_{inst} of plants of areas affected by tunnel was significantly higher than that of areas unaffected by tunnel in both dry and rainy seasons. Additionally, the results of correlation analysis between WUE_{inst} of plants and soil water content showed that there was a negative correlation between the WUE_{inst} of plants and soil water content. In comparison with areas unaffected by tunnel, the WUE_{inst} of plants in areas affected by tunnel was more sensitive to changes of soil water content.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502306)

收稿日期: 2018-11-20; 修订日期: 2019-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

The above results suggested that the tunneling works led to loss of groundwater resources, decrease of soil water content, and change of WUE_{inst} of plants. Consequently, it is required to take more conservative water use strategies in response to certain water stress on plants in areas affected by tunnel construction.

Key Words: karst trough valley; tunnel construction; soil water; water use efficiency; seasonal variation

隧道建设对社会经济发展有重要意义但同时也会对生态环境造成影响。隧道开挖不可避免地会破坏地下水的储存点和转移通道,使地下水重新分配,造成地下水系统内部原有水循环失衡及地下水系统与外界水循环平衡的破坏。喀斯特地区溶隙的发育使地下水循环系统具有一定脆弱性^[1],隧道的建设必然对其地下水循环过程造成破坏,含水层地下水的动态变化加大,潜水位降低,储水量减少,泉水干枯,造成水资源的大量流失^[2]。因此,国内外大多数研究集中于喀斯特区隧道建设对水文地质方面的影响,包括地下水环境变化,地表沉降危害等方面^[3-6]。

在喀斯特地区,基岩裸露率高,渗透性强,土体零星,土层浅薄,以致岩石裂隙及浅薄土层中植物吸收和生长所需的储水量十分有限,水分条件成为植物生长的重要影响因子。而隧道修建导致地表水干涸及地下水流失可能使植物受到的水分胁迫更加严重。目前,隧道建设对植物群落结构动态变化或植物生理生态效应的影响上讨论较少^[7]。其中王芳其、郑伟,利用树轮宽度均值研究发现地下水漏失对隧道区优势植物的生长产生不利影响,一定程度上阐明了地下水位和植物生长情况之间相关性^[8-9]及地下水漏失对植物生长的具体影响程度^[8-9]。而最近也有研究表明,隧道开挖降低了喀斯特地区土壤水分含量,进而改变了喀斯特地区植物吸水模式,在隧道影响区,植物将吸收更多的皮下层水分^[10]。但在讨论隧道建设对植物内在耗水机制的影响并没有相关研究成果。瞬时水分利用效率(Instantaneous Water Use Efficiency, WUE_{inst})指植物消耗单位水量生产出的干物质量^[11],不仅可以反映植物内在耗水机制,同时又是揭示植物对生态环境变化响应和适应对策的重要手段^[12-15]。因此,在本文中,我们研究了隧道影响区与无隧道影响区不同深度土层(0—20 cm、20—40 cm)土壤含水量的季节变化趋势以及典型常绿乔、灌木植物种 WUE_{inst} 在时空尺度的分布差异,并对植物 WUE_{inst} 与土壤含水量的关系进一步分析,探讨隧道建设影响下典型植物 WUE_{inst} 的季节性变化特征及其与环境因子之间的关系。以期了解植物水分利用特性对环境变化的响应,并为槽谷生态环境的精确评估和保护提供数据支撑及理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

观音峡背斜槽谷区(图1)位于重庆市北碚区境内中梁山北段($106^{\circ}23'15''$ — $106^{\circ}28'05''E$, $29^{\circ}40'30''$ — $29^{\circ}48'10''N$),属于中亚热带湿润季风气候区,热量丰富、雨量充沛,年均温度 $21.3^{\circ}C$,年均降水量 1200 mm,植物生长季降水量占全年的 75%。背斜山体经流水作用而形成条状喀斯特洼地,即喀斯特槽谷区,海拔 600—800 m。研究区位于背斜山体较宽的东槽,其主要岩性组段自核部至两翼包括 T_1f 地层, T_{1j} 、 T_2l 及 T_{3xj} 地层,其中飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组地层岩性主要为灰岩、白云岩、生物碎屑灰岩、泥质灰岩和角砾状灰岩,须家河组地层以砂岩为主。观音峡背斜核部 T_1f 地层第 2、4 段与两翼 T_{3xj} 地层及 J 地层构成隔水层,使 T_{1j} 地层成为主要喀斯特含水岩组,水量丰富,喀斯特发育较强,溶隙十分发育。研究区内发育地带性土壤黄壤和非地带性土壤石灰土,轻度至中度石漠化,土层较浅薄,厚度在 40—50 cm 左右,且分布不均。植被类型主要为亚热带常绿阔叶林、暖性针叶林、灌木丛,为旱生、喜钙型植物,分布于槽谷东西两侧山坡。由于生态恢复建设,沿坡形成针叶林、阔叶林、灌木丛的垂直分异分布格局,原生植被稀少,多为次生人工林。坡脚及谷底多为耕地和经济果林,人类活动以农业活动为主。

本研究中喀斯特槽谷区具体分为龙凤喀斯特槽谷和龙车喀斯特槽谷,为相互独立的水文地质单元。其中龙凤喀斯特槽谷面积 11.7 km^2 ,自 1999 年首条隧道施工建设以来,至今共修建三条东西走向公路隧道

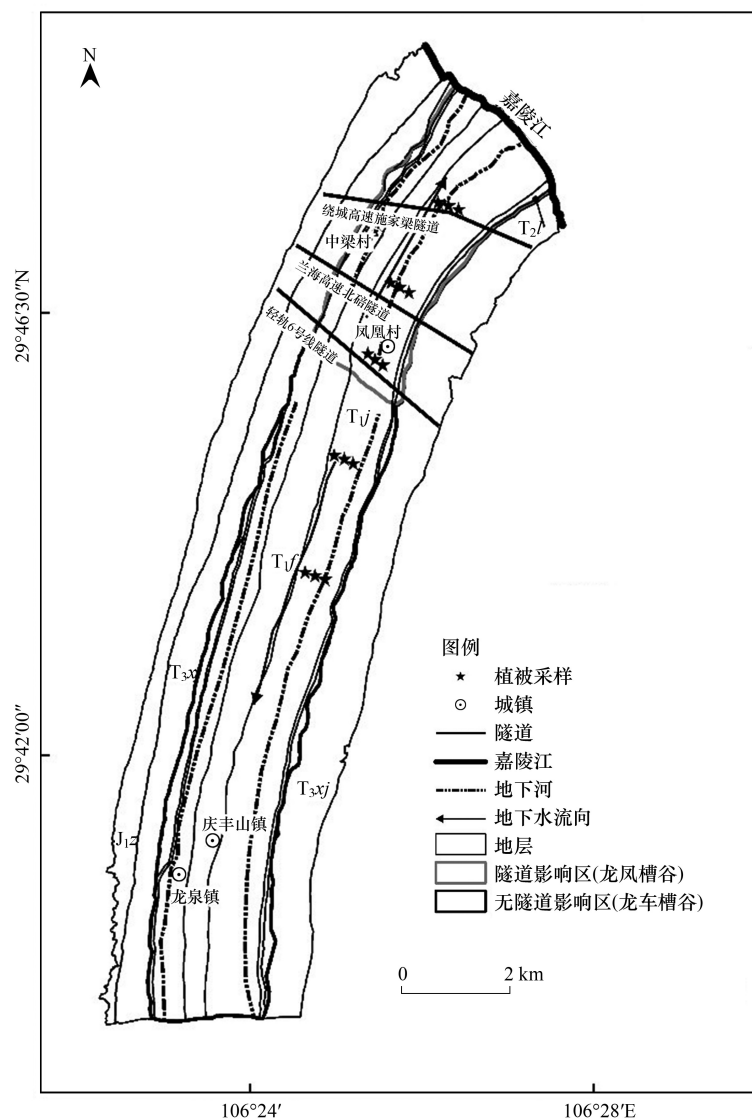


图1 研究区及采样点位置示意

Fig.1 Sketch of the study location in China and sampling sites

(表1),其均没有任何通风竖井,且挖掘在地下河流水位以下。由表1可知,隧道开挖造成地下水排水量可达58 L/s,西槽谷隧道排水量显著高于东槽谷。罗鉴银和傅利飞^[16]人在研究中梁山喀斯特槽谷区隧道建设对地下水循环系统影响中调查发现,仅渝武高速北碚隧道影响区的23个泉眼中,17个泉眼完全干涸,其所引起的水源枯竭面积达7.2 km²,隧道每年渗漏水量达283.9万m³。区域内总体表现为地表泉水逐渐枯竭,植被覆盖度相对较差,石漠化更加严重。而龙车喀斯特槽谷面积26.8 km²,无隧道工程建设,故保留自然喀斯特水文地质系统。

表1 三条隧道基本概况

Table 1 Basic information of three study tunnels

隧道名称 Tunnel name	施工期间 Excavation period	隧道长度 Tunnel length/m	设计高程(东/西) East/West elevation/m	隧道排水(东/西) East/West discharge/(L/s)
施家梁隧道 Shijialiang tunnel	2006—2008	4285	260/245	2.3/6.5
渝武高速北碚隧道 Beibei tunnel of Yuwu expressway	1999—2001	4035	250/240	7.5/16.8
轨道6号线中梁山隧道 Beibei tunnel of the 6 th metro Line	2010—2013	4322	245/240	1.5/23.3

1.2 样品采集与测定

1.2.1 植物叶片的采集

为了探究隧道建设对植被生长的影响,在研究区设置隧道影响区与无隧道影响区对照样地(图 1)。共选择 5 个喀斯特槽谷剖面进行植物种及土壤样品的采集。其中,三个剖面分别位于隧道影响区三条隧道对应上方位置,两个剖面位于无隧道影响区。分别在喀斯特槽谷剖面两侧坡地及底部选择合适的样点进行采样。本研究于 2017 年 9 月(雨季)与 2018 年 3 月(旱季)进行样本采集。基于实验样品普遍性原则,选取各样点的优势种或广适性植物,本研究选取乔木种白蜡树(*Fraxinus chinensis* Roxb)、橘子树(*Citrus reticulata*);灌木种多叶勾儿茶(*Berchemia polyphylla*)、金佛山荚蒾(*Viburnum chinshanense* Graebn)。对于每个植物种,选择 4—8 株长势良好且胸径高度相似的样木,每株样木采集 20—30 片成熟健康的叶片进行混合,作为该植物种的一个样品,编号装入塑封带中。

1.2.2 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定

用等离子水对植物叶片样品进行 2—3 次冲洗,晾干置于 105℃ 下杀青后,在烘箱中于 70℃ 下连续烘干 48 h。将烘干后样品在植物研磨机中研磨粉碎,过 100 目筛,用百万分之一电子天平称取约 50—60 μg 的样品,密封于直径为 3.5 mm、高 5 mm 的锡杯内,在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室利用气体同位素比值质谱仪(Thermo-Element Flash EA2000, Thermo Fisher MAT253, USA)测定叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值。标样为国际标准 V—PDB(Vienna Pee Dee Belemnite),其精度在 0.06‰—0.1‰ 之间。计算式为: $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000$ 。

1.2.3 土壤含水量的测定

选取采集树种附近且地势相对平坦的地方,于土壤剖面 0—20 cm、20—40 cm 处取适量土样装入样瓶中。在实验室测土样鲜重,后对土样烘干至恒重,测其干重,利用公式: $\theta_w(\%) = [(\text{新鲜土重} - \text{烘干后土重}) / \text{烘干后土重}] \times 100$,计算各样地不同土层的土壤含水量,取 3 个重复样测定结果的平均值。

1.3 植物水分利用效率计算

根据 Farquhar 等^[17]对植物稳定碳同位素比率与瞬时水分利用效率(WUE_{inst})关系的研究,证明两者间具有很强的相关性,可以作为植物 WUE_{inst} 的间接性测定指标。故由下式对植物 WUE_{inst} 进行计算:

$$\text{WUE}_{\text{inst}} = C_a \left[1 - \frac{\delta^{13}C_a - \delta^{13}C_p}{a(b - a)} \right] / 1.6\Delta_w$$

式中, $\delta^{13}C_a$ 、 $\delta^{13}C_p$ 分别代表大气中 CO_2 和植物叶片中稳定碳同位素比率; C_a 代表样地大气 CO_2 浓度; Δ_w 为叶片内外水气压之差;其中 a 、 b 为同位素分馏系数, a 为 CO_2 扩散过程中的同位素分馏,4.4‰; b 为 CO_2 羧化过程中的同位素分馏,27‰^[17-18]。

1.4 数据处理

使用 Excel 对初始数据进行整理统计。利用统计分析软件 SPSS(20.0 for Windows, Chicago, USA),通过单因素方差分析(One-Way ANOVA)实验区、对照区植物 WUE_{inst} 值及不同季节植物 WUE_{inst} 值之间的差异性。利用双因素方差分析(Two-Way ANOVA)讨论季节变化与隧道建设对植物 WUE_{inst} 的影响,统计分析水平为 $P < 0.05$ 。利用 Origin 完成土壤含水量与植物 WUE_{inst} 相关性分析及作图。

2 结果与分析

2.1 研究期间降水与土壤含水量变化

图 2 显示的是在研究期间日降水量及气温的波动情况。2017 年 9 月至次年 3 月,降水量与气温均呈先下降后升高的趋势。在此期间,9 月份降水量最高为 249 mm,且降水事件频率相对于其他月份最高;相反,12 月份的降水量最低,仅为 10 mm。通常在喀斯特地区一次降水事件能维持 5—10 天的湿润环境,所以在雨季的第一次采样中,我们认为植物并没有经历水分胁迫;而在次年 3 月 1 日的第二次采样前,研究区经历了相对严

重的干旱,期间(2017年12月至次年2月)仅发生1次较大降水事件($>10\text{ mm}$),且仅占研究期间降水总量的4.9%,考虑到含水层系统储水能力较低,即使气温较低,但植物仍会经历水分胁迫。

隧道影响区与无隧道影响区土壤含水量均具有明显的垂直和季节变化。在旱、雨两季,土壤含水量均随土层深度增加而增加,上层和下层土壤含水量平均值分别为24%和27%。同时,两个区域不同土层深度的土壤含水量随降水变化呈现出明显的时间变化($P=0.002<0.05$),其中土壤含水量最高值发生在6月份(32%),而最低值则发生在气温最高且降水较少的8月份(20%)。

尽管隧道影响区与无隧道影响区的土壤含水量在垂直和时间上表现出相似的变化,但在不同土层深度的土壤含水量均具有显著差异($P<0.05$)。在隧道影响区,表层土壤含水量介于17%—28%之间,平均值为22.3%;较深层土壤含水量介于19%—32%之间,平均为25.3%。而在无隧道影响区,表层土壤含水量在20%—32%范围内,平均为25.9%;较深层土壤含水量在24%—38%范围内,平均为29.4%。其中,隧道影响区表层土壤含水量波动最大。以上结果表明,隧道影响区与无隧道影响区土壤含水量存在显著差异,说明隧道开挖对喀斯特地区的土壤含水量具有一定的影响。

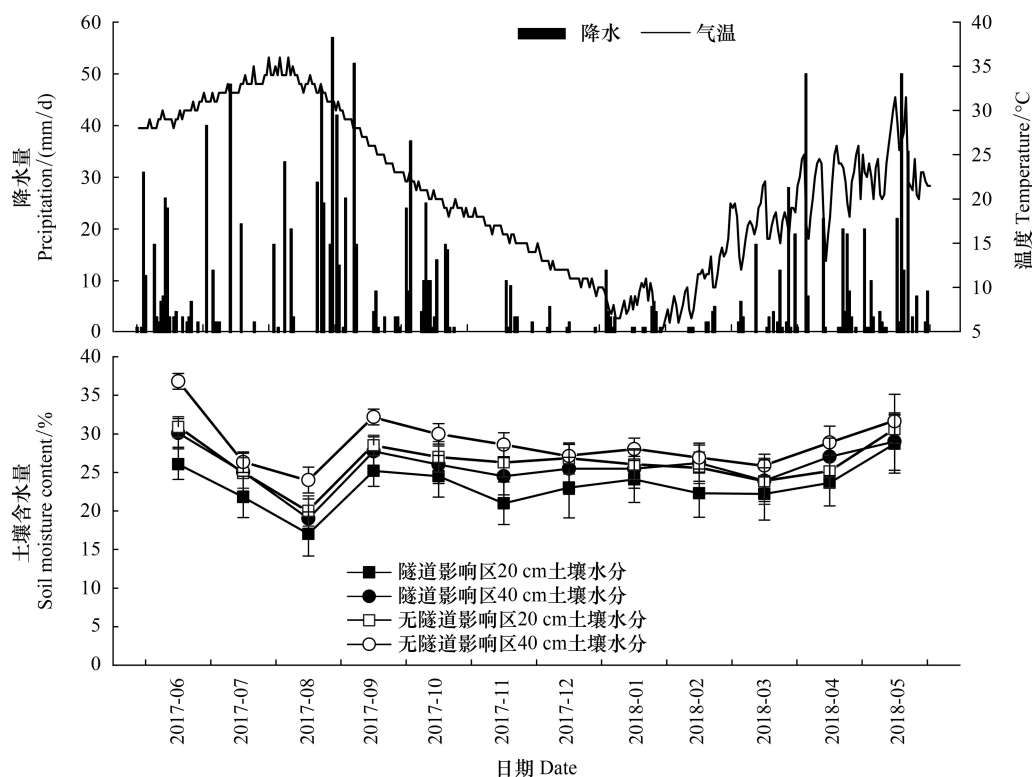


图2 2017年6月至2018年5月日降水量及温度变化和不同深度土壤含水量变化

Fig.2 Daily precipitation between June 2017 and May 2018 at the study site and changes of different deep soil moisture content

2.2 隧道影响区和无隧道影响区植物水分利用效率变化特征

植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 WUE_{inst} 经分析表明,研究区所有样地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -27.93‰ — -32.65‰ 之间,均值为 $-30.25\text{‰}\pm 1.21\text{‰}$,属于典型的C3植物。乔、灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间差异不显著($P>0.05$)。所研究四种植物 WUE_{inst} 变化介于0.462—1.992 mmol/mol之间,平均1.338 mmol/mol。然而,隧道影响区与无隧道影响区不同植物种 WUE_{inst} 均具有显著的季节变化。旱、雨两季植物 WUE_{inst} 测定结果表明,在雨季,植物 WUE_{inst} 变化范围在0.462—0.594 mmol/mol之间,均值为 (0.528 ± 0.050) mmol/mol;旱季,植物 WUE_{inst} 变化范围介于1.800—1.992 mmol/mol之间,均值为 (1.904 ± 0.057) mmol/mol,旱、雨两季植物整体 WUE_{inst} 呈显著差异性($P<0.05$)。说明研究区植物 WUE_{inst} 具有明显的时间变异性。另外,根据表2可知各物种之间 WUE_{inst} 大小趋势存在差异。乔木种

WUE_{inst} 均略大于灌木种,可能是乔木、灌木之间形态的变化使较低的树种具有相对较大的水分供应优势^[19]。

此外,无论在旱季还是在雨季,隧道影响区与无隧道影响区植物水分利用效率均存在差异。生境条件的改变使植物水分利用效率发生变化,而不同的植物对生境条件改变的响应也存在一定差异。由表 3 可知,在旱季,隧道影响区植物种水分利用效率在 1.896—1.992 mmol/mol 之间;无隧道影响区植物种水分利用效率介于 1.800—1.909 mmol/mol 之间。不同影响区整体植物水分利用效率存在显著差异($P<0.05$)。对于各植物种而言,白蜡树与多叶勾儿茶在不同影响区的 WUE_{inst} 值差异达显著水平($P<0.05$),说明相对于其他树种白蜡树与多叶勾儿茶对隧道建设的响应更加敏感,这是由植物本身的生物学特性所决定的。在雨季,隧道影响区植物种水分利用效率在 0.517—0.594 mmol/mol 之间;非隧道影响区植物种水分利用效率介于 0.462—0.508 mmol/mol 之间。不同影响区植物水分利用效率同样存在显著差异,说明研究区植物水分利用效率可能由于隧道建设导致植物生境改变,具有从无隧道影响区到隧道影响区显著增高的变化趋势。为了进一步说明隧道建设对植物 WUE_{inst} 分布的影响,我们选取在旱季五个剖面采样点植物 WUE_{inst} 值进行对比分析。如图 3 所示,在旱季,不同影响区五个剖面采样点植物 WUE_{inst} 平均值从大到小依次: P2 ((1.957±0.013) mmol/mol) > P3 ((1.943±0.020) mmol/mol) > P1 ((1.934±0.051) mmol/mol) > P5 ((1.866±0.041) mmol/mol) > P4 ((1.839±0.031) mmol/mol), 根据单因素方差分析结果表明,在相同区域中各采样点植物 WUE_{inst} 值无显著差异,但是隧道影响区三个剖面样点植物 WUE_{inst} 值均显著高于无隧道影响区植物 WUE_{inst} 值($P<0.05$)。

总体来看,在旱、雨两季,植物 WUE_{inst} 值分布的结果均表明不同影响区植物 WUE_{inst} 值存在差异性,说明隧道建设对植物 WUE_{inst} 值的分布有一定影响。

表 2 不同影响区各树种 WUE_{inst} 旱季和雨季的变化

Table 2 The WUE_{inst} values of different influence sites in wet and dry seasons

树种 Species	旱季 Dry season		<i>P</i>	雨季 Wet season		<i>P</i>
	隧道影响区 Tunneling- affected valley	无隧道影响区 Tunneling- unaffected valley		隧道影响区 Tunneling- affected valley	无隧道影响区 Tunneling- unaffected valley	
白蜡树 <i>F. chinensis</i>	1.936	1.840	0.04 *	0.578	0.488	0.01 *
橘子树 <i>C. reticulata</i>	1.980	1.891	0.17	0.520	0.464	—
多叶勾儿茶 <i>B. polyphylla</i>	1.947	1.825	0.017 *	0.517	0.464	—
金佛山荚蒾 <i>V. chinshanense</i>	1.935	1.873	0.2	0.586	0.491	—

* 表示 $P<0.05$ 差异显著; WUE_{inst} : 瞬时水分利用效率 Instantaneous Water Use Efficiency

2.3 隧道影响区与无隧道影响区植物水分利用效率与土壤含水量的关系

利用线性回归模型,我们对研究区植物 WUE_{inst} 与土壤含水量的相关关系进行探究(表 3),结果表明:隧道影响区与无隧道影响区植物种 WUE_{inst} 均随土壤含水量减少而提高,并呈显著负相关趋势(隧道影响区: $P<0.05, r=-0.92$; 无隧道影响区: $P<0.05, r=-0.84$),表明研究区植物 WUE_{inst} 受土壤含水量变化的影响较大。而隧道区植物 WUE_{inst} 与土壤含水量的相关性较无隧道影响区植物 WUE_{inst} 与土壤含水量的相关性要强,表明相对于无隧道影响区植物,隧道影响区植物 WUE_{inst} 对土壤含水量的变化会更敏感。对于不同生活型植物种而言,隧道影响区灌木种 WUE_{inst} 与土壤含水量相关性高于乔木种,说明在土壤含水量相对偏低的隧道影响区,灌木种对土壤含水量的变化更敏感。

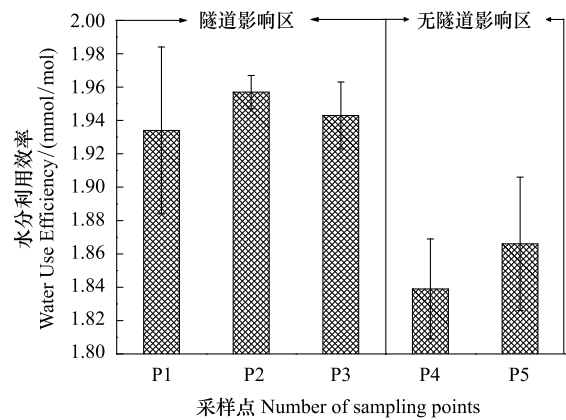


图 3 旱季不同影响区各剖面样点植物 WUE_{inst} 分布

Fig. 3 The WUE_{inst} values of different influence sites in dry seasons at five profiles

WUE_{inst} : 瞬时水分利用效率 Instantaneous Water Use Efficiency

表 3 不同影响区乔、灌木植物 WUE_{inst} 与土壤含水量相关系数Table 3 The correlation coefficient of WUE_{inst} of arbor and shrub and soil moisture content at different sites

树种 Species	地点 Sites	
	隧道影响区 Tunneling-affected valley	无隧道影响区 Tunneling-unaffected valley
乔木 Arbor	-0.90 *	-0.87 *
灌木 Shrub	-0.93 *	-0.78 *
全部树种 All Species	-0.92 *	-0.84 *

* 表示 $P < 0.05$ 差异显著

3 讨论

3.1 隧道影响区与无隧道影响区土壤含水量季节性差异

隧道影响区与无隧道影响区土壤含水量的年动态波动均表现出一定的差异性,这主要是降水的季节性变化引起的。但是我们认为,不同季节隧道影响区与无隧道影响区土壤含水量均表现显著差异性可能是由于隧道建设的影响。因为人工开凿交通隧道对富水岩层的凿穿及巨大的震动增加了溶隙的透水能力,破坏地下水系统内部原有的水循环平衡,使深层裂隙水从渗流转为明流加大了深层地下水的排泄量,改变了溶隙水循环,进一步造成潜水位降低,并由于地下水系统与外界的水循环平衡遭到破坏,加速了地表水和土壤水向喀斯特地下水的入渗转化,造成地表径流和泉水的干涸,水土流失相对严重。另外,根据数据分析表明,无论在旱季或者雨季,两个区域土壤含水量有显著差异(旱季:隧道影响区 22% < 无隧道影响区 25%;雨季:隧道影响区 26% < 无隧道影响区 30%),且在雨季,地表水与土壤水向深层溶隙补给的转化速率更快。这在一定程度上支持了隧道建设可以导致地下水位下降,进而使土壤含水量降低的观点。

3.2 隧道影响区与无隧道影响区植物水分利用效率季节性差异

由于喀斯特槽谷缺乏系统的地表水文网,天然植被生态系统主要依靠消耗地下水资源来维持的。诸多研究表明,植被的分布、生存和演替主要受控于水位和盐份条件。地下水埋深愈浅,植物的生长发育状况愈好,反之会造成植物生长减慢^[20]。不同学者对隧道修建影响地下水系统的相关研究结果,表明隧道建设期间,大量地下水流失,导致区域地下水位下降使隧道区植被覆盖率迅速下降;隧道建成后,地下水位有所回升,植被覆盖率也有所回升,但较之前还是会有显著差距^[21-24]。因此,水分是植物生长发育的重要生态因子。在旱、雨两季隧道影响区与无隧道影响区的土壤含水量均呈现显著差异性,而土壤含水量是直接影响植物碳同化速率和蒸腾速率的关键因子。植物 WUE_{inst} 对此能做出综合反映^[25-26]。首先,喀斯特地区植物的二态根系使研究区不同植物种在旱、雨两季均表现出相似的主要水分吸收源(主要吸水源为浅层土壤水和深层地下水),但是相对于旱季,雨季的乔、灌木会吸收更多的土壤水分^[10]。雨季隧道影响区与无隧道影响区乔、灌木树种 WUE_{inst} 则均表现为显著低于旱季植物 WUE_{inst} 。这是因为,在雨季,长时间持续性阴雨带来丰富的降水量,极大程度补给了喀斯特槽谷区土壤水分。相对于旱季,雨季的光照强度较弱,一定程度上限制了植物光合作用的能力。因此,植物平均水分利用效率也会处于较低的水平。而在旱季,因为降水的不足导致土壤水分条件下降,使植物会吸收更多的地下水,虽然地下水可以作为植物种的稳定水源,但是由于皮下带的孔隙度会随深度的增加而减小,导致蓄水能力有所下降^[27]。另外,有研究表明根系在喀斯特裂隙中吸水并不容易^[28]。因此,尽管在旱季,植物有稳定的深层水源补给,但是仍然会采用相对保守的水分利用策略(高水分利用效率)。这与杜雪莲等人在喀斯特高原对植物叶片 WUE_{inst} 季节变化的研究结果相同^[29-30]。

然而,值得注意的是,无论是在旱季还是雨季,隧道影响区不同生活型植物 WUE_{inst} 均高于无隧道影响区。我们认为,土壤含水量在不同季节,始终是植物主要且稳定的水分吸收来源^[9],由于隧道建设导致了土壤水分有效性的降低,使植物处于一定的水分胁迫环境中,而水分胁迫往往会导致植物 WUE_{inst} 不同程度的增加^[31-33]。在植物受轻度或中度水分胁迫时,脱落酸是植物抗逆的重要激素,它的分泌往往会引起气孔因素的

限制。对此,植物为了减少水分蒸发,会关闭气孔,叶片气孔导度系数减小,同时由于气孔是植物叶片吸收 CO_2 的通道,因此气孔导度的减小会引起叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的降低,使植物蒸腾速率降低,从而提升植物水分利用效率^[34]。而隧道影响区和无隧道影响区植物 WUE_{inst} 与土壤含水量相关关系表明,旱、雨两季隧道影响区乔、灌木树种 WUE_{inst} 对土壤含水量的变化更敏感。这也进一步说明由于土壤水分有效性低,考虑到喀斯特含水层低的储水能力,隧道影响区植物对土壤水分的依赖性比无隧道影响区植物更高。

另外本文基于不同影响区生境条件以及季节变化对植物 WUE_{inst} 值进行双因素方差分析,结果表明:位于不同影响区以及不同季节的植物 WUE_{inst} 值差异显著,而隧道建设 $\times$ 季节的交互效应不显著 ($P>0.05$),即隧道建设和季节对植物水分利用效率不存在交互作用。此外,根据比较 Eta 平方系数(关联强度),认为季节影响程度最大,其次为隧道建设影响,而隧道建设与季节的交互作用最小。因此,进一步说明旱、雨两季乔木、灌木种 WUE_{inst} 的显著变化主要是由于降水变化导致土壤水分的差异造成的,而隧道影响区与无隧道影响区乔木、灌木树种 WUE_{inst} 的差异则可能是隧道建设导致喀斯特槽谷土壤水分有效性降低所造成的。

4 结论

(1)隧道影响区与无隧道影响区土壤含水量存在明显的垂直差异和季节差异。但在隧道影响区,不同土层在旱、雨季节的土壤含水量均比无隧道影响区的要低。

(2)研究区乔、灌木树种叶片 WUE_{inst} 之间差异性未达显著水平。但是各树种 WUE_{inst} 存在明显的季节差异,由于降水引起的土壤含水量的季节性变化,旱季各植物种 WUE_{inst} 显著高于雨季。而隧道修建导致一系列生态环境的改变使隧道影响区土壤水分有效性低于无隧道影响区,植物 WUE_{inst} 在不同影响区的分布范围有显著差异:隧道影响区乔、灌木树种叶片 WUE_{inst} 高于无隧道影响区。

(3)根据植物 WUE_{inst} 与土壤含水量相关性分析结果表明,隧道区植物 WUE_{inst} 对土壤含水量的变化更加敏感,并且随季节变化表现出不同的相关趋势。综合来看,隧道建设的影响及季节变化对植物 WUE_{inst} 的分布均有显著作用,这主要归因于土壤含水量的差异。而植物群落结构对喀斯特地区植物生态可塑性的影响以及植物自身吸水机制适应性变化,也是植物 WUE_{inst} 对隧道建设产生不同响应的重要原因。

参考文献 (References):

- [1] 曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 夏日元, 章程. 岩溶动力系统与全球变化研究进展. 中国地质, 2017, 44(5): 874-900.
- [2] 罗鉴银, 傅瓦利. 岩溶地区开凿隧道对地下水循环系统的破坏——以重庆市中梁山为例. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 432-435.
- [3] Vincenzi V, Gargini A, Goldscheider N. Using tracer tests and hydrological observations to evaluate effects of tunnel drainage on groundwater and surface waters in the Northern Apennines (Italy). Hydrogeology Journal, 2009, 17(1): 135-150.
- [4] Li H, Kagami H. Groundwater level and chemistry changes resulting from tunnel construction near Matsumoto City, Japan. Environmental Geology, 1997, 31(1/2): 76-84.
- [5] Spross J, Larsson S. On the observational method for groundwater control in the Northern Link tunnel project, Stockholm, Sweden. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(2): 401-408.
- [6] Kværner J, Snilsberg P. The Romeriksporten railway tunnel —drainage effects on peatlands in the lake Northern Puttjern area. Engineering Geology, 2008, 101(3/4): 75-88.
- [7] 郑伟, 杨保, 徐宗永, 肖羚. 隧道建设活动对地表植被群落动态的影响——以武昆高速公路象鼻岭隧道为例. 公路交通技术, 2012, (5): 145-149.
- [8] 王芳其, 郑伟, 徐华, 陈剑楠. 岩溶山区隧道地下水漏失对植物生长的影响分析及对策. 隧道建设, 2018, 38(6): 915-923.
- [9] Zheng W, Wang X L, Tang Y, Liu H, Wang M, Zhang L J. Use of tree rings as indicator for groundwater level drawdown caused by tunnel excavation in Zhongliang Mountains, Chongqing, Southwest China. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(15): 522.
- [10] Liu J C, Shen L C, Wang Z X, Duan S H, Wu W, Peng X Y, Wu C, Jiang Y J. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley. Journal of Hydrology, 2019, 571: 485-493.
- [11] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Plant

- Molecular Biology, 1989, 40: 503-537.
- [12] Ehleringer J R, Cooper T A. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants. *Oecologia*, 1988, 76(4): 562-566.
- [13] Chen S P, Bai Y F, Han X G. Variation of water-use efficiency of *Leymus chinensis* and *Cleistogenes squarrosa* in different plant communities in Xilin River Basin, Nei Mongol. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(12): 1484-1490.
- [14] Miller J M, Williams R J, Farquhar G D. Carbon isotope discrimination by a sequence of *Eucalyptus* species along a subcontinental rainfall gradient in Australia. *Functional Ecology*, 2001, 15(2): 222-232.
- [15] 苏波, 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉, 白永飞, 渠春梅. 中国东北样带草原区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率对环境梯度的响应. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 648-655.
- [16] 罗鉴银, 傅瓦利. 岩溶地区开挖隧道对水资源的影响——以渝合高速公路隧道为例. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2006, 28(1): 154-156, 160-160.
- [17] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. *Planta*, 1980, 149(1): 78-90.
- [18] Ehleringer J R. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fractionation and its utility in terrestrial plant studies//Coleman D C, Fry B, eds. *Carbon Isotope Techniques*. Amsterdam: Elsevier, 1991.
- [19] 王玉涛, 李吉跃, 刘平, 陈崇, 何春霞. 不同生活型绿化植物叶片碳同位素组成的季节特征. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 151-159.
- [20] 汤梦玲, 徐恒力, 曹李靖. 西北地区地下水对植被生存演替的作用. *地质科技情报*, 2001, 20(2): 79-82.
- [21] 曾晓燕. 岩溶隧道涌水对生态环境的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [22] 张国珍, 崔圣达, 张洪伟, 徐明飞. 隧道工程对生态环境的影响及环境效应. *地质灾害与环境保护*, 2017, 28(4): 53-57.
- [23] 刘丹, 杨立中, 于苏俊. 华蓥山隧道排水的生态环境问题及效应. *西南交通大学学报*, 2001, 36(3): 308-313.
- [24] 李耐霞. 歌乐山隧道施工过程中对水环境影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [25] 刘美珍, 孙建新, 蒋高明, 董鸣. 植物-土壤系统中水分再分配作用研究进展. *生态学报*, 2006, 26(5): 1550-1557.
- [26] 陈英华, 胡俊, 李裕红, 薛博, 严重玲. 碳稳定同位素技术在植物水分胁迫研究中的应用. *生态学报*, 2004, 24(5): 1027-1033.
- [27] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Ding Y L. Seasonal variations in leaf $\delta^{13}\text{C}$ values: implications for different water-use strategies among species growing on continuous dolomite outcrops in subtropical China. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36(10): 2571-2579.
- [28] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 1-10.
- [29] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区 5 种常见灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化及其对石漠化程度的响应. *地球与环境*, 2010, 38(2): 129-137.
- [30] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 喀斯特峡谷区常见植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与环境因子的关系研究. *环境科学*, 2008, 29(10): 2885-2893.
- [31] 刘国利, 何树斌, 杨惠敏. 紫花苜蓿水分利用效率对水分胁迫的响应及其机理. *草业学报*, 2009, 18(3): 207-213.
- [32] 史作民, 程瑞梅, 刘世荣. 高山植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔响应及其机理. *生态学报*, 2004, 24(12): 2901-2906.
- [33] Xu X, Guan H D, Skrzypek G, Simmons C T. Response of leaf stable carbon isotope composition to temporal and spatial variabilities of aridity index on two opposite hillslopes in a native vegetated catchment. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 214-223.
- [34] Davies W J, Wilkinson S, Loveys W B. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist*, 2002, 153(3): 449-460.