

青藏高原隧道建设对土壤有机碳含量及酶活性的影响

何姝蕊¹, 赵润英¹, 王晓东¹, 张平¹, 裴向军¹, 赖长鸿², 宋放², 唐晓鹿¹

(1.成都理工大学生态环境学院, 四川成都 610059; 2.四川省林业和草原调查规划院, 四川成都 610059)

摘要: [目的] 开展青藏高原隧道建设对土壤有机碳含量及酶活性的影响研究, 为阐明隧道建设对生态环境的影响提供理论参考。[方法] 以青藏高原某隧道工程建设为依托, 在隧道建设影响区与对照区设置半径为 10 m 的固定监测样地, 研究隧道建设对表层土壤有机碳含量及酶活性的短期影响。[结果] 隧道开建 1 a 后隧道影响区土壤有机碳含量、易氧化有机碳含量和可溶性有机碳含量分别为 76.84、25.90 和 3.15 g/kg, 对照区分别为 52.91、15.60 和 3.18 g/kg; 隧道开建 3 a 后隧道影响区土壤有机碳含量、易氧化有机碳含量和可溶性有机碳含量分别为 92.63、28.65 和 3.41 g/kg, 对照区分别为 94.81、23.11 和 3.34 g/kg; 差异均不显著 ($p > 0.05$), 表明短期内隧道建设对土壤有机碳及组分含量无影响。隧道影响区的土壤 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性在开建 1 a 后和 3 a 后与对照区差异均不显著 ($p > 0.05$), 隧道影响区的多酚氧化酶活性在开建 1 a 后有显著降低 ($p = 0.02$), 但在开建 3 a 后, 多酚氧化酶活性在隧道影响区和对照区之间没有显著差异 ($p > 0.05$), 表明隧道建设对土壤酶活性无显著影响。[结论] 隧道工程建设对土壤有机碳及其组分含量和酶活性短期内无显著影响, 主要由于隧道建设过程对土壤有机碳输入与输出等无明显影响所致, 长期影响有待进一步研究。

关键词: 隧道建设; 森林; 土壤有机碳; 土壤酶; 青藏高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0280-07

中图分类号: S714

文献参数: 何姝蕊, 赵润英, 王晓东, 等. 青藏高原隧道建设对土壤有机碳含量及酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 280-286. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.030; He Shurui, Zhao Runying, Wang Xiaodong, et al. Effects of tunnel construction on soil organic carbon content and enzyme activity in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 280-286.

Effects of Tunnel Construction on Soil Organic Carbon Content and Enzyme Activity in Qinghai-Xizang Plateau

He Shurui¹, Zhao Runying¹, Wang Xiaodong¹, Zhang Ping¹,
Pei Xiangjun¹, Lai Zhanghong², Song Fang², Tang Xiaolu¹

(1. College of Ecological Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610050, China; 2. Sichuan Forestry and Grassland Survey and Planning Institute, Chengdu, Sichuan 610050, China)

Abstract: [Objective] The impact of tunnel construction on soil organic carbon content and enzyme activity in the Qinghai-Xizang Plateau was researched in order to provide a theoretical reference for elucidating the impact of tunnel construction on the ecological environment. [Methods] Based on the construction of a tunnel project on the Qinghai-Xizang Plateau, fixed monitoring plots with a radius of 10 m were set up in the impact area and control area of tunnel construction to study the short-term effects of tunnel construction on surface soil organic carbon content and enzyme activity. [Results] After one year of tunnel construction, the soil organic carbon content, easily oxidizable organic carbon content, and soluble organic carbon content in the tunnel-impact area were determined to be 76.84, 25.90, and 3.15 g/kg, respectively, while that of the control area was 52.91, 15.60, and 3.18 g/kg, respectively, whereas that after three years of tunnel

收稿日期: 2023-05-13

修回日期: 2023-07-10

资助项目: 成都理工大学“珠峰科学研究计划”(80000-2022ZF11410); 四川省林草科技创新团队“数字林草监测与林草碳汇创新研究与示范”(CXTD2023003)

第一作者: 何姝蕊(1998—), 女(汉族), 四川省广安市人, 硕士研究生, 研究方向为工程建设的生态环境影响。Email: 1726075207@qq.com。

通信作者: 唐晓鹿(1986—), 男(汉族), 四川省内江市人, 博士, 研究员, 主要从事生态环境监测及碳中和效应评价方面的研究。Email: lxtt2010@163.com。

construction was 92.63, 28.65, and 3.41 g/kg in the impact area respectively, and 94.81, 23.11, and 3.34 g/kg in the control area, respectively. The differences were not significant ($p > 0.05$), indicating that tunnel construction has no impact on soil organic carbon and component content in the short term. The activities of β -glucosidase and catalase in the soil of the tunnel-affected area demonstrated no significant differences compared to the control area after one year and three years of construction ($p > 0.05$), while the activity of polyphenol oxidase in the tunnel-impact area decreased significantly after one year of construction ($p = 0.02$). However, after three years of construction, there was no significant difference in polyphenol oxidase activity between the tunnel-impact area and the control area ($p > 0.05$), indicating that tunnel construction had no significant effect on soil enzyme activity. [Conclusion] Tunnel construction has no significant impact on soil organic carbon and its component content, as well as enzyme activity in the short term. This is primarily because the tunnel construction process has no significant impact on soil microbial processes, soil nutrients, and input and output of soil organic carbon, while the long-term impact needs further research.

Keywords: tunnel construction; forest; soil organic carbon; soil enzyme; Qinghai-Xizang Plateau

隧道工程常被用在交通基础建设中,大多修建在地形复杂、高度落差较大的地区,但隧道在建设过程中可能会对周边植被、土壤、地下水和地表水环境产生影响。如作业场地和施工便道建设过程中会直接造成植被生物量的损失和景观破坏,建设材料和固体废物的运输对土壤的碾压和污染均会直接影响土壤环境,隧洞开挖后的疏排水引起的地下水位波动也会直接或间接影响土壤环境及周边植被^[1],造成土壤含水量下降、植被生长和根系土壤微生物群落变化、地表径流水量减少等问题^[2]。目前已有研究^[3]表明,隧道建设对土壤将产生显著的影响,如中梁山隧道建设显著降低了土壤含水率和土壤养分含量,增加了表层土壤细颗粒流失量,降低了土壤肥力,导致土壤质量下降。同时,刘九缠^[4]的研究表示,隧道影响区受到疏排水的影响,土壤含水率降低,在隧道影响区内的植被利用的地下水比例高于非影响区。因此,隧道建设过程中对土壤环境和植被的影响,可能会对土壤中有机碳的输入与输出造成影响,进而对土壤中有机碳的积累产生影响,但在对气候变化与人类活动敏感的高海拔地区的相关研究还鲜见报道。

土壤有机碳是全球碳循环的重要组成部分,是大气二氧化碳的源和汇,它不仅能表征土壤肥力,也会影响土壤的物理、化学和生物性质^[5]。土壤有机碳也是陆地生态系统里最大的碳库,其微小的变化也会对全球碳循环产生显著影响^[6],全球气候变化及人为扰动也将对土壤有机碳产生着重要影响。例如,隧道建设引起的土壤含水率下降可能会造成植被生长受限及土壤微生物活动变化,导致土壤有机碳及其组分含量变化^[7]。但土壤有机碳背景值相对较高,对外界环境变化反应速度较慢,短期内的反应较为滞后,不能较好地反映短时间土壤质量的变化^[8]。土壤有机碳中活性有机碳可作为土壤有机碳早期变化的指示物,

通常可由土壤可溶性有机碳、易氧化有机碳等表示^[9],研究者可通过测定土壤活性有机碳来反映土壤有机碳对外界变化的响应。隧道建设过程中对地下水涌水的疏排造成地下水位波动,土壤水分降低,会导致地表植被对水分的吸收发生变化,严重可能导致植被枝干枯萎或死亡^[10]。植被凋落物作为森林土壤有机碳的重要来源,人为干扰下造成植被生长变化,可能会影响凋落物的数量和质量^[11],从而调节森林土壤有机碳含量。土壤酶是土壤的重要生物指标^[12],对土壤环境的变化十分敏感,在土壤物质转化和能量代谢等方面起着重要作用,也常作为评价土壤质量的指标之一。万忠梅等^[13]表明土壤酶活性受到植被组成、土壤 pH 值、土壤微生物、土壤有机质、土壤水热气状况等因素的影响。在重大工程建设时,土壤环境受到扰动,理化性质发生改变,对土壤微生物活性、生物量、酶活性等的动态变化都有着重要影响^[14-15]。同时土壤酶活性与土壤有机碳也存在密切关系^[16],胞外酶可以结合在黏土矿物上,形成酶-黏土或酶-腐殖质复合体^[17]。但在酶活性发生变化时,无法确切地观察到土壤酶活性差异是否是土壤中有机碳含量差异导致的,还是酶活性的实际差异^[18]。有研究者^[19-20]采用单位有机碳酶活性(即酶活性与有机碳的比值)来解释土壤酶活性的变化与土壤有机碳的变化,同时消除土壤酶活性与土壤有机碳之间的强相关性,因此,单位有机碳酶活性能比单独酶活性更敏感地显示出土壤变化。

青藏高原是全球的生态屏障,素有“世界屋脊”“第三极”之称,高原显著的海拔高差使得各区域气候具有显著差异,植被种类各不相同,这也导致高原生态系统十分敏感和脆弱^[21]。青藏高原地区是中国重要的林区,林地主要分布在青藏高原东南部,森林类型主要为亚高山暗针叶林、亚热带常绿阔叶林、

低山热带森林、落叶阔叶林和落叶松林等^[22], 树种繁多, 森林覆盖率低且分布不均匀, 但森林蓄积量较高。森林生态系统在陆地生态系统中具有调节气候、涵养水源、保持水土、防风防沙等方面的功能, 森林也是全球碳汇中重要的陆地碳汇。同时, 青藏高原也是我国重大工程建设密集区, 如公路铁路建设、水电开发等, 也将对生态环境产生重要影响。当前研究者们对重大工程影响的研究主要集中在我国东部、中部地区^[3-4], 对青藏高原地区的研究较少; 在隧道影响方面, 多数研究探究其对土壤水分和土壤质量、肥力、结构等的影响, 对土壤有机碳及酶活性的影响研究较少^[10]。因此, 本研究以青藏高原地区某在建隧道工程为依托, 以隧道建设影响区为研究对象, 以非隧道建设影响区为对照, 从土壤有机碳、土壤酶活性等角度, 阐明隧道建设对土壤环境的影响, 以期为阐明隧道建设对生态环境的影响提供重要的理论参考, 同时为青藏高原生态环境保护提供重要的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于西藏自治区林芝市(26°52′—30°40′N, 92°09′—98°47′E), 属青藏高原东南缘, 地处高山深谷地貌区, 海拔 3 000~3 600 m。该区域受印度洋暖湿季风的影响, 为高原温暖半湿润气候, 年均温 9.1 °C, 最暖月(7 月)平均气温为 16.2 °C, 最冷月(1 月)平均气温为 1 °C, 雨季为 3—10 月, 月降水量为 19.0~143.3 mm, 年降水量约 700 mm, 无霜期约 175 d, 年日照时间超 2 000 h。研究区内多年平均降

雨量及气温变化特征如图 1 所示。选取的隧道规划里程全长约 38 000 m, 最大埋深可达 1 600 m, 在施工过程中, 每天排出涌水量可达 4 000~8 000 m³, 隧道于 2020 年 11 月开建, 计划总工期为 93 个月。在研究区内设置的样地中, 土壤类型为山地酸性棕壤, 淋溶作用强烈, 植被主要包括云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)等。

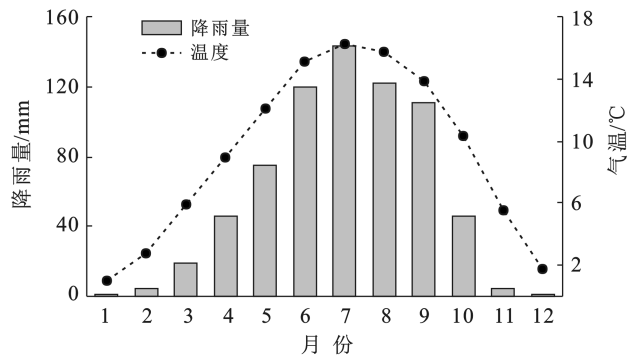


图 1 研究区多年平均降雨量与气温

Fig.1 Average annual rainfall and temperature in study area

1.2 试验设计

在隧道沿线上方, 选取能代表该区域整体情况的林地, 按照随机布点法布置 3 个重复样地作为隧道建设影响区(IA), 每个样地均为半径 10 m 的样圆。朱志强^[23]研究表明, 某隧道疏排水影响半径约 300 m。因此, 本研究在隧道沿线 300 m 外, 植被类型与生长状况、海拔、坡度、坡向具有相似特征的区域划定为非隧道建设影响区, 设置 3 个重复样地作为对照(CK), IA 与 CK 内的重复样地之间相距 50 m 以上。样地情况详见表 1。

表 1 试验样地概况

Table 1 Experimental site conditions

样地	坡度/(°)	坡向	海拔高度/m	主要植物
影响区(IA)	15~20	东南偏东	3 235±5	云杉、冷杉、杜鹃花为主, 少量阔叶
非影响区(CK)	15~20	东南偏东	3 230±5	云杉、冷杉、杜鹃花为主, 少量阔叶

注: IA 为隧道影响区, CK 为对照区。下同。

本次采集时间为隧道开建 1 a 后(2021 年)和 3 a 后(2023 年), 土壤样品采用混合法采集, 在每个样圆内 0°, 120°和 240°这 3 个方向上, 距圆心 5 m 处设置 3 个 1 m×1 m 的小样方进行取样, 样本总量为 18。由于土壤表层性质比深层更为活跃, 因此本研究取样深度为 0—10 cm。取得的土壤样品混合均匀后分为两份, 一份土样装入无菌保鲜袋放入 4 °C 车载冰箱内进行鲜样保存, 带回实验室进行土壤酶活性测定, 另一份土样装入布袋常温保存, 自然风干后过 2 mm 筛, 用于土壤理化性质、土壤有机碳及组分含量的测定。

样地基本性质详见表 2。

1.3 测定项目与方法

土壤有机碳含量采用浓硫酸—重铬酸钾外加热法^[24]; 易氧化有机碳采用 Blair^[25]提供的高锰酸钾氧化比色法测定; 可溶性有机碳采用总有机碳分析仪(TOC)测定^[26], 将水土比为 5:1 的土壤浸提液稀释 10 倍, 使用 TOC 测定。

参考关松荫^[12], 采用邻苯三酚比色法测定多酚氧化酶, 采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性, β-葡萄糖苷酶测定采用硝基酚比色法。

表 2 研究样地内植被与土壤基本性质

Table 2 Basic properties of vegetation and soil in sample land

指标	隧道开建时间/a	IA	CK
植被生物量/(mg·hm ⁻²)	1	259.26±105.49 ^a	293.66±27.23 ^a
	3	266.16±106.97 ^a	302.91±26.64 ^a
总氮/(g·kg ⁻¹)	1	6.41±1.87 ^a	3.23±0.32 ^a
	3	3.99±0.72 ^a	5.00±0.84 ^a
总磷/(g·kg ⁻¹)	1	0.84±0.12 ^a	0.64±0.17 ^a
	3	0.62±0.04 ^a	0.39±0.07 ^b
总钾/(g·kg ⁻¹)	1	5.99±0.41 ^a	4.55±0.42 ^b
	3	5.12±0.42 ^a	3.65±0.21 ^b
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	1	5.06±0.29 ^a	4.86±0.14 ^a
	3	2.96±0.60 ^a	2.76±0.55 ^a
速效钾/(g·kg ⁻¹)	1	0.25±0.08 ^a	0.19±0.11 ^a
	3	0.27±0.05 ^a	0.09±0.01 ^b
pH 值	1	5.52±0.17 ^a	4.82±0.06 ^b
	3	5.32±0.09 ^a	5.00±0.15 ^a

注:数据为平均值±标准误;不同字母表示同一年采集样品在 IA 与 CK 间差异显著($p < 0.05$)。下同。

单位有机碳酶活性计算^[20]为:

$$\text{单位有机碳酶活性} = \frac{\text{EA}}{\text{SOC}} \quad (1)$$

式中:EA 为土壤酶活性;SOC 为土壤有机碳含量。

表 3 隧道建设对土壤有机碳及其组分含量的影响

Table 3 Impact of tunnel construction on soil organic carbon and its component content

样地	土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)		易氧化有机碳/(g·kg ⁻¹)		可溶性有机碳/(g·kg ⁻¹)	
	1 a	3 a	1 a	3 a	1 a	3 a
影响区	76.84±4.06 ^a	92.63±7.66 ^a	25.90±5.60 ^a	28.65±7.58 ^a	3.15±0.002 ^a	3.41±0.45 ^a
非影响区	52.91±10.17 ^a	94.81±9.27 ^a	15.60±1.05 ^a	23.11±3.25 ^a	5.18±0.03 ^a	3.34±0.33 ^a

2.2 隧道建设对土壤酶活性的影响

隧道影响区内,土壤 β -葡萄糖苷酶活性在开建 1 a 后和 3 a 后分别为 1.29±0.52, 1.10±0.24 ml/g, 过氧化氢酶活性分别为 2.36±0.06, 2.09±0.32 ml/g, 与对照区之间差异均不显著(表 4, $p > 0.05$)。

表 4 不同隧道建设年限对土壤酶活性的影响

Table 4 Effects of different tunnel construction years on soil enzyme activity

样地	β -葡萄糖苷酶/(mg·g ⁻¹)		多酚氧化酶/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)		过氧化氢酶/(ml·g ⁻¹)	
	1 a	3 a	1 a	3 a	1 a	3 a
影响区	1.29±0.52 ^a	1.10±0.24 ^a	35.20±3.51 ^a	35.07±6.34 ^a	2.36±0.06 ^a	2.09±0.32 ^a
非影响区	1.21±0.23 ^a	1.22±0.25 ^a	49.50±3.74 ^b	30.12±8.25 ^a	2.42±0.10 ^a	2.24±0.28 ^a

单位土壤有机碳 β -葡萄糖苷酶活性、过氧化氢酶活性在开建 1 a 后和 3 a 后分别为 0.02±0.007, 0.01±0.002 和 0.03±0.002, 0.03±0.005 ml/g, 在隧道影响区和对照区差异均不显著(表 5, $p > 0.05$)。单位

1.4 数据处理

本研究采用 RStudio 4.3.2 对所测数据进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)方差分析法探究隧道建设对土壤有机碳、土壤酶活性、单位有机碳酶活性的影响,用 Pearson 相关分析法来确定土壤理化性质与土壤有机碳、土壤酶活性之间的相关性。利用 Excel 2003 软件制作表格,表中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 隧道建设对土壤有机碳及其组分含量的影响

在隧道开建 1 a 后和 3 a 后,隧道影响区土壤有机碳含量分别为 76.84±4.06, 92.63±7.66 g/kg, 对照区土壤有机碳含量分别为 52.91±10.17, 94.81±9.27 g/kg, 隧道在开建 1 a 后和 3 a 后对土壤有机碳含量的影响均不显著(表 3, $p > 0.05$)。开建 1 a 后和 3 a 后,隧道影响区易氧化有机碳含量分别为 25.90±5.60, 28.65±7.58 g/kg, 可溶性有机碳含量分别为 3.15±0.002, 3.41±0.45 g/kg, 对照区易氧化有机碳含量分别为 15.60±1.05, 23.11±3.25 g/kg, 可溶性有机碳含量分别为 5.18±0.03, 3.34±0.33 g/kg, 隧道在开建 1 a 后和 3 a 后对土壤易氧化有机碳含量和可溶性有机碳含量均没有显著影响($p > 0.05$)。

工程开建 1 a 后,隧道影响区多酚氧化酶活性为 35.20±3.51 $\mu\text{g}/\text{g}$, 显著低于对照区的多酚氧化酶活性 49.50±3.74 $\mu\text{g}/\text{g}$ ($p = 0.02$), 工程开建 3 a 后,多酚氧化酶活性在隧道影响区与对照区之间差异不显著($p > 0.05$)。

土壤有机碳多酚氧化酶活性在隧道影响区为 0.46±0.072, 0.37±0.054 $\mu\text{g}/\text{g}$, 在对照区为 0.78±0.264, 0.37±0.128 $\mu\text{g}/\text{g}$, 隧道建设对单位土壤有机碳多酚氧化酶活性没有显著影响($p > 0.05$)。

表 5 不同隧道建设年限对土壤单位土壤有机碳酶活性的影响

Table 5 Effects of different tunnel construction years on soil organic carbon enzyme activity per unit of soil

样地	β -葡萄糖苷酶/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)		多酚氧化酶/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		过氧化氢酶/($\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$)	
	1 a	3 a	1 a	3 a	1 a	3 a
影响区	0.02±0.007 ^a	0.01±0.002 ^a	0.46±0.072 ^a	0.37±0.054 ^a	0.03±0.002 ^a	0.03±0.005 ^a
非影响区	0.02±0.008 ^a	0.01±0.003 ^a	0.78±0.264 ^a	0.37±0.128 ^a	0.04±0.013 ^a	0.02±0.003 ^a

2.3 土壤性质与土壤酶活性及单位有机碳酶活的相关性

相关性分析表明,土壤有机碳与土壤总氮、速效磷、速效钾呈显著正相关关系,易氧化有机碳与总氮、速效磷呈显著正相关关系,可溶性有机碳与总钾呈显著负相关关系,与速效磷呈正相关关系,土壤多酚氧化酶活性与总钾、pH 值呈显著负相关关系。具体相关系数详见表 6。

表 6 土壤性质与土壤有机碳组分、土壤酶活性的相关性
Table 6 Correlation between soil properties, soil organic carbon components and soil enzyme activities

项目	TN	TP	TK	AP	AK	pH
SOC	0.93*	0.61	-0.19	0.81*	0.83*	-0.03
EOC	0.88*	0.46	-0.54	0.99***	0.56	-0.35
DOC	0.74	0.02	-0.86*	0.93**	0.32	-0.77
PPO	0.30	-0.25	-0.86*	0.69	-0.19	-0.81*
CAT	0.40	0.25	-0.22	0.62	0.19	-0.21
BG	0.52	0.67	-0.09	0.69	0.29	0.13

注:表中数据为相关系数;*表示显著性水平;* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; TN 为总氮; TP 为总磷; TK 为总钾; AP 为速效磷; AK 为速效钾; SOC 为土壤有机碳; EOC 为易氧化有机碳; DOC 为可溶性有机碳; PPO 为多酚氧化酶; CAT 为过氧化氢酶; BG 为 β -葡萄糖苷酶。下同。

3 讨论

3.1 隧道建设对土壤有机碳及其组分含量的影响

隧道开建后 1~3 a 间,对土壤有机碳含量、易氧化有机碳含量与可溶性有机碳含量均无显著影响,这与彭学义^[3]的研究结果存在差异。植被凋落物的输入和有机碳的分解通常是土壤有机碳的重要影响因素^[27],植被凋落物的输入受植被类型、温度降水等的调控,土壤有机碳的分解则受微生物活动的影响。隧道工程建设对土壤有机碳的影响主要与隧道疏排水导致的地下水位波动及地表水下降,植被生长受限等因素所引起土壤有机碳输入减少有关^[28-29]。本研究中隧道影响区与对照区内植被类型、植被密度与生物量无显著差异(表 2),而研究区内降水充沛(图 1),为植被生长提供了充足的水分^[30],当地植被生长主要依靠地表水,而非地下水,隧道建设对地表植被没有显著影响。因此,在隧道建设期间土壤有机碳的主要

输入无显著变化。此外,微生物活性也会影响土壤有机碳含量^[31]。土壤理化性质与养分含量将会调控植物根际微生物及相关酶活性,土壤酶活性是反映土壤微生物活性的重要指标,但隧道建设对影响区内土壤酶活性无显著影响,进而对土壤有机碳的分解未产生显著影响^[32]。本研究结果表明土壤有机碳与土壤总氮、速效磷、速效钾呈显著正相关,隧道建设导致土壤速效钾含量升高,但总氮、速效磷没有显著变化,因此,土壤有机碳含量未产生显著变化。另一方面,也可能是研究区内隧道施工时间较短,短期内并未对土壤有机碳及其组分造成显著影响。

3.2 隧道建设对土壤酶活性的影响

开建 1 a 后和 3 a 后 β -葡萄糖苷酶活性和过氧化氢酶活性在隧道影响区与非影响区均没有显著性差异,这与前人^[33]的研究结果存在差异。隧道建设会降低土壤含水率与土壤养分含量,使微生物群落结构与多样性发生改变,直接影响土壤微生物活性和代谢过程,这是限制土壤酶活性的主要因素。同时土壤水分也间接影响地表植被生长与土壤质量,植被凋落物的输入和分解差异将影响土壤酶活性^[34-35]。本研究中土壤总磷、总钾、速效钾含量均有显著增加,但受高寒气候影响,植被与土壤微生物生存环境与活动未受显著影响,这可能是土壤酶活性未发生变化的原因之一。开建 1 a 后隧道影响区多酚氧化酶活性显著降低,在开建 3 a 后隧道影响区与对照区的多酚氧化酶活性没有显著差异。相关性分析表明,多酚氧化酶活性与土壤 pH 值呈显著负相关。郝建朝等^[36]的研究发现,土壤 pH 值在 4~7 之间时,多酚氧化酶活性与 pH 值呈显著负相关,与本研究结果一致。因此,隧道在开建 1 a 后,土壤中的盐分向上迁移到表层^[3],导致土壤 pH 值升高,进而显著降低了土壤多酚氧化酶活性;而在开建 3 a 后,土壤 pH 值无显著变化,多酚氧化酶活性也无显著变化。开建 1 a 后和 3 a 后,3 种单位有机碳酶活性在隧道影响区和对照区均无显著差异,这与 Raiesi 等^[20]的研究不同。土壤单位有机碳酶活性的变化取决于土壤酶活和有机碳含量的变化,人类活动引起土壤有机碳含量减少,土壤酶变得不稳定,但土壤酶在有机碳分解中仍保持着活性,因此单位有机碳酶活性有显著提高。也有可能是在人

类活动中,有机碳的变化速率大于酶活性的变化速率,同样会表现出单位有机碳酶活性有显著差异^[19]。但在本研究中,隧道在开建1 a后和3 a后均未对土壤有机碳含量产生显著影响,对 β -葡萄糖苷酶活性、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性总体上也未产生显著影响,因此,3种单位有机碳酶活性在隧道影响区和对照区均未出现显著差异。

4 结论

依托青藏高原生态敏感区在建隧道工程,设置研究样地,分别在隧道开建1 a后和3 a后研究隧道建设对土壤有机碳含量和酶活性的短期影响。隧道建设对土壤有机碳含量、易氧化有机碳含量、可溶性有机碳含量、土壤酶活性未产生显著影响。表明高海拔地区隧道建设短期内不会对土壤有机碳及其组分和土壤酶活性产生显著影响,研究结果可为工程建设对青藏高原地区生态环境保护提供重要的理论依据,对生态环境的长期影响还有待进一步探究。

参考文献(References)

- [1] 曾晓燕.岩溶隧道涌水对生态环境的影响[D].四川成都:西南交通大学,2006.
Zeng Xiaoyan. Impact of karst tunnel water inflow on ecological environment [D]. Chengdu, Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 陈畅,贾亚男,贺秋芳,等.典型岩溶槽谷区氨氧化微生物丰度对隧道建设的响应:以中梁山为例[J].微生物学报,2022,62(1):119-130.
Chen Chang, Jia Yanan, He Qiufang, et al. Responses of the ammonia-oxidizing microorganisms' abundance to tunnel evacuation in Karst trough valley: A case study in Zhongliang Mountain, Chongqing, China [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022,62(1):119-130.
- [3] 彭学义.重庆市中梁山岩溶槽谷区隧道建设对土壤质量的影响[D].重庆:西南大学,2019.
Peng Xueyi. The impact of tunnel construction on soil quality in the karst trough valley area of Zhongliangshan, Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [4] 刘九缠.隧道建设对岩溶槽谷区植物水分利用策略的影响[D].重庆:西南大学,2019.
Liu Jiulao. The impact of tunnel construction on plant water use strategies in karst trough valley areas [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [5] Zhu Lianqi, Zhu Xiaoli, Li Xiuxia. Progress in soil organic carbon research [J]. Journal of Henan University Natural Science, 2006,36(3):72-75.
- [6] 曹彦,游巍斌,王方怡,等.森林生态系统粗死木质残体碳

- 储量研究进展[J].生态学报,2021,41(20):7913-7927.
Cao Yan, You Weibin, Wang Fangyi, et al. Research progress on carbon storage of coarse woody debris in forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(20):7913-7927.
- [7] 王海燕,雷相东,张会儒,等.近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J].北京林业大学学报,2009,31(3):11-16.
Wang Haiyan, Lei Xiangdong, Zhang Huiru, et al. Soil organic carbon in semi-natural mixed larch-spruce-fir stands of Northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009,31(3):11-16.
- [8] Haynes R J. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview [M]. Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2005:221-268.
- [9] 白义鑫,盛茂银,胡琪娟,等.西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响[J].应用生态学报,2020,31(5):1607-1616.
Bai Yixin, Sheng Maoyin, Hu Qijuan, et al. Effects of land use change on soil organic carbon and its components in karst rocky desertification of Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(5):1607-1616.
- [10] 吴超,蒋勇军,沈立成,等.喀斯特槽谷典型植物水分利用效率对隧道建设的响应[J].生态学报,2020,40(12):4032-4040.
Wu Chao, Jiang Yongjun, Shen Licheng, et al. Response of water use efficiency of typical plants to tunnel construction in karst trough valley [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(12):4032-4040.
- [11] 赵晗,王海燕,胡兴国,等.基于结构方程的云冷杉阔叶混交林土壤有机碳影响因子[J].生态学杂志,2024,43(1):264-272.
Zhao Han, Wang Haiyan, Hu Xingguo, et al. Influencing factors of soil organic carbon in mixed spruce-fir-broadleaved forest based on structural equation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(1):264-272.
- [12] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
Guan Songyin. Soil Enzymes and Their Research Methods [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [13] 万忠梅,宋长春.土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J].土壤通报,2009,40(4):951-956.
Wan Zhongmei, Song Changchun. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009,40(4):951-956.
- [14] 任晓华.山西省高速公路路域植被建植技术研究[J].低碳世界,2021,11(10):152-153.
Ren Xiaohua. Study on vegetation planting technology

- in expressway road area [J]. *Low Carbon World*, 2021, 11(10):152-153.
- [15] 侯敏, 胡艳平, 张静晓, 等. 高速公路建设沿线植被覆盖度时空演化特征研究[J]. *交通节能与环保*, 2024, 20(1):101-108.
- Hou Min, Hu Yanping, Zhang Jingxiao, et al. Study on temporal and spatial evolution characteristics of vegetation coverage along expressway construction [J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2024, 20(1):101-108.
- [16] Wang Bing, Liu Guo bin, Xue Sha, et al. Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(5):915-925.
- [17] Nannipieri P, Kandeler E, Ruggiero P. Enzyme Activities and Microbiological and Biochemical Processes in Soil [M]. *Enzymes in the Environment*. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [18] Wang Bing, Xue Sha, Liu Guobin, et al. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China [J]. *Catena*, 2012, 92:186-195.
- [19] Zhang Xinyu, Dong Wenyi, Dai Xiaoqin, et al. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536(1):59-67.
- [20] Raiesi F, Beheshti A. Soil specific enzyme activity shows more clearly soil responses to paddy rice cultivation than absolute enzyme activity in primary forests of Northwest Iran [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 75:63-70.
- [21] 亓玉昆. 守护好青藏高原的生灵草木、万水千山[N]. *人民日报*, 2023-05-25(18).
- Qi Yukun. Guarding the Life, Plants, and Mountains of the Qinghai Tibet Plateau [N]. *People's Daily*, 2023-05-25(18).
- [22] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化[J]. *科学通报*, 2015, 60(32):3048-3056.
- Zhang Xianzhou, Yang Yongping, Piao Shilong, et al. Ecological change on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32):3048-3056.
- [23] 朱志强. 色季拉山隧道工程岩体渗透特征及涌水预测研究[D]. 四川 成都: 成都理工大学, 2020.
- Zhu Zhiqiang. Study on rock mass permeability characteristics and water inflow prediction of Sejila Mountain Tunnel Project [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2020.
- [24] 中国林科院. LY/T1237-1999 森林土壤有机质的测定及碳氮化的计算[S]. 北京: 国家林业局, 2018.
- Chinese Academy of Forestry. LY/T1237-1999 Determination of Organic Matter in Forest Soil and Calculation of Carbon Nitrogen Ratio [S]. Beijing: State Forestry Administration, 2018.
- [25] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7):1459.
- [26] 丁咸庆, 柏菁, 项文化, 等. 不同浸提剂处理森林土壤溶解性有机碳含量比较[J]. *土壤*, 2020, 52(3):518-524.
- Ding Xianqing, Bai Jing, Xiang Wenhua, et al. Comparison of dissolved organic carbon contents in forest soils extracted by different agents [J]. *Soils*, 2020, 52(3):518-524.
- [27] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2):406-413.
- Su Zhuoxia, Su Bingqian, Shanguan Zhouping. Advances in effects of plant litter decomposition on the stability of soil organic carbon [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2):406-413.
- [28] 刘建, 刘丹. 岩溶隧道建设引起的地下水环境负效应研究: 以铜锣山隧道为例[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3):268-271.
- Liu Jian, Liu Dan. Study on groundwater negative effects resulted by tunnel construction in karst areas: A case study of Tongluoshan tunnel [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(3):268-271.
- [29] 康小兵, 胡卸文. 四川松潘某隧道建设对地下水动力环境影响预测模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1):113-117.
- Kang Xiaobing, Hu Xiewen. Numerical simulation of impacts of mountain tunnel construction on groundwater environment [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(1):113-117.
- [30] Zhao Pei, Tang Xiangyu, Zhao Peng, et al. Temporal partitioning of water between plants and hillslope flow in a subtropical climate [J]. *Catena*, 2018, 165:133-144.
- [31] 王冰, 张鹏杰, 张秋良. 不同林龄兴安落叶松林土壤总有机碳与理化性质的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(10):36-45.
- Wang Bing, Zhang Pengjie, Zhang Qiuliang. Relationship between soil total organic carbon and physico-chemical properties in *Larix gmelinii* forests at different ages [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(10):36-45.

- [13] 刘万铨.水土保持是黄土高原改善生态环境保证农业可持续发展的必由之路[J].中国水土保持,1999(4):3-6.
Liu Wanshuan. Soil and water conservation is the only way to improve ecological environment and ensure sustainable agricultural development in Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 1999(4):3-6.
- [14] 赵雅萍.黄土高原退耕还林(草)土壤碳汇评估及驱动因素分析[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Zhao Yaping. Evaluation of soil carbon sequestration and analysis of driving factors in the conversion of farmland to forests (grasslands) on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [15] Deng Lei, Liu Guobin, Shangguan Zhouping. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis [J]. Global change biology, 2014,20(11):3544-3556.
- [16] Sun Caili, Xue Sha, Chai Zongzheng, et al. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2016,8(2):221-231.
- [17] 邱宇洁,许明祥,师晨迪,等.陇东黄土丘陵区域改梯田土壤有机碳累积动态[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):87-98.
Qiu Yujie, Xu Mingxiang, Shi Chendi, et al. Dynamic accumulation of soil organic carbon of terrace changed from slope cropland in the hilly Loess Plateau of Eastern Gansu Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014,20(1):87-98.
- [18] Chen Die, Wei Wei, Daryanto S, et al. Does terracing enhance soil organic carbon sequestration?: A national-scale data analysis in China [J]. Science of the Total Environment, 2020,721:137751.
- [19] 张玥,郭学锋,韩剑桥,等.黄土高原近 40 年梯田建设的土壤固碳效益初步估算[J].水土保持学报,2024,38(4):190-197.
Zhang Yue, Guo Xuefeng, Han Jianqiao, et al. In the past nearly 40 years, the preliminary estimation of soil carbon sequestration benefits of terrace construction on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):190-197.
- [20] Zeng Yi, Fang Nufang, Shi Zhihua. Effects of human activities on soil organic carbon redistribution at an agricultural watershed scale on the Chinese Loess Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 303:107112.
- [21] 王震,刘颖,杨明义,等.坝地剖面泥沙有机碳分解特征及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(10)2635-2643.
Wang Zhen, Liu Ying, Yang Mingyi, et al. Characteristics and factors influencing organic carbon decomposition in sediment in check dams [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(10):2635-2643.
- [32] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J].生态学杂志,2004,23(6):77-83.
Li Zhian, Zou Bi, Ding Yongzhen, et al. Key factors of forest litter decomposition and research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004,23(6):77-83.
- [33] Wang Jianan, Jiang Yongjun, He Qiufang, et al. Response of soil microbial community in grassland to tunnel construction in the karst trough valley, Zhongliang Mountain, Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(16): 6136-6145.
- [34] 刘芳,汪航飞,蒲春燕,等.不同施肥对葡萄苗根际微生物量、土壤酶活性和生理的影响[J].四川农业大学学报,2023,41(2):318-324.
Liu Fang, Wang Hangfei, Pu Chunyan, et al. Effects of different fertilization on rhizosphere microbial biomass, soil enzyme activity and physiology of grape seedlings [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023,41(2):318-324.
- [35] 覃蒙尔,李臻,窦莉,等.喀斯特地区植物根系分泌物酶活性对根际土酶活性和养分的影响[J].广西植物,2024,44(3):465-476.
Qin Menger, Li Zhen, Dou Li, et al. Effects of plant root exudates enzyme activities on rhizosphere soil enzyme activities and nutrients in karst areas [J]. Guihaia, 2024,44(3):465-476.
- [36] 郝建朝,吴沿友,连宾,等.土壤多酚氧化酶性质研究及意义[J].土壤通报,2006,37(3):470-474.
Hao Jianchao, Wu Yanyou, Lian Bin, et al. Properties of polyphenol oxidase in soil and its significance [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006,37(3):470-474.

(上接第 286 页)