



雅鲁藏布江下游隧道工程对土壤有机碳稳定性的影响

赵润英 李凇 唐晓鹿 陈果 李景吉 曹龙熹 王国严 石松林 罗建 裴向军

Effects of the construction of the lower Yarlung Tsangpo River tunnel project on the stability of soil organic carbon

ZHAO Runying, LI Lin, TANG Xiaolu, CHEN Guo, LI Jingji, CAO Longxi, WANG Guoyan, SHI Songlin, LUO Jian, PEI Xiangjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0089>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

林草恢复对热水河小流域侵蚀区土壤团聚体稳定性与有机碳氮特征的影响

Effects of forest and grass restoration on soil aggregate stability, and organic carbon and nitrogen characteristics in an eroded area of the Reshui River

草业科学. 2021, 38(6): 1012 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0062>

黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素

Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland

草业科学. 2020, 37(5): 833 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0557>

新疆土壤有机碳与土壤理化性质的相关性

Soil organic carbon in relation to soil physicochemical properties in Xinjiang

草业科学. 2017, 11(4): 692 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0376>

黄土高原雨养区苜蓿种植年限对土壤固碳细菌丰度和活性有机碳组分的影响

Effects of alfalfa planting with different cultivating ages on abundance of soil carbon-sequestration bacteria and labile organic carbon fractions in rainfed Loess Plateau

草业科学. 2021, 38(6): 1024 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0037>

施用有机物料对沙化土壤碳氮含量、酶活性及紫花苜蓿生物量的影响

Effects of fertilizing organic materials on contents of carbon and nitrogen, enzyme activity of desertified soils and alfalfa biomass

草业科学. 2017, 11(3): 456 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0378>

不同土地利用方式下干旱区湿地土壤活性有机碳组分特征

Effect of land use type on the active organic carbon of wetland soil in an arid area

草业科学. 2019, 36(8): 1944 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0595>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0089

赵润英, 李凇, 唐晓鹿, 陈果, 李景吉, 曹龙熹, 王国严, 石松林, 罗建, 裴向军. 雅鲁藏布江下游隧道工程对土壤有机碳稳定性的影响. 草业科学, 2023, 40(1): 15-24.

ZHAO R Y, LI L, TANG X L, CHEN G, LI J J, CAO L X, WANG G Y, SHI S L, LUO J, PEI X J. Effects of the construction of the lower Yarlung Tsangpo River tunnel project on the stability of soil organic carbon. Pratacultural Science, 2023, 40(1): 15-24.

雅鲁藏布江下游隧道工程对土壤 有机碳稳定性的影响

赵润英, 李 凇, 唐晓鹿, 陈 果, 李景吉, 曹龙熹,
王国严, 石松林, 罗 建, 裴向军

(成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059)

摘要: 隧道在高原山岭等地区道路建设中被广泛采用, 但其对土壤有机碳稳定性的影响研究较少。土壤有机碳稳定性是评价土壤生态系统对外界环境变化响应的重要指标。为阐明土壤有机碳 (SOC) 对隧道工程建设的抗干扰能力, 本研究以雅鲁藏布江下游隧道建设为依托, 设置工程影响区 (ED) 和非影响区 (CK) 监测样地, 从土壤活性有机碳 (LOC)、团聚体和土壤酶活性等角度探究隧道建设对 SOC 稳定性的影响。结果表明, 工程影响区 SOC、LOC 含量分别为 291.40 和 110.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, CK 区域中分别为 255.31 和 91.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 两个区域差异不显著 ($P > 0.05$)。ED 和 CK 中, 土壤粒径 $> 0.25 \text{ mm}$ 的团聚体占比均超过 80%, 随着团聚体粒径减小, ED 的 SOC 含量呈现降低趋势, 但 ED 与 CK 差异不显著。本研究表明, 隧道建设未改变植被凋落物量, 对 SOC 的输入与输出未产生显著影响。ED 与 CK 区土壤酶、微生物生物量碳及土壤团聚体组成无显著差异, 表明隧道工程建设对 SOC 稳定性的微生物学调控机制及土壤团聚体物理保护机制无显著影响, 对 SOC 稳定性无显著影响。综上, 雅鲁藏布江下游隧道工程建设对土壤有机碳稳定性未产生显著影响, 本研究为隧道建设对环境的影响评价提供了参考依据, 也为雅鲁藏布江下游地区生态环境保护提供数据和理论依据。

关键词: 雅鲁藏布江下游; 隧道工程; 土壤有机碳; 有机碳稳定性; 活性有机碳; 土壤微生物生物量碳; 土壤酶; 土壤团聚体

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2023)01-0015-10

Effects of the construction of the lower Yarlung Tsangpo River tunnel project on the stability of soil organic carbon

ZHAO Runying, LI Lin, TANG Xiaolu, CHEN Guo, LI Jingji, CAO Longxi,

WANG Guoyan, SHI Songlin, LUO Jian, PEI Xiangjun

(College Ecological and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Tunnels have been widely constructed in plateau mountains. However, the effects of tunnel construction on soil organic carbon stability have not been extensively studied. Soil organic carbon stability is an important indicator to evaluate the response of soil ecosystems to environmental changes. To detect the resistance of soil organic carbon (SOC) to tunnel construction in the lower Yarlung Tsangpo River tunnel, we compared the response of SOC stability to tunnel construction in

收稿日期: 2022-02-16 接受日期: 2022-04-29

基金项目: 成都理工大学珠峰科学研究计划 (80000-2021ZF11410); 雅鲁藏布江下游水电站截弯引水发电工程区生态地质环境评价与生态修复技术研究 (80303-AHH110)

第一作者: 赵润英 (1994-), 女 (白族), 云南洱源人, 初级工程师, 在读硕士生, 研究方向为生态修复. E-mail: 1065858319@qq.com

通信作者: 裴向军 (1970-), 男 (蒙古族), 内蒙赤峰人, 教授, 博士, 研究方向为地质灾害、岩石力学、工程边坡稳定性评价及工程治理。
E-mail: peixj0119@tom.com

the engineering impact (ED) and undisturbed (CK) areas by combining labile organic carbon (LOC), soil agglomerates, and soil enzymes. The results showed no significant differences among CK 255.31 and 91.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and ED 291.40 and 110.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in terms of SOC and LOC contents ($P > 0.05$), respectively. The proportion of > 0.25 mm aggregates in all soil fractions was over 80%. With the decrease of aggregate size, the content of organic carbon in aggregate showed a decreasing trend, but no significant difference between the ED and CK areas was observed. This study showed that the tunnel construction did not change litterfall, indicating that tunnel construction did not affect the input and output of SOC. Moreover, there were no significant differences in soil enzymes, microbial biomass carbon, and soil agglomerate composition between ED and CK, indicating that the tunnel construction had no significant effect on the microbiological regulation mechanism of SOC stability and the physical protection mechanism of soil agglomerates. In conclusion, our study indicated that the tunnel construction in the lower Yarlung Tsangpo River did not have a significant effect on the stability of soil organic carbon. These findings can aid in evaluating the impact of tunnel construction on the environment and providing an important basis for ecological protection in the lower Yarlung Tsangpo River.

Keywords: lower reaches of Yarlung Zangbo River; tunnel engineering; soil organic carbon ; soil organic carbon stability; reactive organic carbon; soil microbial biomass carbon; soil enzyme activities; soil aggregate

Corresponding author: PEI XiangJun E-mail: peixj0119@tom.com

隧道工程是道路建设中的控制性工程,具有克服地形高差大、优化线型和缩短距离等优势^[1],在山岭等艰险地区的道路建设中被广泛采用。隧道建设促进经济发展的同时,也可能会打破原有生态平衡,引起地面塌陷、土壤质量下降、植被退化等,降低区域环境承载力^[2]。因此,阐明隧道工程建设对生态环境的影响及其机制,为实现“工程—生态—环境”协调发展提供了重要支撑。近年来,隧道建设规模逐年增加,对生态环境的影响引起了众多学者的关注,但研究多集中水文地质以及隧道疏排水诱发地质灾害、植被利用水等方面^[3-5],而鲜有雅鲁藏布江下游(简称雅江下游)地区工程建设对生态环境影响的研究^[6],尤其是针对工程建设对土壤有机碳稳定性的影响研究。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)稳定性对SOC的积累和分解^[7]、土壤生态系统的功能都有重要影响^[8]。SOC对外界环境变化反应相对较慢,活性有机碳(labile organic carbon, LOC)是碳循环的动力^[9]。由于其性质不稳定,对外界变化反映速度快,因此,被认为是SOC变化的敏感指标^[10],也是评价SOC稳定性的重要指标^[11]。众多研究用易氧化有机碳(easily oxidizable carbon, EOC)、微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)表征LOC^[12-14]。土壤酶主要源于土壤微生物以及活体动植物分泌物,酶活性对微生物活性具有重要指示意义^[15]。其中碳转化酶与SOC的转化存在密切关系^[16],

碳转化酶的变化对准确评估碳组分的变化具有重要指示作用。

雅江下游位于青藏高原藏东南地区,青藏高原是全球生态安全屏障,有“江河源”“生态源”之称^[17],其生态脆弱,一旦受到外界影响,极难恢复^[6]。然而,雅江下游水资源丰富,在“十三五”“十四五”规划的实施下,青藏高原亦是我国重大工程的密集区,如川藏铁路建设、水电开发的重点^[18],其生态环境可能受到影响^[19]。因此,本研究以雅江下游隧道工程建设为依托,以隧道建设影响区为对象,以非影响区为对照,从土壤活性有机碳组分、团聚体、土壤酶活性角度,阐明隧道工程建设对土壤有机碳稳定性和生态环境的影响,将为隧道建设对环境的影响评价提供参考依据,也为雅江下游生态环境保护提供了理论与数据支撑,对实现人与自然和谐共处具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于西藏自治区东南部,雅鲁藏布江下游墨脱县境内(29°35' N, 95°17' E),属于东喜马拉雅构造结东缘,造山带挤压造山作用强烈,地形主要为1 000~3 500 m的中山^[20]。研究区属亚热带湿润气候,年均温为16℃,无霜期340 d以上,日照时数达2 000 h。年降水量2 000~3 000 mm^[21]。

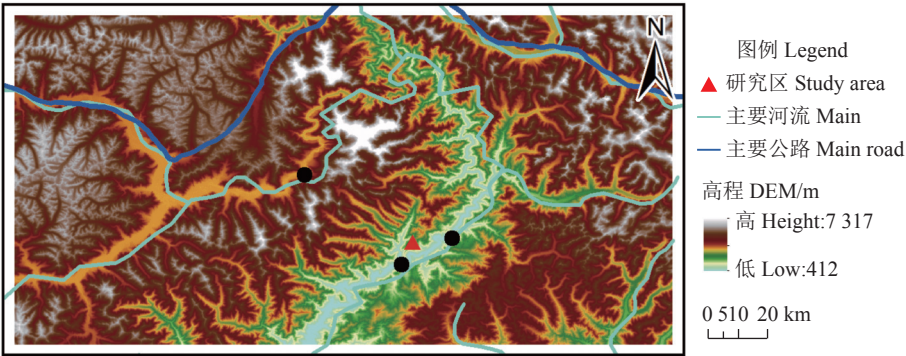


图 1 研究区域概况图

Figure 1 Overview map of the study area

研究区域内岩层普遍发生强变质，基性和超基性岩构造侵位，大块、超大块岩石遍布，物理风化作用不强^[22]。研究区水热条件好，因而土壤具有明显的腐殖质积累过程，淋溶作用强烈^[23]，土层较薄。样地内主要植被包括大叶桂 (*Cinnamomum iners*)、稠李 (*Padus avium*)、棒果森林榕 (*Ficus neriifolia*)、润楠 (*Machilus nees*)、中平树 (*Macaranga denticulata*)、桉木 (*Eurya japonica*)、槲木 (*Aralia elata*) 等 (表 1)。

表 1 影响区和非影响区中植被基本情况

Table 1 Basic situation of vegetation in disturbed and undisturbed areas

处理 Treatment	平均海拔 Average elevation/m	pH	植被密度 Vegetation density/(plant·m ⁻²)	平均胸径 Mean DBH/cm	凋落物量 Litter biomass/(g·m ⁻²)
ED	1 693 ± 32a	5.4 ± 0.9a	0.29 ± 0.08a	22.03 ± 13.74a	440.53 ± 40.31a
CK	1 746 ± 12a	5.1 ± 0.3a	0.28 ± 0.02a	19.75 ± 12.12a	322.76 ± 178.51a

ED为影响区，CK为非影响区；不同小写字母表示影响区与非影响区的指标差异显著($P < 0.05$)；下同。

ED and CK are disturbed and undisturbed regions, respectively. Different lower case letters within the same column indicate significant differences between the indexes in the disturbed and undisturbed areas at the 0.05 level; this is applicable for the following figures and tables as well.

1.2 试验设计

2021 年 4 月，由于研究区地形限制，共设置 4 个圆形固定样地，两组重复。由于隧道顶部无植被分布，因此，在隧道两侧，距离隧道口约 50 m 处，设置两个半径为 12 m 的样圆，作为隧道影响区样地 (ED) (图 2)。Jin 等^[24]研究表明，隧道施工的影响半径 520~643 m。本研究在隧道两侧，距离隧道口约 1 000 m 处，在坡向、坡度、植被条件等相似的区域内设置 2 个半径为 12 m 的圆形固定样地为对照 (CK)。

试验中土壤样品用三点混合法采集 (0—10 cm)。在每个样圆 0°、120°和 240° 3 个方向，距离圆心 6 m 处分别设置 3 个 1 m × 1 m 的小样方进行取样 (图 2)。3 个小样方取样完成后均匀混合，并将样品分为两份，一份鲜土样品置于提前准备好的无菌密封袋中，放入 4 °C 以下的车载冰箱快速带回实验室，用于测定 MBC、DOC 和土壤酶活性；另一份土壤样品用布袋保存，自然风干后一部分过 2 mm 筛，用于测

定土壤理化性质，原状土测定土壤团聚体特征及其 SOC 含量。

1.3 测定指标与方法

SOC 测定用浓硫酸-重铬酸钾外加热法；EOC 测定用 K₂MnO₄ 氧化-比色法；MBC 采用氯仿熏蒸-0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 提取-TOC 总有机碳分析仪测定；

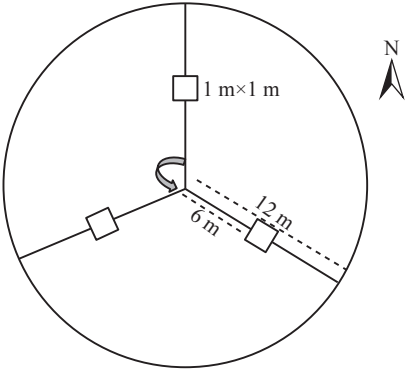


图 2 实验样点分布示意图

Figure 2 Distribution of experimental sample sites

采用比色法测定 DOC^[25]。本试验中用 EOC、DOC、MBC 表征 LOC^[26], 及用三者之和表征 LOC 的含量。参考关松荫^[15], 采用邻苯三酚比色法测定多酚氧化酶; 采用容量法测定过氧化氢酶; 蔗糖酶活性采用靛酚蓝比色法测定; β -葡萄糖苷酶测定采用硝基酚比色法。pH 采用土样与水按 1:2.5 的比例混合后, 利用 pH 计测定^[27]。

土壤团聚体分级采用沙维诺夫干筛法^[28]: 将采集的原状土样置于 4℃ 下风干, 至土壤含水量约为 20%; 称取 200 g 过筛, 自上而下放置 2、0.25、0.053 mm 孔径的土壤筛, 干筛 5 min 后, 得到大团聚体 (>2 mm)、中团聚体 (0.25~2 mm)、微团聚体 (0.053~0.25 mm)、粉+黏团聚体 (<0.053 mm) 粒级, 分别装袋称重。

1.4 数据分析

采用 R 语言对所测数据统计分析, 试验中两组 ED、两组 CK 实验数据, 平均处理后得到一组 ED、一组 CK 数据。单因素方差 (One-Way ANOVA) 分析用于对比隧道影响区与非影响区土壤有机碳组分、团聚体及酶活性的差异是否显著。

2 结果与分析

2.1 隧道工程建设对土壤有机碳及活性有机碳组分的影响

在 ED 和 CK 中 SOC 含量分别为 291.40 和 255.31 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但差异不显著 ($P > 0.05$) (图 3)。ED 中 EOC 为 108.48 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, DOC 为 0.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 含量略高于 CK

区域的 88.26 和 0.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 差异均不显著; MBC 含量在 ED 区域中低于 CK 1.15 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别为 1.58 和 2.73 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 差异不显著; 在 ED 和 CK 区域中, EOC、MBC、DOC 表征的活性有机碳 (LOC) 在 SOC 中的占比分别为 37.85% 和 35.72%。

2.2 隧道工程建设对土壤团聚体及其有机碳含量的影响

在大团聚体 (>2 mm) 中, ED 和 CK 占比分别为 45.58% 和 31.89%, ED 中大团聚体略高于 CK 区域, 但差异不显著 ($P > 0.05$) (图 4); 中团聚体 (0.25~2 mm) 在 ED 中略低于 CK 区域, ED 和 CK 中团聚体含量分别为 45.37% 和 56.03%, 差异不显著; 微团聚体 (0.053~0.25 mm) 在 ED 中为 5.84%, CK 中为 8.11%, 差异均不显著; ED 和 CK 中粉+黏团聚体 (<0.053 mm) 的含量分别为 2.21% 和 2.6%, 差异均不显著。

大团聚体中 90% 为石粒, 测得不同粒径中 SOC 含量 (图 5)。在中团聚体粒径 (0.25~2 mm) 中, ED 和 CK 的 SOC 量分别为 24.09 和 22.75 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 差异不显著 ($P > 0.05$)。微团聚体粒径 (0.053~0.25 mm) 中, ED 和 CK 的 SOC 含量分别为 19.36 和 22.66 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 无显著差异。粉+黏团聚体组分 (<0.053 mm) 中, ED 和 CK 的 SOC 含量分别为 10.64 和 15.81 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, ED 区域中 SOC 含量有所下降, 但无显著差异。

2.3 隧道工程建设对土壤酶活性的影响

ED 和 CK 的蔗糖酶活性分别为 42.6 和 31.42

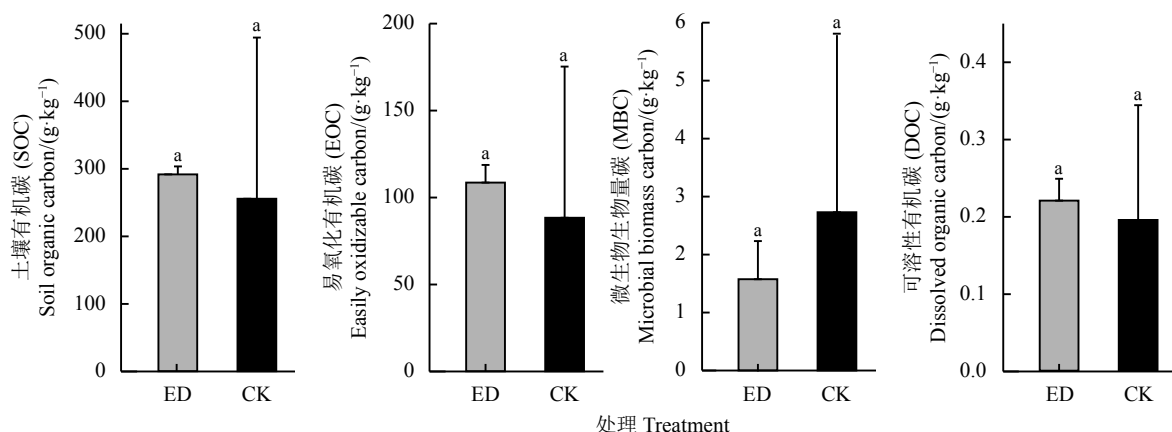


图 3 不同区域中土壤有机碳及活性有机碳组分含量

Figure 3 Soil organic carbon and labile organic carbon components in different regions

相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 下图同。

Same lowercase letters indicate no significant difference between treatments at the 0.05 level; Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the 0.05 levels; this is applicable for the following figures as well.

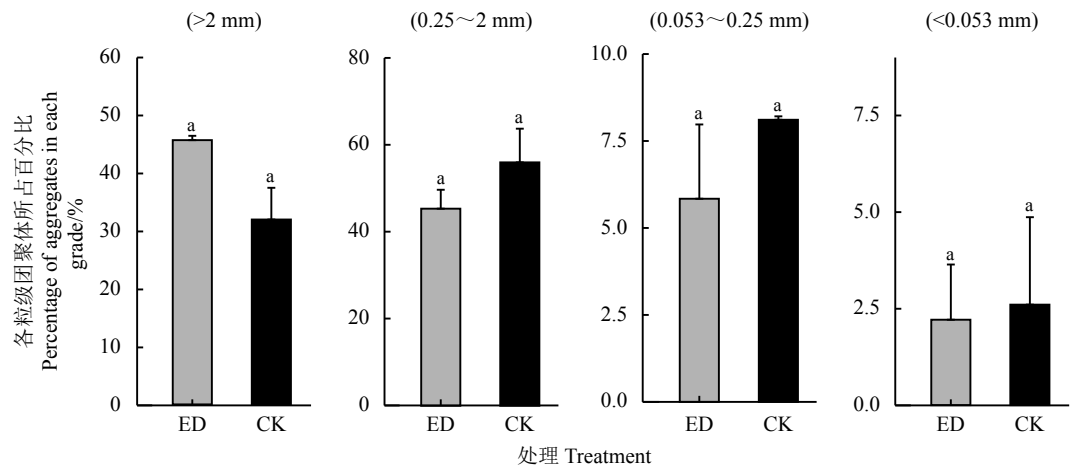


图 4 不同区域中各粒级团聚体所占百分比
Figure 4 Percentage of aggregates in different regions

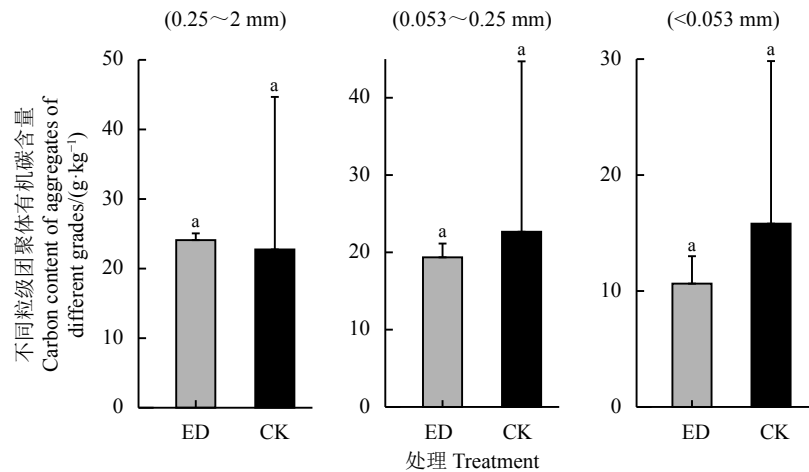


图 5 不同区域中土壤团聚体粒级中有机碳含量
Figure 5 Organic carbon content in soil aggregate components in different grades

mg·g⁻¹, ED 中蔗糖酶活性比 CK 区域高 11.18 mg·g⁻¹ (图 6), 具有显著差异 ($P < 0.05$); ED 和 CK 的过氧化氢酶活性分别为 2.44 和 2.45 mL·g⁻¹, 无显著差异 ($P > 0.05$); ED 和 CK 的多酚氧化酶活性分别为 220.49 和 157 μg·g⁻¹, ED 区域比 CK 中增加 63.49 μg·g⁻¹, 无显著差异; ED 和 CK 中 β-葡萄糖苷酶活性分别为 1.14 和 1.89 mg·g⁻¹, ED 中比 CK 区域下降 0.75 mg·g⁻¹, 无显著差异。

3 讨论

3.1 隧道工程建设对土壤有机碳的影响

本研究中隧道工程建设对 SOC 无显著影响, 这与彭学义^[2]的研究发现隧道建设降低了 SOC 含量的结果不同, 可能是两个研究区的隧道工程区地质

条件、降水、植被类型、土地利用类型等不同导致研究结果不一致。植被生产量(数量、质量)的输入和分解速率通常对 SOC 的积累存在重要影响, 植被生产量的输入受植被类型、群落生物量、温度、降水等因子调控^[29], 降解受微生物生命活动的影响^[30]。本研究中 SOC 含量无显著差异, 可能是由于 ED、CK 中林分密度和凋落物量相似(表 1), 保证了 SOC 的主要输入来源。隧道建设未降低土壤酶活性, 表明微生物活性未受到抑制, 对 SOC 的分解未产生显著影响, 原因可能是隧道建设对植物生长无显著影响, 而植物根际多样性对微生物、相关酶活性以及土壤养分的调控作用未被改变^[31]。研究结果显示, 蔗糖酶活性在 ED 中显著高于 CK 区域, 其原因可能是 ED 区域中 SOC 含量更高有关, 有研究表明在 SOC 多的处理中, 蔗糖酶活性高于 SOC 少的处

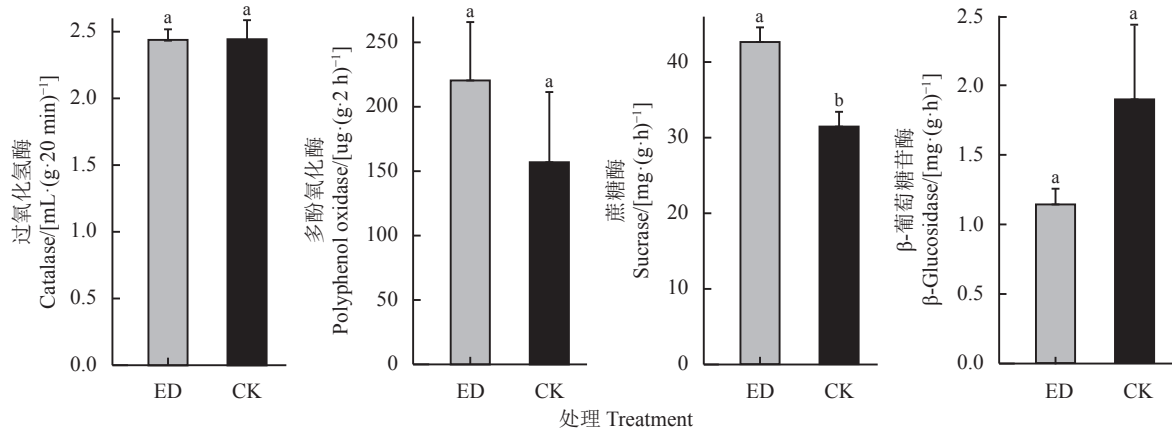


图 6 不同区域中土壤酶活性分布

Figure 6 Distribution of soil enzyme activity in different regions

理^[32]；也可能是隧道工程建设造成的“环境胁迫”效应，微生物底物对碳源的代谢酶系表达，被选择性的激发^[33]。

3.2 隧道工程建设对土壤活性有机碳的影响

活性有机碳 (LOC) 性质活跃，易被微生物利用，易被外界环境影响^[34]，在 SOC 中的占比可在一定程度上表征 SOC 稳定程度，EOC 是微生物以及土壤酶分解后能被微生物快速利用的有机化合物，表征 SOC 的稳定性^[26]。MBC 性质活跃，可反映微生物活性，是存在于微生物体内的有机碳组分^[35]。DOC 的形成主要是在微生物分解过程以及腐殖质的淋溶作用中^[36]。研究区中 EOC、DOC、MBC 含量在 ED 和 CK 中差异均不显著，主要是由于研究区气温高降水量大，有利于植被和微生物生长代谢，因而微生物对 LOC 组分的分解利用以及植被生长未被影响。土壤酶活性与碳循环紧密相关，有研究表明 β-葡萄糖苷酶能够将纤维素转化为 LOC^[37]，李增强等^[38]研究得出提升 β-葡萄糖苷酶和酚氧化酶活性能增加 DOC、MBC 的含量，β-葡萄糖苷酶和酚氧化酶是 LOC 形成的关键^[39]。研究区中隧道建设未对 β-葡萄糖苷酶、多酚氧化酶活性产生显著影响，这也可能是 LOC 组分无显著变化的原因之一。在不同区域中，EOC、LOC 组分在 SOC 中的占比无显著变化，表明隧道建设对 SOC 的稳定性无显著影响。

3.3 隧道工程建设对土壤有机碳稳定性的影响机制

SOC 稳定机制中包括团聚体形成与氧化物、微

生物以及土壤酶的“隔离”^[29]，从而降低 SOC 的矿化速率，被认为是土壤碳固定和稳定的主要机制^[40]。ED、CK 中团聚体组成及其 SOC 含量差异不显著，表明隧道建设未破坏土壤结构及其对 SOC 的保护作用。主要原因可能是团聚体的稳定性和组成分布受成土母质的影响^[41]，研究区大块岩石遍布，物理风化作用不强^[22]，土壤结构不易被外力破坏。也可能是由于研究区植被丰富，植被凋落物的覆盖有效缓解了雨水侵蚀对大团聚体的破坏^[42]。团聚体的形成依赖于有机质的胶结作用^[43]，研究区中 SOC 含量无显著变化，也是团聚体组成无显著变化的原因。微生物分解对 SOC 的稳定性具有重要影响^[26]，研究区中微生物活性无显著变化，故对 SOC 的分解活动无显著变化。SOC 含量、组分、稳定的主要机制以及微生物活性均无显著变化，因此，隧道建设对 SOC 的稳定性无显著影响。

隧道工程建设对生态环境的影响主要是由隧道疏排水导致水资源分配不均限制植被生长和土壤物质循环等引起的^[44]。当地下水补给能满足生态系统的需求时，隧道疏排水可能不会对生态环境产生显著影响，这也可能是本研究与前人研究结果不一致的主要原因之一。研究区墨脱县年降水量超过 2 093 mm^[45]，且中雨可达 268 d^[46]，土壤含水率和田间持水率较高，可为植被生长提高充足的水分。因此，隧道工程的地下水疏排可能对植被生长不会产生显著影响，不会影响土壤碳输入与输出，从而对 SOC 稳定性的影响不显著。另一方面，也可能是隧道工程施工时间较短，目前未对 SOC 稳定性产生显

著的影响。

隧道工程建设对生态环境影响的研究与传统的生态学研究样地设置略有不同,由于隧道工程影响区有一定的范围而限制了样地的布设位置。本研究规划在隧道顶部和两侧共设置3个固定监测样地,但由于隧道顶部无植被分布,因此,仅在隧道两侧设置监测样地。因样地重复偏少,可能会对数据结果带来一定的不确定性。本研究是一重要的探索性工作,可为将来类似研究提供样地设置方面的参考。同时,建议更新或改进研究样地布设方法,以满足“工程建设”对生态环境影响研究的需要。

4 结论

本研究以雅鲁藏布江下游隧道工程建设为依托,通过设置固定监测样地,研究隧道工程建设对SOC稳定性的影响。研究表明,隧道工程建设对SOC含量、组分及稳定性、土壤团聚体及酶活性未产生显著影响,且隧道建设对土壤酶活性、MBC以及土壤团聚体组成也无显著影响,综上,表明雅鲁藏布江下游隧道建设对土壤有机碳稳定性未产生显著影响,研究结果可为隧道建设对环境的影响评价提供参考依据,也为雅鲁藏布江下游地区生态环境保护提供数据和理论依据。

参考文献 References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述. [中国公路学报](#), 2015, 28(5): 1-65.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research. [China Journal of Highway and Transport](#), 2015, 28(5): 1-65.
- [2] 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. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2019.
PENG X Y. Influence of tunnel construction on soil quality in karst valley of Zhongliang mountain Chongqing. Master Thesis. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [3] 徐华轩. 野三关隧道施工地质特征及突水灾害防治研究. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2010.
XU H X. The research on geological characteristics and water inrush prevention in construction of Yesanguan Tunnel. Master Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [4] 李强. 重庆中梁山地区近邻隧道建设地下水环境效应研究. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2017.
LI Q. Study on the groundwater environmental effects caused by construction of neighboring tunnels in Zhongliang mountain area of Chongqing. Master Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [5] 刘红位. 慈母山隧道建设对地下水及植被的影响. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2013.
LIU H W. The impact on groundwater and vegetation of Cimushan tunnel construction. Master Thesis. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [6] 但山林. 高海拔环境敏感区域隧道建设环境影响评价方法及应用研究. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2019.
DAN S L. Study on environmental impact assessment method and application of tunnel construction in high altitude environmental sensitive area. Master Thesis. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [7] 吴晓丽, 李林, 史喜林, 刘淑霞, 高强, 姜玉杰. 土壤有机碳稳定机制及影响因素研究进展. [吉林农业科学](#), 2014, 39(3): 42-45, 78.
WU X L, LI L, SHI X L, LIU S X, GAO Q, LOU Y J. Progress of studies on influencing factors and stabilization mechanism of soil organic carbon. [Journal of Jilin Agricultural Sciences](#), 2014, 39(3): 42-45, 78.
- [8] 陈文博. 长期菌渣还田对土壤有机碳稳定性、酶活性和微生物多样性的影响. 杭州: 浙江农林大学硕士学位论文, 2020.
CHEN W B. Effect of the combined application of fungal residues and chemical fertilizers on the soil organic carbon stability, the enzyme activity and microbial diversity yield in paddy fields. Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2020.
- [9] 巩杰, 王合领, 钱大文, 孙朋, 谢余初, 高彦净, 赵彩霞. 高寒牧区不同土地覆被对土壤有机碳的影响. [草业科学](#), 2014, 31(12): 2198-2204.
GONG J, WANG H L, QIAN D W, SUN P, XIE Y C, GAO Y J, ZHAO C X. Effects of land cover types on soil organic carbon stock in alpine meadow. [Pratacultural Science](#), 2014, 31(12): 2198-2204.

- [10] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展. *农业环境科学学报*, 2021, 40(2): 252-259.
ZHANG F F, YUE S C, LI S Q. Chemical methods to determine soil organic carbon fractions and carbon indexes: A review. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 252-259.
- [11] 贺美, 王迎春, 王立刚, 李成全, 王利民, 李玉红, 刘平奇. 深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响. *土壤学报*, 2020, 57(2): 446-456.
HE M, WANG Y C, WANG L G, LI C Q, WANG L M, LI Y H, LIU P Q. Effects of subsoiling combined with fertilization on the fractions of soil active organic carbon and soil active nitrogen, and enzyme activities in black soil in northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 446-456.
- [12] 荆佳强, 萨仁其力莫格, 秦洁, 张海芳, 李明, 杨殿林. 不同利用方式对贝加尔针茅草原土壤活性有机碳的影响. *草业学报*, 2022, 31(1): 47-56.
JING J Q, Sarenqilimoge, QIN J, ZHANG H F, LI M, YANG D L. Effects of different land-use patterns on soil active organic carbon in *Stipa baicalensis* steppe in Inner Mongolia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 47-56.
- [13] 任瑾涛, 张璞进, 吴英, 朱蔚娜, 金正亮, 张艳丽, 宝文智, 清华. 不同放牧退化阶段大针茅草原土壤有机碳稳定性及其来源研究. *中国草地学报*, 2021, 43(7): 37-44.
REN J T, ZHANG P J, WU Y, ZHU Y N, JIN Z L, ZAHNG Y L, BAO W Z, QING H. Study on stability and source of soil organic carbon in *Stipa grandis* steppe at different grazing degradation stages. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(7): 37-44.
- [14] 张宇辰, 彭道黎. 间伐对塞罕坝华北落叶松人工林土壤活性有机碳的影响. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(4): 961-968.
ZHANG Y C, PENG D L. Effects of thinning on the soil active organic carbon of *Larix principisrupprechtii* plantations in Saihanba. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(4): 961-968.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
GUAN Y S. Soil Enzymes and Their Research Methods. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [16] CHEN X L, CHEN Y H, CHEN X, WANG J, CHENG B J, WANG D, GUAN Q W. Soil labile organic carbon and carbon-cycle enzyme activities under different thinning intensities in Chinese fir plantations. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 162-169.
- [17] 朱立平, 彭萍, 张国庆, 乔宝晋, 刘翀, 杨瑞敏, 王君波. 全球变化下青藏高原湖泊在地表水循环中的作用. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 597-608.
ZHU L P, PENG P, ZHANG G Q, QIAO B J, LIU C, YANG R M, WANG J B. The role of Tibetan Plateau lakes in surface water cycle under global changes. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(3): 597-608.
- [18] 杨永江, 张晨笛. 中国水电发展热点综述. *水电与新能源*, 2021, 35(9): 1-7.
YANG Y J, ZHANG C D. Key aspects of the future hydropower development in China. *Hydropower and New Energy*, 2021, 35(9): 1-7.
- [19] 郭凌冬, 付广裕, 余雅文, 王振宇, 杨君妍. 雅鲁藏布江桑日-墨脱段岩石圈均衡研究以及虚拟水库诱发地震危险性分析. *地球物理学报*, 2021, 64(9): 3220-3231.
GUO L D, FU G Y, SHE Y W, WANG Z Y, YANG J Y. Lithosphericisostasy and risk of reservoir-induced earthquakes along the Yarlung Zangbo River between Sangri and Mêdog. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3220-3231.
- [20] 辛聪聪. 基于DEM雅鲁藏布江东构造结河谷地貌及其地质环境效应研究. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2019.
XIN C C. Geomorphology and geological environment effect analysis of the eastern structural junction valley of Yarlung Zangbo River based on DEM. Master Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [21] 杨爽. 墨脱县农田土壤养分现状与分布特征. *中国农学通报*, 2021, 37(22): 84-89.
YANG S. Current situation and distribution characteristics of soil nutrients in cultivated land of Motuo County. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(22): 84-89.
- [22] 谢超. 南迦巴瓦地区构造地貌及断裂活动特征. *国家地震动态*, 2019(5): 43-46.
XIE C. A Study on tectonic geomorphology of Namche Barwa and activity of the faults. *Institute of Geology, Recent Developments in World Seismology*, 2019(5): 43-46.
- [23] 付达夫, 宋庆安, 李典军. 西藏墨脱县森林植被生物量与碳储量分析. *湖南林业科技*, 2015, 42(4): 67-72.
FU D F, SONG Q A, LI D J. Analysis of forest vegetation biomass and carbon storage in Motuo County of Tibet. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2015, 42(4): 67-72.

- [24] JIN X G, LI Y Y, LUO Y J, LIU H W. Prediction of city tunnel water inflow and its influence on overlain lakes in karst valley. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(16): 1162.
- [25] 崔东, 闫俊杰, 刘海军, 陈晨. 伊犁河谷不同类型湿地土壤活性有机碳组分及其含量差异. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2087-2093.
CUI D, YAN J J, LIU H J, CHE C. Soil labile organic carbon fractions and the differences of their concentrations in different types of wetlands in Yili valley. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2087-2093.
- [26] 庞丹波. 断陷盆地区典型林分土壤有机碳组分特征研究. 北京: 北京林业大学博士学位论文, 2019.
PANG D B. The characteristics of soil organic carbon fraction of typical forests in karst faulted basin. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [27] 江淼华, 吕茂奎, 林伟盛, 谢锦升, 杨玉盛. 生态恢复对红壤侵蚀地土壤有机碳组成及稳定性的影响. *生态学报*, 2018, 38(13): 4861-4868.
JIANG M H, LYU M K, LIN W S, XIE J S, YANG Y S. Effects of ecological restoration on soil organic carbon components and stability in a red soil erosion area. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4861-4868.
- [28] 谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 郭彦涵, 洪坚平, 张杰, 李云霞, 李廷亮. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 274-281, 290.
XIE J Y, CAO H B, MENG H S, GUO Y H, HONG J P, ZHANG J, LI Y X, LI T L. Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 274-281, 290.
- [29] 徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 崔晓阳. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 222-230.
XU J H, SUN Y, GAO L, CUI X Y. A review of the factors influencing soil organic carbon stability. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2018, 26(2): 222-230.
- [30] 胡明慧, 赵建琪, 王玄, 熊鑫, 张慧玲, 褚国伟, 孟泽, 张德强. 自然增温对南亚热带森林土壤微生物群落与有机碳代谢功能基因的影响. *生态学报*, 2022(1): 359-369.
HU M H, ZHAO J Q, WANG X, XIONG X, ZHANG H L, CHU G W, MENG Z, ZHANG D Q. Effects of natural warming on soil microorganisms communities and functional genes of soil organic carbon metabolism in subtropical forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2022(1): 359-369.
- [31] 黄龙, 包维楷, 李芳兰, 胡慧. 土壤结构和植被对土壤微生物群落的影响. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(6): 1725-1731.
HUANG L, BAO W K, LI F L, HU H. Effects of soil structure and vegetation on microbial communities. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(6): 1725-1731.
- [32] 邓欧平, 李翰, 熊雷, 邓良基, 周伟, 贾凡凡. 秸秆、猪粪混施对麦田根际土壤过氧化氢酶与蔗糖酶活性的影响. *土壤*, 2018, 50(1): 86-92.
DENG O P, LI H, XIONG L, DENG L J, ZHOU W, JIA F F. Effect of mixed application of rice-wheat straws and pig manure on soil enzyme activities in wheat-growth field. *Soils*, 2018, 50(1): 86-92.
- [33] 乌吉斯古冷, 康鹏, 胡金鹏, 潘雅清, 周月, 马蓉, 彭伊扬, 刘建利. 荒漠植物黑沙蒿嫩枝与成熟枝内生菌群落结构差异. *微生物学通报*, 2022(2): 569-582.
Wujisiguleng, KANG P, HU J P, PAN Y Q, ZHOU Y, MA R, PENG Y Y, LIU J L. Difference in endophyte community structure between young and mature branches of *Artemisia ordosica*. *Microbiology China*, 2022(2): 569-582.
- [34] 李文杰, 张祯皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉. 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系. *环境科学*, 2022(2): 1050-1058.
LI W J, ZHANG Z J, ZHAO Y P, XU M P, REN C J, YANG G H, FENG Y Z, REN G X, WANG X J, HAN X H. Changes in soil microbial carbon-degrading enzymes and their relationships with carbon pool components during the restored process of robinia pseudoacacia. *Environmental Science*, 2022(2): 1050-1058.
- [35] 马俊勇. 四种森林经营措施对土壤活性有机碳组分影响研究. 北京: 北京林业大学博士学位论文, 2019.
MA J Y. A study on soil actively organic carbon components under four different forest management stratagems. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [36] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 吴泽鹏, 王振师, 李小川, 周宇飞. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2020, 40(6): 1839-1850.

- HU H Q, LUO S S, LUO B Z, WEI S J, WU Z P, WANG Z S, LI X C, ZHOU Y F. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1839-1850.
- [37] WICKINGS K, GRANDY A S, REED S C, CLEVELAND C C. The origin of litter chemical complexity during decomposition. *Ecology Letters*, 2012, 15 (10): 1180-1188.
- [38] 李增强, 张贤, 王建红, 曹凯, 徐昌旭, 曹卫东. 紫云英施用量对土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响. *中国土壤与肥料*, 2018(4): 14-20.
- LI Z Q, ZHANG X, WANG J H, CAO K, XU C X, CAO W D. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) application rate on soil labile organic carbon and C-transformation enzyme activities. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(4): 14-20.
- [39] SINSABAUGH R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(3): 391-404.
- [40] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响. *环境科学*, 2018, 39(1): 355-362.
- XU G X, WANG Z F, GAO M, TIAN D, HUANG R, LIU J, LI J C. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 355-362.
- [41] 冷暖, 邓羽松, 林立文, 王金悦, 黄娟, 杨钙仁, 刘淑娴, 黄智刚. 南亚热带不同母质发育土壤团聚体特征及其稳定性. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 80-86, 93.
- LEN N, DENG Y S, LIN L W, WANG J Y, HUANG J, YANG G R, LIU S X, HUANG Z G. Characteristics and stability of soil aggregates developed from different parent materials in the south subtropical region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 80-86, 93.
- [42] 张剑雄, 谷丰, 朱波, 周明华. 林草恢复对热水河小流域侵蚀区土壤团聚体稳定性与有机碳氮特征的影响. *草业科学*, 2021, 38(6): 1012-1023.
- ZHANG J X, GU F, ZHU B, ZHOU M H. Effects of forest and grass restoration on soil aggregate stability, and organic carbon and nitrogen characteristics in an eroded area of the Reshui River. *Pratacultural Science*, 2021, 38(6): 1012-1023.
- [43] 徐海东, 苑海静, 熊静, 虞木奎, 成向荣. 杉阔异龄复层林对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响. *林业科学研究*, 2020, 33(3): 107-115.
- XU H D, YUAN H J, XIONG J, YU M K, CHENG X R. Effects of uneven-aged cunninghamia lanceolata and evergreen broadleaved mixed plantations on soil aggregate stability and soil organic carbon and nutrients stocks. *Forest Research*, 2020, 33(3): 107-115.
- [44] 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 蔡立群, 张仁陟, 谢军红. 土壤团聚体稳定性及有机碳组分对苜蓿种植年限的响应. *草业学报*, 2016, 25(10): 40-47.
- LUO Z Z, LI L L, NIU Y N, CAI L Q, ZHANG R Z, XIE J H. Response of soil aggregate stability and soil organic carbon fractions to different growth years of alfalfa. *Pratacultural Science*, 2016, 25(10): 40-47.
- [45] 陈萍, 李波. 藏东南水汽输送特征分析及其影响. *南方农业*, 2018, 12(9): 124-125.
- CHEN P, LI B. Study on the mechanism of influence of tunnel construction on forest soil organic carbon stability in the lower Yarlung Tsangpo River basin. *South China Agriculture*, 2018, 12(9): 124-125.
- [46] 旺杰, 德庆央宗, 旦增, 汪英, 德吉白玛, 陈官燕, 田云杰. 2012—2018西藏“雨窝”降水特征及其成因分析. *气象科技*, 2021, 49(2): 211-217.
- WANG J, Deqingyangzong, Danzeng, WANG Y, Dejibaima, CHEN G Y, TIAN Y J. Characteristic and causal analysis of concentrated and frequently occurring intense rainfall in Tibet in 2012—2018. *Meteorological Science and Technology*, 2021, 49(2): 211-217.

(责任编辑 苟燕妮)