

DOI: 10.20103/j.stxb.202406051299

谭晓红,甘凤玲,蒋莉沙,石海龙,罗杰,蒲俊兵.坡向对喀斯特槽谷区不同土地利用类型土壤理化性质和酶活性的影响.生态学报,2025,45(16):

Tan X H, Gan F L, Jiang L, Shi H L, Luo J, Pu J B. Effects of slope aspect on soil physicochemical properties and enzyme activity of different land use types in karst trough valley. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16):

坡向对喀斯特槽谷区不同土地利用类型土壤理化性质和酶活性的影响

谭晓红,甘凤玲*,蒋莉沙,石海龙,罗杰,蒲俊兵

重庆师范大学三峡库区地表过程与生态恢复重庆市重点实验室/三峡库区地表生态过程重庆观测研究站/三峡库区地表生态过程重庆野外观测研究站,地理与旅游学院,重庆师范大学,重庆 401331

摘要:不同的坡向和土地利用类型会改变土壤中的环境状况,进而引起土壤性质和土壤酶的变化,改变土壤的质量。然而在生境复杂的喀斯特槽谷区,其不同坡向与土地利用类型下的土壤理化性质和土壤酶活性及其相互关系的变化更为复杂。因此,以重庆市青木关喀斯特槽谷区为研究对象,研究不同坡向和土地利用类型下的土壤理化性质及土壤酶活性特征,探索影响该地区土壤酶活性的关键驱动因子。研究结果表明:(1)阳坡的全磷(TP)和C:N高于阴坡,但阴坡的有机质(SOM),有机碳(SOC),全氮(TN),C:P和N:P显著高于阳坡。草地和林地的土壤自然含水率(NC),SOM,SOC,TN,C:P和N:P的含量高于其他土地利用类型。(2)阳坡的C:N比阴坡高14.82%,但阴坡的C:P和N:P显著高于阳坡。草地和林地的C:P和N:P高于裸地、玉米地和辣椒地。(3)阳坡的蛋白酶(PA)和蔗糖酶(SA)活性显著低于阴坡($P<0.05$)。除酸性磷酸酶(AKP)外,阳坡草地的土壤酶活性高于裸地、玉米地、辣椒地和林地,而阴坡则为林地的土壤酶活性最高。(4)阳坡的TN与土壤酶活性呈显著负相关关系($P<0.05$),其对土壤酶活性的贡献率为37.9%。阴坡的TP与土壤酶活性呈极显著负相关关系($P<0.01$),对土壤酶活性的贡献率为52.7%,说明土壤酶活性在不同坡向下受不同的土壤性质的影响。综上所述,阴坡的土壤酶活性高于阳坡,草地和林地的酶活性高于其他土地利用类型,因此,为提高喀斯特槽谷区土地质量,应依据坡向和土地利用类型的差异,因地制宜的在阳坡应该自然恢复草地,阴坡增加林地的面积。

关键词:喀斯特槽谷区;坡向;土地利用类型;化学计量比;土壤酶活性

Effects of slope aspect on soil physicochemical properties and enzyme activity of different land use types in karst trough valley

TAN Xiaohong, GAN Fengling*, JIANG Lisha, SHI Hailong, LUO Jie, PU Junbing

Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area / Chongqing observation and Research Station of Earth surface Ecological process in the Three Gorges Reservoir Area / Chongqing Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

Abstract: Different slope aspects and land use types can alter the soil environmental conditions, leading to changes in soil properties and enzymes, thereby impacting soil quality. However, in karst trough valley with complex habitats, the variations in soil physical and chemical properties, as well as enzyme activities under different slope aspects and land use types are more intricate. Therefore, this study focused on the Qingmuguan karst trough valley of Chongqing to investigate the characteristics of soil physicochemical properties and enzyme activity under different slope aspects and land use types,

基金项目:国家自然科学基金项目(W2412149, 42107355);中国博士后基金项目(2023MD744195);重庆师范大学大学生创新创业训练计划项目(S202110637057)

收稿日期:2024-06-05; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ganfengling@cqnu.edu.cn

aiming to explore the key factors influencing soil enzyme activity in this region. The results show that: (1) The total phosphorus (TP) is higher on the sunny slope compared to the shady slope, while the shady slope exhibits higher levels of organic matter (SOM), organic carbon (SOC), and total nitrogen (TN) than the sunny slope. Moreover, both grassland and forest demonstrate higher soil natural moisture content (NC), SOM, SOC, and TN compared to other land use types. (2) The C:P and N:P ratios of grassland and forest surpassed those of abandoned land, corn fields, and pepper fields. The C:N ratio on the sunny slope exceeded that on the shady slope by 14.82%, while the C:P and N:P ratios were higher on the shady slope. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry indicated a greater availability of phosphorus in the sunny slope compared to the shady slope, despite a slower rate of organic matter decomposition. Phosphorus content is lower in abandoned land, corn fields, and grassland but demonstrates superior effectiveness. (3) The soil enzyme activities of protease (PA) and sucrase (SA) were significantly lower on the sunny slope compared to those on the shady slope ($P < 0.05$). With the exception of acid phosphatase (AKP), the soil enzyme activities in the grassland on the sunny slope exceeded those in abandoned land, corn fields, pepper fields, and forest. Conversely, on the shady slope, it exhibits the highest level of soil enzyme activity among forest. (4) The soil enzyme activity on the sunny slope showed a significant negative correlation with the soil enzyme activity ($P < 0.05$), contributing to 37.9%. Similarly, the soil enzyme activity on the shady slope exhibited a significant negative correlation with the soil enzyme activity ($P < 0.01$), contributing to 52.7%. The results indicated that soil enzyme activity was affected by different soil properties on different slopes. In conclusion, the soil enzyme activity on shady slope surpasses that of sunny slope, with grassland and forest exhibiting higher levels compared to other land types. Therefore, in order to enhance the land quality of karst trough valley, natural restoration of grassland should be prioritized on sunny slope based on slope aspect and land use type differences, while increasing the forest on shady slope according to local conditions.

Key Words: karst trough valley; slope aspect; land use type; stoichiometric ratio; soil enzyme activity

土壤酶影响着土壤中有机质(SOM),有机碳(SOC),全氮(TN),全磷(TP)等营养物质的转换^[1],影响着土壤肥力状况及土地质量^[2]。土壤营养元素作为土壤肥力的重要指示指标,与土壤酶关系密切,其中土壤的SOM, SOC, TN, TP 等是影响土壤酶活性的主要因素,即土壤 SOM 等的细微变化都会引起土壤酶活性的改变^[3-4]。当土壤中 SOC, TN 或 TP 受到限制时,微生物会通过自身的能力分解相对应的酶以保证自身供给需求^[5-7]。土壤碳、氮、磷化学计量比既反映了土壤酶对土壤中各养分元素的活化状况,又反映了土壤养分的可利用性和有效性,能有效地提高土壤肥力和土地质量^[8]。在喀斯特槽谷生态系统中,山地空间结构下不同的地形条件会影响土壤生物和非生物的性质。其中,坡向是影响喀斯特槽谷区土壤生境的最主要的地形因子之一。不同坡向通过直接改变水热条件间接作用于土壤理化性质和酶活性,与阴坡相比,阳坡获得的太阳辐射更多,温度更高,从而促进了土壤水分的蒸散发,引起土壤水分的降低,改变土壤水分的有效性,进而抑制土壤营养元素的转化和土壤酶活性。此外,不同土地利用类型下的土壤性质具有显著差异,如赵雯^[2]对青藏高原高寒山区的灰钙土、栗钙土、草甸土等土壤的理化性质及其化学计量比进行研究,发现在强烈的地质背景作用下,不同土地利用类型的环境因子与土壤性质呈显著相关关系。但是,关于土壤性质研究均集中在连续的、均质的非喀斯特地区,而对于大面积基岩裸露地表,成土率低、土壤呈不连续性间断分布的喀斯特地质条件下,地形因素和土地利用类型对土壤特性特别是酶活性的影响需要进一步开展研究。同时,由于不同坡向下日照辐射、气温、降水等方面存在差异,对土壤特性特别是土壤酶活性的生态环境的因素存在较大影响。因此,有必要在喀斯特地区探讨影响土壤性质及其酶活性的关键驱动因子。

喀斯特地貌为中国五大地貌之一,广泛发育在我国南方地区^[9],区域内大面积基岩裸露于地表,经风化作用后形成土壤,分布在岩石表面和岩溶孔隙中,与岩石镶嵌分布,但是在自然和人为不合理利用土地资源的双重作用下,造成喀斯特地区水土流失,出现严重的石漠化和土地退化问题^[10-11]。与东北平原黑土广泛分

布,土层较厚,土壤肥沃等非喀斯特地区相比,喀斯特地区植被主要生长在岩石裂缝和浅薄的土层中,不同地区具有不同的土地利用类型^[12-13]。不同土地利用类型的土壤具有不同的理化性质,影响着土壤酶活性状况,而土壤酶作为影响土地质量的因素之一,不仅体现土壤生物的活性,还能反映喀斯特地区土壤质量的变化^[14]。因此,基于喀斯特地区不同土地利用类型的养分的差别,揭示喀斯特地区不同土地利用类型对土壤的性质及土壤酶的关系,对喀斯特地区土地质量的提高至关重要。

喀斯特槽谷是喀斯特地区的八大典型岩溶地貌之一,在强烈的地质背景作用过程中,背斜/向斜地质结构在长期的流水作用下形成了独具特色的“一山二岭一槽”形状^[15-17],其土地利用类型与土壤的理化性质与其他喀斯特地貌存在较大差异,例如,喀斯特洼地农业用地分布较广,而喀斯特槽谷区以裸地和自然恢复地为主^[18],所以,尽管已有研究^[19]对喀斯特地区的土壤的特性以及酶活性进行研究,但却鲜少有针对具有独特地貌特征喀斯特槽谷区的土壤理化性质和酶活性的研究。喀斯特槽谷区两翼岩层倾向一致但坡向相反,存在典型的顺/逆层坡,岩层倾向与坡向平行形成顺层坡,岩层倾向与坡向垂直形成逆层坡^[20],顺层坡坡向朝南,接收的太阳辐射更多,为阳坡,逆层坡的坡向朝北,太阳辐射较少,为阴坡。与其他岩溶地形相比,喀斯特槽谷区石漠化和土地退化更为严重^[21]。以往的研究主要集中在喀斯特槽谷区土层抗侵蚀能力方面,表示岩土结构异质性极显著,顺层坡的岩土结构更为松散,抗侵蚀能力更弱,导致其土壤厚度小于逆层坡^[22]。而对于喀斯特槽谷区不同坡向及其岩层倾向条件下,土地利用类型对土壤理化性质及酶活性的影响机制的研究较为鲜见,目前尚处于初步探索阶段。因此,对比分析不同坡向及其土地利用类型下的土壤的特性特别是酶活性特征,有助于提高喀斯特槽谷区生态环境和土地质量,实现可持续发展。

由此,结合喀斯特槽谷区水热条件等环境因子,本研究以重庆市青木关喀斯特槽谷区的阳坡和阴坡为研究对象,通过分析阴坡和阳坡不同土地利用类型的土壤理化性质,探讨不同坡向对不同土地利用类型土壤酶活性的影响,为喀斯特槽谷区生态的修复以及土地质量的提高提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市沙坪坝区青木关喀斯特槽谷区(106°16′—106°20′E,29°40′—29°47′N)(图1)地处副热带季风区,属于亚热带湿润季风气候,降雨集中在夏秋两季,多年平均降水1100mm,多年平均气温15.5℃,雨热同期,四季分明。青木关喀斯特槽谷形成于川东平行岭谷缙云山温塘峡背斜南段,是由特殊的背斜地质结构在长期的水流侵蚀作用下形成的喀斯特槽谷景观,槽谷两翼存在典型的顺层坡和逆层坡,顺层坡坡向朝南,接收的太阳辐射更多,阳光充足,生长的大部分为马尾松等喜阳植物,为阳坡;逆层坡的坡向朝北,太阳辐射较少,生长的多为蕨类等喜阴植物,为阴坡^[23-24]。该区域特殊的自然条件和强烈的人为干扰活动导致区域内水土流失严重,出现严重的石漠化和土地退化问题。区域内主要土地利用类型有林地(61.52%)、草地(19.62%)和耕地(9.42%)。玉米、水稻、辣椒、油菜等为该地区主要农作物。

1.2 样品采集与数据测定

本研究于2021年5月至12月在重庆市沙坪坝区青木关岩溶槽谷地区进行。选取的样地包括面积约占全区域面积19.62%的草地、约9.42%的耕地(玉米和辣椒为主要农作物)以及约61.52%的林地。在阳坡和阴坡分别选取4种土地利用类型作为采样点,并以裸地为对照组进行分析。由于重庆特殊的生物、气候与地貌条件,加之湿润的气候带来丰富的降水,使得土壤易发生富铝化作用和氧化铁的水化作用,适合黄壤发育,因此青木关喀斯特槽谷区土壤类型以地带性土壤黄壤和非地带性土壤石灰土为主^[25-26]。裸地的土壤砂砾含量较高,孔隙度较大,土壤含水量和有机质含量较低。玉米地和辣椒地的土壤粘度高,孔隙度差,受农业生产活动的影响,有机质含量较低。林地和草地由于大量腐殖质进入土壤,有机质含量较高,再加上对雨水的截留作用,含水量也较高,土壤颜色较深,呈深灰色。

为了确保实验的可行性,在海拔范围为427—463m、坡度约为40°的阳坡和阴坡大致相同的位置建立了共

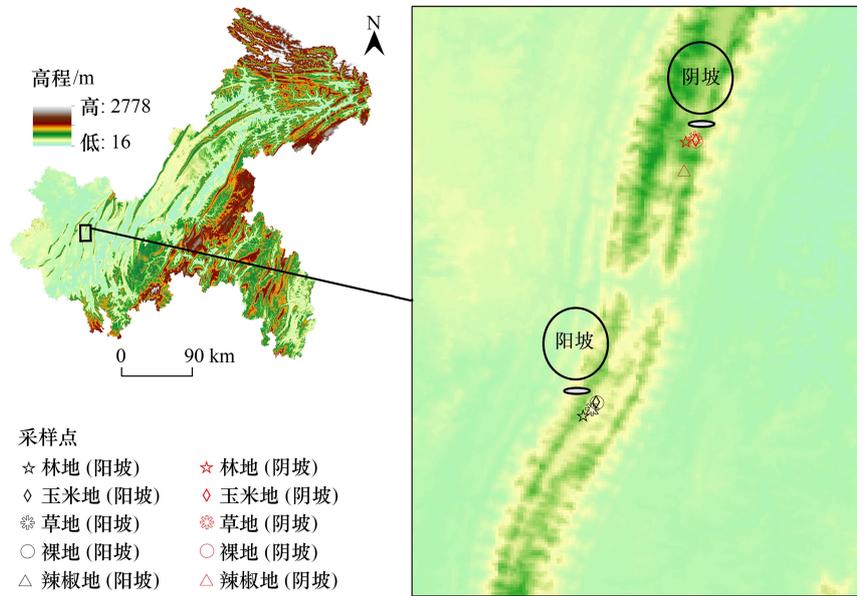


图1 研究区图

Fig.1 Overview of the study area

10个采样点(表1)。研究区域内的每块单一土地利用类型样地由20m×20m的地块组成。采用三分法在每个样地随机建立面积为1.0m×1.0m的3个子样地。每个子样地设置3个重复,共采集90个样本(3个重复样本×3子样地×5土地利用类型×2坡向)。在每个子样地的耕作层内大约20—80cm的深度收集大约1kg的新鲜土壤样本,清除其中的可见的根和砾石,然后将样品放入密封袋中,运送到实验室分析其基本理化性质。此外,用体积为100cm³的环刀,在每个子样地附近取3个原状土样,用于测定土壤容重(BD)^[20,23]。

表1 喀斯特槽谷区阳坡/阴坡采样点

Table 1 Sampling sites of sunny/shady slope in karst trough valley

坡向 Slope aspect	岩层倾向 Rock strata dips	土地利用类型 Land use types	海拔 Altitude/m	土层厚度 Soil layer thickness/cm	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)
阳坡 Sunny slope	顺层坡	裸地	462.7	20—50	106.305468°	29.724779°
		玉米地	452.6	50—60	106.305506°	29.725102°
		辣椒地	450.6	50—60	106.301409°	29.714456°
		草地	462.5	50—80	106.305275°	29.725833°
		林地	526.3	50—70	106.302005°	29.72466°
阴坡 Shady slope	逆层坡	裸地	427.6	30—60	106.27069°	29.632307°
		玉米地	431.5	50—60	106.270399°	29.632522°
		辣椒地	452.1	50—60	106.269030°	29.630168°
		草地	442.3	60—80	106.269024°	29.630018°
		林地	453.7	50—80	106.265867°	29.627771°

本研究采用以下方法测定土壤理化和生物指标:样品土壤的自然含水率(NC)采用烘干法测定,pH值采用1:2.5土水比电极法测定,SOM和SOC采用重铬酸钾滴定法测定,TN采用全自动凯氏定氮法测定,TP则用钼锑抗比色法测定,土壤碳、氮、磷化学计量比碳氮比(C:N)是SOC与TN的比率,碳磷比(C:P)是SOC与TP的比率,氮磷比(N:P)是TN与TP的比率。通过分光光度法测定土壤蔗糖酶(SA)、蛋白酶(PA)和脲酶(UA)活性,采用底物诱导法用多功能酶标仪测定土壤酸性磷酸酶(AKP)和 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)活性^[19—22]。BG用于酶的C获取,AKP用于酶的P获取,SA,PA和UA用于酶的N获取。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 进行数据的记录。通过 SPSS 25.0 软件采用单因素方差分析阳坡和阴坡不同土地利用类型的土壤 BG、pH 值、NC、SOM、SOC、TN 和 TP 等含量及其化学计量比差异的显著性($P<0.05$)。用 Origin 2022 统计分析软件绘制土壤理化性质及其化学计量比的统计图、土壤酶活性的统计图;用 Person 相关分析对土壤理化性质以及土壤酶活性进行相关性分析,绘制热图。用 Canoco 5.0 软件,以土壤酶活性为响应变量,以土壤基本理化性质和土壤碳、氮、磷计量比为解释变量进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同坡向土壤的理化性质特征分析

2.1.1 阳坡/阴坡不同土地利用类型土壤理化性质

由图 2 可知,阳坡/阴坡土壤的理化性质特征差异显著($P<0.05$),整体而言,阳坡/阴坡的草地和林地土壤 NC、SOM、SOC 和 TN 含量显著高于其他土地利用类型。除 BD 外,阳坡不同土地利用类型之间理化指标存在显著的差异性($P<0.05$)。阳坡土壤 TP 含量显著高于阴坡,但阴坡土壤 NC、SOM、SOC 和 TN 比阳坡分别高 27.94%、26%、26%和 33.13%。

阳坡草地与玉米地和辣椒地的 NC、SOM、SOC 和 TN 差异显著($P<0.05$),其中 NC 和 TN 的含量大小顺序为草地>林地>裸地>玉米地>辣椒地。草地的 SOM 和 SOC 是玉米地的 0.36 和 0.36 倍,是辣椒地的 0.66 和 0.66 倍。土壤的 pH 表现为辣椒地最高,其次为草地、裸地和林地,玉米地最低。草地、玉米地和林地土壤的 TP 含量显著高于辣椒地($P<0.05$)。

阴坡除 BD 外,林地与辣椒地和玉米地的其他理化性质存在显著的差异($P<0.05$)。林地的 SOM 和 SOC 含量最高,其次为草地和裸地,辣椒地和玉米地为最低。林地的 pH 值、NC、SOM、SOC 和 TN 高辣椒地 18.76%、141.07%、94.86%、94.86%和 151.16%,高玉米地 15.69%、174.13%、184.3%、184.3%和 228.51%,然而林地的 TP 比辣椒地低 106.06%,比玉米地低 88.21%。

2.1.2 阳坡/阴坡不同土地利用类型土壤化学计量特征

根据图 3 阳坡/阴坡土壤的碳、氮、磷化学计量特征分析可知,阳坡/阴坡不同土地利用类型土壤化学计量特征存在显著差异($P<0.05$)。土壤的 C:N、C:P 和 N:P 的变化范围为 7.05—15.53、28.10—193.40、2.36—19.78。阳坡和阴坡的草地和林地的 C:P 和 N:P 显著高于裸地、玉米地和辣椒地。阳坡的 C:N 高阴坡 14.82%,但阴坡的 C:P 和 N:P 更高(126.53%、153.23%)。

阳坡的草地与玉米地和辣椒地的 C:N 和 N:P 差异显著($P<0.05$)。草地的 N:P 分别是玉米和辣椒地的 1.12 倍和 0.91 倍,但草地的 C:N 比玉米地和辣椒地分别少 0.68 倍和 1.2 倍。各土地利用类型的土壤 C:P 差异较小,辣椒地最高,其次为林地、草地和裸地,玉米地的 C:P 最低。

阴坡林地的 C:P 和 N:P 最高,其次为草地和裸地,辣椒地和玉米地最低。林地的 C:P 和 N:P 显著高于辣椒地 306.7%、338.66%和玉米地 445.47%、501.74%,然而林地的 TP 比辣椒地和玉米地低 106.06%和 88.21%。C:N 在各土地利用类型中差异不显著($P>0.05$),但是玉米地和辣椒地的 C:N 高于林地、裸地和草地。

2.2 不同坡向的土壤酶活性分析

如表 2,坡向和土地利用类型及其交互作用对土壤酶活性具有极显著影响($P<0.01$)。此外,由图 4 可知,阳坡/阴坡土壤酶活性大小顺序表现为:PA>SA>UA>BG>AKP,PA 的活性在阴坡的 5 种土地利用类型中均表现为最高,但阳坡草地和辣椒地中则是 SA 最高。阳坡 PA 是 AKP 的 8.91 倍,而阴坡的 PA 比 AKP 高 953.63%。阴坡的土壤酶活性高于阳坡,阳坡的 SA、PA、AKP、UA、BG 的含量分别低阴坡 12.51%、18.85%、11.07%、17.67%、9.17%。

阳坡草地的土壤酶活性高于其他 4 种土地利用类型,SA 在草地最高(204.70nmol g⁻¹ h⁻¹),在裸地最低

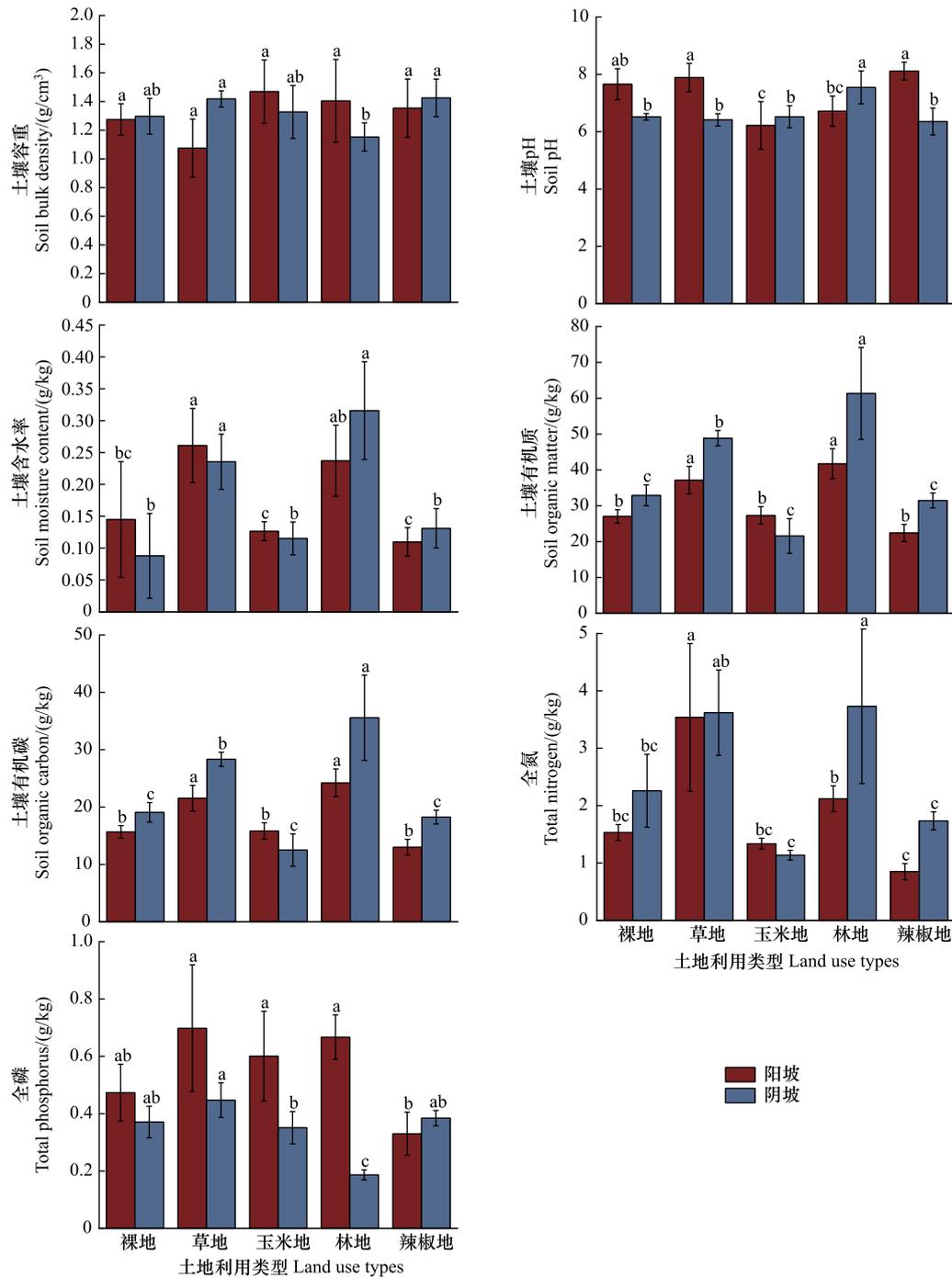


图2 喀斯特槽谷区阳坡/阴坡土壤的理化性质特征

Fig.2 Soil physical and chemical properties on sunny/shady slope in karst trough valley

不同小写字母(a, b, c)表示相同坡向下不同土地利用类型的土壤理化性质差异显著 ($P < 0.05$)

($114.44 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)。PA, AKP 和 UA 都表现为在辣椒地数量最少,其中草地的 PU 和 UA 显著高于辣椒地,是辣椒地的 0.61 倍和 0.35 倍。AKP 在玉米地最高,其次为林地,草地和裸地,辣椒地的 AKP 最低。BG 的大小顺序为草地>玉米地>林地>辣椒地>裸地。

阴坡林地的土壤酶活性最高,辣椒地酶活性最低。SA 在林地最高,分别是裸地、辣椒地玉米地草地的 0.71 倍,的 0.78 倍,的 0.86 倍,的 0.27 倍。林地的 UA 最高,其次是裸地和玉米地,草地和辣椒地最低。不同

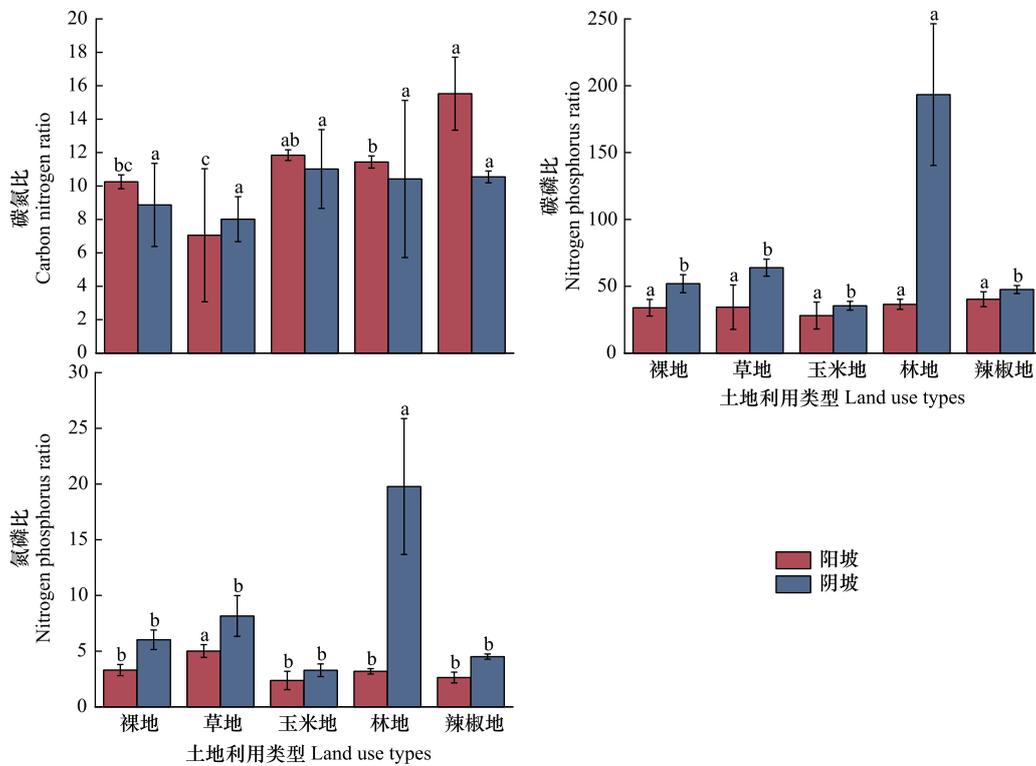


图3 喀斯特槽谷区阳坡/阴坡土壤的碳、氮、磷化学计量特征

Fig.3 Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics on sunny/shady slope in karst trough valley

土地利用类型的 AKP 具有显著差异,林地的 AKP 含量高裸地 30.86%,高辣椒地 125.37%,高玉米地 24.60%,高草地 5.55%。PA 的大小顺序表现为林地>玉米地>裸地>草地>辣椒地。草地的 BG 最高 ($52.51 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$),玉米地的最低 ($17.25 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)。

表2 喀斯特槽谷区坡向、土地利用类型及其交互作用对土壤酶的影响

Table 2 The effects of aspects and land use types on soil enzymes in karst trough valley

交互影响 Interaction	显著性 Significance
坡向 Slope aspect	0.004
土地利用类型 Land use type	<0.001
坡向×土地利用类型 Slope aspect×land use type	0.001

2.3 不同坡向下土壤理化性质与土壤酶活性的相互关系

为阐明喀斯特槽谷区阳坡/阴坡下不同土地利用类型土壤的理化性质与土壤酶活性的关系,本文对土壤理化性质与土壤酶活性进行 Pearson 相关性分析(图5),结果表明:阳坡/阴坡不同土地利用类型的土壤理化性质与土壤酶相关性差异显著($P<0.05$)。阳坡/阴坡 BD 与 pH 和 TN 呈显著负相关关系($P<0.05$);NC 与土壤营养物质关系密切,其中,与 SOM, SOC, TN 极显著正相关($P<0.01$);TN 与 N:P 呈极显著正相关关系,与 C:N 极显著负相关($P<0.01$);TP 与 PA 和 UA 极显著负相关($P<0.01$)。此外,阳坡的 BD 与 N:P 极显著负相关($P<0.01$);NC 与 TP 极显著正相关($P<0.01$),与 C:N, PA 和 BG 显著负相关($P<0.05$);pH 与 TP 和 AKP 显著负相关($P<0.05$),与 UA 显著正相关($P<0.05$);SOM 和 SOC 与 PA, BG 显著负相关($P<0.05$),与 UA 呈极显著负相关关系($P<0.01$);TN 与 PA 极显著负相关($P<0.01$),与 AKP 和 UA 显著负相关($P<0.05$);C:N 与 PA, AKP 和 UA 呈显著正相关关系($P<0.05$);N:P 与 PA 和 AKP 极显著负相关($P<0.01$)。与阳坡不同的是,阴坡 NC 与 C:P 和 N:P 极显著正相关($P<0.01$);SOM, SOC 与 C:P 和 N:P 极显著正相关($P<0.01$);TP 与

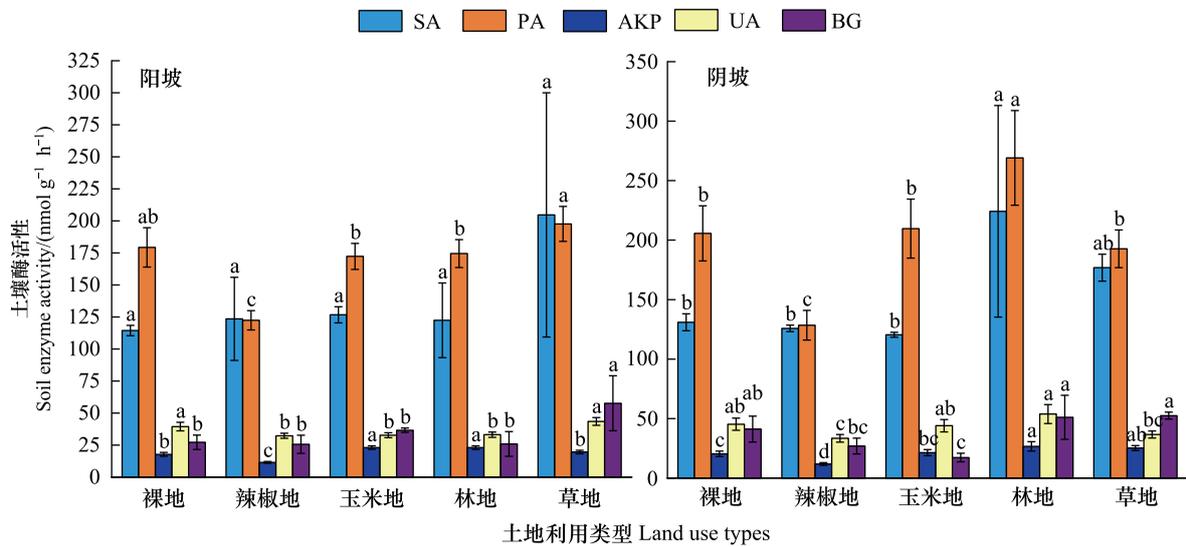


图4 喀斯特槽谷区阳坡/阴坡土壤酶活性特征

Fig.4 Soil enzyme activity characteristics on sunny/shady slope in karst trough valley

SA:蔗糖酶; PA:蛋白酶; AKP:酸性磷酸酶; UA:脲酶; BG:β-1,4-葡萄糖苷酶

C:P, N:P, PA 和 UA 极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 AKP 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$); C:N 与 AKP 显著正相关 ($P < 0.05$); C:P 和 N:P 与 SA, PA 和 UA 极显著正相关 ($P < 0.01$)。

为了进一步分析喀斯特槽谷区土壤理化性质与土壤酶的关系, 本文进行了土壤理化性质与土壤酶的 RDA 分析, 结果与 Pearson 相关性分析一致 (图 6)。阳坡第 1 轴和第 2 轴的解解释变量分别为 33.82%、9.83%, 解释了变异的 43.65%, 其中 TN 贡献率最大 (37.9%), 与土壤酶活性存在显著相关性 ($P < 0.05$), pH 值, N:P, SOM, SOC, BD, NC, TP 的贡献率相对较低, C:N 贡献率最小 (0.5%)。此外, 阳坡 TN 与土壤酶活性夹角较大, 表明 TN 与土壤酶活性呈负相关关系。阴坡第 1 轴和第 2 轴的解解释变量分别为 60.43%、19.48%, 解释了变异的 79.91%, TN, TP 和 N:P 与土壤酶都存在显著相关性 ($P < 0.05$), 其中 TP 具有极显著相关关系 ($P = 0.002$), 贡献率分别为 11.7%、52.7% 和 22.4%, 但是 C:P 贡献率最小, 仅 1.1%。阴坡则是 TP 与土壤酶活性的夹角更大, 表明阴坡的 TP 与土壤酶活性呈负相关关系。

3 讨论

3.1 喀斯特槽谷区土壤理化性质及其化学计量比特征分析

喀斯特槽谷区不同坡向所接收的太阳辐射量具有显著差异, 进而所产生的水热条件不同, 导致不同坡向土壤的 C、N、P 等元素转化效率不同。同时, 喀斯特槽谷区的阳坡和阴坡位于其顺/逆层坡, 而岩层倾向会影响地表/地下水的流漏失量^[20], 导致地表土壤的 BD、NC、土壤厚度、pH 值等物理性质发生变化^[27-28], 而土壤的营养元素如 SOM、SOC、TN、TP 等与土壤物理性质密切相关^[29], 因此, 在喀斯特槽谷区, 阳坡和阴坡的土壤理化性质存在显著差异。本研究结果表明, 阳坡土壤 TP 含量高于阴坡, 但阴坡的 NC, SOM, SOC, TN, C:P 和 N:P 含量比阳坡更高。导致这个结果的原因可能是阳坡接收的太阳辐射增加, 导致土壤水分蒸发增加, 再加上植物的生长发育以及蒸腾作用需要消耗大的水分, 降低了土壤水分的有效性, 从而降低土壤 NC 的含量。阳坡较高的太阳辐射有利于植物充分吸收光照生长, 而植物拥有较高的生物量, 在其快速生长的过程中增加了对土壤中的 SOM, SOC 和 TN 的消耗, 同时, 土壤中微生物的活性得以提高, 从而加快对土壤中的有机物质的分解速率, 加速对土壤中 C 和 N 的释放, 引起 SOM, SOC 和 TN 的损失^[30]。P 元素是作物生长的不可或缺的元素之一, 阳坡地表温度相对更高, 土壤水分蒸发量相比较于阴坡而言更大, 土壤的 NC 和紧实度较低, 且

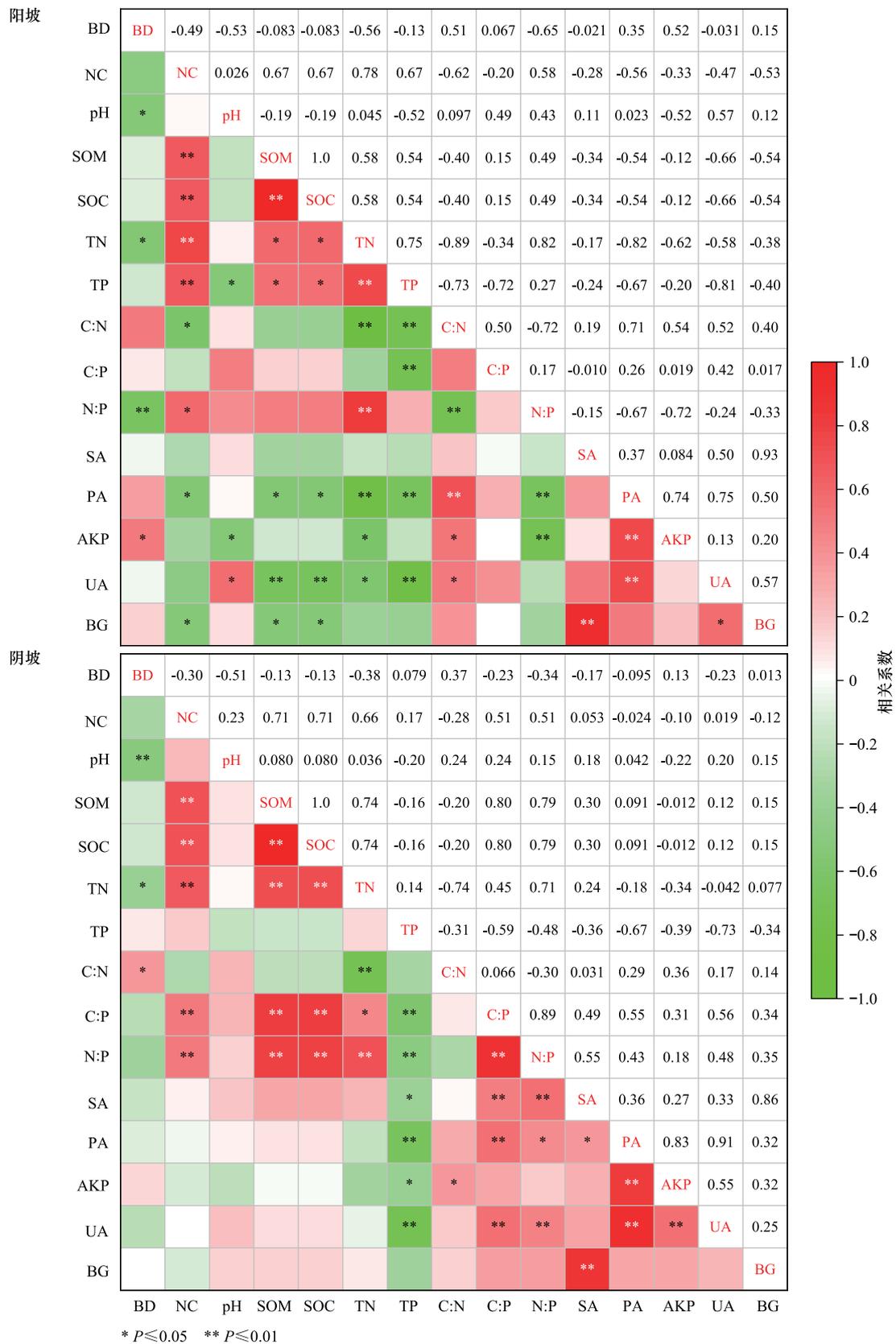


Fig.5 Correlation between soil physical and chemical properties and soil enzymes on sunny/shady slope in karst trough valley

BD:土壤容重;NC:土壤含水率;SOM:土壤有机质;SOC:土壤有机碳;TN:土壤全氮;TP:土壤全磷

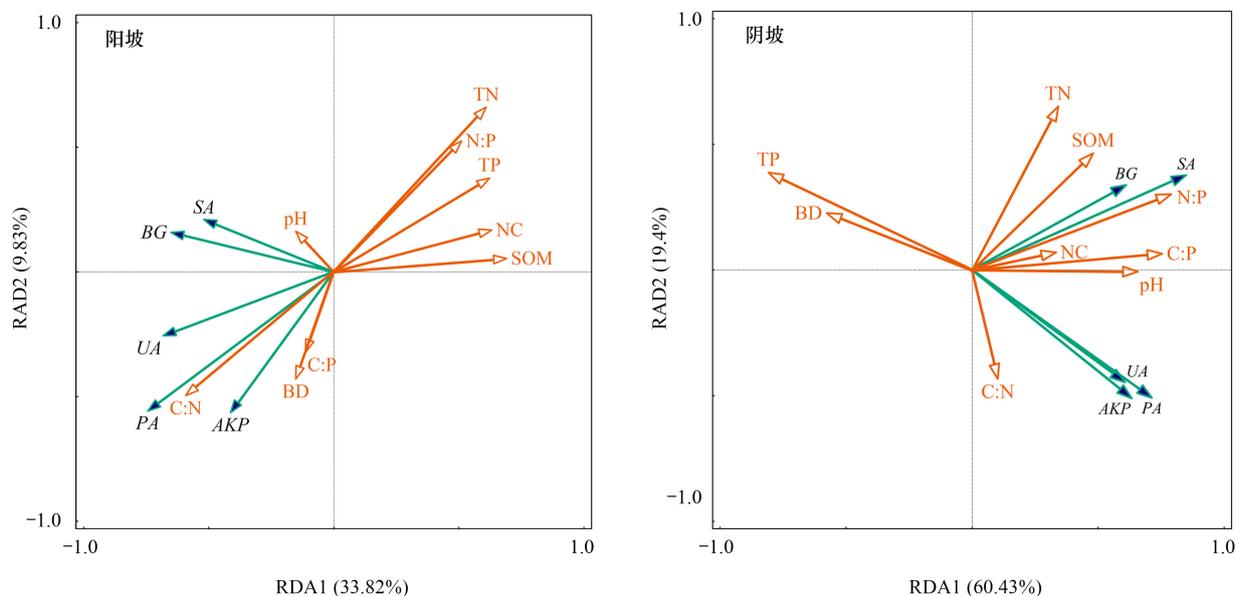


图6 喀斯特槽谷区阳坡/阴坡土壤理化性质与土壤酶的冗余分析

Fig.6 Redundancy analysis (RDA) of soil physicochemical properties and soil enzymes on sunny/shady slope in karst trough valley

P 在土壤中受到的淋溶作用小,易保存于土壤中,再加上在喀斯特地区,土壤与岩石镶嵌分布的格局改变了土壤中的营养元素的分布格局^[13],其中母岩经风化作用产生的 P 元素成为土壤中 P 的主要来源。喀斯特槽谷区的岩石产状,即岩层倾向也会改变营养元素的分布格局。阳坡为顺层坡,因此对于阳坡而言,岩层倾向与水流方向一致,使得地表产流顺流而下,增加对地表土层的冲刷。已有研究表明,地表产流在运动过程中带走地表的土壤,造成土壤流失,使得阳坡土壤厚度小于阴坡,导致阳坡的裸岩率更高,岩石风化程度更高,在风化作用下大量 P 元素存积在土壤中,导致土壤 TP 高^[23,31-32]。因此,阳坡的 TP 含量更高,但 SOM, SOC 和 TN 含量更低。与阳坡不同的是,阴坡接收的太阳辐射少于阳坡,NC 含量更高,缓解了植物对水分的迫切需求,有利于根系的生长和发育,产生更多的根系分泌物,温度也相对更低,就会限制对土壤中养分的分解,有利于 SOM 等的储存。阴坡较低的气温促使植物凋落物和土壤 SOM 增加的同时,增加了土壤微生物的呼吸作用,提高了土壤 OC 和 TN 的含量^[25]。再加上阴坡位于逆层坡,其坡向与岩层倾向相反,水流在运动过程中受岩层的阻挡沿岩层孔隙和裂隙向下运动,以地下产流为主,地下水漏失量更高。但是由于岩层倾向的阻挡作用,在相同时间内阴坡的地下水土漏失缓慢且数量少于阳坡地表在冲刷作用下带走的土壤数量,所以阴坡的地表水土流失较少,土壤能较好的保存在坡面,从而使得阴坡的土壤厚度大于阳坡,大部分岩石被掩埋在土壤中受到的分解作用小,因而阴坡 TP 含量更低。而阴坡的地表产流冲刷能力小,使得土壤中的 SOM、SOC、TN 等营养元素的流失速度更慢,含量更高^[33-34]。除外,有相关研究表明土壤厚度与土壤中的营养元素含量密切相关,土层越厚,土壤团聚体稳定性越好,土壤的保肥保水能力相应的也越好,土壤的 SOC、TN 等元素更优^[20,27]。N 和 P 作为养分限制指标,阴坡土壤中的碳氮磷化学计量比 C:P 和 N:P 高于阳坡,说明阴坡对磷的有效性维持较高,且有机质分解速度低,有利于土壤养分的维持^[35]。

土壤的 C、N、P 作为土地质量的评价指标之一,受到自然和人为双重作用的影响。不同土地利用类型下,土壤中的营养元素含量存在显著差异^[36-37]。就本研究而言,阳坡/阴坡草地和林地的土壤中,NC, SOM, SOC、TN 的含量以及 C:P 和 N:P 高于裸地、玉米地和辣椒地。这主要是因为喀斯特槽谷区石漠化明显,原本土壤稀薄的草地和林地受人类活动的干扰较小,在自然恢复过程中更新死亡的生物质滞留原地,受到植物根系的保护作用不被地表径流带走,通过微生物降解作用重新进入土壤,形成腐殖质层,为 SOM 的积累提供了条件,加上植物的光合作用和固氮作用将大气中的 C、N 不断输入土壤^[38-39],因此林地和草地的土壤 SOM、SOC、TN

含量较高。再加上枯落层对雨水的截留作用^[4,31],使得林地和草地的 NC 含量也更高。而长期的农业除根除草等,对辣椒地和玉米地的土壤养分状况、水分含量等产生较大的负面影响,与黄土丘陵等非喀斯特地区的农耕地相比,喀斯特槽谷区农耕地的土壤表层疏松,岩石孔/裂隙大,通透性和透水性更强^[40],造成 NC、SOM、SOC、TN 的流失。土壤的 C:P 和 N:P 常用作评价养分限制的因子,在自然恢复地的 C:P 和 N:P 大于农耕地,可能是因为受农业活动的影响,农耕地土壤的 SOC 流失的速度高于 TN 和 TP,而 P 是喀斯特槽谷区土壤中最受限的元素,农耕地由于农民施加磷肥等,使得土壤中的 P 含量更高^[41-42],因此,农耕地 C:P 和 N:P 的值低于草地和林地。

3.2 喀斯特槽谷区影响土壤酶活性的驱动因素

土壤酶活性作为衡量土壤质量的生物学指标之一,受到土壤养分、土壤厚度、植被类型、土壤水热条件、土壤微生物等条件的影响,养分含量越高,土壤厚度越大,植被覆盖率越高、类型越丰富,土壤水热条件越好,土壤酶活性越高,其中养分状况与土壤酶活性密切相关^[43-44]。与在川西亚高原的研究中,坡向对土壤酶活性无显著影响等非喀斯特地区相比^[45],喀斯特地区坡向与土壤酶活性存在显著相关关系,这是因为在喀斯特槽谷区,阳坡和阴坡的岩层倾向的不同,导致土壤地表/下水的流/漏失量的改变,造成阳坡和阴坡土壤厚度变化和岩石中的矿物元素的分解程度不一,引起土壤养分含量的变化,进而改变土壤酶活性,因此坡向对土壤酶活性有着重要的影响。PA 通过转化蛋白质对土壤的 N 循环起着至关重要的作用,土壤 P 元素的分解转化及其生物有效性对 AKP 的活性具有重要意义^[46]。本研究发现,阳坡/阴坡的土壤酶活性都表现为:PA 活性最高,AKP 活性最低,阴坡的土壤酶活性整体高于阳坡。这可能是因为阳坡和阴坡的植被生长过程中所产生的或土壤自身的 TN 含量较高,通过微生物对 N 的转化提高了 PA 的活性,而喀斯特槽谷区 P 元素的主要来源是母岩经风化作用而产生,再加上槽谷区土层浅薄,农业活动在很大程度上受到限制,耕作施加的磷肥也相对较少,因此 P 限制普遍存在,不利于对 AKP 的转化,所以 PA 活性高,AKP 活性低。pH 值,NC,SOM,SOC,TN,TP 等土壤养分状况对土壤酶活性变化起驱动作用^[47-49]。阴坡土壤受岩层倾向的影响,营养元素不易流失,使得土壤中的 SOM、SOC、TN 等含量高于阳坡,养分状况更好,再加上阴坡土壤与阳坡相比,NC 含量更高,缓解了水分对植物的限制作用,植物通过根际分泌物向土壤酶的输入所需营养,因此,由于 NC 含量升高,促进了土壤酶活性,所以阴坡的土壤酶活性整体高于阳坡。本研究结果显示,阳坡的 TN 与土壤酶活性夹角较大,表明 TN 与土壤酶活性呈负相关关系,但是阴坡则是 TP 与土壤酶活性极显著负相关。导致这个结果的原因可能是阳坡 TN 含量低,微生物含量减少,从而对微生物的营养进行了限制,此时微生物会分泌大量所需要的酶以满足自身对营养的需求^[6],所以阳坡 TN 含量与土壤酶活性呈显著负相关关系,阴坡亦是如此,因此坡向显著影响土壤酶活性。

不同土地利用类型的土壤养分保持能力不同,在阳坡的草地土壤酶活性高于其他 4 种土地利用类型,但是在阴坡则为林地的土壤酶活性更高。这主要是因为阳坡中,岩石的裸露率高,与其他土地利用类型相比,草地能够在岩石缝隙中生长以改善土壤环境,为土壤动物提供更为适宜的生存环境,加之草地的 NC,pH 值更高,水分充足的碱性土壤更适合土壤动物的生存,而有研究表明^[50],土壤酶活性与土壤动物的活动有关,因此阳坡草地的土壤酶活性更高。对于阴坡林地而言,土壤的 NC,pH 值,SOM 等更高,更能够为微生物的生存提供充足的营养物质和生存条件,使得土壤酶活性更高。由此可见,土地利用类型与土壤酶活性密切相关。

总的来说,喀斯特槽谷区受坡向差异的影响,其土壤理化性质、酶活性等自然要素存在明显差异。由于阳坡和阴坡不同土地利用类型的凋落物的数量、质量、分解率以及水热等环境因子不同,导致阴坡的养分含量优于阳坡,进而引起土壤酶活性变化,阴坡的酶活性高于阳坡。因此,在石漠化治理和土地资源利用中,要考虑槽谷区坡向的差异,充分了解喀斯特槽谷土壤微生物养分循环背后的驱动力,增加喀斯特槽谷区阳坡的草地和阴坡的林地的面积,以更好地保护喀斯特槽谷区的生态环境,提高其土地质量。

4 结论

阳坡和阴坡土壤的理化性质差异显著,阳坡的 TP 高于逆层坡,但阴坡的 SOM,SOC 和 TN 比阳坡更高,阳

坡和阴坡都变现为草都和林地的 NC, SOM, SOC 和 TN 的含量高于其他土地利用类型,表明阴坡的土壤理化性质优于阳坡;草地和林地的理化性质优于裸地、玉米地和辣椒地。阳坡和阴坡草地和林地的 C:P 和 N:P 高于裸地、玉米地和辣椒地。阳坡的 C:N 高阴坡 14.82%,但阴坡 C:P 和 N:P 更高,土壤碳、氮、磷化学计量比表明本研究区域内阳坡磷元素的有效性高于阴坡,但有机质分解速度慢;裸地、玉米地、草地磷元素的含量更低,有效性更优。

对不同坡向下土地利用类型的土壤酶活性进行分析,发现阳坡和阴坡的 PA 酶活性在 5 种土地利用类型中表现为最高, AKP 活性最低。阳坡草地的土壤酶活性高于其他 4 种土地利用类型,阴坡林地的土壤酶活性最高,辣椒地酶活性最低,阴坡的土壤酶活性高于阳坡,进而优化了阴坡草地和林地土壤养分的配置。

阳坡的 TN 对土壤酶活性贡献率达 46.1%,与土壤酶活性呈负相关关系。阴坡的 TP 与土壤酶都存在显著相关性($P < 0.05$),贡献率为 52.6%,与土壤酶活性呈极显著负相关关系($P = 0.002$),说明坡向与土壤酶活性密切相关。总体上,阴坡土壤理化性质优于阳坡,土壤酶活性高于阳坡,在阳坡增加草地的面积,阴坡增加林地的面积,以促进喀斯特槽谷区土地质量的提高。

参考文献(References):

- [1] Cristina Moscatelli M, Massaccesi L, Marabottini R, Primavera F, Riccini A, Marinari S. The beneficial use of basalt flour combined to a microbial consortium to improve soil quality in basalt and carbonatic dismissed quarries. *Catena*, 2024, 237: 107820.
- [2] 赵雯, 黄来明. 高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(11): 4415-4427.
- [3] 龙健, 吴求生, 李娟, 廖洪凯, 刘云飞, 黄博聪, 张菊梅. 贵州茂兰喀斯特森林不同小生境类型对岩石溶蚀的影响. *土壤学报*, 2021, 58(1): 151-161.
- [4] 董天富, 邓志豪, 杨静, 戴全厚, 聂云鹏. 喀斯特退耕地不同植被恢复阶段土壤团聚体稳定性特征. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 33-42.
- [5] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, Han F, Ju W L, Ye L P, Wang X, Tan W F, Zhang X C. Natural grassland as the optimal pattern of vegetation restoration in arid and semi-arid regions: Evidence from nutrient limitation of soil microbes. *Science of The Total Environment*, 2019, 648: 388-397.
- [6] 张鹏, 王国梁. 黄土高原刺槐林土壤酶化学计量沿着环境梯度变化. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 161-167.
- [7] 霍皇煜, 米琦, 周天财, 李洋, 张建香, 陈俊合, 汪亚峰, 孙建. 青藏高原高寒草地土壤酶活性海拔地带性特征. *生态学报*, 2024, 44(1): 405-415.
- [8] Xu F J, Huang Y M, Huang Q, Shen J K. Relationship between microbial nutrient limitation and soil organic carbon fraction during shelterbelts construction. *Environmental Science*, 2024, 45(4): 2342-2352.
- [9] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 田连恕, 张建明. 自然地理学. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 275-279.
- [10] 王世杰, 彭韬, 刘再华, 倪健, 陈喜, 张信宝, 刘长成. 加强喀斯特关键带长期观测研究, 支撑西南石漠化区生态恢复与民生改善. *中国科学院院刊*, 2020, 35(7): 925-933.
- [11] 李阳兵. 中国西南岩溶山地石漠化转型演变解析. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 698-706.
- [12] 杨威, 彭旭东, 戴全厚, 刘婷婷, 许胜兵. 石漠化山区露石岩面流对岩-土界面土壤氮磷淋溶与输入作用的研究. *土壤学报*, 2024, 61(1): 86-97.
- [13] 何洁, 严友进, 易兴松, 王勇, 戴全厚. 喀斯特地区土壤异质性及其与植物相互作用. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2249-2258.
- [14] Farooq T H, Kumar U, Mo J, Shakoor A, Wang J, Rashid M H U, Tufail M A, Chen X Y, Yan W D. Intercropping of peanut-tea enhances soil enzymatic activity and soil nutrient status at different soil profiles in subtropical Southern China. *Plants*, 2021, 10(5): 881.
- [15] 蒋勇军. 喀斯特槽谷区生态退化与修复专题导读. *生态学报*, 2019, 39(16): 6058-6060.
- [16] 覃自阳, 甘凤玲, 何丙辉. 岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 68-75, 80.
- [17] Wang T, Zhou W, Xiao J Y, Li H R, Yao L, Xie L J, Wang K M. Soil organic carbon prediction using sentinel-2 data and environmental variables in a karst trough valley area of southwest China. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2118.
- [18] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 何丙辉, 谢建平, 罗维均, 白晓永, 肖琼. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发. *生态学报*, 2016, 36(22): 7092-7097.
- [19] 巢林, 曾鑫, 欧梦菲, 黄忻婷, 张建兵, 刘艳艳. 喀斯特山区不同土地利用方式对土壤微生物生物量、酶活性及其化学计量的影响. *山地学报*, 2023, 41(1): 28-40.
- [20] Gan F L, Shi H L, Gou J F, Zhang L X, Liu C H. Effects of bedrock strata dip on soil infiltration capacity under different land use types in a karst trough valley of Southwest China. *Catena*, 2023, 230: 107253.
- [21] Luo X Z, Hou E Q, Chen J Q, Li J, Zhang L L, Zang X W, Wen D Z. Dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and stoichiometry resulting from conversion of primary broadleaf forest to plantation and secondary forest in subtropical China. *Catena*, 2020, 193: 104606.
- [22] 石海龙, 张林星, 甘凤玲, 蒲俊兵, 苟俊菲, 刘涓. 喀斯特槽谷区侵蚀坡面的土壤质量评价及障碍因子. *水土保持学报*, 2024, 38(2):

126-135.

- [23] 蒋莉沙, 甘凤玲, 谭晓红, 石海龙, 赵烜, 蒲俊兵. 岩层倾向对喀斯特槽谷区不同土地利用类型土壤分离能力的影响. 水土保持学报, 2024, 38(3): 130-139.
- [24] 张鑫钰, 何萍, 徐杰. 坡向对道路边坡生物土壤结皮组成和发育特征的影响. 生态学报, 2024, 44(19): 8459-8468.
- [25] 翁昊璐, 慈恩, 李松, 连茂山, 陈林. 重庆市黄壤的成土特点与系统分类研究. 土壤学报, 2020, 57(3): 579-589.
- [26] 刘文, 张强, 贾亚男. 夏季不同土地利用方式下的溶蚀作用研究——以重庆青木关岩溶槽谷区为例. 中国岩溶, 2012, 31(1): 1-6.
- [27] 汪啟容, 蒋勇军, 郝秀东, 乔伊娜, 张彩云, 马丽娜, 茆杨, 吕同汝, 邱菊. 孢粉记录的重庆岩溶槽谷区 700 年来植被演替与喀斯特石漠化. 生态学报, 2021, 41(9): 3634-3644.
- [28] 周玮, 王应飞, 李玲. 黔中岩溶区不同土层厚度土壤碳、氮、磷含量及其转化酶的活性. 贵州农业科学, 2017, 45(3): 76-79.
- [29] 高鑫宇, 曾献奎, 吴吉春, 苏辉东, 杜东东, 张兆丰, 金晓蕊. 兰州窑家山典型坡面土壤水分、有机质含量及抗蚀性相关关系研究. 南京大学学报: 自然科学, 2018, 54(1): 185-195.
- [30] 龙健, 赵畅, 张明江, 吴劲楠, 吴求生, 黄博聪, 张菊梅. 不同坡向凋落物分解对土壤微生物群落的影响. 生态学报, 2019, 39(8): 2696-2704.
- [31] 余春娅, 张恒彬, 赵鑫, 龙明忠, 江洪, 李晓娜. 贵州喀斯特石漠化地区苔藓结皮对土壤酶活性及碳氮磷含量的影响. 土壤通报, 2023, 54(5): 1137-1147.
- [32] 贾洪杰, 甘凤玲, 李振轮, 黄雪娇, 冯密, 冯适, 毛鑫羽. 岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响. 生态学报, 2019, 39(16): 6107-6113.
- [33] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 袁应飞, 赵龙山. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.
- [34] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.
- [35] 魏兴萍, 谢德体, 倪九派, 苏程烜. 重庆岩溶槽谷区山坡土壤的漏失研究. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 462-473.
- [36] 魏书蒙, 陈详腾, 赵光宇, 李仰龙, 董玉红, 焦如珍, 张雄清. 杉木人工林近自然改造对土壤化学性质及酶活性的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4277-4287.
- [37] 胡斯乐, 董立国, 白晓雄, 许浩, 安钰, 万海霞, 韩新生, 王月玲, 李妍, 郭永忠, 余旋. 黄土丘陵区典型土地利用类型土壤-微生物量及其生态化学计量特征. 水土保持学报, 2024, 38(3): 298-305.
- [38] 许窈孜, 叶彩红, 张耕, 张中瑞, 朱航勇, 何茜, 丁晓纲. 北江中下游不同林分类型土壤 C、N、P 生态化学计量特征. 应用生态学报, 2023, 34(4): 962-968.
- [39] 蒋芳市, 何恺文, 李慧, 林根根, 彭绍云, 岳辉, 林金石, 黄炎和. 2 种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤分离的影响. 水土保持学报, 2018, 32(6): 112-117.
- [40] 张晓东, 李忠, 张峰. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型土壤养分及活性有机碳组分研究. 水土保持研究, 2017, 24(5): 55-62.
- [41] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). Geoderma, 2013, 209: 75-85.
- [42] 马丽娜, 蒋勇军, 张彩云, 汪啟容. 岩溶槽谷区坡面土壤磷素流失过程与影响因素——以中梁山龙凤槽谷试验场为例. 水土保持学报, 2020, 34(6): 265-274.
- [43] 彭学义, 贾亚男, 蒋勇军, 吴韦, 卫敏洁. 中梁山岩溶槽谷区不同土地类型土壤生态化学计量学特征. 中国农学通报, 2019, 35(5): 84-92.
- [44] 马和平, 屈兴乐, 东主, 连玉珍. 西藏尼洋河流域不同土地利用方式对土壤微生物量碳、氮的影响. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(3): 117-125.
- [45] Duan C J, Wang Y H, Wang Q, Ju W L, Zhang Z Q, Cui Y X, Beiyuan J Z, Fan Q H, Wei S Y, Li S Q, Fang L C. Microbial metabolic limitation of rhizosphere under heavy metal stress: Evidence from soil coenzymatic stoichiometry. Environmental Pollution, 2022, 300: 118978.
- [46] 刘顺, 许格希, 陈森, 陈健, 冯秋红, 史作民. 坡向对川西亚高山土壤酶活性和微生物养分限制的影响. 应用生态学报, 2023, 34(11): 2993-3002.
- [47] Liu C, Song Y Y, Dong X F, Wang X W, Ma X Y, Zhao G Y, Zang S Y. Soil enzyme activities and their relationships with soil C, N, and P in peatlands from different types of permafrost regions, Northeast China. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 670769.
- [48] 张雅茜, 方晰, 冼应男, 王振鹏, 项文化. 亚热带区 4 种林地土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性特征. 生态学报, 2019, 39(14): 5326-5338.
- [49] 夏国栋, 朱四喜, 李武江, 赵伟, 高宁, 赵斌. 喀斯特煤矿区土地利用类型对土壤养分、酶活性及化学计量特征的影响. 中国无机分析化学, 2022, 12(6): 67-76.
- [50] 张水琳, 马丽娜, 王妍, 李成荣, 刀明宽, 刘云根. 断陷盆地不同石漠化生态修复类型下土壤碳氮磷化学计量及酶活性特征. 水土保持研究, 2023, 30(4): 69-74.