

DOI:10.12171/j.1000-1522.20180328

喀斯特断陷盆地典型林地土壤酶活性及理化性质研究

孙永磊^{1,2} 卢泽洋³ 周金星^{1,2} 庞丹波^{1,2} 刘玉国⁴ 关颖慧^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 3. 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714; 4. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】土壤酶参与土壤中各种生物化学过程, 与土壤理化性质密切相关。本文以喀斯特断陷盆地 3 种典型林地作为研究对象, 探究林地土壤酶活性与理化性质之间的关系, 为该地区植被生态恢复工作提供参考依据。【方法】本研究以喀斯特断陷盆地云南松林、桉树林和天然次生林为研究对象, 采用冗余分析方法, 探讨不同林地土壤酶活性及其与理化性质之间的关系。【结果】(1) 3 种林地土壤 pH 介于 5.47~6.03 之间, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤密度, 云南松林显著高于桉树林和次生林 ($P < 0.05$), 0~10 cm 和 10~20 cm 土层全氮含量, 桉树林显著高于云南松林和次生林 ($P < 0.05$), 0~10 cm 土层速效磷含量, 次生林显著高于云南松林和桉树林 ($P < 0.05$), 有机碳和铵态氮含量整体呈现次生林 > 云南松林 > 桉树林的规律。(2) 3 种林地 0~10 cm 土层酸性磷酸酶和脲酶活性为次生林 > 桉树林 > 云南松林, 而 10~20 cm 土层呈现相反的规律。淀粉酶、纤维素酶和蔗糖酶活性在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层均为次生林最高, 云南松林次之, 桉树林最低。此外, 林地各土层间土壤酶活性具有显著性差异 ($P < 0.05$), 土壤酶活性呈现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势。(3) 冗余分析表明, 有机碳、铵态氮、速效磷和 pH 均与蔗糖酶活性呈显著正相关关系, 而全氮与蔗糖酶活性呈显著负相关关系。土壤密度与脲酶和酸性磷酸酶活性呈负相关关系。(4) 蒙特卡洛检验表明土壤理化性质对土壤酶活性影响的重要性大小排序为: 有机碳(41.4%) > 铵态氮(32.9%) > 速效磷(24.3%) > 土壤密度(12.6%) > 全氮(7.9%) > pH(5.5%)。【结论】综上所述, 有机碳、铵态氮等是影响研究区内土壤酶活性变化的主要指标, 在断陷盆地林地土壤肥力和酶活性恢复方面, 次生林最佳, 而云南松林的优势高于桉树林。

关键词: 断陷盆地; 典型林地; 土壤酶活性; 土壤理化性质; 冗余分析

中图分类号: S714.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)02-0040-09

引文格式: 孙永磊, 卢泽洋, 周金星, 等. 喀斯特断陷盆地典型林地土壤酶活性及理化性质研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2): 40-48. Sun Yonglei, Lu Zeyang, Zhou Jinxing, et al. Soil enzyme activities and physicochemical properties of typical woodlands in karst faulted basins [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(2): 40-48.

Soil enzyme activities and physicochemical properties of typical woodlands in karst faulted basins

Sun Yonglei^{1,2} Lu Zeyang³ Zhou Jinxing^{1,2} Pang Danbo^{1,2} Liu Yugu⁴ Guan Yinghui^{1,2}

(1. Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;

4. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Soil enzymes are involved in all soil biochemical processes and are closely related to soil physicochemical properties. In this paper, three typical woodlands in karst faulted basins were studied,

收稿日期: 2018-10-16 **修回日期:** 2018-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502504、2016YFC0502500), 国家自然科学基金项目(31500583), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2014ZD006、CAFYBB2016QB020)。

第一作者: 孙永磊。主要研究方向: 石漠化区植被恢复研究。Email: yonglei_SUN@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 关颖慧, 博士, 讲师。主要研究方向: 气候变化与植被恢复研究。Email: gyhdem@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

and the relationships between soil enzyme activities and physicochemical properties of forest lands were explored, which provided a reference for vegetation ecological restoration in this area. [Method] In this study, the *Pinus yunnanensis*, *Eucalyptus maideni* and natural secondary forest in the karst faulted basin were used as research objects. The relationship between soil enzyme activities and physicochemical properties was studied using the methods of redundancy analysis. [Result] (1) The soil pH values of the three forest lands ranged from 5.47 to 6.03, and the soil bulk densities of the 10–20 cm and 20–30 cm soil layers in the *Pinus yunnanensis* forest were significantly higher than those of the *Eucalyptus maideni* forest and the secondary forest ($P < 0.05$). The contents of total nitrogen (TN) in 0–10 cm and 10–20 cm layers of *Eucalyptus maideni* forest were significantly higher than those in *Pinus yunnanensis* forest and secondary forest ($P < 0.05$). The available phosphorus (AP) content in 0–10 cm soil layer of secondary forest was significantly higher than that in *Pinus yunnanensis* forest and *Eucalyptus maideni* forest ($P < 0.05$). The contents of soil organic carbon (SOC) and ammonium nitrogen (AN) showed the law of secondary forest > *Pinus yunnanensis* forest > *Eucalyptus maideni* forest. (2) The activity of acid phosphatase and urease in the 0–10 cm soil layer of three woodlands was in the order of secondary forest > *Eucalyptus maideni* forest > *Pinus yunnanensis* forest, while the 10–20 cm soil layer showed the opposite law. The highest activities of amylase, cellulase and invertase in 0–10 cm and 10–20 cm soil layers were obtained from secondary forest, followed by *Pinus yunnanensis* forest and the lowest in *Eucalyptus maideni* forest. In addition, the soil enzyme activities in the soil layers of the forests were significantly different ($P < 0.05$), and the soil enzyme activities showed a trend of decreasing with the increase of soil depth. (3) Through the redundancy analysis of soil physicochemical properties and enzyme activities in the three forest lands, the results showed that SOC, AN, AP and pH all had a significant positive correlation with invertase activity. However, TN was significantly negatively correlated with invertase activity. Soil bulk density was negatively correlated with urease and acid phosphatase activities. (4) the Monte Carlo test showed that the order of importance of soil physicochemical properties on soil enzyme activities was: SOC (41.4%) > AN (32.9%) > AP (24.3%) > soil bulk density (12.6%) > TN (7.9%) > pH (5.5%). [Conclusion] Comprehensive analysis showed that SOC and AN were the main indicators affecting the changes of soil enzyme activity in the study area. The secondary forest is the best in the restoration of soil fertility and enzyme activity in karst faulted basins, while the advantage of *Pinus yunnanensis* forest is higher than that of *Eucalyptus maideni* forest.

Key words: faulted basin; typical woodland; soil enzyme activity; soil physicochemical property; redundancy analysis

土壤酶是土壤生态系统代谢的主要驱动力, 在土壤生态系统中碳、氮、磷循环和植物养分转化过程中扮演重要角色^[1], 常被用来反映土壤质量和生态系统功能变化^[2]。土壤酶活性与土壤理化性质密切相关, 理化性质提供了酶促反应的底物和环境, 直接影响着酶活性, 而土壤酶活性驱动土壤有机物质的合成、分解与转化、以及无机物质的氧化与还原等过程^[3]。土壤酶作为生态系统中的生化催化剂, 其活性能够反映植被恢复模式对土壤的改良作用^[4]。为此, 众多学者开展了不同研究区土壤酶活性与其理化性质的深入研究。然而, 现有研究多集中在黄土高原^[5-6]、北方土石山区^[7-8]、南方丘陵坡地^[4,9]等地区, 且研究方法多采用传统的分析方法, 如 Pearson 相关性分析、方差分析和多元线性回归分析等方法。当变量数据较多时, 上述分析方法得出的结果往往与实际情况

存在一定的偏差^[10]。数量生态学中的冗余分析方法 (redundancy analysis, RDA) 是一种非线性多元直接梯度排序法, 可同时对实体及属性进行比较并得到排序聚类效果图, 结果直观准确, 非常适合评价多变量数据之间的相互关系^[11]。

喀斯特断陷盆地集中分布在滇东-攀西, 该区长时间强烈的岩溶作用造成了水土资源不协调的地表、地下双层空间结构, 土壤持水性能差, 土层浅薄, 地形特征复杂, 致使该区域生态系统十分脆弱, 石漠化问题突出, 植被恢复困难^[12]。喀斯特独特的生境条件决定了该区土壤酶活性及其与理化性质关系都有别于其他研究区, 但以往学者在喀斯特地区主要聚焦于单一土壤酶活性对植被演替的响应^[13-14]以及人工林土壤肥力分析等方面^[15], 且研究区集中于喀斯特岩溶高原、峰丛洼地区^[16-17]。关于喀斯特断陷盆

地的相关研究鲜有报道,影响土壤酶活性的主控因子尚不清晰,严重阻碍了该区石漠化治理与植被恢复工作。因此,本文以喀斯特断陷盆地3种典型林地作为研究对象,采用冗余分析方法,探讨不同林地土壤酶活性及其与理化性质之间的关系,以期为该区域土壤生态系统结构与功能提供基础数据,同时为石漠化治理和植被恢复提供理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于西南喀斯特断陷盆地云南省建水县境内(102°54'12" E, 23°37'13" N),海拔在1 350~1 700 m之间,属南亚热带季风气候。受西南印度洋季风气候的影响,干湿季节明显,旱季为11月份至次年4月份,雨季为5—10月份。降雨季节分配极不均匀,雨季降雨量约占全年总降雨量的80%,季节性干旱严重。该地区年均气温19.8℃,年均地温20.8℃,年均相对湿度72%,年均日照时数2 322 h,

年均降雨量805 mm,全年无霜期307 d。

本研究选取云南松(*Pinus yunnanensis*)林、桉树(*Eucalyptus maideni*)林和天然次生林3种典型林地作为研究对象。除天然次生林外,其余两种均为人工造林恢复植被,是喀斯特断陷盆地的主要造林树种,恢复时间均在20年以上,土壤结构稳定且受干扰较少。其中,云南松林岩石裸露率50%,乔木、灌木和草本的平均高度分别为4.2、0.7、0.2 m,主要植被有云南松、铁仔(*Myrsine africana*)和刺芒野古草(*Arundinella setosa*)等;桉树林岩石裸露率15%,乔木、灌木和草本的平均高度分别为13.6、1.0、0.3 m,主要植被有桉树、车桑子(*Dodonaea viscosa*)和茜草(*Rubia cordifolia*)等;天然次生林岩石裸露率35%,乔木、灌木和草本的平均高度分别为3.6、0.9、0.2 m,主要植被有铁橡栎(*Quercus cocciferoides*)、清香木(*Pistacia weinmannifolia*)、假虎刺(*Carissa spinarum*)、小石积(*Osteomeles anthyllidifolia*)和多花茺子梢(*Campylotropis polyantha*)等。样地其他信息见表1。

表1 林地基本概况

Tab. 1 Basic profile of forest lands

林地 Forest land	地理坐标 Geographical coordinates	坡度 Slope degree/(°)	坡向 Slope aspect	海拔 Altitude/m	植被盖度 Vegetation coverage/%	植株密度/(株·hm ⁻²) Plant density/(tree·ha ⁻¹)	冠幅 Crown diameter/(m × m)
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	102°46'41"E, 23°40'30"N	15	西偏南 West by south	1 560	80	3 838	3.32 × 3.26
桉树林 <i>Eucalyptus maideni</i> forest	102°57'11"E, 23°42'34"N	11	北偏东 North by east	1 511	65	2 619	2.25 × 2.33
次生林 Secondary forest	102°55'03"E, 23°44'06"N	10	西偏北 West by north	1 416	75	6 756	1.84 × 1.79

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的采集及物理性质测定

为降低土壤空间变异对研究结果的影响,在3种不同林地分别设置3个30 m × 30 m的样方,每个样方的土壤样本采集按照五点混合法,采样前先移除地表未分解和半分解的凋落物,按0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 3个层次自下而上采集土壤样品,去除根系和石块等杂物,最后将同一种林地3个土壤样方的样本充分混匀后作为土样。将土样分为两部分,一部分土壤自然风干后过2 mm和0.25 mm筛,供测试土壤化学性质指标,另一部分土样经自然风干后过2 mm筛,用于土壤酶活性的测定。土壤物理指标依据中国林业科学研究院《森林土壤水分-物理性质的测定》(LY/T1215—1999)标准,采用环刀法同步测定土壤密度。采样时间为2017年8月份。

1.2.2 土壤化学性质及酶活性的测定

土壤化学指标的测定参照鲍士旦^[18]的测试方

法,pH用PHS-3C型pH计测得(土水比为1:2.5),有机碳采用重铬酸钾氧化-外加加热法,全氮采用凯氏定氮法,铵态氮按液土比为5:1,采用0.5 mg/L硫酸钾溶液浸提,滤液用流动注射分析仪测定,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法。土壤酶活性的测定参照关松荫^[19]的测试方法,其中淀粉酶、纤维素酶和蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定(pH值为6.5的缓冲液),脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定。

1.3 数据处理

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同树种、不同土层间的差异显著性,显著性水平设为 $P < 0.05$ 。土壤理化性质和土壤酶活性的关系在Canoco 4.5 for Windows软件中进行分析,首先对指标进行去趋势对应分析(DCA),若4个轴中梯度最大值大于4,适宜选择单峰模型;若小于3,适宜选择线性模型;介于3~4之间,两种模型均合适。本文

指标梯度长度最大值为 0.219, 因此采用线性模型中的冗余分析(RDA)。另外, 在 Canoco 4.5 for Windows 软件中采用蒙特卡洛检验对土壤理化性质进行重要性排序^[20]。采用 Canoco 4.5 for Windows 软件中的 t -value 双序图确定单一土壤理化性质对土壤酶活性的影响^[17]。

2 结果与分析

2.1 3 种林地对土壤理化性质的影响

研究区不同林地土壤理化性质如表 2 所示。3 种林地 0~10 cm 土层土壤密度无显著性差异, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层云南松林土壤密度均显著高于桉树林和次生林($P < 0.05$)。随着土层深度的增加, 云南松林和桉树林 0~10 cm 土层显著低于 10~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤密度($P < 0.05$), 但次生林各土层间差异不显著。3 种林地土壤 pH 介于 5.47~6.03 之间, 云南松林和次生林间土壤 pH 无

显著性差异, 但桉树林 0~10 cm 和 10~30 cm 土层土壤 pH 均显著低于云南松林和次生林($P < 0.05$)。各林地均表现为土壤养分含量随土层深度增加而递减的趋势。有机碳和铵态氮含量整体呈现出次生林 > 云南松林 > 桉树林的规律, 0~10 cm 土层有机碳含量云南松林显著低于桉树林和次生林($P < 0.05$), 10~20 cm 土层有机碳含量次生林显著高于云南松林和桉树林($P < 0.05$), 20~30 cm 土层 3 种林地有机碳含量无显著性差异。次生林铵态氮含量均显著高于云南松林和桉树林($P < 0.05$)。另外, 桉树林 0~10 cm 和 10~20 cm 土层全氮含量均显著高于云南松林和次生林($P < 0.05$), 20~30 cm 土层 3 种林地间无显著性差异。次生林 0~10 cm 土层速效磷含量显著高于云南松林和桉树林($P < 0.05$), 10~20 cm 土层 3 种林地间速效磷含量无显著性差异, 但云南松林 20~30 cm 土层速效磷含量显著低于桉树林和次生林($P < 0.05$)。

表 2 3 种林地不同土层深度理化性质

Tab. 2 Physicochemical properties of different soil depths in three forest lands

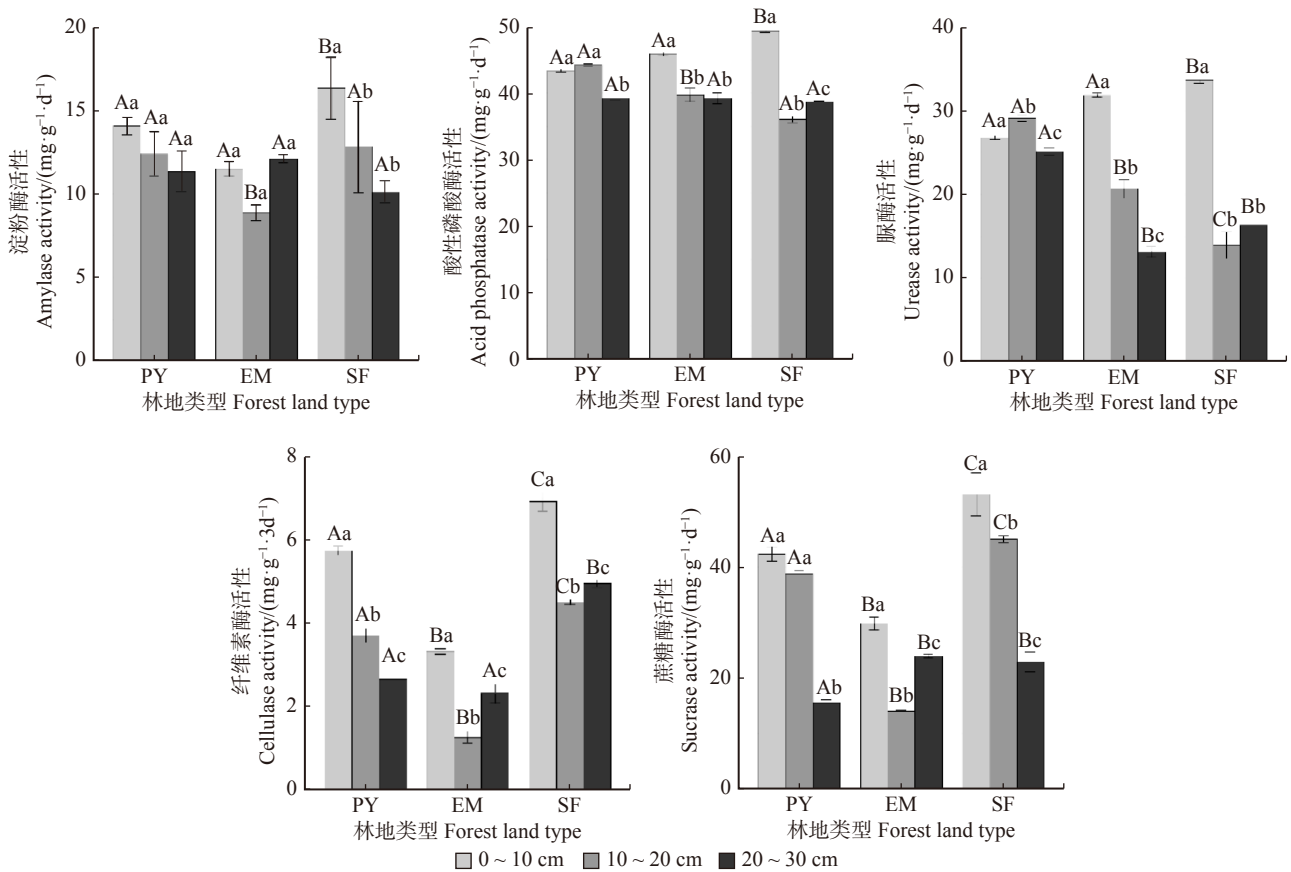
林地 Forest land	土层深度 Soil depth/cm	土壤密度 Soil bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	pH	有机碳 Organic carbon/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	0~10	1.07 ± 0.05Aa	5.99 ± 0.09Aa	32.50 ± 5.41Aa	5.74 ± 1.72Aa	5.02 ± 0.07Aa	1.01 ± 0.17Aa
	10~20	1.25 ± 0.02Ab	5.98 ± 0.07Aa	25.05 ± 1.84Aab	3.32 ± 0.05Aa	4.91 ± 0.16Aa	1.00 ± 0.30Aa
	20~30	1.28 ± 0.05Ab	5.99 ± 0.05Aa	15.22 ± 1.32Ab	2.66 ± 0.34Aa	3.93 ± 0.08Aa	0.67 ± 0.25Aa
桉树林 <i>Eucalyptus maideni</i> forest	0~10	1.02 ± 0.02Aa	5.47 ± 0.16Ba	42.07 ± 4.34Ba	4.44 ± 1.25Aa	17.15 ± 0.21Ba	1.13 ± 0.05Aa
	10~20	1.14 ± 0.06Bb	5.83 ± 0.08Aa	21.86 ± 2.05Ab	3.57 ± 0.35Aa	10.93 ± 0.30Bb	0.97 ± 0.10Aa
	20~30	1.18 ± 0.04Bb	5.64 ± 0.26Ba	10.94 ± 1.91Ab	2.62 ± 0.26Aa	4.58 ± 0.05Ac	1.63 ± 0.90Ba
次生林 Secondary forest	0~10	1.09 ± 0.09Aa	5.95 ± 0.09Aa	46.33 ± 7.55Ba	24.35 ± 3.96Ba	6.44 ± 0.12Aa	2.33 ± 0.18Ba
	10~20	1.13 ± 0.07Ba	5.88 ± 0.13Aa	35.04 ± 3.63Ba	14.69 ± 1.88Bb	4.25 ± 0.09Aa	1.88 ± 0.50Aa
	20~30	1.18 ± 0.09Ba	6.03 ± 0.04Aa	17.05 ± 3.16Ab	10.85 ± 1.83Bb	5.30 ± 0.04Aa	1.76 ± 0.31Ba

注: 数据为均值 ± 标准差, $n = 3$ 。同列同一树种不同小写字母表示均值间差异显著($P < 0.05$), 同列同一土层不同大写字母表示均值间差异显著($P < 0.05$), 下同。Notes: the data in the table are mean ± standard deviation, $n = 3$. Difference between the mean values of the same tree species in different lowercase letters indicates a significant difference ($P < 0.05$), and the difference between the mean values in the same soil layer in the same column indicates a significant difference ($P < 0.05$). The same below.

2.2 3 种林地对土壤酶活性的影响

研究区不同土层深度土壤酶活性变化如图 1 所示。3 种林地 0~10 cm 和 10~20 cm 土层淀粉酶、纤维素酶和蔗糖酶活性均为次生林最高, 云南松林次之, 桉树林最低, 20~30 cm 土层 3 种酶活性变化无明显规律。对淀粉酶活性而言, 次生林 0~10 cm 土层显著高于 10~20 cm 和 20~30 cm 土层($P < 0.05$), 而云南松林和桉树林各土层间淀粉酶活性变化无显著性差异。林地各土层间纤维素酶和蔗糖酶活性有显著性差异($P < 0.05$)。3 种林地 0~10 cm 土层酸性磷酸酶和脲酶活性为次生林 > 桉树

林 > 云南松林, 而各林地 10~20 cm 土层表现出相反的趋势。酸性磷酸酶在 3 种林地 20~30 cm 土层的活性相当, 在 38.69~39.25 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 之间, 而脲酶活性在 20~30 cm 土层为云南松林 > 次生林 > 桉树林, 依次为 25.15、16.3 和 13.15 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 。云南松林随着土层深度的增加酸性磷酸酶和脲酶活性表现出先上升后下降的规律, 而次生林则表现出先下降后上升的规律。对桉树林而言, 酸性磷酸酶和脲酶活性随着土层深度的增加而降低, 且各土层间酶活性有显著性差异($P < 0.05$)。



PY. 云南松林 *Pinus yunnanensis* forest; EM. 桉树林 *Eucalyptus maideni* forest; SF. 次生林 Secondary forest

图1 3种林地不同土层深度土壤酶活性变化

Fig. 1 Changes of soil enzyme activities in different soil depths of three forest lands

2.3 3种林地土壤酶活性与理化性质的关系

2.3.1 土壤酶活性与理化性质 RDA 排序

土壤酶活性与理化性质 RDA 排序的特征值及累计解释量见表3。从表3可以看出,土壤酶活性特征解释量在第I轴和第II轴分别为65.7%和15.3%,即前两轴土壤理化性质累积解释土壤酶活性特征的81%。另外,土壤酶活性特征与土壤理化性质关系的累计解释量在前两轴达到了95.2%,表明前两轴能够反映土壤酶活性与土壤理化性质关系的绝大部分信息,并且主要由第I轴决定。

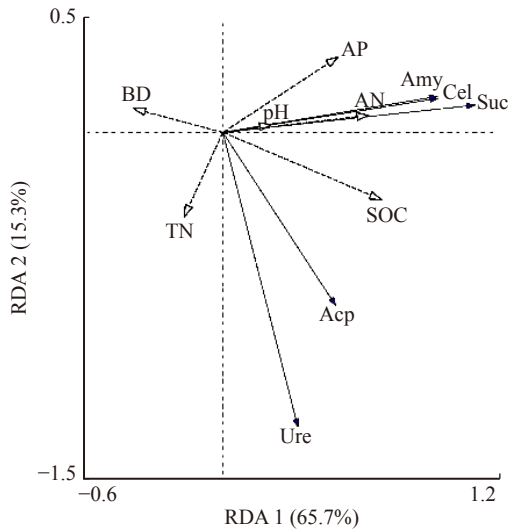
图2为土壤酶活性与土壤理化性质的二维排序

图,空心箭头代表土壤理化性质指标,实心箭头代表土壤酶活性指标,箭头连线长度和相应夹角余弦值代表土壤理化性质与酶活性的相关性大小,箭头连线越长、余弦值绝对值越大,则说明某一土壤理化性质与酶活性的相关性越大。由图2可以看出,土壤理化性质对不同土壤酶活性的影响程度有很大差异。有机碳、铵态氮的箭头连线较长,且与5种土壤酶的夹角均为锐角,说明二者与土壤酶均为正相关关系。由土壤密度与5种土壤酶之间的夹角均为钝角,判断出其与土壤酶均为负相关关系。全氮与脲酶和酸性磷酸酶呈正相关关系,与淀粉酶、纤维素酶

表3 土壤酶活性与理化性质 RDA 排序的特征值及累计解释量

Tab. 3 Eigenvalues and cumulative variances of RDA ordination of soil enzyme activities and physicochemical properties

排序轴 Sorting axis	第I轴 Axis I	第II轴 Axis II	第III轴 Axis III	第IV轴 Axis IV
土壤酶活性特征解释量 Soil enzyme activity eigenvalues	0.657	0.153	0.032	0.008
土壤酶活性特征与理化性质相关 Soil enzyme activity and physicochemical properties correlations	0.961	0.855	0.711	0.841
土壤酶活性特征累计解释量 Cumulative variances of soil enzyme activity/%	65.7	81.0	84.2	85.0
土壤酶活性特征-理化性质关系累计解释量 Cumulative variances of correlations/%	77.3	95.2	99.0	99.9
典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues		0.851		
总特征值 Sum of all eigenvalues		1.000		



Suc. 蔗糖酶; Cel. 纤维素酶; Ure. 脲酶; Acp. 酸性磷酸酶; Amy. 淀粉酶; BD. 土壤密度; SOC. 有机碳; AN. 铵态氮; TN. 全氮; AP. 速效磷。下同。Suc, sucrase; Cel, cellulase; Ure, urease; Acp, acid phosphatase; Amy, amylase; BD, soil bulk density; SOC, soil organic carbon; AN, ammonium nitrogen; TN, total nitrogen; AP, available phosphorus. The same below.

图 2 土壤酶活性与理化性质的冗余度分析

Fig. 2 Redundancy analysis of soil enzyme activities and physicochemical properties

和蔗糖酶呈负相关关系。速效磷与淀粉酶、纤维素酶和蔗糖酶夹角很小，呈正相关关系，但与脲酶和酸性磷酸酶的夹角接近直角，相关性不明显。pH 箭头连线最短，但与 5 种土壤酶的夹角均为锐角，说明其与 5 种土壤酶呈正相关关系。另外，通过对土壤理

化性质进行蒙特卡洛检验排序，得出土壤理化性质对土壤酶活性影响的重要性排序为：有机碳 > 铵态氮 > 速效磷 > 土壤密度 > 全氮 > pH。各土壤理化性质指标对土壤酶活性差异性大小的解释量依次为 41.4%、32.9%、24.3%、12.6%、7.9% 和 5.5%。

2.3.2 单一土壤理化性质对土壤酶活性的影响

采用 Canoco 4.5 中的 *t*-value 双序图进一步分析单一理化性质对土壤酶活性的影响，若土壤酶活性箭头连线完全落入黑色线圈内，则表示土壤酶活性与该理化性质呈显著正相关关系，若土壤酶活性箭头连线完全落入灰色线圈内，则表示土壤酶活性与该理化性质呈显著负相关关系。图 3a 表示有机碳与土壤酶活性关系，蔗糖酶的箭头连线完全落入黑色线圈内，说明有机碳与蔗糖酶活性呈显著正相关关系，其余 4 种土壤酶的箭头连线均穿过黑色线圈，与有机碳均呈正相关关系。铵态氮与土壤酶活性的关系如图 3b 所示，铵态氮与蔗糖酶活性呈显著正相关关系，与淀粉酶、纤维素酶和酸性磷酸酶活性呈正相关关系。对速效磷进行分析(图 3c)得出，速效磷与蔗糖酶活性呈显著正相关关系，与淀粉酶和纤维素酶活性呈正相关关系，与脲酶活性呈负相关关系。由图 3d 可知，脲酶和酸性磷酸酶的箭头连线均穿过灰色线圈，说明土壤密度与这两种土壤酶活性均呈负相关关系。图 3e 表示全氮与土壤酶活性关系，全氮与蔗糖酶活性呈显著负相关关系，与淀粉酶和纤维素酶活性呈负相关关系，与脲酶活性呈正相关关

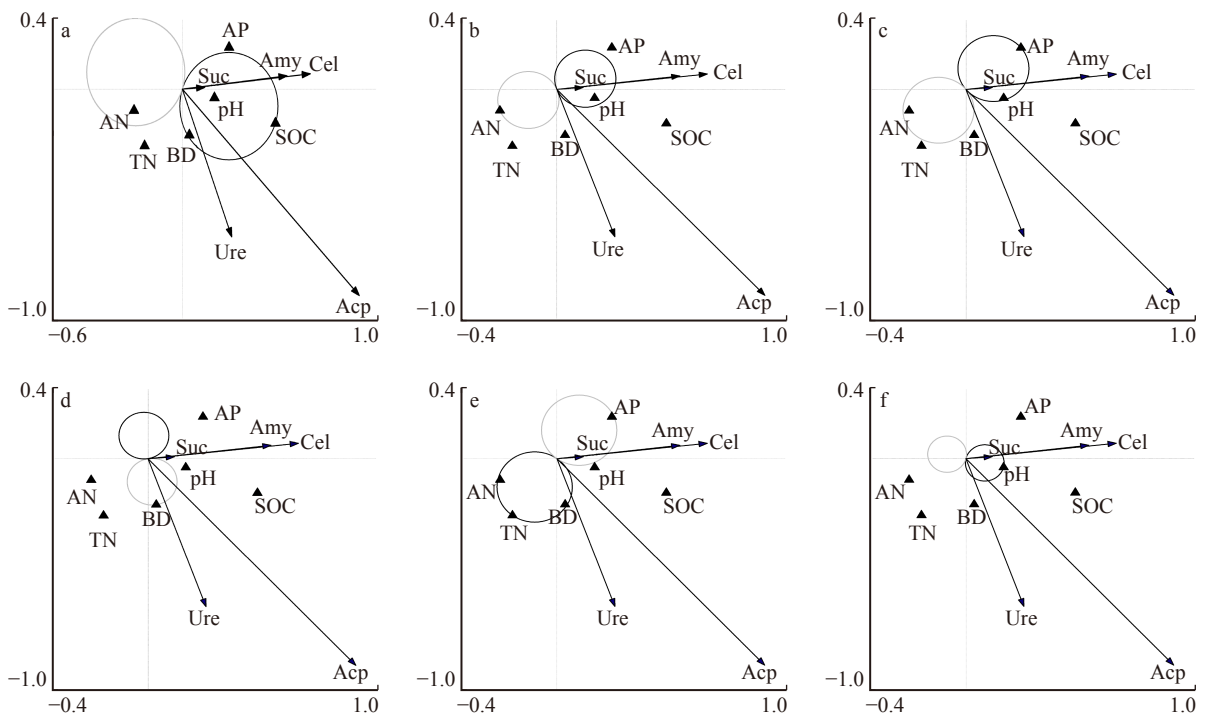


图 3 单一土壤理化性质对酶活性影响的 *t*-value 检验

Fig. 3 The *t*-value for single factor influencing characteristics of soil enzyme activities

系。pH与土壤酶活性的关系如图3f所示，pH与蔗糖酶活性呈显著正相关关系，与其余4种土壤酶活性均呈正相关关系。

3 讨 论

纤维素酶是表征土壤碳素循环速度的重要指标^[21]。蔗糖酶活性可作为评价土壤熟化程度和肥力水平的重要指标，一般情况下，土壤有机质含量越高，蔗糖酶活性越强^[22]。本研究发现，纤维素酶和蔗糖酶活性在3种林地间具有显著性差异($P < 0.05$)，均表现为次生林最高，云南松林次之，桉树林最低(图1)，这与3种林地间的有机碳含量规律一致(表2)，说明纤维素酶和蔗糖酶能够较敏感的反映不同植被恢复模式对土壤的影响。靳振江等^[23]在桂林喀斯特地区研究表明，蔗糖酶活性与磷酸酶活性受土地利用方式(稻田湿地、天然湿地和旱地表层)的影响较为显著。耿玉清等^[24]研究发现，针阔树种混交的天然林较人工纯林更有利于相关土壤酶活性的提高。不同林地类型的植被根系及凋落物腐殖质的种类与质量各异，影响土壤生态过程，导致土壤酶活性不同，进而说明土壤酶活性的差异可以反映不同植被恢复模式对土壤的影响^[25]。另外，3种林地各土层间土壤酶活性具有显著性差异($P < 0.05$)，土壤酶活性均呈现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势，权国玲等^[26]也得出相似的结论。林地土壤酶主要以化学或物理的形式吸附于土壤有机或无机颗粒上，而这些土壤养分含量随土层深度增加而降低；植物的细根系作为根系最活跃部分，其分泌物可促使相关酶进入土壤，而细根系主要分布在土壤表层；再加上随着土层深度的增加，土壤的水分含量及土壤通气性呈下降趋势，故导致土壤酶活性随土层深度增加而降低^[27]。

土壤碳、氮和磷等养分元素的存在形态以及含量等与土壤酶活性密切相关^[28]，pH则通过影响土壤微生物群落的组成来影响土壤酶活性^[17]。本研究发现，有机碳、铵态氮、速效磷和pH与蔗糖酶活性均呈显著正相关关系，而全氮与蔗糖酶活性呈显著负相关关系。杨皓等^[29]、裴丙等^[8]学者研究发现，蔗糖酶与土壤有机质、水解氮、速效磷、速效钾之间存在着显著正相关性，但是杨宁等^[4]在紫色土丘陵坡地研究表明蔗糖酶活性与土壤有机碳、全氮、全磷、速效钾呈极显著正相关关系，与pH值呈极显著负相关关系。张海鑫等^[6]对黄土高原区3种人工林(刺槐、油松和侧柏)和两种天然次生林(桦树和辽东栎)林下土壤研究发现，蔗糖酶与土壤有机碳、全氮呈极显著正相关关系，与pH呈显著负相关关系，与本文研

究结果有所差异。另外，本研究表明，有机碳、铵态氮等是影响土壤酶活性变化的主要指标，这与相关学者在喀斯特峰丛洼地的研究结果相似^[16,23]，但一些学者在北方土石山区^[7-8]、滨海盐碱地^[10]等地区研究发现，土壤pH和含水率也是影响土壤酶活性变化的主要指标。诸多学者对于土壤理化性质和酶活性间的关系进行了大量研究，但不同研究得出的影响酶活性的主导因子不尽相同^[17]，这可能是由于不同地区、不同植被类型的土壤水热状况、理化性状以及微生物区系各异，从而导致土壤酶活性与理化因子关系存在较大差异，所以结合当地土壤水热状况及微生物区系来探讨土壤酶活性与理化性质关系是今后值得进一步研究的方向。

4 结 论

(1)研究区各林地间土壤理化性质存在显著差异，云南松林土壤密度显著高于桉树林和次生林($P < 0.05$)，桉树林0~10 cm和10~20 cm土层全氮含量均显著高于云南松林和次生林($P < 0.05$)。另外，有机碳和铵态氮含量整体呈现出次生林>云南松林>桉树林的规律，各林地土壤养分含量均表现为随土层深度增加而递减的趋势，呈现“表聚型”特征。

(2)纤维素酶和蔗糖酶活性在3种林地间具有显著性差异($P < 0.05$)，说明这2种土壤酶能够敏感的反映不同植被恢复模式对土壤的影响，但淀粉酶、酸性磷酸酶和脲酶活性在3种林地间差异性不显著。云南松林随着土层深度的增加酸性磷酸酶和脲酶活性表现出先上升后下降的规律，而次生林则表现出先下降后上升的规律，对于桉树林而言，酸性磷酸酶和脲酶活性均随着土层深度的增加而降低。

(3)通过对3种林地的土壤理化性质及酶活性进行冗余分析，结果表明有机碳、铵态氮、速效磷和pH均与蔗糖酶活性呈显著正相关关系，与淀粉酶和纤维素酶为正相关关系。而全氮与蔗糖酶活性呈显著负相关关系，与淀粉酶和纤维素酶活性呈负相关关系。土壤密度与脲酶和酸性磷酸酶活性呈负相关关系。

(4)蒙特卡洛检验表明，3种林地中土壤理化性质对土壤酶活性影响的重要性大小排序为：有机碳>铵态氮>速效磷>土壤密度>全氮>pH。其中，有机碳、铵态氮等是影响研究区内土壤酶活性变化的主要指标，林地土壤酶活性恢复程度依次为次生林>云南松林>桉树林。因此，在断陷盆地林地土壤肥力和酶活性恢复方面，次生林最佳，而云南松林的优势高于桉树林。

参 考 文 献

- [1] 张鹏, 赵洋, 黄磊, 等. 植被重建对露天煤矿排土场土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2715–2723.
Zhang P, Zhao Y, Huang L, et al. Effect of revegetation on soil extracellular enzyme activity in the dumping site of an open-pit coal mine in Heidaigou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): 2715–2723.
- [2] Banerjee S, Bora S, Thrall P H, et al. Soil C and N as causal factors of spatial variation in extracellular enzyme activity across grassland-woodland ecotones[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 105: 1–8.
- [3] Song Y Y, Song C C, Yang G S, et al. Changes in labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after marshland reclamation and restoration in the Sanjiang Plain in northeast China[J]. Environmental Management, 2012, 50(3): 418–426.
- [4] 杨宁, 杨满元, 雷玉兰, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 575–580.
Yang N, Yang M Y, Lei Y L, et al. Response of soil enzyme activities to re-vegetation on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(4): 575–580.
- [5] 张笑培, 杨改河, 任广鑫, 等. 黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 64–68.
Zhang X P, Yang G H, Ren G X, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in the gully region of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 64–68.
- [6] 张海鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 子午岭典型植被凋落叶-土壤养分与酶活性特征[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2262–2270.
Zhang H X, Zeng Q C, An S S, et al. Soil enzyme activities, soil and leaf litter nutrients of typical vegetation in Ziwuling Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2262–2270.
- [7] 孔爱辉, 耿玉清, 余新晓. 北京低山区栓皮栎林和油松林土壤酶活性研究[J]. 土壤, 2013, 45(2): 264–270.
Kong A H, Geng Y Q, Yu X X. Soil enzyme activities under *Quercus variabilis* and *Pinus tabulaeformis* forests in lower mountain area, Beijing[J]. Soils, 2013, 45(2): 264–270.
- [8] 裴丙, 朱龙飞, 梁红艳, 等. 太行山低山丘陵区不同人工林型对土壤性质及酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 190–195.
Pei B, Zhu L F, Liang H Y, et al. Effect of different plantation types on soil properties and enzyme activity in the hilly region of Taihang Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(10): 190–195.
- [9] 文东新, 杨宁, 杨满元. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复模式对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(6): 1241–1247.
Wen D X, Yang N, Yang M Y. Effect of different re-vegetation pattern on soil microbial biomass and enzyme activities in purple soils of sloping-land in Hengyang, Hunan Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(6): 1241–1247.
- [10] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1404–1412.
Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, et al. Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to different aged coastal reclamation area, eastern China[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1404–1412.
- [11] Ouyang W, Song K Y, Wang X L, et al. Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics[J]. Ecological Indicators, 2014, 45: 579–589.
- [12] 刘从强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Liu C Q. Biogeochemical processes and surface material cycles: cyclogenesis of karst soil and vegetation systems in southwest China[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [13] 刘璐, 陈浩, 李德军, 等. 喀斯特山区植被恢复过程中土壤水解酶和氧化酶活性的响应[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3528–3534.
Liu L, Chen H, Li D J, et al. Changes of soil hydrolytic and oxidized enzyme activities under the process of vegetation restoration in a karst area, southwest China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(9): 3528–3534.
- [14] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5789–5796.
Liu S J, Zhang W, Wang K L, et al. Soil urease activity during different vegetation successions in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5789–5796.
- [15] 戎宇, 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特山地不同人工林土壤特性差异与综合评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 108–112.
Rong Y, Liu C G, Xue J H. Different and integrated evaluation on soil fertility properties of different plantations in karst area[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 35(2): 108–112.
- [16] 叶莹莹, 刘淑娟, 张伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被演替对土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 6974–6982.
Ye Y Y, Liu S J, Zhang W, et al. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity along a vegetation restoration gradient in a karst peak-cluster depression area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 6974–6982.
- [17] 罗攀, 陈浩, 肖孔操, 等. 地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2577–2585.
Luo P, Chen H, Xiao K C, et al. Effects of topography, tree species and soil properties on soil enzyme activity in karst regions[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2577–2585.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Analysis of soil agrochemical[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.
Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1983.
- [20] 庞燕, 项颂, 储昭升, 等. 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4005-4012.
Pang Y, Xiang S, Chu Z S, et al. Relationship between agricultural land and water quality of inflow river in Erhai Lake Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 4005-4012.
- [21] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7.
Liu S J, Xia X, Chen G M, et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 1-7.
- [22] 秦嘉海, 张勇, 赵芸晨, 等. 祁连山黑河上游不同退化草地土壤理化性质及养分和酶活性的变化规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 335-346.
Qin J H, Zhang Y, Zhao Y C, et al. Soil physicochemical properties and variations of nutrients and enzyme activity in the degrading grasslands in the upper reaches of the Heihe River, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 335-346.
- [23] 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 等. 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 335-341.
Jin Z J, Zeng H H, Li Q, et al. Comparisons of microbial numbers, biomasses and soil enzyme activities between paddy field and dryland origins in karst cave wetland[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 335-341.
- [24] 耿玉清, 戴伟, 余新晓, 等. 森林经营对土壤酶活性影响的研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 132-138.
Geng Y Q, Dai W, Yu X X, et al. Research advances for the effects of forest management on soil enzyme activity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 132-138.
- [25] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2678-2685.
Zhu M L, Gong L, Zhang L L. Soil enzyme activities and their relationships to environmental factors in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. Environmental Science, 2015, 36(7): 2678-2685.
- [26] 权国玲, 谢开云, 仝宗永, 等. 复合微生物肥料对羊草草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 27-36.
Quan G L, Xie K Y, Tong Z Y, et al. The effect of compound bio-fertilizers on soil physical and chemical properties and soil enzyme activity in *Leymus chinensis* steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(2): 27-36.
- [27] 曹小玉, 李际平, 张彩彩, 等. 不同龄组杉木林土壤有机碳和理化性质的变化特征及其通径分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 200-205.
Cao X Y, Li J P, Zhang C C, et al. Variation of contents of organic carbon and physic-chemical properties of soil and path analysis for their relations in different age-group Chinese fir plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 200-205.
- [28] Burke D J, Weintraub M N, Hewins C R, et al. Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(4): 795-803.
- [29] 杨皓, 范明毅, 李婕羚, 等. 喀斯特山区无籽刺梨种植基地土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 28-37.
Yang H, Fan M Y, Li J L, et al. relationship between soil enzyme activities and fertility factors from *Rosa sterilis* S. D. shi planting bases located in karst mountain region[J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 28-37.

(责任编辑 范娟
责任编辑 孙向阳)