

# 岩溶生态系统土壤酶活性的时空动态及其与土壤肥力的关系

——以桂林丫吉村岩溶试验场为例

李 为<sup>1</sup>, 余龙江<sup>1</sup>, 李 涛<sup>2</sup>, 项 俊<sup>1,3</sup>, 吴 耿<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学生命科学与技术学院资源生物学与生物技术研究所, 湖北 武汉 430074; 2. 三峡大学化学与生命科学学院, 湖北宜昌 443003; 3. 黄冈师范学院生命科学与工程学院, 湖北 黄州 438000)

**摘 要:** 以桂林丫吉村岩溶试验场为考察基地, 研究了不同地貌部位(洼地、坡地和垭口)土壤酶活性(转化酶、蛋白酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶)的时空变化特征, 结果表明, 不同地貌部位土壤酶活性存在明显差异, 洼地和垭口土壤水解酶类活性较高, 与这两个地貌部位微生物数量较多的结果相对应。试验场不同地貌部位土壤水解酶类活性随土壤深度的增加而逐渐降低, 但对于不同的酶和不同的地貌部位, 酶活性降低的幅度有所差异。各地貌部位各层次土壤过氧化氢酶活性差别不大。4种水解酶活性的季节变化规律一般是春季上升, 夏季或秋季为最高。此外, 土壤水解酶类活性与不同地貌部位的土壤养分水平密切相关, 一般与土壤有机质、全 N、有效 N、速效 P 之间呈显著或极显著正相关, 这既说明土壤酶活性在一定程度上反映了岩溶土壤肥力水平的高低, 可作为评价岩溶土壤肥力水平的重要指标之一, 而且也为评价西南岩溶生态系统脆弱程度提供了新的生物学方面的指标, 为不同地貌部位的土地利用方式和植被重建模式提供了一定的理论依据。

**关键词:** 岩溶生态系统; 不同地貌部位; 土壤酶; 土壤肥力

中图分类号: S154.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)01-0260-07

## Seasonal and Spatial Dynamics of Soil Enzyme Activities and Its Relationship to Soil Fertility in Karst Ecosystem—A Case Study of Guilin Yaji Karst Experimental Site

LI Wei<sup>1</sup>, YU Long-jiang<sup>1</sup>, LI Tao<sup>2</sup>, XIANG Jun<sup>1,3</sup>, WU Geng<sup>1</sup>

(1. Institute of Resource Biology and Biotechnology, College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Chemistry and Life Science, China Three Gorges University, Yichang 443003, China; 3. College of Life Science and Engineering, Huanggang Normal University, Huangzhou 438000, China)

**Abstract:** The seasonal and spatial variation of soil enzyme activities (invertase, protease, urease, alkaline phosphatase and catalase) at different geomorphological positions (Depression, Slope and Saddle) were investigated in Guilin Yaji Karst Experimental Site, China. There were obvious differences in enzyme activities among different geomorphological positions. Activities of soil hydrolytic enzymes were higher at Depression and Saddle, which was consistent with the higher amount of soil microbes in these two geomorphological positions. The hydrolytic enzyme activities fell gradually with the increase of soil depth, which varied with different enzymes and with different geomorphological positions. There was slight difference in soil catalase activities for every geomorphological position and every soil layer. Generally, the activities of four hydrolytic enzymes rose in spring and reached the highest level in summer or autumn. The enzyme activities correlated significantly with soil nutrients such as soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen and available phosphorus in different geomorphological positions. These results illuminated that the soil enzyme activities could not only be used as one of the important indicators in evaluating karst soil fertility level, but also provide a new biological index for evaluating the fragility of karst ecosystem in Southwest China, and provide a certain theoretical basis for land use mode at different geomorphological positions.

**Keywords:** karst ecosystem; different geomorphological positions; soil enzyme; soil fertility

收稿日期: 2007-04-11

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90202016)

作者简介: 李 为(1969—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源生物技术、地质生物学。E-mail: hulwei\_009@163.com

通讯联系人: 余龙江 E-mail: yulongjiang@hust.edu.cn

关于岩溶生态环境方面的研究过去主要从地质背景、岩石土壤化学及人类活动等角度来进行。目前,越来越多的研究者开始关注岩溶生态系统中土壤微生物和土壤酶的研究。例如,何跃军等<sup>[1]</sup>研究了重庆市北碚区境内石灰岩退化生态系统不同恢复阶段的土壤酶活性;任京辰等<sup>[2]</sup>研究了贵州岩溶贞丰-关岭石山地区退化地、农用地和恢复地的土壤酶活性。然而,对于岩溶生态系统土壤微生物和酶活性的生态特征及其生态效应的研究仍然很缺乏。土壤酶参与了土壤中一切复杂的生物化学过程,包括腐殖质的合成和分解、有机化合物和动植物残体的分解、土壤养分的固定与释放,以及氧化还原反应等<sup>[3-5]</sup>。因此土壤酶在土壤的发生和发育,以及肥力形成过程中起着重要作用。对土壤酶活性的研究将有助于了解土壤肥力及演变<sup>[6-8]</sup>。土壤中水解酶类(转化酶、脲酶、蛋白酶)活性的变化与土壤有机质的分解过程强度相关,而氧化酶类(过氧化氢酶)的活性变化与土壤有机质再合成过程的强度相关<sup>[9]</sup>。

本文以桂林岩溶试验场为例,对峰丛洼地岩溶生态系统不同地貌部位土壤中的转化酶、脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶活性进行研究,并分析它们同某些土壤养分之间的相关关系,以探讨不同地貌部位的土壤酶活性和土壤养分之间是否存在明显的差异,利用这两类酶活性的变化关系来解释土壤中物质的分解与腐殖质化强弱程度,为不同地貌部位的土地利用方式提供科学数据。

## 1 研究区概况

桂林岩溶试验场位于桂林东南8 km处的丫吉村附近,处于典型的峰丛洼地与峰林平原交界地带,最高海拔为650 m,而附近的峰林平原的海拔高度为150 m。桂林为亚热带季风区,多年平均气温为18.8℃,多年平均降雨量为1 915 mm,其中70.32%的降雨量分配在4~8月。构成试验场的岩溶地层为上泥盆统融县组(D<sub>3r</sub>),主要岩石成分为浅灰色致密质纯中厚层泥亮晶颗粒石灰岩。场区土壤分布不均匀,坡地一般在30~150 cm,洼地在1~2 m,而垭口在1 m左右,土壤基本上属棕色石灰土,按土壤系统分类为钙质湿润淋溶土<sup>[9]</sup>。场区植被覆盖度为60%~80%,主要以灌木和草本为主,黄荆在植被中占据着绝对的地位,是群落的建群种和优势种。垭口植物主要有黄荆(*Vitex negundo*)、欆木(*Loropetalum chinense*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)等;坡地植物主要有黄荆、欆木、金樱子(*R. laevigata Michx*)、九龙藤(*B. cham-*

*pioni Benth*)等;洼地植物主要有黄荆、欆木、老虎刺(*Pterolobium punctatum*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)等。

## 2 材料与方法

### 2.1 土壤样品的采集

土壤样品采自桂林丫吉村岩溶试验场,具体时间为2003年2月28日、7月4日、11月2日和2004年1月16日,分别代表4个季节,每个季节都取3个系列的样本,分别为场区1#洼地、坡地、垭口3个不同地貌部位的土壤。在每个地貌部位,随机设置3个取样点(即3个重复),分别在每个取样点采集0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm深度的土样,将同一样地3个重复取样点的土样按相同层次等比例混匀,将混合样保鲜带回室内进行分析。

### 2.2 土壤酶活性分析方法

参照《土壤酶及其研究法》<sup>[9]</sup>,土壤蛋白酶活性的测定采用茚三酮比色法,转化酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,脲酶采用靛酚比色法,过氧化氢酶采用容量法。

### 2.3 土壤肥力基本参数的测定

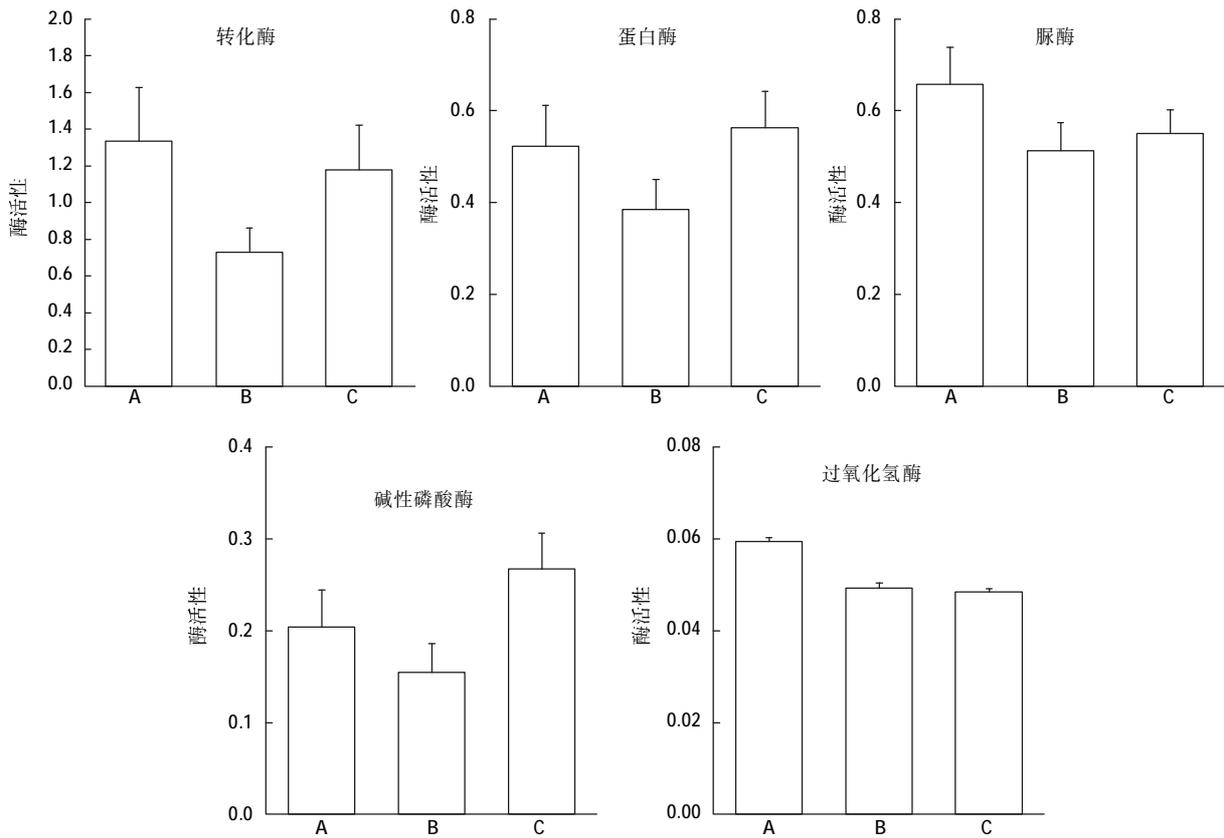
参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[10]</sup>,土壤含水量采用烘干法,pH值采用酸度计法,有机质含量采用重铬酸钾氧化法,全氮含量采用半微量凯氏定氮法,有效N含量采用碱解扩散法,速效P含量采用钼锑抗比色法。不同地貌部位土壤的肥力状况参见参考文献[11]。

## 3 结果与分析

### 3.1 试验场不同地貌部位土壤酶活性的差异

由图1可以看出,试验场土壤5种酶平均活性随地貌部位的变化具有一定的规律性,除过氧化氢酶活性外,其余4种水解酶活性均为坡地最低,其中对于转化酶和脲酶,酶活性呈现为洼地>垭口>坡地;对于蛋白酶和碱性磷酸酶,酶活性呈现为垭口>洼地>坡地。不同酶活性差异幅度不同,差异幅度较大的是碱性磷酸酶和转化酶,其中洼地和垭口的碱性磷酸酶活性分别比坡地高30.8%和70.5%,转化酶活性分别比坡地高82.6%和60.2%。差异幅度较小的是蛋白酶和脲酶,其中洼地和垭口的蛋白酶活性分别比坡地高35.8%和45.7%,洼地和垭口的脲酶活性分别比坡地高28.1%和7.41%。过氧化氢酶活性是洼地最高,坡地和垭口相差很小。

### 3.2 试验场土壤酶活性的垂直变化



(1)A: 洼地;B: 坡地;C: 垭口;(2)各种酶活性单位为(以下同):转化酶( $\text{mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot (\text{g 干土} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,  $37^\circ\text{C}$ );

蛋白酶( $\text{mg NH}_2\text{-N} \cdot (\text{g 干土} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,  $30^\circ\text{C}$ );脲酶( $\text{mg NH}_3\text{-N} \cdot (\text{g 干土} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,  $37^\circ\text{C}$ );

碱性磷酸酶( $\text{mg Phenol} \cdot (\text{g 干土} \cdot \text{h})^{-1}$ ,  $37^\circ\text{C}$ ); 过氧化氢酶( $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4 \text{ mL} \cdot (\text{g 干土} \cdot \text{min})^{-1}$ )

(1)A: Depression; B: Slope; C: Saddle; (2)Units of activities of various enzymes (the same as follows):

Invertase ( $\text{mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot (\text{g 干土} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,  $37^\circ\text{C}$ ); protease ( $\text{mg NH}_2\text{-N} \cdot (\text{g 干土} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ); urease ( $\text{mg NH}_3\text{-N} \cdot (\text{g 干土} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,  $37^\circ\text{C}$ );

alkaline phosphatase ( $\text{mg Phenol} \cdot (\text{g 干土} \cdot \text{h})^{-1}$ ,  $37^\circ\text{C}$ ); catalase ( $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4 \text{ mL} \cdot (\text{g 干土} \cdot \text{min})^{-1}$ )

图 1 试验场不同地貌部位土壤酶平均活性的差异

Figure 1 Mean activities of soil enzymes at different geomorphological positions at the Experimental Site

试验场不同地貌部位土壤 5 种酶活性的垂直变化如图 2 所示。从图 2 可知, 试验场不同地貌部位土壤水解酶类活性具有明显一致的垂直变化规律, 即随土壤深度的增加, 酶活性逐渐降低, 但对于不同的酶和不同的地貌部位, 酶活性降低的幅度有所差异。以 3 个地貌部位酶活性的平均值进行比较, 转化酶随土壤深度降低的幅度最大, 表层 (0~20 cm) 土壤平均酶活性分别是中层 (20~40 cm) 土壤的 1.94 倍和底层土壤的 3.27 倍; 蛋白酶下降的幅度最小, 表层土壤平均酶活性分别是中层土壤的 1.29 倍和底层土壤的 1.56 倍; 脲酶和碱性磷酸酶活性下降幅度介于上述两者之间, 表层土壤平均酶活性对于脲酶而言, 分别是中层土壤的 1.56 倍和底层土壤的 2.08 倍, 对于碱性磷酸酶则分别是中层土壤的 1.40 倍和底层土壤的 1.87

倍。从不同地貌部位来看, 对于转化酶, 酶活性下降幅度为垭口 > 洼地 > 坡地, 其中垭口表层土壤平均酶活性是底层土壤的 7.34 倍, 坡地的相应倍数则为 2.21 倍; 对于脲酶, 洼地的酶活性下降幅度最大, 垭口的下降幅度略低于洼地; 对于蛋白酶和碱性磷酸酶, 3 个地貌部位的酶活性下降幅度相差不太大。氧化还原酶类活性随土壤深度的垂直变化与水解酶类活性不一样, 各地貌部位各层次土壤过氧化氢酶活性差别不大。

### 3.3 试验场表层土壤酶活性的季节动态

试验场表层土壤 5 种酶活性的季节变化动态见图 3。从图 3 可知, 试验场土壤 5 种酶活性的季节变化规律是比较明显的。土壤转化酶、蛋白酶、脲酶、碱性磷酸酶等 4 种水解酶活性一般变化规律是春季上升, 夏季或秋季为最高, 冬季低于夏季和秋季但高于

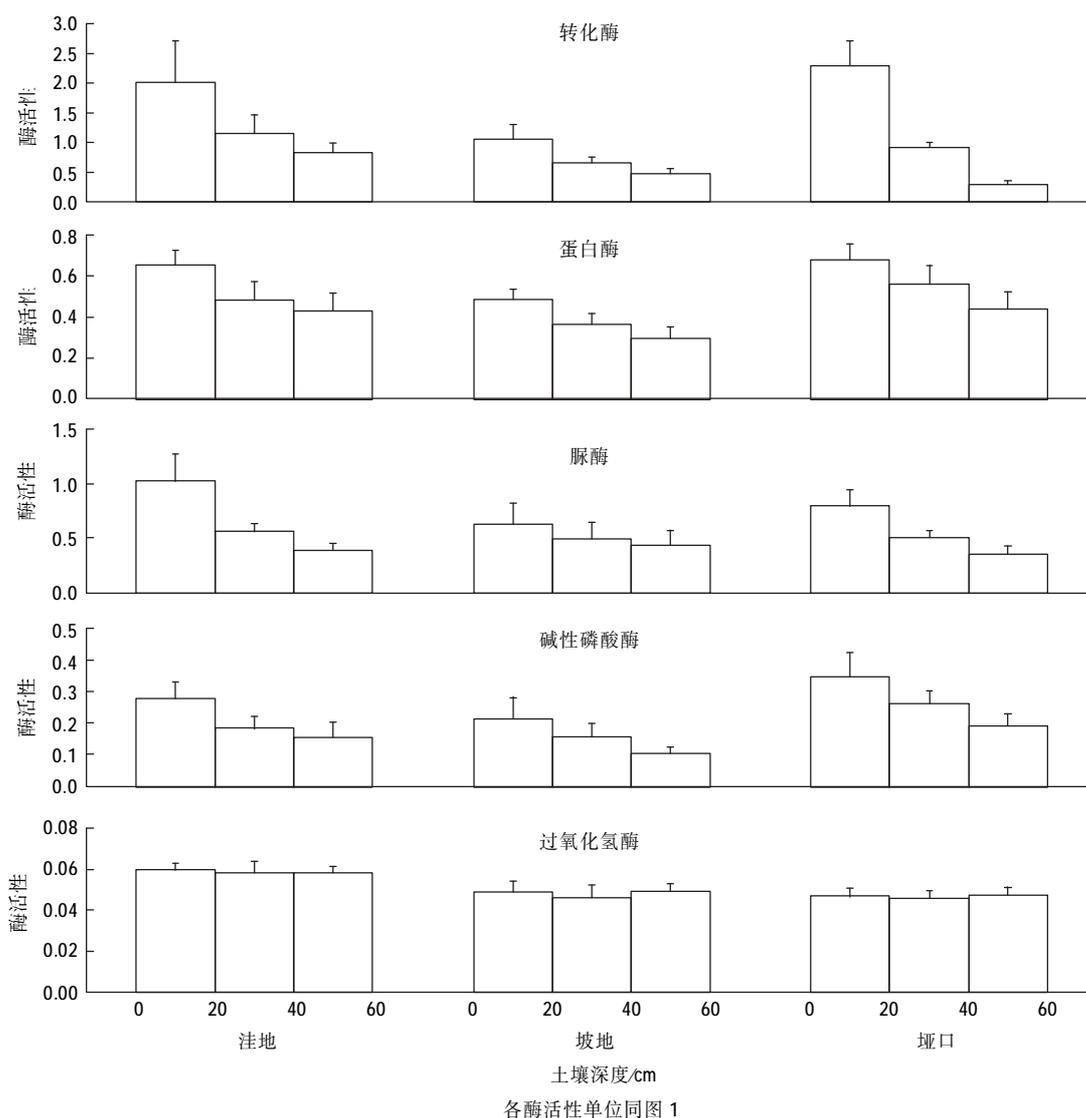


图 2 试验场不同地貌部位土壤酶活性的垂直变化

Figure 2 Vertical changes of the soil enzyme activities with geomorphological locations at the Experimental Site

春季。不同地貌部位 4 种水解酶活性季节变化规律在夏、秋两季有所不同。对于蛋白酶和碱性磷酸酶活性, 3 个地貌部位变化趋势相似, 以秋季最高, 夏季略低于秋季; 对于转化酶和脲酶活性, 洼地和坡地以秋季最高, 其中洼地比坡地的变化幅度大得多, 垭口则以夏季最高, 秋季略低于夏季。过氧化氢酶活性的季节变化情况与水解酶类有所不同。坡地和垭口的过氧化氢酶活性在春、夏和秋季的变化趋势基本一致, 均是夏季较高, 春、秋季较低, 而洼地的过氧化氢酶活性夏季略低于春、秋和冬季。

### 3.4 试验场土壤酶活性的时空变异

试验场土壤 5 种酶平均活性及其空间和时间的变化状况见表 1。从表 1 可以看出, 试验场土壤 4 种

水解酶中, 除了转化酶活性是以随土壤剖面深度的变化幅度最大, 即变异系数最大外, 其余 3 种水解酶活性都是以季节变化变异系数最大, 在 0.363~0.508 之间, 垂直变化变异系数次之, 变化幅度最小的是随地貌部位变化。过氧化氢酶活性的地貌部位变异系数与水解酶类差别不大, 但其垂直变化和季节变化的变异系数都很小, 分别只有 0.019 和 0.053。这反映出氧化还原酶类活性时空变异的相对稳定, 而水解酶类活性则相对不稳定。

从不同种类酶活性的时空变异大小看, 不同地貌部位变异系数的大小顺序为: 转化酶 > 碱性磷酸酶 > 蛋白酶 > 脲酶 > 过氧化氢酶; 垂直变化变异系数的大小顺序为: 转化酶 > 脲酶 > 碱性磷酸酶 > 蛋白酶 >

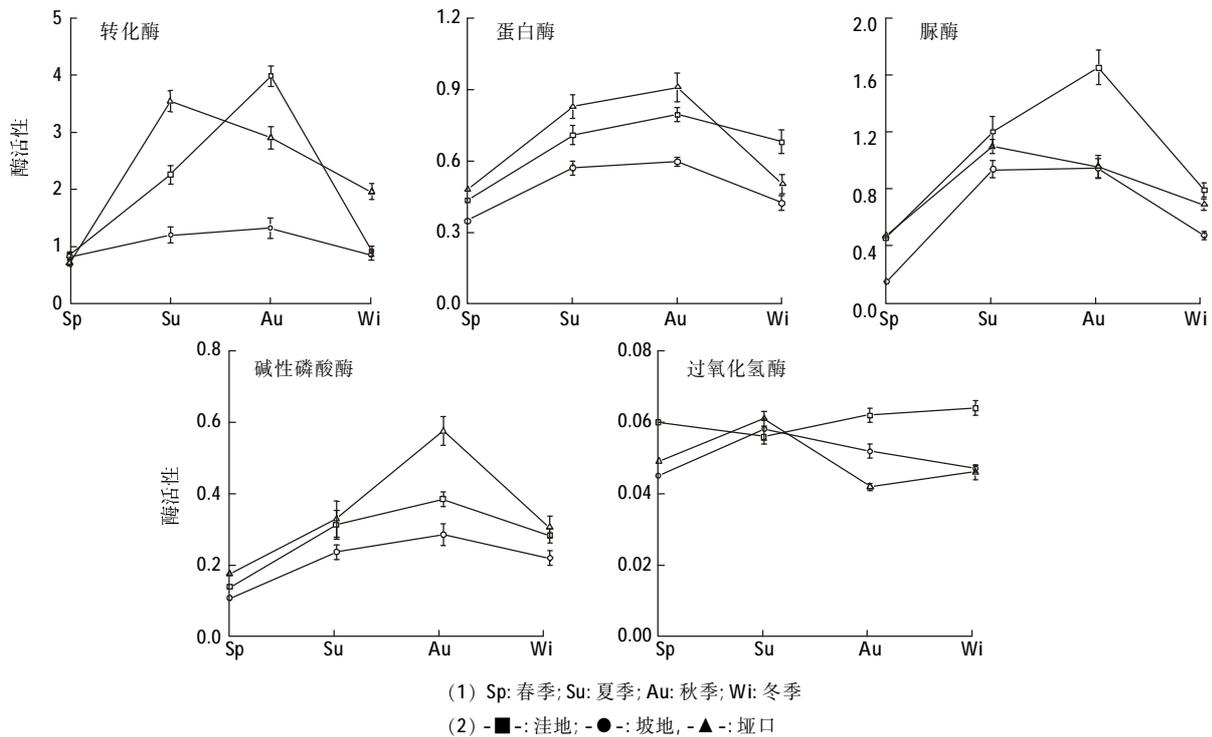


图3 试验场表层土壤酶活性季节变化

Figure 3 Seasonal changes in the soil enzyme activity at the surface layer at the Experimental Site

表1 试验场土壤5种酶活性的空间和季节变化的变异系数

Table 1 Variation coefficients for spatial and seasonal changes of five soil enzyme activities at the Experimental Site

项目	转化酶	蛋白酶	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶
酶活性平均值	1.079	0.490	0.574	0.209	0.053
地貌部位变化变异系数	0.289	0.189	0.130	0.264	0.115
垂直变化变异系数	0.587	0.223	0.376	0.314	0.019
季节变化变异系数	0.507	0.363	0.508	0.369	0.053

过氧化氢酶; 季节变化变异系数的大小则以转化酶和脲酶相当, 蛋白酶和碱性磷酸酶相当, 而转化酶和脲酶又高于蛋白酶和碱性磷酸酶, 过氧化氢酶最小。

### 3.5 土壤酶与土壤肥力的相互关系

利用 Spss11.0 软件计算试验场土壤酶活性与土壤肥力因子的 Spearman 相关系数( $n=27$ ), 结果表明(表2), 转化酶、蛋白酶和脲酶与有机质、全氮、有效氮、速效磷呈极显著相关; 碱性磷酸酶与有机质和速效磷呈极显著相关, 与全氮和有效氮呈显著相关; 而过氧化氢酶则除了与速效磷有相关性外, 与其他几种肥力因子相关不显著。4个肥力因子的 Spearman 相关分析结果表明(表2), 有机质同全氮、有效氮、速效磷呈极显著相关。以上研究结果说明试验场土壤酶

活性与场区的土壤养分水平密切相关, 虽然土壤转化酶、蛋白酶、脲酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶不能代表土壤的总生物特性与肥力, 但可作为评定肥力水平的一项重要指标。从表2还可以看出, 4种水解酶活性间的相关性大都达到“极显著性水平”(P<0.01), 说明它们是协同发展的, 共同完成土壤中营养元素的转化及植物对营养元素的利用。

## 4 讨论

试验场不同地貌部位土壤酶活性的差异与不同地貌部位土壤的理化性状以及植被的种类和生长状况密切相关。试验场的植被主要以次生灌丛为主, 在洼地、埡口和坡地都生长有黄荆和櫟木, 但埡口处黄

表 2 试验场土壤酶活性和肥力因子之间相关系数

Table 2 Correlation coefficients between enzyme activities and factors of soil fertility at the Karst Experimental Site

转化酶	蛋白酶	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	有机质	全氮	有效氮	速效磷
转化酶	0.780**	0.808**	0.468*	0.216	0.803**	0.809**	0.838**	0.744**
蛋白酶	1	0.728**	0.742**	0.006	0.816**	0.683**	0.849**	0.647**
脲酶		1	0.444*	0.166	0.782**	0.716**	0.806**	0.782**
碱性磷酸酶			1	-0.223	0.555**	0.415*	0.467*	0.516**
过氧化氢酶				1	0.213	0.183	0.274	0.391*
有机质					1	0.873**	0.878**	0.871**
全氮						1	0.843**	0.803**
有效氮							1	0.821**
速效磷								1

注:\*\* P<0.01, \* P<0.05。

荆的数量较多,分布着一大片黄荆的优势群落。由于黄荆是秋季落叶植物,故秋季垭口处有大量的黄荆枯落叶添加到地面,而枯落物对水解酶类活性的“启爆剂效应”<sup>[9]</sup>较明显,因而垭口土壤水解酶类的活性较高。相关分析表明,4种土壤水解酶活性一般与有机质和全氮、有效氮、速效磷呈显著或极显著正相关,洼地土壤的有机质和全氮、有效氮、速效磷含量较高,土壤酶积极参与土壤中营养物质的转化和分解,为植物的生长提供足够的营养,因而洼地土壤水解酶类的活性也比较高,平均活性与垭口相比则互有大小。4种水解酶中,转化酶能酶促蔗糖水解生成葡萄糖和果糖,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用;脲酶是一种酰胺酶,它作用于线型酰胺 C-N 键的水解,促使尿素水解生成氨、二氧化碳和水,而氨是植物氮素营养的直接来源;蛋白酶参与土壤中存在的氨基酸、蛋白质以及其他含蛋白质氮的有机化合物的转化,其水解产物亦是高等植物的氮源之一;磷酸酶的酶促作用则能加速有机磷循环速度,从而提高磷素有效性。洼地和垭口的水解酶类活性高于坡地的水解酶类活性,说明洼地和垭口两处地貌部位土壤中的有效氮供应状况比坡地土壤好,土壤供磷能力比坡地土壤强,此结论与这3个地貌部位土壤肥力水平的测定结果相一致<sup>[11]</sup>。同时,洼地和垭口土壤水解酶类活性较高的结果亦与前面研究报道这两个地貌部位的微生物数量较多的结果相对应<sup>[11]</sup>。蒋忠诚<sup>[21]</sup>在1993—1994年研究碳酸盐岩的溶蚀作用时就曾发现试验场不同地貌部位的溶蚀作用存在差异性(表3),洼地和垭口的溶蚀量较大,坡地的溶蚀量却较小。此野外试验结

果与本文对土壤微生物和土壤水解酶类活性的分析结果相对应,这从一个侧面反映出土壤微生物和土壤酶的岩溶生态效应,从微观上解释了不同地貌部位差异溶蚀的原因之一就是土壤微生物和土壤酶活性的差异,因此认为土壤微生物数量和土壤酶活性可作为西南岩溶生态系统脆弱程度的评价指标,脆弱程度越高的岩溶生态系统,其土壤微生物数量越少,土壤酶活性越低。同时,也给我们提出了思考:怎样科学地进行不同地貌部位的土地利用?换言之,在进行石山治理、植被恢复时应考虑岩溶生态系统不同地貌部位的特点,因地制宜地选择合适的土地利用方式,才能收到较好的成效。

表 3 试验场不同地貌部位的试片溶蚀量(mg·片<sup>-1</sup>)<sup>[21]</sup>

Table 3 Dissolution quantity of cubes at different geomorphological locations at the Experimental Site

地貌部位	地表岩面溶蚀量	土下 20 cm 溶蚀量	平均值
垭口	104.80	177.37	141.09
坡地	72.80	41.70	57.25
洼地	122.27	174.10	148.19

试验场土壤水解酶类活性在土壤剖面上的垂直变化模式与许多研究者对其他陆地生态系统林地土壤酶活性的研究结果是一致的<sup>[12,13]</sup>,而且这种垂直变化模式与土壤微生物的变化相一致,加之洼地和垭口土壤水解酶类活性较高的结果亦与这两个地貌部位微生物数量较多的结果相对应,这些都说明土壤微生物是土壤酶的主要来源之一,这与其他研究者的研究结果相一致<sup>[5]</sup>。

试验场土壤水解酶类活性在春、夏和秋三季的季

节变化模式也与其他陆地生态系统林地土壤酶活性的季节变化模式基本一致,但在本试验年度内测得的冬季酶活性的动态与其他陆地生态系统林地土壤酶活性不同<sup>[13-15]</sup>,冬季酶活性不是最低,反而高于春季,分析原因可能有两个:第一,冬季样品的采集时间跨了一个年度,春、夏和秋季样品都是在2003年采集的,其中春季样品是在2003年2月底采集的,而冬季样品是在2004年1月中旬采集的。2004年初全国大部分地区包括桂林在内都出现了暖冬现象,1月份的平均气温比2003年同期甚至比2003年2月份的气温都显得高些,而且在2004年1月16日采样前桂林持续降雨好几天,从而加快了土壤微生物的生命活动,使之产生和分泌更多的酶类。第二,据调查,试验场的植被处于正向演替状态<sup>[16]</sup>,植被长势一年好于一年,而植物根系是土壤酶的另一主要来源<sup>[5]</sup>,故第二年度的土壤酶活性有可能会高于前一年度,这也说明试验场的土壤质量正在向良性方向发展。何跃军等<sup>[1]</sup>的研究结果亦表明,随着正向演替的进展,土壤酶活性增强。有不少研究者报道,土壤氧化还原酶类活性在土壤剖面中分布的规律性不强,而水解酶类活性通常随土壤深度增加而降低<sup>[17,18]</sup>;土壤酶活性与植物产量有关,即单位面积的植物现存量越多,土壤酶活性越高<sup>[19,20]</sup>。试验场土壤酶活性的变化与上述研究结果基本一致。

#### 参考文献:

- [1] 何跃军,钟章成,刘济明,等.石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究[J].应用生态学报,2005,16(6):1077-1081.
- [2] 任京辰,张平究,潘根兴,等.岩溶土壤的生态地球化学特征及其指示意义——以贵州贞丰-关岭岩溶石山地区为例[J].地球科学进展,2006,21(5):504-512.
- [3] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986.
- [4] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987.
- [5] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [6] Wittmann C, Kahkonen M A, Ilvesniemi H, et al. Areal activities and stratification of hydrolytic enzymes involved in the biochemical cycles of carbon, nitrogen, sulphur and phosphorus in podsolized boreal forest soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 425-433.
- [7] Ajwa H A, Dell C J, Rice C W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31: 769-777.
- [8] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality[C]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. eds. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*[M]. American Society of Agronomy, Madison, WI, 1994. 107-124.
- [9] 龚子同,等.中国土壤系统分类:理论·方法·实践[M].北京:科学出版社,1999. 537-607.
- [10] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000. 12-194.
- [11] 李 为,余龙江,周蓬蓬,等.西南岩溶区土壤微生物生态作用的初步研究——以桂林丫吉村岩溶试验场为例 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 112-114.
- [12] 张成娥,陈小利.林地砍伐开垦对土壤酶活性及养分的影响[J].生态学杂志,1998,17(6):18-21.
- [13] 张银龙,林 鹏.秋茄红树林土壤酶活性时空动态[J].厦门大学学报(自然科学版),1999,38(1):129-136.
- [14] 杨万勤,钟章成,韩玉萍.缙云山森林土壤酶活性的分布特征、季节动态及其与四川大头茶的关系研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),1999,24(3):318-324.
- [15] 连玉武,张其水.林地土壤酶活性季节动态[J].厦门大学学报(自然科学版),1989,28(6):662-666.
- [16] 李 强,孙海龙,何师意,等.桂林岩溶试验场植物多样性恢复及其水、气效应[J].热带地理,2005,25(1):5-9.
- [17] 关松荫,沈桂琴,孟昭鹏,等.我国主要土壤剖面酶活性状况[J].土壤学报,1984,21(4):368-381.
- [18] Duxbury J M, Tate R L. The effect of soil depth and crop cover on enzymatic activities in Pahokee muck [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1981, 45: 322-328.
- [19] Pancholy S K, Rice E L. Soil enzymes in relation to old field succession: Amylase, cellulase, invertase, dehydrogenase and urease[J]. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 1973, 37: 47-50.
- [20] 麦克伦伦 A D 著. 闵九康,关松荫,译.土壤生物化学[M].北京:农业出版社,1984.
- [21] 蒋忠诚.峰丛石山的岩溶作用及生态环境元素迁移典型研究[D].北京:中国地质科学院研究生部.1997.

**致谢:**感谢国土资源部岩溶动力学重点实验室的科研人员在野外采样时给予的热情支持和帮助!感谢卢锦标、张勇同学协助部分实验分析工作!