

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                        |                                                |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| PM <sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 .....          | 吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)                           |
| 北京地区近35年大气污染扩散条件变化 .....                               | 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)                      |
| 北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 .....                           | 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)                     |
| 北京山谷风环流特征分析及其对PM <sub>2.5</sub> 浓度的影响 .....            | 董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)                        |
| 北京市建筑施工扬尘排放特征 .....                                    | 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)                  |
| 生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 .....                              | 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)                |
| 广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O <sub>3</sub> 与SOA的生成潜势 .....     | 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)                            |
| 南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 .....                                 | 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)                    |
| 亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 .....                            | 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)                 |
| 宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 .....                         | 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)          |
| 垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 .....                           | 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)    |
| 重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 .....                                  | 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)                |
| 轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 .....                | 王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)                     |
| 不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 .....                           | 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)                       |
| 西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义 .....                             | 许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)                        |
| 基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程 .....                   | 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)                         |
| 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 .....                      | 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326) |
| 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 .....                              | 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)                    |
| 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 .....                          | 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)                   |
| 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 .....                          | 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)            |
| 海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成 .....                 | 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)                    |
| 两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 .....                           | 王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)                            |
| 高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验 .....                           | 金建荣,李田,时珍宝(2379)                               |
| 稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚 .....                           | 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)                         |
| 超声、紫外增强H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /KI降解磺胺甲基嘧啶 ..... | 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)                           |
| 不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 .....                         | 姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)                |
| 铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 .....                         | 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)               |
| 组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 .....                          | 张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)                          |
| 温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 .....                                 | 张玲,彭党聪,常蝶(2429)                                |
| 海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 .....                              | 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)                        |
| 不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 .....                          | 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)                   |
| 磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 .....                             | 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)                    |
| 碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 .....                            | 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)            |
| 外源Ca <sup>2+</sup> 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 .....         | 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)                              |
| 膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 .....                               | 张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)                   |
| 反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 .....                            | 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)                       |
| 硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 .....                         | 李欢,王磊,王亚楠(2496)                                |
| 关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 .....                            | 乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)                        |
| 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析 .....                       | 陈秀端,卢新卫(2513)                                  |
| 基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 .....                      | 佟瑞鹏,杨校毅(2522)                                  |
| Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制 .....                              | 钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)    |
| 典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系 .....                            | 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)                     |
| 复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果 .....                            | 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)                   |
| 两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 .....                      | 田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)                  |
| 大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性 .....                            | 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)                    |
| 源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 .....                    | 杨宁伟,毕二平(2568)                                  |
| 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 .....                       | 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)                     |
| 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N <sub>2</sub> O排放的影响 .....   | 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)                  |
| 基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 .....                     | 袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)                         |
| 广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 .....                          | 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)          |
| 活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 .....                           | 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)            |
| 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 .....                       | 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)                              |
| 《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384) |                                                |

# 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

罗攀<sup>1,2,3</sup>, 陈浩<sup>1,2</sup>, 肖孔操<sup>1,2</sup>, 杨利琼<sup>1,2,3</sup>, 文丽<sup>1,2,3</sup>, 李德军<sup>1,2,\*</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测站, 环江 547100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 土壤胞外酶在生态系统生物地球化学循环过程中扮演着重要角色, 然而关于土壤胞外酶活性的主控因子研究还不够深入, 特别是在偏碱性的钙质土壤区域相关研究尤其缺乏。本研究以典型喀斯特山区(木论国家级自然保护区)的林地为研究对象, 采集不同地形条件(不同坡位和坡向)、不同树种(厚壳桂和伞花木)下的表层土壤(0~15 cm), 测定了与碳、氮、磷循环相关的6种水解酶的活性及相关土壤理化性质。研究运用方差分解, 并结合多响应置换过程以及冗余分析技术分析了地形、树种和土壤理化性质对土壤酶活性的影响。结果表明, 坡位对土壤酶活性有显著影响。树种和坡向对土壤酶活性的影响不显著。方差分解结果表明, 地形、树种和土壤理化性质共同解释了土壤酶活性变化的55.3%, 其中土壤因子是影响酶活性改变的主要因子, 解释了44.2%的变异。而冗余分析的结果进一步表明在土壤因子中, pH、总氮和无机氮是影响土壤酶活性变化的主要指标。研究首次量化了喀斯特地区小尺度内地形、树种及土壤理化性质对土壤酶活性变化的影响。研究也说明了在喀斯特山区小尺度内土壤酶活性的变化可由土壤理化性质来表征。

**关键词:** 土壤胞外酶活性; 地形; 树种; 土壤属性; 喀斯特

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2577-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201611078

## Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions

LUO Pan<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hao<sup>1,2</sup>, XIAO Kong-cai<sup>1,2</sup>, YANG Li-qiong<sup>1,2,3</sup>, WEN Li<sup>1,2,3</sup>, LI De-jun<sup>1,2,\*</sup>

(1. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil extracellular enzymes are crucial in biogeochemical cycle and ecosystem functioning. Yet uncertainty exists in terms of major determinants on soil extracellular enzyme activity (EEA), especially at calcareous areas. In this study, soil samples (0-15 cm) were collected from different topographic conditions (different slope positions and aspects) and different tree species (*Cryptocarya concinna* and *Eurycorymbus cavaleriei*) in a forest located at Mulun natural reserve, a typical karst area. Six hydrolytic enzymes, related to carbon, nitrogen or phosphorus cycling, and soil physiochemical properties were investigated. The effects of topography, tree species and soil properties on soil enzyme activities were analyzed by multi-response permutation procedures (MRPP), redundancy analysis (RDA) and variation partitioning. The enzyme profiles were significantly ( $P < 0.05$ ) separated among the four slope positions but not significantly separated between the two aspects or two tree species according to multi-response permutation procedure (MRPP) analysis. Variation partitioning indicated that topography, tree species and soil properties together explained 55.3% of EEA variation. Soil property was the key factor influencing EEA variation, which explained 44.2% of EEA variation. The result of redundancy analysis (RDA) showed that soil pH, total nitrogen and inorganic nitrogen were the most important variables among the nine soil properties for EEA variation. This study first quantified the effects of small-scale topographic, tree species, and soil properties on soil enzyme activity variation in karst areas. Our results suggest that EEA variation can be well explained by soil properties at a small scale in the karst area.

**Key words:** soil extracellular enzyme activity; topography; tree species; soil properties; karst

土壤胞外酶参与了土壤有机质的分解, 释放出植物与微生物所需的能量与矿质营养<sup>[1]</sup>, 是土壤有机质分解的限速步骤, 因此土壤胞外酶在生态系统物质循环和能量流动中扮演着重要的角色<sup>[2]</sup>。在某种程度上, 土壤胞外酶活性也能表征土壤养分转化和运移能力的强弱, 是评价土壤肥力的重要参数之

收稿日期: 2016-11-09; 修订日期: 2017-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502404); 国家自然科学基金项目(31500405, 41571295, 31400462); 中国科学院百人计划项目(Y523101030); 中国科学院 STS 项目(KFJ-EW-ST5-092)

作者简介: 罗攀(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域生态与景观生态, E-mail: lpp1010@outlook.com

\* 通信作者, E-mail: dejunli@isa.ac.cn

—<sup>[3]</sup>. 目前研究较多的土壤胞外酶包括:降解纤维素的 $\beta$ -葡萄糖苷酶( $\beta$ -glucosidase, BG)和纤维素酶( cellobiohydrolase, CBH);降解几丁质和肽聚糖的 $\beta$ -1, 4-*N*-乙酰葡萄糖氨糖苷酶( $\beta$ -1, 4-*N*-acetylglucosaminidase, NAG);水解蛋白质和多肽的亮氨酸氨基肽酶(leucine aminopeptidase, LAP);矿化有机磷的酸性(或碱性)磷酸酶(acid or alkaline phosphatase, ACP or ALP)<sup>[4]</sup>. 在生态学研究中,这些胞外酶的活性与碳、氮、磷元素的循环密切相关. 因此,对这些土壤胞外酶活性的研究有助于理解土壤养分循环特征及机制.

土壤酶活性受许多因素影响,包括土壤理化性质、土地利用类型和地形(坡度和坡向)等<sup>[5, 6]</sup>. 这些因素可分为两大类:一类是直接影响土壤酶活性的因子,包括土壤湿度、温度、pH 和有机质等;另一类是间接影响土壤酶活性的因子,包括气候、地形、树种和土地利用类型等<sup>[7]</sup>. 第一类因子通过提供了酶促反应的底物和环境,直接影响着酶活性大小<sup>[8]</sup>;第二类因子,如地形因子通过影响微气候、径流和蒸发蒸腾等途径改变了土壤属性,从而间接影响土壤酶活性<sup>[9]</sup>;再如树种因子会通过改变凋落物数量与质量以及根系分泌液影响土壤有机质底物的可利用性,进而影响土壤酶活性<sup>[10]</sup>. 目前已有大量研究报道了这些因素对土壤酶活性的影响<sup>[11, 12]</sup>,然而大部分是针对单个影响因素的研究,关于土壤属性、树种和地形对土壤酶活性的综合影响及交互作用的研究较少.

喀斯特是地表生态系统的重要组成部分,中

国西南喀斯特区是世界最大、最集中连片的喀斯特区. 喀斯特区独特的土壤条件(如:高 pH、高钙与高缓冲能力、特殊水文条件、地形特征复杂等)决定了其土壤理化性质及植物群落类型等都有别于其他地区. 目前,关于喀斯特地区中性偏碱性的土壤中土壤酶活性变化的研究还较少<sup>[13]</sup>,影响土壤酶活性的主控因子依然还不清楚,并缺乏对主控因子影响能力的量化. 因而,在喀斯特山区开展土壤酶活性特征研究,一方面可获取区域代表性数据,另一方面可揭示喀斯特山区土壤肥力的供应和保持特征,以期对喀斯特生态恢复实践提供理论支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西环江木论国家自然保护区(25°06′~25°12′ N, 107°53′~108°05′ E),属典型喀斯特峰丛洼地景观以及亚热带季风气候区. 保护区森林面积9 991 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率 93.4%,生长着中亚热带隐域性的喀斯特森林顶级植被群落. 林区主要优势种为厚壳桂和伞花木. 海拔最低为 405 m,最高为 823 m. 年平均气温为 19.6~21.6℃,最低温出现在 1 月,约为 3.4~8.7℃,最高温出现在 7 月,约为 23.0~26.7℃. 年均降雨量为 1 530~1 820 mm. 全年干湿季明显,其中 4 月到 8 月属于湿季,9 月到次年 3 月属于旱季. 林区基岩主要为石灰岩和白云岩. 土壤主要为石灰土. 坡上土壤深度约为 0~30 cm,洼地土壤深度约为 0~80 cm.

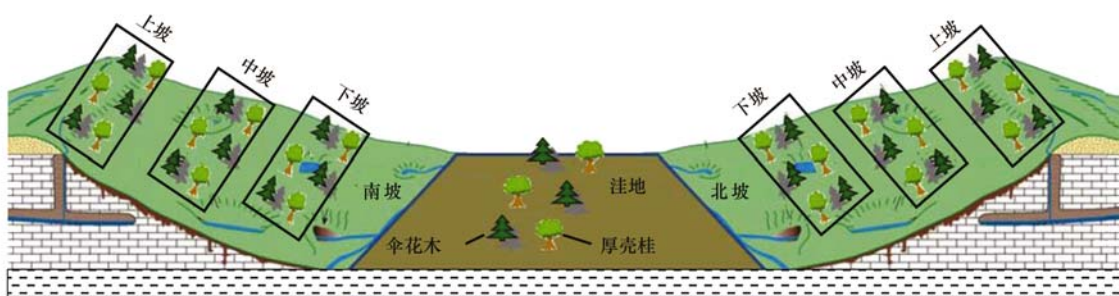


图 1 样方分布示意

Fig. 1 Schematic of sampling plot distribution

### 1.2 实验设计

样地建立在保护区缓冲区的常绿阔叶混交林内. 选取南北朝向的两个坡(坡度 20°~25°)及两个坡中间的洼地(坡度 2°~4°)作为研究样地(图 1). 分别在每个坡向的上、中、下坡和两个坡中间的洼地各设置 1 个面积为 20 m×20 m 的大样方,共

7 个大样方. 样方之间距离 >10 m. 每个样方内设置 3 个小样方. 每个小样方内选取代表性的优势树种,即厚壳桂和伞花木作为研究对象. 所选择的厚壳桂平均胸径、树高和树龄分别为 8.8 cm、9.5 m 和 20 年;伞花木平均胸径、树高和树龄分别为 9.3 cm、7.2 m 和 20 年. 在 2014 年 8 月,每个样方内选



择厚壳桂和伞花木各5株,在每株树下1 m范围内采集1个0~15 cm表层土样,将采集的5个土样混成一个混合土样.共采集42个混合土壤样品.新鲜土样放于冰盒中带回实验室,先用镊子挑去根和石块,过2 mm筛后分两部分保存.一部分保存在4℃冰箱内供土壤酶活性和无机氮分析,另一部分经自然风干后用于土壤理化性质分析.

1.3 土壤理化性质的测定

土壤 pH 采用 pH 计测定(土水比为1:2.5)<sup>[14]</sup>;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加加热法(油浴)测定<sup>[14]</sup>;速效磷(AP)采用0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提、钼锑抗比色法测定;全氮(TN)采用半微量开氏法-流动注射仪(Fiastar 5000)测定<sup>[14]</sup>;铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)采用0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提,再用流动注射仪(Fiastar 5000)测定.

1.4 土壤酶活性的测定

6种土壤酶活性的测定均采用96微孔酶标板荧光分析法进行测定<sup>[15,16]</sup>.所测土壤水解酶及其所用底物见表1.具体步骤为:称取1 g鲜土至800 mL的广口烧杯中,碱性磷酸酶加入125 mL NaHCO<sub>3</sub> 缓冲液(pH=8),其他酶加入125 mL CH<sub>3</sub>COONa 缓冲

液(pH=5),涡旋荡1 min,制成土壤悬浮液,并使用八通道移液器(Eppendorf)向96孔酶标板中加样.空白孔中加入250 μL缓冲液;土壤控制孔中加入50 μL缓冲液和200 μL土壤悬浮液;基底控制孔中加入50 μL底物溶液和200 μL缓冲液;参考标准孔加入50 μL标准液和200 μL缓冲液;猝灭标准孔中加入50 μL标准液和200 μL悬浮液;样品测定孔则加入200 μL土壤悬浮液和50 μL底物溶液.各控制孔和样品测定孔均设置8个重复.所有酶标板放置在黑暗的25℃培养箱中培养4 h后,使用多功能酶标仪(瑞士 Tecan Infinite F200/M200 型多功能酶标仪)进行荧光测定.仪器设定自动在每个孔加入10 μL,1 mol·L<sup>-1</sup>的NaOH溶液,1 min后进行荧光检测.酶标仪设定在365 nm波长处激发,在450 nm处检测荧光.酶活性计算公式如下:

酶活性[μmol·(h·g)<sup>-1</sup>] = (净荧光值/单位标准物的荧光值)/(土壤干重×培养时间)  
其中,单位标准物的荧光值 = [参考标准物荧光值/(10 μmol·L<sup>-1</sup> × 0.000 05 L)];净荧光值 = [(样品测定荧光值 - 土壤控制荧光值)/猝灭系数] - 基底控制孔荧光值;猝灭系数 = (猝灭标准荧光值 - 土壤控制荧光值)/准物荧光值.

表1 所测土壤酶的国际分类编号、缩写以及所用底物<sup>1)</sup>

| Table 1 Soil enzymes assayed for potential activity along with their enzyme commission number (EC), abbreviation and substrate |                                   |     |                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----|--------------------------------------------------|
| 编号                                                                                                                             | 酶名称                               | 缩写  | 底物                                               |
| EC 3. 2. 1. 21                                                                                                                 | β-葡萄糖苷酶(β-glucosidase)            | BG  | 4-MUB-β-D-glucoside                              |
| EC 3. 2. 1. 91                                                                                                                 | 纤维素酶( cellobiohyrolase)           | CBH | 4-MUB-β-D-cellobioside                           |
| EC 3. 4. 11. 1                                                                                                                 | 亮氨酸氨基多肽酶( leucine aminopeptidase) | LAP | L-leucine-7-amido-4-methylcoumarin hydrochloride |
| EC 3. 2. 1. 14                                                                                                                 | 几丁质酶(β-N-acetylglucosaminidase)   | NAG | 4-MUB-N-acetyl-β-D-glucosaminide                 |
| EC 3. 1. 3. 2                                                                                                                  | 酸性磷酸酶( acid phosphatase)          | ACP | 4-MUB-phosphate                                  |
| EC 3. 1. 3. 1                                                                                                                  | 碱性磷酸酶( alkaline phosphatase)      | ALP | 4-MUB-phosphate                                  |

1) MUB 为 methylumbelliferyl

1.5 数据分析

采用单因素方差分析比较树种之间(厚壳桂和伞花木)、坡位之间(上坡、中坡、下坡和洼地)以及不同坡向(南向和北向)之间土壤理化性质和土壤酶活性的差异.采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较.

将所有的酶当作一个整体,采用多响应置换过程(MRPP)比较树种、坡位以及不同坡向之间土壤酶活性的差异. MRPP 是一种用于两组或者多组多元数据矩阵差异性分析的非参数检验,不要求数据的正态分布和方差齐性<sup>[17]</sup>.其中,数值 *T* (test statistic) 为描述组间差异程度的统计量, *T* 的绝对值越大,其组间差异越大. *A* (agreement statistic) 值为

描述组内数据一致性的统计量<sup>[18]</sup>. *A* 值介于-1~1之间,大于0.1代表组内差异高.

采用方差分解的方法分析各环境因子(即:地形因子、树种因子和土壤因子)对土壤酶活性变化的相对贡献率.其中地形因子包括坡位和坡向,树种因子包括厚壳桂和伞花木,土壤因子包括土壤有机碳、总氮、碳氮比、有效磷、pH、土壤含水量、氨氮、硝氮和无机氮.方差分解法是将响应变量的总方差无偏分解成由各组解释变量所决定的子方差,即可给出每组变量的单独解释部分、共同解释部分以及总的解释量<sup>[19]</sup>.相对贡献的结果采用韦恩图进行描述.

土壤因子和土壤酶活性之间的关系采用冗余分

析的向前选择法和蒙特卡洛置换检验来分析检验土壤因子对土壤酶活性的影响是否显著,得出影响土壤酶活性变异的主要土壤因子( $P < 0.05$ ). 冗余分析是一种排序方法,通过原始变量与典型变量之间的相关性,分析引起原始变量变异的原因. 其结果的显著性是由蒙特卡洛置换检验来确定的,置换次数为 499. 蒙特卡洛置换检验是一种常用的置换检验方式.

采用  $t$ -value 双区检验图描述单一土壤因子对酶活性的影响.  $t$ -value 双区检验图中的箭头代表土壤酶活性指标;三角形代表土壤指标;从某个土壤指标到原点为直径构成的圆圈代表该土壤指标所能解释的范围. 比如,某个土壤酶活性指标的箭头完全落入某土壤指标构成的圆圈内,代表该种该土壤酶活性与该土壤指标具有显著相关性. 如果落入实线圈表示呈显著正相关,落入虚线圈为显著负相关<sup>[20]</sup>. 以上分析通过 PC-ORD 和 Canoco 5.0 两个软件完成. 其中,PC-ORD 软件用于进行 MRPP 分析,Canoco 5.0 用于方差分解分析和冗余分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区土壤酶活性及理化性质的差异性分析

土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维素酶、亮氨酸氨基多肽酶、几丁质酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶均值分别为 173.8、21.7、16.0、34.5、308.9 和 394 nmol·(h·g<sup>-1</sup>). 研究区土壤中性略偏碱性,pH 平均值为 7.3(表 2). 区域内土壤有机碳、总氮、有效磷、无机氮的平均含量分别为 77.4 g·kg<sup>-1</sup>、5.4 g·kg<sup>-1</sup>、6.5 mg·kg<sup>-1</sup>、262.1 mg·kg<sup>-1</sup>(表 2). 多重比较结果表明,树种间的土壤 pH、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶差异显著. 坡向间、有效磷、pH、铵态氮、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维素酶、亮氨酸氨基多肽酶和酸性磷酸酶的差异显著. 坡位间、有机碳、总氮、有效磷、碳氮比、pH、硝态氮、无机氮、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维素酶、亮氨酸氨基多肽酶和酸性磷酸酶的差异显著(表 2).

### 2.2 树种、坡位和坡向对土壤酶活性的影响

通过 MRPP 比较了树种间、坡位间和坡向间土壤酶活性的差异,其结果如表 3 所示:总体上,树种间和坡向间土壤酶活性差异不显著( $P > 0.05$ );坡位间土壤酶活性差异显著( $P < 0.05$ ). 其中上坡与中坡、上坡与下坡和上坡与洼地这 3 组的  $T$  值和  $A$  值都比较大, $T$  值较大说明上坡与中坡、下坡和洼地的组间差异最为明显, $A$  值较大则表明其组内的

一致性较好. 同时, $P$  值也说明了上坡与中坡、下坡和洼地之间土壤酶活性差异极显著,中坡和洼地之间土壤酶活性差异显著.

### 2.3 方差分解分析

通过方差分解的方法分析了地形、树种和土壤属性这 3 组解释变量对土壤酶活性的相对贡献,结果如图 2 所示;3 组解释变量总共解释了土壤酶活性变异的 55.3%. 其中,土壤属性解释了土壤酶活性变异的 44.2%,地形因子解释了土壤酶活性变异的 30.7%,而树种因子仅仅解释了土壤酶活性变异的 4.4%. 3 组变量存在交互作用,其中地形和土壤共同解释的变异为 22.4%;地形和树种土壤属性共同解释的变异为 0.4%;树种和土壤属性共同解释的变异为 1.2%;三者共同解释的部分为 0. 当剔除了两两间共同解释部分后,土壤因子净解释了土壤酶活性变异的 20.6%,地形因子净解释了土壤酶活性变异的 7.9%,树种因子净解释了土壤酶活性变异的 2.8%.

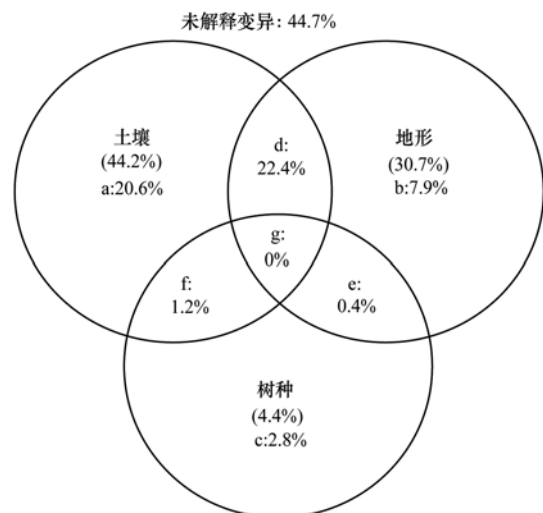


图 2 土壤、地形和树种这 3 组解释变量的方差分解

Fig. 2 Variation partitioning for soil EEAs by soil factors, topographical factors and tree species factors

### 2.4 影响土壤酶活性的主要土壤性质指标

通过冗余分析手动前置选择法和蒙特卡洛置换检验得出影响土壤酶活性的主要土壤属性指标为土壤 pH( $P = 0.002$ )、总氮( $P = 0.002$ )和无机氮( $P = 0.008$ ). 进一步采用  $t$ -value 双序图确定土壤 pH、总氮和无机氮对土壤酶活性的影响,图中箭头完全落入实线圈内则表示两者正相关,完全落入虚线圈内则表示两者负相关. 如图 3 所示:pH 与酸性磷酸酶(ACP)、几丁质酶(NAG)和纤维素酶(CBH)显著负相关;总氮与碱性磷酸酶(ALP)和几丁质酶

表 2 不同树种、坡向和坡位下的土壤基本理化性质<sup>1)</sup>  
Table 2 Physicochemical properties of soil under different tree species, slope aspect and slope positions

| 项目                      | 树种           |              | 坡向           |              |               | 坡位           |              |              | 平均含量        |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
|                         | 厚壳桂          | 伞花木          | 南向           | 北向           | 上坡            | 中坡           | 下坡           | 洼地           |             |
| 有机碳/g·kg <sup>-1</sup>  | 76.7(2.3)    | 78.0(2.2)    | 80.7(2.2)    | 77.3(2.4)    | 83.7(3.7)a    | 77.8(1.9)a   | 75.9(2.2)ab  | 67.6(3.3)b   | 77.4(2.2)   |
| 总氮/g·kg <sup>-1</sup>   | 5.4(0.2)     | 5.4(0.2)     | 5.8(0.2)     | 5.4(0.2)     | 5.9(0.3)a     | 5.5(0.2)a    | 5.4(0.2)ab   | 4.4(0.2)b    | 5.4(0.2)    |
| 有效磷/mg·kg <sup>-1</sup> | 6.9(0.8)     | 6.1(0.5)     | 5.5(0.3)b    | 8.2(0.9)a    | 5.0(0.3)b     | 6.2(0.5)b    | 9.3(1.1)a    | 4.4(0.4)bc   | 6.5(0.6)    |
| 碳氮比                     | 14.3(0.2)    | 14.4(0.2)    | 14.0(0.2)    | 14.4(0.2)    | 14.2(0.2)b    | 14.3(0.2)b   | 14.2(0.3)b   | 15.3(0.4)a   | 14.3(0.2)   |
| pH                      | 7.4(0.1)a    | 7.1(0.1)b    | 7.5(0.1)a    | 7.2(0.1)b    | 7.6(0.1)a     | 7.2(0.2)b    | 7.2(0.2)b    | 6.9(0.1)c    | 7.3(0.1)    |
| 氨氮/mg·kg <sup>-1</sup>  | 5.4(0.5)     | 4.1(0.5)     | 3.4(0.6)b    | 5.8(0.4)a    | 4.3(0.8)      | 5.1(0.71)    | 4.4(0.7)     | 5.5(1.1)     | 4.8(0.5)    |
| 硝氮/mg·kg <sup>-1</sup>  | 251.8(21.9)  | 262.8(15.2)  | 254.8(19.4)  | 285.6(20.3)  | 261.8(23.0)a  | 274.4(22.9)a | 274.4(28.8)a | 180.1(17.3)b | 257.3(18.5) |
| 无机氮/mg·kg <sup>-1</sup> | 257.2(22.0)  | 266.9(15.2)  | 258.1(19.4)  | 291.4(20.3)  | 266.1(23.2)ab | 279.4(22.7)a | 278.9(29.0)a | 185.7(18.2)b | 262.1(18.6) |
| β-葡萄糖苷酶                 | 161.0(9.5)b  | 186.5(14.1)a | 133.3(12.1)b | 194.6(15.5)a | 130.7(10.3)c  | 179.2(15.2)b | 182.0(14.8)b | 232.4(17.6)a | 173.8(11.6) |
| 纤维素酶                    | 20.8(2.5)    | 22.6(3.1)    | 15.8(3.7)b   | 26.2(2.9)a   | 11.9(1.2)b    | 23.7(3.6)a   | 25.1(4.4)a   | 30.1(3.5)a   | 21.7(2.8)   |
| 亮氨酸氨基多肽酶                | 17.4(1.6)    | 14.5(1.0)    | 18.4(1.9)a   | 14.4(2.1)b   | 18.5(1.5)a    | 17.1(2.4)ab  | 13.5(1.3)b   | 13.2(1.2)b   | 16(1.3)     |
| 几丁质酶                    | 30.6(2.9)    | 38.3(2.7)    | 34.0(4.6)    | 36.4(6.4)    | 39.9(4.9)     | 35.4(3.5)    | 30.2(3.3)    | 30.0(1.9)    | 34.5(2.8)   |
| 酸性磷酸酶                   | 331.0(47.5)a | 286.8(28.0)b | 196.0(22.8)b | 331.1(31.8)a | 174.5(18.5)c  | 332.4(42.1)b | 283.9(29.1)b | 580.2(80.3)a | 308.9(37)   |
| 碱性磷酸酶                   | 381.2(19.4)  | 406.7(15.0)  | 387.9(26.2)  | 406.7(34.1)  | 412.0(28.8)   | 393.0(22.1)  | 386.8(14.3)  | 373.9(37.5)  | 394(17.4)   |

1) 所有酶活性的单位为 mmol·(h·g)<sup>-1</sup>; 括号内为标准误差; 不同字母代表差异性显著; 不同字母间的比较为每一行的横向比较

(NAG)显著正相关,而与酸性磷酸酶(ACP)和纤维素酶(CBH)显著负相关;无机氮则与酸性磷酸酶(ACP)和纤维素酶(CBH)显著正相关。

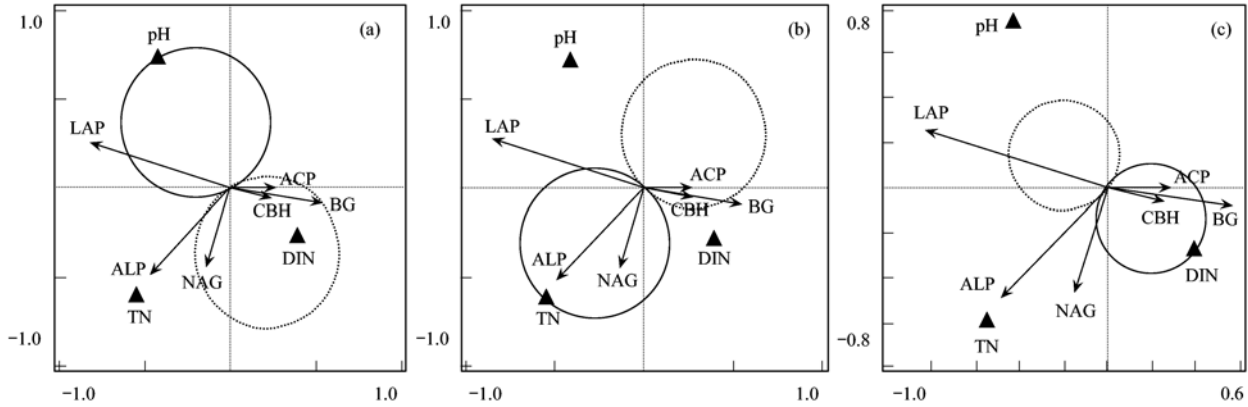
表 3 树种、坡向和坡位之间土壤酶活性的多响应置换过程分析  
Table 3 MRPP for soil enzyme activities under different tree species, slope aspect and slope position

| 项目 | 类型      | <i>T</i> | <i>A</i> | <i>P</i> |
|----|---------|----------|----------|----------|
| 树种 | 厚壳桂与伞花木 | -0.89    | 0.01     | 0.158    |
| 坡向 | 南坡与北坡   | -1.13    | 0.02     | 0.121    |
|    | 上坡与中坡   | -10.15   | 0.31     | 0.000    |
|    | 上坡与下坡   | -8.64    | 0.27     | 0.000    |
| 坡位 | 上坡与洼地   | -7.87    | 0.33     | 0.000    |
|    | 中坡与下坡   | 0.72     | -0.02    | 0.742    |
|    | 中坡与洼地   | -1.88    | 0.06     | 0.047    |
|    | 下坡与洼地   | -1.36    | 0.05     | 0.097    |
| 总体 |         | -9.82    | 0.26     | 0.000    |

3 讨论

3.1 地形、树种和土壤理化性质对土壤酶活性变异的影响

研究发现树种对土壤酶活性没有显著影响,这与目前关于树种对土壤酶活性影响的大量单因子研究的报道结果不同.一般地,树种能通过凋落物分解或根分泌物调节根际土壤养分有效性而影响土壤酶活性<sup>[21]</sup>.比如,Ushio等<sup>[22]</sup>调查了马来西亚婆罗洲地区山地森林生态系统树种对酸性磷酸酶、 $\beta$ -葡糖苷酶和多酚氧化酶的影响,结果表明树种可通过影响土壤湿度、有机碳、总氮等土壤理化性质而影响土壤酶活性.导致本研究中树种对土壤酶活性无显著影响的原因可能有两个.其一,喀斯特地区树种相对单一,选用的厚壳桂和伞花木虽然是该区域



(a)表示pH的*t*值检验双区图,(b)表示TN(总氮)的*t*值双区检验图,(c)表示DIN(无机氮)的*t*值双区检验图;*t*-value双序图中的箭头代表土壤酶活性指标;三角形代表土壤指标;从某个土壤指标到原点为直径构成的圆圈代表该土壤指标所能解释的范围,比如,(b)中NAG的箭头完全落入TN表征的实线圆圈中,代表NAG与TN具有显著正相关关系,而ACP的箭头完全落入TN表征的虚线圆圈中,代表ACP与TN具有显著负相关关系

图 3 土壤因子对土壤酶活性影响的*t*值双区检验

Fig. 3 The *t*-value biplots showing the relationships between enzyme activities and soil properties

内两种最为主要的树种,但是其功能性状可能比较接近.其二则可能是由于植被与土壤属性存在功能上的重叠,导致方差分解中分析时无法体现出树种的效应.

本研究还发现坡位对土壤酶活性影响显著,但是坡向的影响则很小.地形可通过影响土壤属性或者改变局部气候(温度和降水)从而影响土壤酶活性.比如,Kang等<sup>[6]</sup>发现脲酶、脱氢酶、磷酸酶和硫酸酯酶这4种土壤酶的活性均在北坡高于南坡,这可能是因为南坡上对酶活性有抑制作用的铁、铝离子浓度高而对酶活性有激发作用的镁、钾离子浓度低<sup>[23]</sup>.Khalili-Rad等<sup>[9]</sup>调查了坡位对土壤生物活性的影响,结果表明下坡的微生物量和土壤酶活

性显著高于上坡,并指出这可能是因为下坡有机碳的富集为微生物提供了丰富的碳源.本研究中,坡位间的酶活性差异与坡位间显著的土壤属性(包括土壤pH、总氮和无机氮等)差异相吻合(表3),这说明地形因子对土壤酶活性的影响大部分可通过土壤属性解释.这也解释了图2所示的地形与土壤属性的强烈交互效应.同时值得注意的是,地形本身也解释了7.9%的变异.这部分变异说明地形还可能通过诸如局部气候等非土壤属性的因子影响土壤酶活性.

3组研究变量中,土壤性质对于解释土壤酶活性变异的贡献最大.这说明在局域尺度上,土壤性质才是解释土壤酶活性空间变化的主导因素.如上



所述,地形和树种对土壤酶活性的影响主要是通过改变土壤属性进行间接作用。相比之下,土壤属性才是最直接的作用因素。这可能是导致本研究结果的主要原因。

### 3.2 土壤理化性质中影响酶活性的关键因子

虽然诸多学者对土壤因子与土壤酶活性的关系进行了广泛研究,其中包括有机质、总氮、总磷、土壤 pH、土壤湿度和碳氮比等,但是不同研究得出的土壤酶活性的主控因子不同<sup>[5, 24~26]</sup>。本研究发现测定的 9 个土壤理化指标中,土壤 pH、总氮和无机氮对土壤酶活性有显著影响。

土壤 pH 不仅是影响土壤微生物群落组成的主要因子<sup>[27, 28]</sup>,也是影响土壤酶活性的关键因子<sup>[29]</sup>。目前的整合分析表明,在全球尺度上土壤 pH 与大部分的土壤酶活性的均存在显著的关系<sup>[13]</sup>。在本研究中,土壤 pH 与亮氨酸氨基多肽酶正相关,而与酸性磷酸酶、几丁质酶和纤维素酶显著负相关。这与之之前大部分研究结果相一致。比如, Sinsabaugh 等<sup>[13]</sup>的整合分析表明虽然酸性磷酸酶、纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶与土壤 pH 相关性不显著,但都呈负相关趋势,几丁质酶与土壤呈显著负相关,但亮氨酸氨基多肽酶却与土壤 pH 呈显著正相关。Kivlin 等<sup>[26]</sup>综合分析了加利福尼亚地区多种生态系统影响土壤酶活性变异的因子,发现酸性磷酸酶、纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶与土壤 pH 显著负相关,并指出这可能是因为这些酶已经适应当地土壤中偏碱性的环境,而实验所用 pH 为 5.5 的缓冲液可能对酶活性起到反作用,使得这些酶与 pH 呈负相关关系。这刚好与本研究的情况相吻合。由于大部分水解酶在 pH 等于 5 左右的时候活性最佳<sup>[30]</sup>,因而实验采用 pH 为 5 的缓冲液。然而在喀斯特区域的土壤 pH 介于 6~8 之间,土壤水解酶可能已经适应这种中性偏碱性的环境,因而土壤酶与土壤 pH 呈显著负相关。

土壤总氮也是影响土壤酶活性的重要因素(图 3)。本研究发现土壤总氮与碱性磷酸酶和几丁质酶显著正相关,与酸性磷酸酶和纤维素酶显著负相关。碱性磷酸酶和几丁质酶与土壤总氮显著的正相关与目前大部分的研究结果一致。例如 Banerjee 等<sup>[31]</sup>在澳大利亚东南部地区发现其所调查的林地和草地生态系统中几丁质酶、纤维素酶和磷酸酶与土壤总氮显著正相关。李为等<sup>[32]</sup>调查了桂林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,发现碱性磷酸酶均与土壤总氮呈显著正相关。何跃

军等<sup>[33]</sup>研究了石灰岩退化生态系统不同恢复阶段的土壤酶活性,发现土壤总氮与碱性磷酸酶之间呈显著正相关关系。然而也有少数研究表明土壤酶活性与总氮之间呈负相关关系。比如, Brockett 等<sup>[7]</sup>在加拿大地区发现几丁质酶和磷酸酶的活性与总氮浓度呈显著负相关关系。氮素是合成土壤酶的重要元素,因此土壤总氮含量一定程度上决定了微生物产生的酶的数量<sup>[34]</sup>。此外,总氮能增加植被地下细根生物量,促进根际微生物生长,致使土壤中相关酶活性增强<sup>[35]</sup>。因而,总氮与大部分酶呈正相关关系。研究中碱性磷酸酶与总氮显著正相关,酸性磷酸酶与总氮显著负相关可能是由于土壤 pH 对土壤酶活性变异有更为强烈的影响而导致的。由于研究区土壤总氮与土壤 pH 的变化一致,而土壤 pH 对酸性磷酸酶和碱性磷酸酶有更为强烈的相反作用,从而导致总氮与两种磷酸酶之间也有相反的关系。

除了土壤 pH 和土壤总氮之外,土壤无机氮也是影响土壤酶活性的重要因子。本研究发现土壤无机氮与酸性磷酸酶和纤维素酶都显著正相关。这也与之前许多研究结果相一致。例如 Banerjee 等<sup>[31]</sup>发现纤维素酶、几丁质酶和磷酸酶均与土壤铵态氮和硝态氮都呈显著正相关。葛晓改等<sup>[36]</sup>调查了三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系,发现纤维素酶与土壤硝态氮呈显著正相关。由于酶自身也是一种蛋白质,因而微生物产生酶也需要氮源。而无机氮作为氮素的一种,可为微生物提供氮源,促进酶的产生,增强酶的活性。这可能是无机氮与酶呈正相关的原因。

## 4 结论

(1) 树种和坡向对酶活性的影响不显著,而坡位对酶活性的影响显著。

(2) 地形、树种和土壤属性共同解释了土壤酶活性变化的 55.3%。其中土壤性质是影响酶活性变化的主要因子,解释量为 44.2%。

(3) 土壤 pH、总氮、无机氮是影响土壤酶活性变化的主要控制因子。

(4) 研究说明在喀斯特地区小尺度内土壤酶活性主要受土壤理化性质的影响。由于目前土壤胞外酶活性的主控因子研究还不够深入,特别是在偏碱性的钙质土壤区域相关研究尤其缺乏,本研究为该领域提供了新的知识。同时,本研究首次量化了喀斯特地区小尺度内地形、树种,及土壤属性对土壤酶活性变化的影响,对该地区土壤酶活性研究有重要

## 的参考价值.

## 参考文献:

- [1] Yao X H, Min H, Lü Z H, *et al.* Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, **42**(2): 120-126.
- [2] 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性[J]. *生态学报*, 2012, **32**(8): 2390-2399.  
Lu S Y, Peng W X, Song T Q, *et al.* Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(8): 2390-2399.
- [3] de la Paz Jimenez M, de la Horra A, Pruzzo L, *et al.* Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **35**(4): 302-306.
- [4] 王冰冰, 曲来叶, 马克明, 等. 岷江上游干旱河谷优势灌丛群落土壤生态酶化学计量特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(18): 6078-6088.  
Wang B B, Qu L Y, Ma K M, *et al.* Patterns of ecoenzymatic stoichiometry in the dominant shrubs in the semi-arid Upper Minjiang River Valley[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 6078-6088.
- [5] Acosta-Martínez V, Cruz L, Sotomayor-Ramírez D, *et al.* Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, **35**(1): 35-45.
- [6] Kang H, Kang S, Lee D. Variations of soil enzyme activities in a temperate forest soil[J]. *Ecological Research*, 2009, **24**(5): 1137-1143.
- [7] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **44**(1): 9-20.
- [8] 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.
- [9] Khalili-Rad M, Nourbakhsh F, Jalalian A, *et al.* The effects of slope position on soil biological properties in an eroded toposequence[J]. *Arid Land Research and Management*, 2011, **25**(3): 308-312.
- [10] 梁儒彪, 梁进, 乔明锋, 等. 模拟根分泌物 C:N 化学计量特征对川西亚高山森林土壤碳动态和微生物群落结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, **39**(5): 466-476.  
Liang R B, Liang J, Qiao M F, *et al.* Effects of simulated exudate C:N stoichiometry on dynamics of carbon and microbial community composition in a subalpine coniferous forest of western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(5): 466-476.
- [11] Nahidan S, Nourbakhsh F, Mosaddeghi M R. Variation of soil microbial biomass C and hydrolytic enzyme activities in a rangeland ecosystem: are slope aspect and position effective?[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, **61**(6): 797-811.
- [12] Chodak M, Niklińska M. The effect of different tree species on the chemical and microbial properties of reclaimed mine soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, **46**(6): 555-566.
- [13] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, **11**(11): 1252-1264.
- [14] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 等. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [15] Bell C W, Fricks B E, Rocca J D, *et al.* High-throughput fluorometric measurement of potential soil extracellular enzyme activities[J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2013, (81): e50961.
- [16] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1180-1186.
- [17] Stallins J A. Dune plant species diversity and function in two barrier island biogeomorphic systems[J]. *Plant Ecology*, 2003, **165**(2): 183-196.
- [18] 孙东, 朱纯, 熊咏梅, 等. 林隙光照对广州市风景林下植物分布的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2011, **32**(4): 63-66.  
Sun D, Zhu C, Xiong Y M, *et al.* Effect of gap light factors on understory plant species distribution in urban scenic forests of Guangzhou[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2011, **32**(4): 63-66.
- [19] Heikkinen R K, Luoto M, Virkkala R, *et al.* Effects of habitat cover, landscape structure and spatial variables on the abundance of birds in an agricultural-forest mosaic[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2004, **41**(5): 824-835.
- [20] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 193.
- [21] Šnajdr J, Dobiášová P, Urbanová M, *et al.* Dominant trees affect microbial community composition and activity in post-mining afforested soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **56**: 105-115.
- [22] Ushio M, Kitayama K, Balser T C. Tree species effects on soil enzyme activities through effects on soil physicochemical and microbial properties in a tropical montane forest on Mt. Kinabalu, Borneo [J]. *Pedobiologia*, 2010, **53**(4): 227-233.
- [23] Ekenler M, Tabatabai M A. Effects of trace elements on  $\beta$ -glucosaminidase activity in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(11): 1829-1832.
- [24] Acosta-Martínez V, Klose S, Zobeck T M. Enzyme activities in semiarid soils under conservation reserve program, native rangeland, and cropland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, **166**(6): 699-707.
- [25] Štursová M, Baldrian P. Effects of soil properties and management on the activity of soil organic matter transforming enzymes and the quantification of soil-bound and free activity [J]. *Plant and Soil*, 2011, **338**(1-2): 99-110.
- [26] Kivlin S N, Treseder K K. Soil extracellular enzyme activities

- correspond with abiotic factors more than fungal community composition[J]. *Biogeochemistry*, 2014, **117**(1): 23-37.
- [27] Lauber C L, Hamady M, Knight R, *et al.* Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(15): 5111-5120.
- [28] Nicol G W, Leininger S, Schleper C, *et al.* The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 2966-2978.
- [29] Stursova M, Sinsabaugh R L. Stabilization of oxidative enzymes in desert soil may limit organic matter accumulation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(2): 550-553.
- [30] Frankenberger Jr W T, Johanson J B. Effect of pH on enzyme stability in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, **14**(5): 433-437.
- [31] 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.
- [32] 李为, 余龙江, 李涛, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(1): 260-266.
- Li W, Yu L J, Li T, *et al.* 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 [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(1): 260-266.
- [33] 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.
- He Y J, Zhong Z C, Liu J M, *et al.* Soil enzyme activities of limestone degraded ecosystem at its different restoration phases [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(6): 1077-1081.
- [34] 贡璐, 冉启洋, 韩丽. 塔里木河上游典型绿洲连作棉田土壤酶活性与其理化性质的相关性分析[J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(4): 36-42.
- Gong L, Ran Q Y, Han L. Enzymatic activities and related physicochemical properties in soils of continuous cropping cotton fields within a typical oasis in Upper Reaches of Tarim River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(4): 36-42.
- [35] 涂利华, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区光皮桦林土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(8): 2129-2134.
- Tu L H, Hu H L, Hu T X, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities in a *Betula luminifera* plantation in Rainy Area of West China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(8): 2129-2134.
- [36] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(2): 445-451.
- Ge X G, Xiao W F, Zeng L X, *et al.* Relationships between soil nutrient contents and soil enzyme activities in *Pinus massoniana* stands with different ages in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(2): 445-451.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                             |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Comparison of Models on Spatial Variation of PM <sub>2.5</sub> Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                  | WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)              |
| Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years .....                                                                    | GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)            |
| Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer .....                                               | HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)            |
| Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing .....                                                               | DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)           |
| Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing .....                                                                    | XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)               |
| Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers .....                                                              | WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)               |
| Effect of VOCs on O <sub>3</sub> and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station ..... | ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)                     |
| Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O <sub>3</sub> in Northern Suburb of Nanjing .....                                              | WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)               |
| Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China .....                    | WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)             |
| Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential .....                                          | WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)        |
| Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator .....                                                 | DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)             |
| Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing .....                                                            | ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)          |
| Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems .....                                                       | WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)            |
| Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel .....                     | LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)              |
| Spatial Variation and Environmental Significance of δ <sup>18</sup> O and δD Isotope Composition in Xijiang River .....                                     | XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)                  |
| Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed .....                                                           | HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)                |
| Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir .....                               | JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)                 |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake .....           | WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)            |
| Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River .....                                       | LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)          |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake .....                                                    | ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)              |
| Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination .....              | QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)                    |
| Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters .....                           | WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)             |
| Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level .....                              | JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao, <i>et al.</i> (2379)              |
| Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron .....                                                                | ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)              |
| Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation .....                             | WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)              |
| Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels .....                                         | JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)          |
| Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis .....          | ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)             |
| Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater .....                                                    | ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419) |
| Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition .....                                                                                       | ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die, <i>et al.</i> (2429)             |
| Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....                                                       | FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)                     |
| Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater .....                                   | ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)           |
| Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....                                                                               | ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)                     |
| Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress .....                                | QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)                |
| Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors .....   | REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen, <i>et al.</i> (2470)          |
| Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge .....                                                  | ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)         |
| Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers .....                                                                 | TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)                          |
| Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism .....                                            | LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (2496)                    |
| Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains .....                                                     | QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)         |
| Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics .....                                     | CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, <i>et al.</i> (2513)                         |
| Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs .....                                                 | TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (2522)                       |
| Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil .....                                                                      | ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)   |
| Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice .....                                           | CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)                     |
| Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice .....                                                  | CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)           |
| Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As .....                                                          | TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)                     |
| Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene .....                                                    | WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)               |
| Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil .....                     | YANG Ning-wei, BI Er-ping, <i>et al.</i> (2568)                         |
| Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions .....                                                      | LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)                  |
| Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain .....            | HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)           |
| Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling .....                                                             | YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)                 |
| Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi .....                            | WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)       |
| Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions .....                             | GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)                |
| Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review .....                                        | WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (2617)        |