

毛竹林土壤酶活性变化的海拔效应^{*}

陈双林^{**} 郭子武 杨清平

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

摘 要 在毛竹分布南缘的中亚热带与南亚热带气候过渡区,选择土壤类型、坡度、坡向、经营水平等一致的3个海拔高度(低海拔90~120 m、中海拔360~400 m、高海拔700~780 m)毛竹林,对其土壤酶活性和物理、化学性质进行了测定。磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性分别为0.031~0.042、0.104~0.146和0.017~0.039 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,中海拔是3种酶活性显著变化的转折点。蛋白酶活性为0.248~0.259 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,随海拔的升高酶活性缓慢提高。过氧化氢酶活性为0.097~0.143 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,随海拔的升高酶活性显著上升。不同海拔高度毛竹林土壤物理性质对土壤酶活性无显著影响。土壤有机质、全氮、碱解氮含量与土壤酶活性呈显著或极显著正相关,pH值对土壤酶活性具正效应,海拔梯度上的土壤全磷、全钾、速磷、速钾含量对土壤酶活性影响不显著。不同种类土壤酶活性间呈显著或极显著相关,酶促反应具专一性和共同性特点。

关键词 毛竹;海拔;土壤酶;土壤物理性质;土壤化学性质

中图分类号 S154 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)3-0529-05

Soil enzyme activities in Moso bamboo forests along an altitude gradient. CHEN Shuang-lin, GUO Zi-wu, YANG Qing-ping (Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China). *Chinese Journal of Ecology* 2010 29(3) 529-533.

Abstract: Soil samples were collected from the Moso bamboo forests with same soil type, slope gradient, slope orientation, and management level at three altitudes (90-120 m, 360-400 m, and 700-780 m) in the mid and south subtropical transitional zone, the southern edge of Moso bamboo distribution, with their physical and chemical properties and enzyme activities determined. In the forests, the activities of soil alkaline phosphatase, invertase, and urease were in the ranges of 0.031-0.042, 0.104-0.146, and 0.017-0.039 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively, with the turning points appeared at altitude 360-400 m. The proteinase activity was in the range of 0.248-0.259 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, and increased slowly with increasing altitude; whereas the catalase activity was in the range of 0.097-0.143 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, and increased significantly with increasing altitude. The enzyme activities at the all three altitudes were less affected by soil physical properties and soil total and available phosphorus and potassium, but had significant positive correlations with soil organic matter, total nitrogen, and available nitrogen. Soil pH had positive effects on the enzyme activities. There existed significant correlations among the test enzyme activities, suggesting that soil enzymatic reactions were both specific and concomitant.

Key words: Moso bamboo; altitude; soil enzyme; soil physical property; soil chemical property.

土壤酶主要来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶,以酶-有机质复合体形式存在,多分布在较小粒径土粒和微团聚体上(Taylor *et al.* 2002)。土壤中广泛存在

的酶类是氧化还原酶类和水解酶类,是土壤代谢的动力,与土壤微生物共同推动着土壤物质转化和能量流动,土壤中有有机、无机营养物质的转化速度,主要取决于转化酶、蛋白酶、磷酸酶、脲酶及其他水解酶类和多酚氧化酶、硫酸盐还原酶等氧化还原酶类的酶促作用(严超升等,1988)。土壤酶活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向(周礼恺

^{*} 国家林业局科技成果(推广)计划资助项目([2004]36-2)。

^{**} 通讯作者 E-mail: cslbamboo@126.com

收稿日期:2009-07-13 接受日期:2009-10-31

等,1981),是土壤肥力评价的重要指标之一,也是土壤自净能力评价的一个重要指标,与土壤生物、理化性质和环境条件等密切相关,如土壤中微生物种类、水气热状况、酸碱度、结构组成、养分丰缺等。

海拔是最能反映环境变化,尤其是光、水、热的因子之一,直接作用于生境的气候生态学特征,并对气候环境的改变使土壤发生物理、化学和生物方面的变化,影响植物群落结构和类型的演化(黄建辉,1994;Begon *et al.*, 2000),最终引起生态系统功能的改变(黄建辉等,2001),使植物生长状况、形态特征与组织显微结构产生不同程度的分异(李书靖等,1999;郭明辉和潘月洁,2000;吴承祯等,2000)。海拔对土壤酶活性变化会产生一定的影响,珠穆朗玛峰北坡海拔4400~5550 m地区,夏季土壤脲酶、磷酸酶活性随海拔升高呈高低波动变化(唐学芳等,2008),浙江西天目山与气候垂直带相应的常绿阔叶林、常绿落叶针阔混交林和落叶矮林土壤脲酶、磷酸酶等5种酶活性随海拔升高呈逐渐上升趋势(徐秋芳等,1997),不同试验区海拔梯度上酶活性变化规律的差异,与研究区气候、土壤类型、植物群落结构等有关。目前就海拔对竹林土壤酶活性的影响尚无研究。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)是中国所特有的经济竹种,分布区域广,栽培面积大,利用价值高,在我国竹产业中占据着十分重要的地位。其生长状况和竹林产品质量与土壤性质关系密切(瞿巧文等,1995;徐秋芳等,1998;姜培坤和徐秋芳,2001)。本文在毛竹分布南缘的中亚热带与南亚热带气候过渡区,选择人工干扰小的不同海拔梯度毛竹林,开展毛竹林土壤酶活性的海拔效应研究,对于揭示气候-土壤-竹林生态系统生物地球化学循环规律,探讨不同海拔梯度毛竹林的更新生长,充分发挥毛竹林多功能效益的人工干扰经营技术具有重要的理论意义和应用价值。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于福建省漳州市华安县(24°38'00"N—25°11'13"N,117°16'20"E—117°44'1"E),是南亚热带向中亚热带过渡的区域,属南亚热带季风湿润气候,年均气温21.3℃,极端最高气温39.0℃,极端最低气温-3.8℃,≥10℃的年均积温7320.6℃,年均

无霜期320 d,年降水量1448~2023 mm,主要降水期3—8月。地带性土壤为南亚热带赤红壤,海拔300~800 m的山地为红壤,海拔800 m以上为黄壤。竹林面积1.1万hm²,其中,毛竹林4000 hm²,在海拔100~300 m区域成小块状分布,海拔300~600 m成块状分布,海拔600 m以上成片分布。试验区人工集约经营的主要竹种为麻竹(*Dendrocalamus latiflorus*)、绿竹(*Bambusa oldhami*)等丛生笋用竹。毛竹林经营极为粗放,多为纯林,以材用林经营为主,秋冬季择伐3度及以上立竹,较少采笋,仅采收退笋和弱小笋,不实施土壤养分补充。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 设置了土壤类型均为红壤,坡向均为西南方向,坡度25°~30°,纯林,经营水平相近(极为粗放,仅有少量伐竹和退笋、弱小笋采收)的3个海拔梯度毛竹试验林。试验林地点、海拔等基本情况如下:

低海拔(90~120 m)——绵良村,坡度27.2°,毛竹林面积2.1 hm²;中海拔(360~400 m)——仁寿坑村,坡度26.5°,毛竹林面积3.8 hm²;高海拔(700~780 m)——天湖坪村,坡度29.1°,毛竹林面积10.3 hm²。

依据试验地毛竹林地下鞭系主要分布于30 cm土层空间的特点,在3个海拔梯度毛竹林中,去除表层杂草、枯落物等,用200 cm³环刀取30 cm土层的样品,每个采样点3次重复,将充满原状土样的环刀带回实验室进行土壤物理性质测定;另外,在3个海拔梯度试验毛竹林中按S形选取5个点,挖土壤剖面,用小型工具铲4个土面垂直平整地取30 cm土层土壤,去除石块、根系等,充分混合均匀后,四分法取土样1 kg,3次重复。土样过1 mm筛,4℃储藏保存用于土壤化学性质、酶活性测定。

1.2.2 土壤物理、化学性质和酶活性测定 利用环刀土样测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度(国家林业局,2000),pH值采用电位法,土壤有机质采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法,土壤全N采用开氏消煮法,全P采用酸溶-钼锑抗比色法,全K采用酸溶-火焰光度法,碱解N采用扩散吸收法,速效P采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效K采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定(鲁如坤,2001),过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨

酸比色法 ,脲酶采用靛酚蓝比色法 ,蛋白酶采用茚三酮比色法测定(关松荫 ,1986)。

1.3 数据处理

实验数据在 Excel 统计软件中进行整理 ,应用 SPSS (one-way ANOVA 和 LSD 法)分析不同海拔梯度毛竹林土壤理化性质、酶活性差异性 ,以及土壤理化性质与土壤酶活性和土壤酶活性间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度毛竹林土壤理化性质变化

由表 1 分析可知 ,不同海拔梯度毛竹林土壤容重无显著差异。海拔对土壤孔隙性的影响主要体现在非毛管孔隙度上 ,3 个海拔梯度毛竹林土壤非毛管孔隙度差异显著 ,高海拔毛竹林分别较中、低海拔毛竹林提高 20. 89%、38. 47% ,总孔隙度、毛管孔隙度无显著差异。土壤 pH 值高海拔毛竹林显著低于中、低海拔毛竹林 ,降幅分别为 13. 85%、19. 12%。土壤有机质含量则是高海拔毛竹林显著高于中、低海拔毛竹林 ,增幅分别为 12. 57%、19. 22%。土壤 pH 值、有机质含量中、低海拔毛竹林均无显著差异。土壤全氮、碱解氮含量不同海拔梯度毛竹林间均有显著差异 ,低海拔最高、高海拔最低 ,土壤全磷、全钾、速效磷、速效钾含量在海拔梯度上无显著差异。

2.2 不同海拔梯度毛竹林土壤酶活性

由表 2 可知 ,海拔对毛竹林 5 种土壤酶活性有一定的影响 ,均是高海拔最大 ,低海拔最小。中、低海拔毛竹林土壤磷酸酶、蔗糖酶、脲酶活性均无显著

差异 ,至高海拔时酶活性显著提高 ,可以认为中海拔是这些土壤酶活性变化的转折点。毛竹林土壤蛋白酶活性随海拔升高无显著变化 ,过氧化氢酶活性则随海拔升高显著增强 ,高海拔毛竹林较中、低海拔毛竹林分别提高 20. 17% 和 47. 42%。

2.3 不同海拔梯度毛竹林土壤酶活性与土壤理化性质的关系

由表 3 可见 ,试验毛竹林土壤酶活性与土壤物理性状具有一定的相关性 ,对改善土壤物理性状有一定的作用 ,但影响程度有限。除土壤容重与磷酸酶、脲酶活性 ,毛管孔隙度、非毛管孔隙度与蔗糖酶活性呈显著负相关 ,总孔隙度与脲酶活性呈显著正相关外 ,其他均未达到显著相关水平。

毛竹林土壤 pH 值对 5 种土壤酶活性均存在正效应 ,相关性不显著。土壤有机质、全氮、碱解氮 ,除碱解氮对蔗糖酶影响不显著外 ,其他均与 5 种土壤酶活性呈显著或极显著相关。土壤全磷、全钾、速磷、速钾含量对土壤酶活性的影响均未达到显著水平。

2.4 毛竹林土壤酶活性间相关关系

土壤是多酶体系 ,各种酶促反应既是专性的 ,又是相互联系的 ,各种酶在同一土壤环境条件下 ,必然相互影响。不同海拔梯度毛竹林土壤酶活性间呈显著或极显著相关关系(表 4) ,除磷酸酶与蔗糖酶、蛋白酶呈显著相关外 ,其他酶间均呈极显著相关 ,说明这些酶在进行酶促反应时 ,不仅具有自身的专一特性 ,还存在着一些共性。

表 1 不同海拔梯度毛竹林土壤理化性质

Tab.1 Soil physical-chemical properties of Moso bamboo forest at different altitudes

海拔 (m)	容重 (g · cm ⁻³)	总孔隙度 (%)	毛 管 孔隙度 (%)	非毛管 孔隙度 (%)	pH	有机质 (g · kg ⁻¹)	全氮 (g · kg ⁻¹)	全磷 (g · kg ⁻¹)	全钾 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	速效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)
90 ~ 120	1. 58 ± 0. 06 a	56. 69 ± 2. 12 a	37. 27 ± 1. 47 a	19. 42 ± 1. 48 a	5. 23 ± 0. 12 a	22. 17 ± 1. 13 a	2. 23 ± 0. 07 a	1. 53 ± 0. 04 a	16. 63 ± 0. 78 a	139. 07 ± 7. 74 a	1. 87 ± 0. 04 a	312. 19 ± 11. 97 a
360 ~ 400	1. 50 ± 0. 04 a	59. 50 ± 2. 42 a	36. 58 ± 1. 39 a	22. 26 ± 1. 69 b	4. 91 ± 0. 17 a	23. 48 ± 1. 74 a	1. 72 ± 0. 04 b	1. 57 ± 0. 07 a	17. 02 ± 0. 56 a	114. 86 ± 6. 25 b	1. 84 ± 0. 03 a	305. 83 ± 10. 56 a
700 ~ 780	1. 43 ± 0. 02 a	62. 08 ± 3. 08 a	35. 19 ± 1. 95 a	26. 89 ± 1. 71 c	4. 23 ± 0. 14 b	26. 43 ± 1. 18 b	1. 01 ± 0. 02 c	1. 52 ± 0. 05 a	16. 71 ± 0. 51 a	89. 38 ± 5. 89 c	1. 82 ± 0. 03 a	308. 67 ± 9. 17 a

数据为平均值 ± 标注差 , 同列不同小写字母表示差异显著(P < 0. 05)。下同。

表 2 不同海拔梯度毛竹林土壤酶活性变化(mg · g⁻¹ · h⁻¹)

Tab.2 Soil enzyme activity of Moso bamboo forest at different altitudes

海拔(m)	过氧化氢酶	磷酸酶	蔗糖酶	脲酶	蛋白酶
90 ~ 120	0. 097 ± 0. 002 a	0. 031 ± 0. 002 a	0. 104 ± 0. 011 a	0. 017 ± 0. 005 a	0. 248 ± 0. 009 a
360 ~ 400	0. 119 ± 0. 005 b	0. 031 ± 0. 002 a	0. 107 ± 0. 009 a	0. 020 ± 0. 007 a	0. 251 ± 0. 011 a
700 ~ 780	0. 143 ± 0. 003 c	0. 042 ± 0. 004 b	0. 146 ± 0. 010 b	0. 039 ± 0. 008 b	0. 259 ± 0. 007 a

表 3 土壤酶活性与土壤理化性质关系
Tab. 3 Relationship between soil enzyme activity and physical-chemical properties

理化性质	过氧化氢酶	磷酸酶	蔗糖酶	脲酶	蛋白酶
容重	0. 3187	-0. 6467 *	0. 4705	-0. 6136 *	0. 2419
总孔隙度	0. 4219	0. 4631	-0. 3628	0. 6314 *	0. 2738
毛管孔隙度	0. 3365	0. 3815	-0. 7132 *	0. 5935	0. 2513
非毛管孔隙度	0. 3726	0. 4839	-0. 6714 *	0. 5208	0. 2738
pH	0. 2478	0. 3167	0. 1265	0. 4065	0. 3143
有机质	0. 7341 **	0. 8342 **	0. 4618 *	0. 7317 **	0. 7138 **
全 N	0. 7849 **	0. 9124 **	0. 7687 **	0. 8763 *	0. 7841 **
碱解 N	0. 8219 **	0. 7957 **	0. 4514	0. 9012 **	0. 8137 **
全 P	0. 3419	0. 4087	0. 3328	0. 3508	0. 2045
速效 P	0. 4214	0. 3815	0. 3029	0. 4761	0. 3084
全 K	0. 4529	0. 3971	0. 4702	0. 5014	0. 4735
速效 K	0. 3940	0. 5138	0. 3917	0. 4382	0. 5147

* $P < 0. 05$, ** $P < 0. 01$ 。下同。

表 4 土壤酶活性间相关性
Tab. 4 Correlation coefficient matrix of soil enzyme activity

土壤酶	过氧化氢酶	磷酸酶	蔗糖酶	脲酶
磷酸酶	0. 8347 **			
蔗糖酶	0. 7153 **	0. 6874 *		
脲 酶	0. 8212 **	0. 7381 **	0. 7429 **	
蛋白酶	0. 7430 **	0. 5985 *	0. 9132 **	0. 7301 **

3 讨 论

本研究表明,随海拔升高毛竹林土壤 5 种酶活性提高,与杨式雄等(1993)在福建武夷山典型森林类型土壤中的研究结果一致。说明试验区海拔升高对毛竹林土壤肥力提高有促进作用,是引起不同海拔梯度毛竹林生长状况差异显著的主要原因之一。中海拔是土壤磷酸酶、蔗糖酶、脲酶活性显著提高的转折点。海拔升高对蛋白酶活性的影响小,而过氧化氢酶活性变化显著。这种土壤酶活性的变化规律,与不同海拔毛竹林环境因子的变化直接相关,土壤酶活性与气候、土壤理化性质等关系极为密切(周智彬和徐新文 2004,安韶山等 2005)。

虽然海拔的升高对土壤物理性质起到了一定的改善作用,尤其是土壤非毛管孔隙度的显著增大,不同海拔梯度毛竹林土壤物理性质与土壤酶活性也具有一定的相关性,但影响程度有限。这可能与调查测定的 3 个海拔梯度毛竹林土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度 3 个重要的土壤物理性质因子无显著差异有关。已有研究表明,土壤物理性质对土壤酶活性

有影响,但影响程度未达到显著水平(郑诗樟等, 2008),与本试验结果一致。

土壤酸碱度直接影响着土壤酶参与生化反应的速度,有些酶促反应,对 pH 变化很敏感,甚至只能在较窄的 pH 范围内进行(周礼恺,1987;万忠梅和吴景贵 2005),许多酶的酶促反应最适 pH 值是在中性或弱酸性、弱碱性土壤中(Frankenberger *et al.*, 1983 和文祥等 2000),当土壤 pH 值降低到一定程度时,微生物种群的变化会促使酶活性的降低(娄翼来等 2007),表明土壤 pH 值对土壤酶活性有着重要影响。试验毛竹林土壤 pH 值对 5 种土壤酶活性均具有正效应。毛竹林土壤有机质、全氮、碱解氮是土壤酶活性的主要影响因子,其中,碱解氮对蔗糖酶活性影响不显著,可能与土壤机械组成随海拔高度的变化而变化,尤其是与土壤蔗糖酶活性密切相关的粘粒含量变化有关,其机理需进一步研究。各个海拔梯度上土壤磷、钾全量和速效养分含量均无显著差异,从而使土壤全磷、全钾、速效磷、速效钾对土壤酶活性的影响均未达显著水平。

随着海拔的升高,毛竹林土壤 pH 值下降,有机质含量提高,全氮、碱解氮含量显著下降,土壤酶活性提高,分析可见,土壤酶活性受多种因素的综合作用,是各因素正、负效应及其作用强度的结果,也反映出土壤有机质对土壤酶活性的重要性,土壤有机质增加,即碳源在数量上的提高,可以促进土壤酶主要来源的土壤微生物的新陈代谢,从而提高土壤酶活性。从土壤养分状况及土壤化学性质与酶活性的相关性分析,不同海拔梯度毛竹林除应实行分类经营、定向培育外,适当地人工补充土壤养分是增强土壤肥力、提高林分生产力的需要,特别是增施磷、氮肥。当然,为避免因长期施用化学肥料致成土壤酸化,应施用磷、氮养分含量高的有机肥或专用复混肥。也应注意林地生物量的有效归还,增加土壤有机质含量。

不同海拔梯度毛竹林土壤酶活性间呈显著或极显著相关,酶促反应具有专一性和共同性,这可能是几种土壤酶针对某一相同底物时,其中任何一种酶与底物结合后,会产生一种或多种信息物质激活其他酶的活性,如磷酸酶的酶促作用能够加速有机磷的转化,提高土壤磷素的有效性,而磷素对于其他土壤酶来说是必须的能源。而有着共性关系的酶类在总体活性程度上反映出土壤肥力水平的高低(高惠民 1988)。

参考文献

- 安韶山,黄懿梅,郑粉莉. 2005. 黄土丘陵地区草地土壤脲酶活性特征及其与土壤性质的关系. *草地学报*, **13** (3):233-237.
- 高惠民. 1988. 农业土壤管理. 北京:科学出版社.
- 关松荫,张德生,张志明. 1986. 土壤酶及其研究法. 北京:农业出版社.
- 郭韶辉,潘月洁. 2000. 不同海拔高度白桦木材解剖特征径向变异. *东北林业大学学报*, **28**(4):25-29.
- 国家林业局. 2000. 中华人民共和国林业行业标准——森林土壤分析方法,LY/T1210-1275-1999. 北京:中国标准出版社.
- 和文祥,朱铭莪,张一平. 2000. 土壤酶与重金属关系的研究现状. *土壤与环境*, **9**(2):139-142.
- 黄建辉,白永飞,韩兴国. 2001. 物种多样性与生态系统功能:影响机制及有关假说. *生物多样性*, **9**(1):1-7.
- 黄建辉. 1994. 物种多样性的空间格局及其形成机制初探. *生物多样性*, **2**(2):103-107.
- 姜培坤,徐秋芳. 2001. 土壤生物学性质对毛竹粗生长影响的研究. *生态学杂志*, **20**(6):25-28 40.
- 瞿巧文,赵忠北,张东北,等. 1995. 立地条件对毛竹林结构影响的研究. *竹类研究*, **14**(2):52-59.
- 李书靖,党宏忠,何虎林,等. 1999. 华北落叶松生长量与立地气候因子关系的研究. *甘肃林业科技*, **24**(1):1-5.
- 姜翼来,关连珠,王玲莉,等. 2007. 不同植烟年限土壤 pH 和酶活性的变化. *植物营养与肥料学报*, **13**(3):531-534.
- 鲁如坤. 2001. 土壤农业化学分析方法. 北京:科学出版社.
- 唐学芳,孙辉,罗英,等. 2008. 珠穆朗玛峰北坡土壤脲酶和中性磷酸酶活性初步研究. *土壤通报*, **39**(2):270-273.
- 万忠梅,吴景贵. 2005. 土壤酶活性影响因子研究进展. *西北农林科技大学学报*, **33**(6):87-92.
- 吴承祯,洪伟,姜志林. 2000. 杉木人工林自疏过程密度变化与环境因子关系的数量分析. *江西农业大学学报*, **22**(2):214-219.
- 徐秋芳,刘力,洪月明. 1998. 高低产毛竹林地土壤酶活性比较分析. *竹子研究汇刊*, **17**(3):37-40.
- 徐秋芳,郑小平,余文忠. 1997. 西天目山森林土壤酶活性的分析. *浙江林学院学报*, **4**(2):142-146.
- 严昶升,周礼恺,张德生. 1988. 土壤肥力研究法. 北京:农业出版社.
- 杨式雄,戴教藩,陈宗献,等. 1993. 武夷山土壤酶活性垂直分布与土壤肥力关系的研究. *福建林业科技*, **20**(1):1-7.
- 郑诗璋,肖青亮,吴蔚东. 2008. 丘陵红壤不同人工林型土壤微生物类群、酶活性与土壤理化性状关系的研究. *中国生态农业学报*, **16**(1):57-61.
- 周礼恺,张志明,陈恩凤. 1981. 黑土的酶活性. *土壤学报*, **18**(2):158-165.
- 周礼恺. 1987. 土壤酶学. 北京:科学出版社.
- 周智彬,徐新文. 2004. 塔里木沙漠公路防护林土壤酶分布特征及其与有机质的关系. *水土保持学报*, **18**(5):10-14.
- Begon M, Harper JL, Townsend CR. 2000. *Ecology: Individuals Populations and Communities* (2nd ed.). Boston: Blackwell Scientific Publications.
- Frankenberger JR, Johansen JB, Nelson CO. 1983. Urease activity in sewage sludge amended soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **15**:543-549.
- Taylor JP, Wilson B, Mills MS, et al. 2002. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface and subsoils using various techniques. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**:387-401.

作者简介 陈双林 男 1965 年生 博士 研究员. 主要从事竹林生态与栽培研究 发表论文 60 余篇. E-mail: cslbamboo@126.com
责任编辑 魏中青