

土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性

耿玉清¹ 白翠霞¹ 赵广亮² 余新晓¹ 姚永刚² 秦永胜³

(1 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京林业大学水土保持学院

2 北京市八达岭林场 3 北京市园林绿化国际项目合作办公室)

摘要:为探讨土壤磷有效性管理的措施,该文对北京八达岭地区9种林分类型下土壤的磷酸酶活性、有机磷组分以及二者之间的关系进行了系统研究。结果表明:土壤磷酸酶的类型以酸性磷酸酶为主。表层0~5 cm土层的磷酸酶活性显著高于5~25 cm和25~45 cm土层的磷酸酶活性,且与土壤有机碳、氮有显著的相关性。土壤有机磷有明显的表聚性,在全磷中的比例为15.51%~17.48%。在土壤有机磷组分中,以中活性有机磷含量最高,其次为活性有机磷,而高稳性有机磷的含量最低。活性有机磷与中活性有机磷含量的相关性显著。磷酸酶活性与有机磷含量有密切的关系,无论是酸性磷酸酶还是碱性磷酸酶,都与活性有机磷、中活性有机磷、中稳性有机磷以及土壤有效磷含量有极显著的相关性。增加土壤有机质,诱导磷酸酶的产生,是提高土壤有效磷含量的途径。

关键词:酶活性;土壤磷酸酶;土壤有机磷;有机磷组分;活性有机磷;土壤有效磷;相关性

中图分类号:S714.3 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2008)增刊2-0139-05

GENG Yu-qing¹; BAI Cui-xia¹; ZHAO Guang-liang²; YU Xin-xiao¹; YAO Yong-gang²; QIN Yong-sheng³.

Soil phosphatase activity and its correlation with composition of organic phosphorus. *Journal of Beijing Forestry University* (2008)30(Supp.2)139-143[Ch, 20 ref.]

¹ Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

² Beijing Badaling Forest Farm, 102112, P. R. China;

³ Beijing Forestry and Parks Department of International Cooperation, 100029, P. R. China.

Soil phosphatase activity, composition of organic phosphorus and their relationship in nine different forest types were studied to explore measures of soil phosphorus availability management in Badaling mountains, Beijing. Results show that soil acid phosphatase is predominant. Phosphatase activity in 0-5 cm soil horizon is obviously higher than that in 5-25 cm and 25-45 cm. The correlation of phosphatase activity and soil organic carbon, nitrogen is significant. Content of soil organic phosphorus in 0-5 cm soil horizon is obviously rich. The rate of soil organic phosphorus is from 15.51% to 17.48% in total phosphorus. In the composition of organic phosphorus, the content of moderate labile organic phosphorus is the highest, followed by the labile organic phosphorus, and resistant organic phosphorus is the lowest. The labile organic phosphorus is significantly related to the moderate labile organic phosphorus. The activity of acid and alkaline phosphatase is closely related to the contents of labile organic phosphorus, moderate labile organic phosphorus, moderate resistant organic phosphorus and available phosphorus. Inducing phosphatase by enriching soil organic matters may increase the content of soil available phosphorus.

Key words enzyme activity; soil phosphatase; soil organic phosphorus; composition of organic phosphorus; labile organic phosphorus; available phosphorus; correlation

收稿日期:2008-05-26

http://www.bjfujournal.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:北京市科委重大项目(D0706001000091)。

第一作者:耿玉清,博士,副教授。主要研究方向:森林土壤健康及管理。电话:010-62338103 Email:gengyuqing@bjfu.edu.cn 地址:100083 北京林业大学水土保持学院。

责任作者:余新晓,博士生导师,教授。主要研究方向:水土保持、生态学、生态水文。电话:010-62338846 Email:yuxinxiao@bjfu.edu.cn 地址:同上。

在自然和半自然的森林生态系统中,维持森林植物健康发育所需的磷,主要来源于土壤有机质和土壤矿物质。但磷在土壤中的难溶性和难移动性,可能会导致土壤有效磷的缺乏。在某些温带区域,磷的缺乏可能是普遍的现象^[1]。森林土壤含有丰富的有机物质,促进有机磷的转化,对提高磷的有效性具有重要意义。磷酸酶可催化磷酸脂类或磷酸酐的水解,其活性的高低直接影响着土壤有机磷的分解转化及其生物有效性。国外不少学者针对土壤磷酸酶与土壤磷素的关系、磷酸酶活性的动态及其影响因素等进行了大量的研究^[2-5]。近年来,我国从施肥和磷胁迫对土壤磷酸酶的影响^[6-8]、影响磷酸酶活性的因素^[9-13]以及土壤磷酸酶活性演变与林木生长的关系^[14]等方面进行了一系列研究。但对磷酸酶与磷形态的系统研究不多。本文以山地森林土壤为研究对象,系统研究土壤磷酸单脂酶类型、分布及其与土

壤有机磷各形态组分的关系。旨在揭示磷酸酶在磷转化中的作用,为山地土壤磷的管理提供理论依据。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究地区概况及采样方法

研究区设在北京市八达岭林场。地理坐标为东经 115°55', 北纬 40°17', 平均海拔 780 m。该区属大陆性季风气候, 年均气温 10.8℃, 年均降水量 454 mm, 其中 7、8 月的降水量约占全年的 59%。岩石种类以花岗岩为主, 土壤类型主要为褐土和棕壤。植被类型主要是 20 世纪 50 年代营造的人工林、自然恢复的灌草丛和灌丛, 在中山地带少量的天然次生林。

在北京八达岭林场的西沟地带, 选取 9 种不同的林分类型, 分别设置 20 m × 20 m 的标准样地。样地基本情况见表 1。

表 1 样地的基本情况

TABLE 1 General situation of experiment plots

林分类型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度	树高/m	胸径/cm	土层厚度/cm
油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>)	703	0	平坦	0.70	14.0	8.2	60
华山松 (<i>Pinus armandii</i>)	669	0	平坦	0.80	13.5	8.5	58
华北落叶松 (<i>Larix principis-rupprechtii</i>)	973	18	阴坡	0.65	17.4	7.9	70
侧柏 (<i>Platycladus orientalis</i>)	615	40	阳坡	0.70	17.8	9.3	35
白梨 (<i>Pyrus bretschneideri</i>)	732	15	阳坡	0.50	20.6	9.9	48
暴马丁香 (<i>Syringa reticulata</i>)	748	30	阳坡	0.70	12.7	6.2	32
黑桦 (<i>Betula dahurica</i>)	1 166	15	阴坡	0.85	14.5	6.6	67
糠椴 (<i>Tilia mandshurica</i>)	896	20	阴坡	0.70	16.7	8.8	100
核桃楸 (<i>Juglans mandshurica</i>)	1 023	15	阴坡	0.70	17.4	8.9	66

在每块标准地有代表性的部位, 分别挖掘 3 个土壤剖面。按 0~5 cm、5~25 cm、25~45 cm 的深度采集土壤分析样本, 并将同层的土样混合。

1.2 室内分析指标及分析方法

土壤常规指标的分析方法: 土壤 pH 采用 2.5:1 的水(体积)土(质量)比, 用电位法测定; 土壤有机质采用水合热重铬酸钾氧化-容量法; 土壤全氮采用

硫酸钾-硫酸铜-硒粉消煮, 定氮仪自动分析法; 土壤水解性氮采用碱解扩散法; 土壤全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法; 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法; 土壤全钾采用氢氟酸-高氯酸消煮火焰光度计法; 土壤速效钾采用中性乙酸铵提取-火焰光度计法。土壤常规指标的分析结果见表 2。

土壤有机磷及形态的分组测定采用化学浸提剂方法^[15]。

磷酸酶活性测定采用对硝基苯磷酸盐法, 采用 pH 为 6.5 和 11 的缓冲液将磷酸单脂酶分为碱性磷酸酶(EC 3.1.3.1)和酸性磷酸酶(EC 3.1.3.2), 磷酸酶的活性用 1 h 每克土产生对硝基酚的微克数表示^[16]。

应用 SPSS 13 软件的均数比较和相关分析对所获数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 土壤磷酸酶活性的分布

2.1.1 土壤磷酸酶的类型

对研究地区土壤磷酸酶活性的测定数据见表

表 2 不同土层土壤的 pH、有机质和养分含量

TABLE 2 Soil pH, organic matter, nutrients in different soil horizons

	土层/cm		
	0~5	5~25	25~45
pH	6.59(0.17)A	6.72(0.13)A	6.80(0.16)A
有机质/(g·kg ⁻¹)	58.82(3.54)A	42.24(4.23)B	3.09(3.02)C
全氮/(g·kg ⁻¹)	2.23(0.21)A	1.63(0.19)B	1.24(0.14)B
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	32.02(4.78)A	18.01(3.95)B	12.43(2.70)B
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.58(0.06)A	0.54(0.08)A	0.48(0.09)A
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	16.12(1.99)A	13.28(1.80)AB	9.87(1.67)B
全钾/(g·kg ⁻¹)	16.95(3.07)A	5.38(0.67)B	4.07(0.49)B
速效钾/(g·kg ⁻¹)	146.01(17.04)A	73.65(15.29)B	49.04(4.76)C

注: 括号内数据为标准误, 表中 A、B、C 等不同大写字母表示同行差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。下同。

3。目前国外对磷酸酶的研究中,一般将磷酸酶分为酸性磷酸酶和碱性磷酸酶^[2-5,17]。依据各土层磷酸酶活性的变动范围以及平均值可看出,研究地区的土壤磷酸酶活性以酸性磷酸酶,而碱性磷酸酶的活性相对较低。依据平均值进行统计分析发现,任何土层的酸性磷酸酶都显著高于碱性磷酸酶。如 0~5 cm 中,酸性磷酸酶的平均活性为 90.91 $\mu\text{g/g}$,比碱性磷酸酶高 28.33%。酸性磷酸酶显著高于碱性磷酸酶的原因,可能与土壤的酸碱性大小有关,在酸性

土壤中的酸性磷酸酶占优势^[18]。从测定的 27 个土壤 pH 数据中,低于 6.5 的有 10 个,低于 7.0 的有 19 个,超过 7.5 的仅有 1 个。将 27 个土壤 pH 数据与磷酸酶活性进行相关分析(见表 4),其中酸性磷酸酶与 pH 的相关系数为 -0.508,达到了显著的水平 ($P < 0.05$)。因此,研究地区土壤磷酸酶 pH 对酸性磷酸酶活性的影响非常显著。有学者认为,测定碱性磷酸酶与酸性磷酸酶的比值(AlkP/AcdP)可以作为指示土壤酸性调节的指标^[17]。

表 3 不同土层土壤磷酸酶的活性

TABLE 3 Soil phosphatase activity in different soil horizons

层次/cm	酸性磷酸酶		碱性磷酸酶		磷酸酶总量
	变动范围	平均值	变动范围	平均值	
0~5	43.32~136.45	90.91 (10.30) aA	32.42~103.46	70.84(8.11) aB	161.75(17.87) a
5~25	37.72~98.77	61.42 (7.51) bA	3.78~91.34	39.53(9.80) bB	100.95(14.95) b
25~45	22.21~73.66	47.17(6.17) bA	2.92~59.35	28.81(6.00) bB	75.98(11.14) b

注:a,b 等不同小写字母表示同列指标差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 土壤磷酸酶的垂直分布

从表 3 土壤磷酸酶在不同土层的垂直分布来看,无论是酸性磷酸酶还是碱性磷酸酶,在 0~5 cm 土层中的活性最高,显著地高于 5~25 cm 和 25~45 cm 的磷酸酶活性。虽然 5~25 cm 土层的磷酸酶活性高于 25~45 cm,但差异未达到显著水平。因此,土壤磷酸酶活性的大小随土层深度的增加,呈现递减的规律。这可能与森林土壤表层含有丰富的有机碳、氮以及微生物有关^[18]。对 27 组土壤磷酸酶与有机质、氮的相关性进行分析的结果(见表 4)显示,酸性磷酸酶与有机质、氮的相关系数分别为 0.658 和 0.531,而碱性磷酸酶的相关系数则分别为 0.714 和 0.659,均达到了显著相关的水平。因此,土壤中有机碳、氮含量的高低影响着磷酸酶活性的消长变化。

表 4 土壤磷酸酶与土壤有机质和氮的相关性

TABLE 4 Correlation of soil phosphatase with soil organic C and N

磷酸酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	pH	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
酸性磷酸酶	-0.508**	0.658**	0.531**	0.742**
碱性磷酸酶	0.328	0.714**	0.659**	0.872**
总磷酸酶	-0.438*	0.715**	0.619**	0.840**

注:* 表示相关性显著 ($P < 0.05$), ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

2.2 土壤有机磷及其各组分的含量

2.2.1 土壤有机磷的含量及垂直分布

来自生物体的土壤有机磷是全磷的一个重要组成部分。从表 5 土壤有机磷总量的垂直分布来看,表层 0~5 cm 土壤有机磷的含量最高,与下层土壤的有机磷有显著的差异。这一分布与表层土壤有机

质丰富有关。土壤有机磷在全磷中的比例在不同土层的样本中有较大的差异。如在 0~5 cm 土层中,黑桦林有机磷占全磷的比例为 26.55%,而侧柏林有机磷占全磷的比例仅为 11.35%。与表层相比,25~45 cm 的土层中有机磷在全磷中的比例较低,而侧柏林有机磷占全磷的比例仅为 5.61%(数据未列出)。表 5 数据显示,土壤有机磷在全磷中的比例平均为 15.51%~17.48%,这说明研究地区土壤磷主要来源于矿物质,而来自有机物质的磷相对较少。这一现状可能与研究地区人工植被恢复时间较短,有机物质在土壤中的积累时间不长有关。

表 5 土壤有机磷的含量及分布

TABLE 5 Content and distribution of organic phosphorous

土层/cm	有机磷总量 范围/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机磷 总量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	占全磷量 比例范围/%	占全磷量 比例/%
0~5	44.54~132.42	96.25(8.74)a	11.35~26.04	17.48(1.53)a
5~25	29.00~109.77	67.61(7.88)b	8.17~48.33	16.78(4.21)a
25~45	17.49~74.92	47.69(5.77)b	5.61~19.49	15.51(4.44)a

2.2.2 土壤有机磷的组分特征

对有机磷形态的划分,目前主要是应用 Bowman-Cole 的磷分级体系,将有机磷分为活性有机磷、中活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷。从表 6 来看,表层 0~5 cm 中活性有机磷的含量显著高于活性有机磷、中稳性有机磷以及高稳性有机磷。在底层土壤中,中活性有机磷的含量也属于最高水平。从各组分在总有机磷中的比例也可看出,土壤有机磷的形态主要是中活性有机磷,其次为活性有机磷,而高稳性有机磷的比例最低。这一研究结果与他人的研究不同。孟庆华等^[11]对山东省褐

土和棕壤的有机磷形态组分的研究表明,中活性有机磷是有机磷的主要成分,其次为中稳性有机磷和高稳性有机磷,而活性有机磷含量最低。在东北落叶松(*Larix gmelinii*)林地中,中稳性有机磷的相对含

量最大,其次为中活性有机磷和高稳性有机磷,而活性有机磷含量最低^[19]。研究地区土壤的中活性和活性有机磷含量较高,可能与林地土壤有机质积累的时间不长且土壤的颗粒较粗有关^[20]。

表6 土壤有机磷的组成

TABLE 6 Composition of soil organic phosphorus

土层/ cm	活性有机磷 占有机磷/%	活性有机磷/ (mg·kg ⁻¹)	中活性有机 磷占有机磷/%	中活性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	中稳性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	中稳性有机磷 占有机磷/%	高稳性有 机磷/(mg·kg ⁻¹)
0~5	19.21~50.48	28.31(3.30) aB	31.99~56.40	43.58(5.69)aA	18.26(2.04)aC	4.36~9.87	6.11(0.74)aD
5~25	16.40~49.39	19.53(2.72)bB	31.99~61.64	33.22(5.37)aA	11.47(1.72)bB	2.51~11.30	3.39(0.64)bC
25~45	13.40~41.39	13.79(2.02)bB	30.49~60.64	23.95(3.94)bA	7.64(1.00)bC	2.98~13.71	2.32(0.44)bC

由于土壤活性有机磷在土壤中矿化分解很快,可作为植物生长的一种有效磷源;而中活性有机磷的矿化速率虽不及活性有机磷,但它也可提供部分植物生长所需磷。了解有机磷各组份间的关系,可进一步了解活性有机磷的来源。表7的数据显示:活性有机磷分别与中活性有机磷、中稳性和高稳性

有机磷以及有机磷总量、有效磷呈显著的相关性,而中活性有机磷与中稳性和高稳性有机磷以及有机磷总量、有效磷和全磷之间存在显著的相关性。由此看来,有机磷总量的消长显著影响着中活性有机磷以及活性有机磷的变化,进而影响到土壤有效磷的水平。

表7 土壤有机磷组分之间的关系

TABLE 7 Relationship among different components of soil organic phosphorus

	中活性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	中稳性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	高稳性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	有机磷总 量/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)
活性有机磷/(mg·kg ⁻¹)	0.534**	0.570**	0.486*	0.797**	0.600**	0.281
中活性有机磷/(mg·kg ⁻¹)	1	0.581**	0.387*	0.897**	0.562**	0.527**

注: *表示相关性显著($P<0.05$), **表示相关性极显著($P<0.01$)。下表同。

2.3 土壤磷酸酶与有机磷的关系

土壤有机化合物中的磷,主要是通过磷酸酶的作用来释放的。有学者认为,在磷酸酶缺乏的情况下,土壤有机磷的释放需要几百年的时间^[1]。因此,磷酸酶活性的高低与土壤有机磷的矿化组分有密切关系。将磷酸酶与土壤磷素的形态进行相关分析

(见表8)可知,无论是酸性磷酸酶还是碱性磷酸酶与全磷的相关性均较低,但磷酸酶活性与有机磷以及活性、中活性以及中稳性有机磷组分的含量存在着显著的相关性。这表明磷酸酶在有机磷各组分转化过程有重要作用。

在植物生长发育过程中,经常用有效磷含量表

表8 土壤磷酸酶与土壤有机磷组分的相关性

TABLE 8 Correlation between soil phosphatase and soil organic phosphorus

磷酸酶/(mg·g ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)	有机磷/ (g·kg ⁻¹)	活性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	中活性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	中稳性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	高稳性有机 磷/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)
酸性磷酸酶	0.227	0.793**	0.703**	0.629**	0.730**	0.563**	0.691**
碱性磷酸酶	0.084	0.718**	0.686**	0.623**	0.505**	0.352	0.772**
总磷酸酶	0.162	0.787**	0.724**	0.652**	0.644**	0.478*	0.762**

示土壤的供磷水平。而磷酸酶影响着有机磷的转化,因此探讨磷酸酶的活性与土壤有效磷的关系,对磷素的生物管理具有重要意义。表8数据表明,土壤磷酸酶与有效磷含量的相关系数为0.762,达到了极显著相关水平。Olander等^[4]也发现在磷含量高的样地中,磷酸酶的活性最高。但也有学者认为土壤磷酸酶活性随土壤磷素含量的降低而增加^[3]。从目前来看,由于土壤酶来源的广泛性以及研究方法的复杂性,目前生态系统中养分有效性与土壤酶活性的相关关系还很难建立^[2]

3 结 论

通过对磷酸酶活性、有机磷组分以及二者之间的相互关系进行研究,可得出如下结论:

1)研究地区土壤磷酸酶中,主要以酸性磷酸酶形态存在。表层0~5 cm 土层磷酸酶的活性显著高于底层土壤。与土壤有机碳、氮有显著的相关性。因此,增加土壤有机质的积累可诱导磷酸酶的产生。

2)土壤有机磷有明显的表聚性,表层0~5 cm 土壤有机磷的含量最高,与下层土壤的有机磷有显

著的差异。土壤有机磷主要来源于矿物质,在全磷中所占比例为 15.51%~17.48%。在土壤有机磷组分中,以中活性有机磷为主,其次为活性有机磷,而高稳性有机磷的比例最低,且活性有机磷与中活性有机磷含量有显著的区别且有显著的相关性。因此,研究地区土壤中可矿化的有机磷资源比较丰富。有机磷及其各组分的消长影响着土壤有效磷含量的变化。

3) 无论是酸性磷酸酶还是碱性磷酸酶,与有机磷以及各组分的含量、土壤有效磷含量有显著的相关性。提高土壤有机磷含量,诱导磷酸酶的产生,可在一定程度上提高土壤有效磷的含量。

参 考 文 献

- [1] FISHER R F, BINKLEY D. *Ecology and management of forest soils* [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000: 282-284.
- [2] ALLISON V J, CONDRON L M, PELTZER D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand[J]. *Soil Biological and Biochemistry*, 2007, 39(7): 1 770-1 781.
- [3] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 937-944.
- [4] OLANDER L P, VITOUSEK P M. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 49(2): 175-191.
- [5] KR? MER S, GREEN D M. Acid and alkaline phosphatase dynamics and their relationship to soil microclimate in a semiarid woodland [J]. *Soil Biological and Biochemistry*, 2000, 32(2): 179-188.
- [6] 孟娜, 廖文华, 贾可, 等. 磷肥、有机肥对土壤有机磷及磷酸酶活性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(4): 57-59.
MENG N, LIAO W H, JIA K, et al. Effect of phosphorus fertilizer and organic manure on organic phosphorus content and the activity of phosphatase in soils[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(4): 57-59.
- [7] 谢林花, 吕家珑, 张一平. 长期不同施肥对石灰性土壤微生物磷及磷酸酶的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 65-68.
XIE L H, LÜ J L, ZHANG Y P. Long-term effects of different fertilization on calcareous soil microbial P and phosphatase [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 65-68.
- [8] 梁霞, 刘爱琴, 马祥庆, 等. 磷胁迫对不同杉木无性系酸性磷酸酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 54-59.
LIANG X, LIU A Q, MA X Q, et al. The effect of phosphorus deficiency stress on activities of acid phosphatase in different clones of Chinese fir[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 54-59.
- [9] 和文祥, 蒋新, 余贵芬, 等. 生态环境条件对土壤磷酸酶的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 81-83.
HE W X, JIANG X, YU G F, et al. Influence of ecological-environmental conditions on soil phosphatase [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2003, 31(2): 81-83.
- [10] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J]. 安徽技术师范学院学报, 2001, 15(4): 5-8.
YU Q Y. Study on soil phosphatase activity and their influenced factor[J]. *Journal of Anhui Technical Teachers College*, 2001, 15(4): 5-8.
- [11] 孟庆华, 李根英. 山东省主要土类的有机磷及其与磷酸化酶和解磷微生物的相关性研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 84-87.
MENG Q H, LI G Y. Study on organic phosphorus and its correlation with soil phosphatase and phosphorus-solubilizing microbe in the main soils of Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 84-87.
- [12] 白翠霞, 耿玉清, 余新晓, 等. 八达岭山地次生林土壤养分与磷酸酶活性研究[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 52-55.
BAI C X, GENG Y Q, YU X X, et al. Soil nutrient and phosphatase activity under secondary forest in Badaling mountain[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 52-55.
- [13] 耿玉清, 白翠霞, 赵铁蕊, 等. 北京八达岭地区土壤酶活性及其与土壤肥力的关系[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 7-11.
GENG Y Q, BAI C X, ZHAO T R, et al. Soil enzyme activity and its relationship with the soil fertility in Badaling mountain area of Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 7-11.
- [14] 陈立新, 杨承栋, 落叶松人工林土壤磷形态、磷酸酶活性演变与林木生长关系的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 12-18.
CHEN L X, YANG C D. The succession of various types of phosphorus, phosphatase activity, and the relationship with the tree growth in larch plantations [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(3): 12-18.
- [15] 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.
LU R K. *Standard soil agro-chemical analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] SCHINNER F, HLINGER R, KANDELER E, et al. *Methods in soil biology* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 213-216.
- [17] DICK W A, CHENG L, WANG P. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators[J]. *Soil Biological and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1 915-1 919.
- [18] GIANFREDA L, RUGGIERO P. Enzyme activities in soil [M]// NANNIPIERI P, SMALLA K. *Nucleic acids and proteins in soil*. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 257-265.
- [19] 陈立新. 人工林土壤质量演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 72-86.
CHEN L X. *Succession and regulation of soil quality in plantations* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 72-86.
- [20] 耿玉清. 北京八达岭地区森林土壤理化特征及健康指数的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
GENG Y Q. *Study on physico-chemical property and health index of forest soil on Badaling Mountain in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.

(责任编辑 赵 勃)