

北京山地 4 种阔叶林土壤酶活性及动力学特征

刘肖肖, 戴 伟, 戴奥娜

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: 为研究北京山地阔叶林土壤酶特征及其与土壤理化性质的关系, 探讨土壤酶活性与动力学参数作为评价土壤肥力指标的可行性, 选取刺槐 *Robinia pseudoacacia*, 山杨 *Populus davidiana*-白桦 *Betula platyphylla*, 槲树 *Quercus dentata* 和板栗 *Castanea mollissima* 等 4 种阔叶林林型, 利用方差分析、相关分析和主成分分析方法对 0~20, 20~40, 40~60 cm 土壤脲酶、过氧化物酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶的活性和动力学特征及与土壤理化性质的关系进行了研究。结果表明: 脲酶和过氧化氢酶活性, 酶促反应的最大速度($V_{\max}$), 酶促反应速度反映指标($V_{\max}/K_m$)都随土壤深度的增加而减小($P<0.05$), 米氏常数(K_m)变化无规律; 土壤酶促反应效率不仅取决于土壤酶活性, 动力学特征对其也有重要影响; 评价土壤肥力的指标, 除了有机质、全氮、速效钾、速效磷和有效铁外, 土壤脲酶活性, $V_{\max}$, $V_{\max}/K_m$, 过氧化物酶活性与 K_m 也可作为北京山地阔叶林土壤肥力的评价指标。图 2 表 6 参 29

关键词: 森林土壤学; 阔叶林; 土壤酶特征; 土壤理化性质; 相关分析; 主成分分析

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)05-0794-08

Soil enzyme activity and their kinetics in broadleaf forests of Beijing mountainous areas

LIU Xiaoxiao, DAI Wei, DAI Aona

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To study the relationship between characteristics of soil enzymes and soil physicochemical properties of broadleaf forests in the Beijing mountainous area and to determine the feasibility of using soil enzyme activity as well as kinetic parameters as the evaluation indexes of soil fertility, soil from *Robinia pseudoacacia*, mixed *Betula platyphylla*-*Populus davidiana*, *Quercus dentata*, and *Castanea mollissima*, four kinds of broadleaf forests in Beijing, were selected as the research objects. Variance, correlation analysis, and principal component analysis (PCA) were used for analysis of four soil enzymes activity (urease, peroxidase, polyphenol oxidase, and catalase) and kinetic characteristics in the 0–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm soil depths. Results showed that enzyme activity, maximum rate of enzymatic reaction ($V_{\max}$), and the indicator of enzymatic reaction rate ($V_{\max}/K_m$) (where K_m is Michaelis constant) of urease and catalase significantly decreased ($P<0.05$) with an increase of soil depth. However, K_m had not significant variation. Soil enzymatic reaction efficiency depends not only on enzyme activity but also on its kinetics. Enzyme activity, $V_{\max}$, and $V_{\max}/K_m$ of urease as well as enzyme activity and K_m of peroxidase could be used to reflect soil fertility in the Beijing mountain forests with other important indexes to evaluate being soil organic matter, total N, available K, available P, and available Fe. [Ch, 2 fig, 6 tab, 29 ref.]

Key words: forest soil science; broadleaf forests; soil enzyme characteristics; soil physicochemical properties; correlation analysis; principal component analysis (PCA)

收稿日期: 2017-10-23; 修回日期: 2017-12-18

基金项目: 国家科技基础性工作专项基金资助项目(2014FY120700)

作者简介: 刘肖肖, 从事土壤生态研究。E-mail: liuxiaoxiao677@163.com。通信作者: 戴伟, 副教授, 博士, 从事森林土壤研究。E-mail: daiwei1@bjfu.edu.cn

土壤酶作为土壤有机物转化的执行者和植物营养元素的活性库，积极参与土壤中所有的生物化学过程^[1]。由于酶对土壤及环境变化比较敏感，因此土壤酶被看作判别土壤质量和胁迫环境下土壤退化的早期预警指标^[2-3]。鉴于此，很多学者将关注焦点集中在土壤酶活性与土壤理化性质关系方面的研究，探讨利用酶活性评价土壤肥力的可能性^[4-9]。为了更加深入了解土壤酶的影响作用，学者们进一步开展了土壤酶促反应动力学特征方面的研究^[10-15]。但由于土壤酶促反应的复杂性，迄今为止，土壤酶活性作为土壤肥力指标虽被大多数者认可，但仍存有争论^[16-17]；研究内容多集中在表层土壤酶活性方面，而结合土壤酶促反应机理所开展的更深入的研究较少；研究对象多以不同农业管理方式下的土壤为主，针对森林土壤的研究很少，且不完善等^[18]。刺槐 *Robinia pseudoacacia* 林，板栗 *Castanea mollissima* 林，槲树 *Quercus dentata* 林以及山杨 *Populus davidiana*-白桦 *Betula platyphylla* 林是北京山地重要的阔叶林分类型，针对其林下土壤酶活性及酶促反应动力学特征的相关研究较少。为此，本研究选择刺槐、山杨-白桦、槲树和板栗林下土壤为对象，研究土壤脲酶、多酚氧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性及动力学特征，并进一步利用主成分分析，分析比较各特征因子评价土壤肥力的可行性，选取合理的肥力评价指标，以期完善北京林地土壤质量评价体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选取坡度相近、坡向相同的刺槐林、板栗林、槲树林、以及山杨-白桦林为研究样地。设置 100 m × 100 m 标准样地(表 1)，每个样地分割为 20 m × 20 m 的 25 个样方，利用随机取样法选取 5 个样方保证代表性，分别采集深度为 0~20、20~40 和 40~60 cm 的土壤混合样品，风干过筛后，放入 4 ℃冰箱中保存备用。

表 1 研究样地概况

Table 1 General situation of experimental sites

林型	海拔/m	腐殖质层厚/cm	坡度/(°)	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	密度/(株·hm ⁻²)	郁闭度
RP	576	0.7	18	东北	11.51	6.09	778	0.65
BP	1 270	5.5	19	东北	13.10	10.97	1 149	0.93
QD	710	0.2	22	东北	14.90	8.72	871	0.67
CM	525	0	15	东北	7.43	3.11	864	0.72

说明：RP 代表刺槐林，BP 代表山杨-白桦林，QD 代表槲树，CM 代表板栗林

1.2 研究方法

1.2.1 土壤理化性质测定 土壤颗粒组成采用吸管法；土壤有机质用外加热法；土壤全氮采用硫酸-高氯酸消煮-凯氏定氮仪法；土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法；土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法；pH 值采用酸度计法；土壤有效态铁、锰、锌、铜采用 DTPA-TEA 浸提-AAS 法^[19-20]。

1.2.2 土壤酶活性及动力学参数测定 脲酶活性采用靛酚蓝比色法，酶活性以 37 ℃，24 h 土壤释放铵态氮的量表示(mg·g⁻¹)；多酚氧化酶和过氧化物酶活性采用邻苯三酚比色法，酶活性以 30 ℃，2 h 土壤生成没食子素的量表示(mg·g⁻¹)；过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法，酶活性以 20 min 土壤消耗高锰酸钾的量表示(mL·g⁻¹)。

酶促反应特征参数：分别测定不同反应时间下底物浓度或产物的变化量，利用时间与变化量作图，曲线初期的斜率即为土壤酶促反应初速度(V_0)。再根据 Lineweaver-Burk 方程(1)，利用 $1/V_0$ 对 $1/S$ 作图，求出不同酶促反应的 $V_{\max}$ ， K_m 和 $1/V_{\max}$ ^[21-23]。

$$1/V_0 = 1/V_{\max} + K_m / V_{\max} \times 1/S。$$
(1)

式(1)中： V_0 为酶促反应初速度； $V_{\max}$ 为酶促反应的最大速度，可表征土壤酶参与酶促反应过程潜在能力的容量指标，即酶的总量； K_m 为米氏常数，是酶的特征性常数，只与酶的性质有关，与总酶量无关，可表征酶与底物的亲和能力； S 为底物浓度(mol·L⁻¹)。其中，脲酶底物浓度为 0.008，0.020，0.080 和 0.600 mol·L⁻¹，反应时间分别为 6.0，12.0，18.0 和 24.0 h；多酚氧化酶底物浓度为 0.080，0.160，0.320 和 0.480 mol·L⁻¹，反应时间分别为 0.5，1.0，2.0 和 3.0 h；过氧化物酶底物浓度为 0.008，0.040，0.080

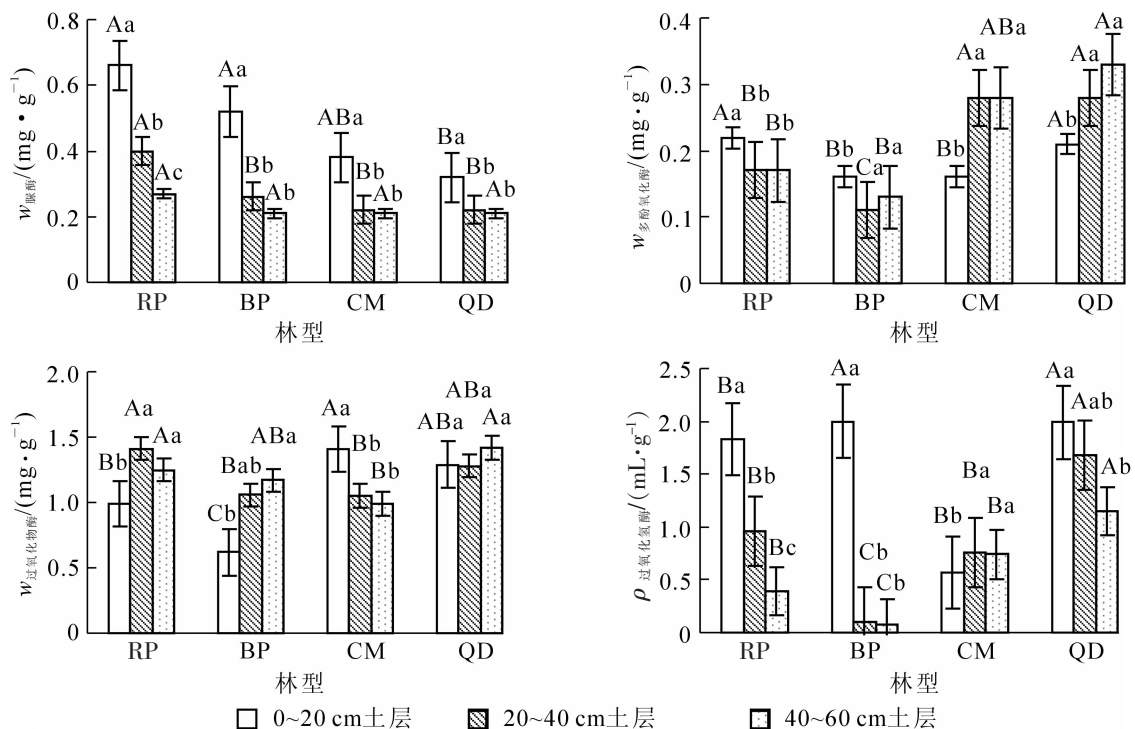
和 $0.160 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应时间分别为 0.5, 1.0, 2.0 和 3.0 h; 过氧化氢酶底物浓度为 0.088, 0.176, 0.352, 0.528, 0.704 和 $0.880 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应时间分别为 2.0, 4.0, 8.0 和 10.0 min。

1.2.3 数据处理 采用 SPSS 21 对 4 种酶的活性和动力学参数进行方差分析, 对 4 种酶特征值和土壤理化性质进行相关分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 土壤酶活性变化特征

不同林分类型下, 土壤脲酶随土层加深而减小, 0~20 cm 土壤酶活性显著高于下层土壤, 这与以往多数研究结果相同^[24-25]。此外, 不同林型同层土壤比较发现, 脲酶活性为刺槐林>山杨-白桦林>板栗林>榉树林。除板栗林外, 3 种林型土壤过氧化氢酶活性也表现出与脲酶活性相同的剖面规律, 其中, 刺槐林和山杨-白桦林 0~20 cm 土壤酶活性显著高于下层, 而榉树林土壤则表现为渐变的层间变化特征。不同林型下土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性表现出不同的剖面垂直变化和层间变化特点。但刺槐林、山杨-白桦林和榉树林同层土壤比较发现, 2 种酶活性都呈现高一低一高的变化趋势(图 1)。



RP代表刺槐林, BP代表山杨-白桦林, QD代表榉树林, CM代表板栗林。不同大写字母表示同一土层不同林型差异显著($P < 0.05$); 不同小写字母表示相同林型不同土层差异显著($P < 0.05$)

图 1 不同林型土壤酶活性

Figure 1 Enzyme activity in the soil under different plantations

2.2 土壤酶动力学参数变化特征

表 2 表明: 土壤脲酶酶促反应的最大速度(V_{max})和土壤酶催化效率(V_{max}/K_m)均随土层深度增加而降低, 两者在 0~20 cm 土层明显高于下层土壤, 表明该土层脲酶质量分数最高, 酶促反应效率最高, 但酶和底物亲和力(K_m)没有明显的剖面变化; 除板栗林外, 其他 3 种林型土壤过氧化氢酶酶促反应的 V_{max} , V_{max}/K_m 和 K_m 表现出与脲酶相同的剖面变化特征。但不同林型下土壤多酚氧化酶和过氧化物酶酶促反应的 V_{max} , V_{max}/K_m 和 K_m 没有明显的剖面垂直变化规律。不同林型同层土壤呈不同的酶促反应特征, 没有统一的规律性。

2.3 土壤酶活性及动力学参数相关分析

从表 3 看出: 脲酶活性与 V_{max} , 脲酶活性与 V_{max}/K_m , V_{max}/K_m 与 V_{max} 的相关系数分别为 0.905, 0.918 和 0.927, 达极显著相关水平, 与 K_m 呈负相关; 多酚氧化酶的活性与 V_{max}/K_m 显著相关(0.895), 与 V_{max}

表 2 土壤酶动力学参数
Table 2 Kinetic parameters of soil enzyme

林型	土层深度/cm	脲酶			多酚氧化酶			过氧化物酶			过氧化氢酶		
		$V_{\max}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	$K_m/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$V_{\max}/K_m$	$V_{\max}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	$K_m/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$V_{\max}/K_m$	$V_{\max}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	$K_m/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$V_{\max}/K_m$	$V_{\max}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	$K_m/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$V_{\max}/K_m$
RP	0~20	5.76 Ba	7.13 Cb	0.81 Aa	0.26 Aa	0.11 Ab	2.44 Ba	0.75 ABb	0.04 Ba	16.81 Bc	1.19 Ba	1.05 Bb	1.13 Aa
	20~40	3.58 Ab	13.55 Ba	0.26 Ab	0.28 Aa	0.19 Aa	1.50 Bb	1.02 Aa	0.04 Aa	27.17 Bb	0.46 Bb	0.76 ABc	0.61 Bb
	40~60	2.70 Ac	11.34 Cab	0.24 Ab	0.21 ABa	0.12 Ab	1.78 Cb	0.76 Bb	0.02 Cb	43.29 Ba	0.32 Bb	1.35 Aa	0.24 Cc
BP	0~20	7.21 Aa	9.41 BCc	0.77 Aa	0.15 Ba	0.08 Ba	2.00 Ca	0.65 Bc	0.09 Aa	7.52 Cb	2.06 Aa	1.72 Aa	1.20 Aa
	20~40	2.04 Bb	12.04 Bb	0.17 ABb	0.12 Ba	0.09 Ba	1.31 Bb	0.88 Bb	0.05 Aa	17.39 Ca	0.02 Cb	0.27 Bb	0.08 Cb
	40~60	1.25 Bb	28.49 Aa	0.04 Bc	0.14 Ba	0.08 Ba	1.66 Cb	1.04 Aa	0.06 Aa	16.00 Ca	0.02 Cb	0.41 Cb	0.06 Db
QD	0~20	4.28 Ba	22.01 Ab	0.19 Ca	0.19 ABb	0.06 Ba	2.99 Ac	0.88 ABa	0.03 Ba	29.94 Ab	1.32 Ba	1.10 Ba	1.20 Aa
	20~40	1.62 Cb	28.91 Aa	0.06 Bb	0.28 Aa	0.08 Ba	3.51 ABb	0.83 Ba	0.02 Ba	35.09 Ab	1.16 Aab	1.13 Aa	1.02 Aab
	40~60	1.52 Bb	30.97 Aa	0.05 Bb	0.29 Aa	0.06 Ba	4.77 Ba	0.82 Ba	0.01 Ca	66.23 Aa	0.82 Ab	1.16 ABa	0.70 Ab
CM	0~20	3.46 Ba	12.39 Bb	0.28 Ba	0.15 Bb	0.08 Ba	2.00 Cb	1.02 Aa	0.03 Ba	30.03 Aab	0.20 Cb	0.54 Cb	0.37 Ba
	20~40	2.70 Ab	10.05 Bb	0.27 Aa	0.26 Aa	0.07 Ba	3.85 Ab	0.61 Bb	0.02 Ba	36.23 Aa	0.44 Ba	0.92 Aa	0.47 Ba
	40~60	1.33 Bc	21.52 Ba	0.06 Bb	0.20 ABb	0.03 Cb	6.05 Aa	0.69 Bb	0.03 Ba	22.94 Cb	0.38 Ba	0.81 Ba	0.46 Ba

说明：RP 代表刺槐林，BP 代表山杨-白桦林，QD 代表榉树，CM 代表板栗林。不同大写字母表示同一土层不同林型差异显著($P<0.05$)；不同小写字母表示相同林型不同土层差异显著($P<0.05$)

相关， $V_{\max}/K_m$ 和 K_m 呈负相关；过氧化物酶的 $V_{\max}/K_m$ 和 K_m 显著负相关；过氧化氢酶的 $V_{\max}$ 与 $V_{\max}/K_m$ ， K_m 均显著相关，且系数为 0.815 和 0.937， $V_{\max}/K_m$ 和 K_m 为正相关关系。

表 3 不同林型下土壤酶特征值相关分析

Table 3 Correlation analysis of soil enzyme characteristics under different plantations

酶	酶特征值	活性	$V_{\max}$	K_m	$V_{\max}/K_m$	酶	酶特征值	活性	$V_{\max}$	K_m	$V_{\max}/K_m$
脲酶	活性	1.000				过氧化物酶	活性	1.000			
	$V_{\max}$	0.905**	1.000				$V_{\max}$	0.334	1.000		
	K_m	-0.596*	-0.645*	1.000			K_m	-0.550	0.022	1.000	
	$V_{\max}/K_m$	0.918**	0.927**	-0.734**	1.000		$V_{\max}/K_m$	0.205	-0.028	-0.826**	1.000
多酚氧化酶	活性	1.000				过氧化氢酶	活性	1.000			
	$V_{\max}$	0.614*	1.000				$V_{\max}$	0.439	1.000		
	K_m	-0.446	0.260	1.000			K_m	0.352	0.815**	1.000	
	$V_{\max}/K_m$	0.895**	0.424	-0.666*	1.000		$V_{\max}/K_m$	0.456	0.937**	0.698*	1.000

说明：* 表示差异显著($P<0.05$)，** 表示差异极显著($P<0.01$)

2.4 土壤酶特征值与土壤理化性质相关分析

各层土壤属于壤土。除板栗林外，其余林型下层土壤黏粒高于表层，体现出一定的黏粒淋溶聚集特点。不同林型土壤 pH 值均呈弱酸性反应。除有效铜外，其他土壤化学性质表现出随土层加深逐渐减小的特点(表 4)。

土壤脲酶、过氧化物酶的活性与土壤有机质、速效磷、速效钾达显著或极显著相关；脲酶酶促反应的 $V_{\max}$ 和 $V_{\max}/K_m$ ，过氧化物酶酶促反应的 K_m ，与有机质、全氮、速效钾等土壤化学性质以及有效铁、有效锰、有效锌之间都呈显著或极显著相关。其余的酶特征因子与土壤理化性质相关性较差或无相关性(表 5)。

2.5 土壤因子主成分分析

以往对土壤肥力进行评价时，涉及大量指标和数据，仅凭借主观判断很难找出其中的内部联系和影响，主成分分析法可将各个因子化为少数几个综合因子，并尽可能保留原变量的信息量，且彼此之间互不相关，而达到简化的目的。因此，近年来在土壤肥力研究中得到了普遍的应用^[11,14,26]。表 5 可知：土

表 4 不同林型土壤理化性质

Table 4 Physicochemical properties of soil under different plantations

林型	土层/ cm	砂粒	粉粒	黏粒<	pH	$w_{\text{有机质}}/$	$w_{\text{全氮}}/$	$w_{\text{速效磷}}/$	$w_{\text{速效钾}}/$	$w_{\text{有效铁}}/$	$w_{\text{有效锰}}/$	$w_{\text{有效锌}}/$	$w_{\text{有效铜}}/$
		200~0.02 mm/%	0.020~0.002 mm/%	0.002 mm/%		(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)
RP	0~20	54.49	38.74	6.77	6.57	31.81	1.32	2.06	148.5	23.16	17.37	1.42	0.68
	20~40	62.97	30.14	6.90	6.53	20.16	0.87	1.78	70.0	14.22	16.85	0.39	0.82
	40~60	49.51	42.74	7.75	6.54	8.08	0.46	1.03	56.5	8.54	12.17	0.16	0.47
BP	0~20	48.62	45.74	5.64	6.13	81.10	4.09	3.33	135.0	77.57	14.46	1.23	0.45
	20~40	35.46	53.63	10.92	6.08	29.65	1.43	1.42	62.0	43.40	6.39	0.26	0.21
	40~60	23.44	66.13	10.43	6.26	18.78	1.23	1.16	69.5	37.34	4.85	0.19	0.54
QD	0~20	70.51	24.01	5.49	5.71	28.43	0.97	1.71	47.5	36.02	64.82	1.03	0.55
	20~40	58.25	35.91	5.84	5.48	10.74	0.39	1.20	24.3	17.34	56.13	0.40	0.46
	40~60	69.72	24.79	5.49	6.40	7.50	0.15	0.85	20.5	9.49	42.71	0.16	0.17
CM	0~20	57.11	34.91	7.99	5.64	13.59	0.61	2.58	52.0	63.81	40.32	1.75	2.10
	20~40	64.48	28.31	7.22	6.87	8.74	0.36	2.26	50.0	17.82	15.71	0.69	1.32
	40~60	57.33	33.54	9.13	7.13	7.71	0.39	1.39	60.0	13.52	9.76	0.53	1.57

说明: RP 代表刺槐林, BP 代表山杨-白桦林, QD 代表榉树, CM 代表板栗林

表 5 土壤酶特征值与土壤理化性质的相关关系

Table 5 Correlations between enzyme activity as well as its kinetic characteristics and the physicochemical properties of the soil under different plantations

酶种类	特征值	pH 值	有机质	全氮	速效磷	速效钾	黏粒	有效铁	有效锰	有效锌	有效铜
脲酶	活性	-0.043	0.634*	0.571	0.644*	0.870**	-0.318	0.397	-0.090	0.706*	0.018
	V_{max}	-0.258	0.793**	0.739**	0.784**	0.775**	-0.445	0.609*	0.050	0.741**	0.017
	K_m	0.450	-0.490	-0.405	-0.162	-0.390	0.411	-0.162	-0.234	-0.190	0.539
	V_{max}/K_m	-0.136	0.760**	0.700*	0.598*	0.851**	-0.425	0.403	-0.028	0.580*	-0.217
多酚氧化酶	活性	0.268	-0.426	-0.491	-0.262	-0.388	-0.532	-0.581*	0.420	-0.124	0.075
	V_{max}	0.518	-0.454	-0.475	-0.065	-0.056	-0.253	-0.640*	-0.030	-0.018	0.412
	K_m	0.195	0.098	0.097	0.074	0.329	0.042	-0.193	-0.340	-0.104	-0.098
	V_{max}/K_m	0.214	-0.432	-0.460	-0.269	-0.450	-0.323	-0.390	0.334	-0.109	0.183
过氧化物酶	活性	-0.289	-0.726**	-0.761**	-0.552	-0.712**	-0.087	-0.439	0.503	-0.240	0.094
	V_{max}	0.037	-0.171	-0.157	-0.094	-0.092	0.441	0.038	-0.127	-0.051	0.200
	K_m	-0.213	0.873**	0.911**	0.518	0.625*	0.041	0.728**	-0.318	0.191	-0.381
	V_{max}/K_m	0.389	-0.637*	-0.624*	-0.362	-0.459	0.105	-0.551	0.051	-0.211	0.487
过氧化氢酶	活性	-0.273	0.492	0.366	0.389	0.338	-0.849**	0.137	0.564	0.467	-0.204
	V_{max}	0.106	0.562	0.553	0.880**	0.589*	-0.368	0.523	-0.109	0.729**	0.428
	K_m	0.244	0.333	0.349	0.551	0.385	-0.438	0.175	-0.122	0.394	0.293
	V_{max}/K_m	0.110	0.348	0.307	0.819**	0.497	-0.420	0.370	0.029	0.810**	0.575

说明: * 表示差异显著($P<0.05$), ** 表示差异极显著($P<0.01$)

壤脲酶活性, V_{max} 和 V_{max}/K_m 以及土壤过氧化物酶活性和 K_m 与多项土壤理化性质表现出很好的相关性, 因此具有一定的土壤肥力评价意义。为筛选出起主要因素的因子群, 对土壤理化性质及上述酶学指标进一步作主成分分析。由表 6 可知: 第 1 主成分的方差贡献率最大, 为 50.93%, 4 个主成分累计方差贡献率达 91.81%。因此, 前 4 个主成分的综合指标基本能反映土壤肥力系统内的变异信息。

由图 2 可知: 第 1 主成分和第 2 主成分分别解释了总方差变量的 50.93%和 17.94%, 因此与之相关性大的因子可以认为是主要影响因子。第 1 主成分主要与有机质($r=0.930$), 全氮($r=0.909$), 速效钾($r=0.862$), 速效磷($r=0.834$), 有效铁($r=0.747$), 过氧化物酶 K_m ($r=0.774$), 脲酶的活性($r=0.832$), V_{max} ($r=0.925$), V_{max}/K_m ($r=0.876$) 相关, 第 2 主成分主要与有效锰($r=0.928$)相关。上述因子可作为评价土壤肥

力的重要指标。

3 讨论

土壤脲酶活性和除板栗林外的其他 3 种林型下土壤过氧化氢酶活性垂直剖面特点明显，表现出随土壤深度增加而降低的特征。板栗林土壤过氧化氢酶可能受到较为强烈的人为影响，因而其活性表现出独特的剖面垂直特征(图 1)。例如农药的施入会强烈抑制土壤过氧化氢酶活性^[22]，在板栗林管理中往往会使用低浓度农药防治栗疫病、白粉病等，这可能是导致板栗林表层土壤过氧化氢酶活性降低的重要原因之一。土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性与土壤腐殖质的形成和转化密切相关^[22]。尽管刺槐、山杨-白桦和槲树林下同层土壤显示出一定的变化规律，但如何更加准确理解不同林型下 2 种土壤酶活性的特征及变化，还需深入研究。

土壤酶来自于微生物、植物根系和土壤动物的分泌^[22]，其活性被认为是评价土壤肥力的重要指标。研究认为，土壤脲酶活性与土壤肥力密切相关，是评价土壤肥力的重要指标之一^[8,15,21]。本研究得到相同的结论(图

2)，验证了土壤脲酶活性可作为评价土壤肥力的普遍性指标。土壤过氧化物酶活性对土壤肥力也表现出良好的指示意义，而多酚氧化酶和过氧化氢酶活性则指示意义较低(表 2)，这一结论与前人研究或相同^[27]或不同^[28]。这种研究结论间的差异表明上述土壤酶活性受土壤条件和植被类型的深刻影响，所以表现出同一种酶活性在不同研究中呈现不同的土壤肥力指示意义，不具备土壤脲酶活性所具有的普遍性特点。因此，在进行土壤肥力评价时，选择具有说明意义的土壤酶活性指标是十分必要的。

土壤酶作为一种特殊催化剂影响着土壤中生物化学反应的过程和强度，其活性是影响酶促反应的重要因素。一些学者尝试通过土壤酶活性的变化解释酶对土壤特征的响应和影响^[29]。但本研究表明：土壤酶促反应强度并不仅取决于土壤酶活性的高低，土壤酶的活性及其与底物的结合强度等动力学特征也同样会对酶促反应产生重要影响。因此，单纯利用活性高低解释土壤酶对酶促反应的影响并不利于对酶促反应的理解。以 0~20 cm 土壤脲酶酶促反应催化效率为例，刺槐林土壤脲酶催化效率最高，其次分别为山杨-白桦林土壤、板栗林和槲树林土壤。这种催化效率的不同是由酶的活性、质量分数和酶-底物亲和力共同作用的结果。刺槐林土壤脲酶具有最高的活性及与底物最强的亲和力，酶促反应催化效率最高；槲树林土壤脲酶活性虽然高于板栗林土壤，但由于活性最低、酶-底物亲和力最弱，催化效率最低；山杨-白桦林土壤脲酶活性显著高于其他 3 种土壤，脲酶活性最高，但由于活性和酶-底物亲和力的影响，使其酶促反应催化效率低于刺槐林土壤，而高于板栗林和槲树林土壤；板栗林土壤脲酶活性虽然低于槲树林，但由于相对较高的活性及 K_m 值明显不同，使其酶促反应的催化效率高于槲树林土壤(图 1，表2)。

4 结论

土壤脲酶活性和其他 3 种林型下(除板栗林)的土壤过氧化氢酶活性随土壤深度的增加而减小，而土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性在不同林型下垂直剖面特征不同。土壤脲酶和过氧化氢酶 V_{max} 和 V_{max}/K_m 随土壤深度的增加而减小；多酚氧化酶和过氧化物酶的动力学参数均无规律性变化。土壤酶促反应效率不仅取决于土壤酶活性，其动力学特征也会对酶促反应产生重要影响，两者结合更利于对酶促反应的理

表 6 土壤主成分特征值

Table 6 Principal component eigenvalues of the tested soils			
项目	特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
第 1 主成分	7.64	50.93	50.93
第 2 主成分	2.69	17.94	68.87
第 3 主成分	1.91	12.74	81.61
第 4 主成分	1.53	10.20	91.81

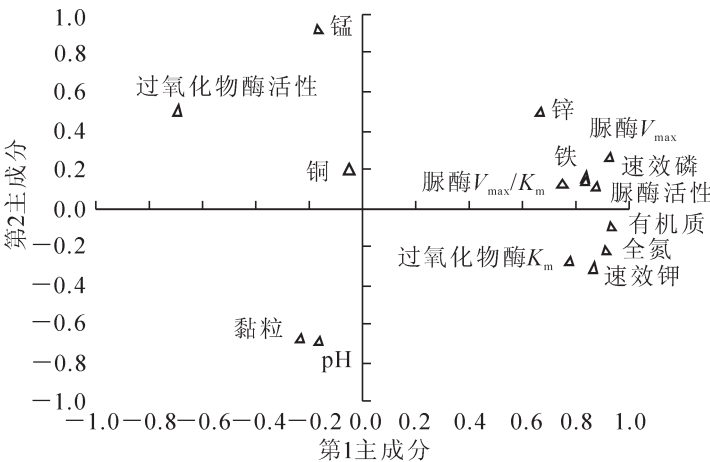


图 2 土壤主成分因子载荷

Figure 2 Factor loading of main composition of soil

解。土壤酶的种类及其活性和动力学参数对土壤肥力的解释程度不同,脲酶的活性, $V_{\max}$, $V_{\max}/K_m$ 和过氧化物酶的活性, K_m 可以作为反映北京山地阔叶林土壤肥力的指标,而多酚氧化酶和过氧化氢酶的活性与动力学参数对土壤肥力的说明意义较小。土壤脲酶的活性, $V_{\max}$ 和 $V_{\max}/K_m$ 以及过氧化物酶 K_m , 有机质、全氮、速效钾、速效磷、有效铁等因子可作为评价北京山地阔叶林土壤肥力状况的重要指标。

5 参考文献

- [1] SRIVASTAVA S C, SINGH J S, MICROBIAL C. N and P in dry tropical forest soils: effects of alternate land-uses and nutrient flux [J]. *Soil Biol Biochem*, 1991, **23**(2): 117 – 124.
- [2] DICK R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality [C]// DORAN J W, COLEMAN D C, BEZDICEK K F. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison: Soil Science Society of America Special Publication, 1994: 107 – 124.
- [3] BADIANE N N Y, CHOTTE J L, PATE E, *et al.* Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions [J]. *Appl Soil Ecol*, 2001, **18**(3): 229 – 238.
- [4] 朱海强, 李艳红, 李发东. 艾比湖湿地典型植物群落土壤酶活性季节变化特征[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(4): 1145 – 1154.
ZHU Haiqiang, LI Yanhong, LI Fadong. Seasonal variations of soil enzyme activities in typical plant communities in the Ebinur Lake wetland, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(4): 1145 – 1154.
- [5] SARDANS J, PENUELAS J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37**(3): 455 – 461.
- [6] 张英洁, 靳英华, 谷晓楠, 等. 长白山苔原带植被变化与土壤微生物、酶活性及土壤肥力的相关性[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(11): 3086 – 3093.
ZHANG Yingjie, JIN Yinghua, GU Xiaonan, *et al.* Vegetation change in relation to soil microbes, enzyme activity and soil fertility in tundra of Changbai Mountain [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(11): 3086 – 3093.
- [7] SALAZAR S, SANCHEZ L E, ALVAREZ J, *et al.* Correlation among soil enzyme activities under different forest system management practices [J]. *Ecol Eng*, 2011, **37**(8): 1123 – 1131.
- [8] 梁卿雅, 王旭, 刘文杰, 等. 不同林龄桉树人工林的土壤理化性质及脲酶活性[J]. *热带作物学报*, 2017, **38**(3): 450 – 455.
LIANG Qingya, WANG Xu, LIU Wenjie, *et al.* Soil physical and chemical properties and soil urease activity in *Eucalyptus* plantation of different planting age [J]. *Chin J Trop Crops*, 2017, **38**(3): 450 – 455.
- [9] 孙鹏跃, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松人工林地土壤养分与土壤酶的季节变化及关系[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, **33**(6): 944 – 952.
SUN Pengyue, XU Fuli, WANG Weiling, *et al.* Seasonal dynamics of soil nutrients and soil enzyme activities in *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(6): 944 – 952.
- [10] 于海霞, 戴伟, 夏良放, 等. 亚热带不同人工林对土壤酶活性及其动力学特征地影响[J]. *北京林业大学学报*, 2007, **29**(1): 114 – 118.
YU Haixia, DAI Wei, XIA Liangfang, *et al.* Effects of different plantations on the activity of soil enzymes and their kinetic characteristics in subtropical zone [J]. *J Beijing For Univ*, 2007, **29**(1): 114 – 118.
- [11] 薛文悦, 戴伟, 王乐乐, 等. 北京山地几种针叶林土壤酶特征及其与土壤理化性质的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2009, **31**(4): 90 – 96.
XUE Wen Yue, DAI Wei, WANG Lele, *et al.* Characteristics of soil enzymes and their relationship with physicochemical properties in coniferous forest soils in Beijing mountainous area [J]. *J Beijing For Univ*, 2009, **31**(4): 90 – 96.
- [12] 王乐乐, 戴伟, 聂立水, 等. 北京山地不同阔叶林型下土壤脲酶动力学与热力学特征[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(2): 314 – 319.
WANG Lele, DAI Wei, NIE Lishui, *et al.* Kinetic and thermodynamic properties of urease in different broad-leaved forest soils in Beijing mountain area [J]. *Chin J Soil Sci*, 2010, **41**(2): 314 – 319.
- [13] 李丹丹. 北方温带森林不同海拔梯度土壤有机质分解酶活性及动力学特征研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
LI Dandan. *Soil Organic Carbon Related Enzyme Activities and the Kinetics at Different Altitudes in the Northern*

- Temperate Forest, China* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [14] 孔龙, 谭向平, 和文祥, 等. 黄土高原沟壑区宅基地复垦土壤酶动力学研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, **41**(2): 123 – 129.
- KONG Long, TAN Xiangping, HE Wenxiang, *et al.* Enzyme kinetics characteristics of soil in the reclaimed home-
stead land on Loess Plateau [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2013, **41**(2): 123 – 129.
- [15] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, **46**(6): 1232 – 1236.
- HE Wenxiang, TAN Xiangping, WANG Xudong, *et al.* Study on total enzyme activity index in soils [J]. *Acta Pedol Sin*, 2010, **46**(6): 1232 – 1236.
- [16] 周礼恺, 张志明, 曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用[J]. 土壤学报, 1983, **19**(4): 83 – 88.
- ZHOU Likai, ZHANG Zhiming, CAO Chengmian. On the role of the totality of soil enzyme activities in the evaluation
of the level of soil fertility [J]. *Acta Pedol Sin*, 1983, **19**(4): 83 – 88.
- [17] SAKORM P P. Urease activity and fertility status of some lowland rice soils in the central plain [J]. *Thai J Agric Sci*, 1987, **20**(3): 173 – 186.
- [18] 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 Yuqing, BAI Cuixia, ZHAO Tierui, *et al.* Soil enzyme activity and its relationship with the soil fertility in
Badaling Mountain Area of Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(5): 7 – 11.
- [19] 林大仪. 土壤学试验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [22] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [23] 莫里斯 J G. 生物学工作者的物理化学[M]. 王嶽, 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [24] LOEPPMANN S, BLAGODATSKAYA E, PAUSCH J, *et al.* Substrate quality affects kinetics and catalytic efficiency
of exo-enzymes in rhizosphere and detritusphere [J]. *Soil Biol Biochem*, 2016, **92**: 111 – 118.
- [25] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, **18**(1): 12 – 21.
- WANG Lide, WANG Fanglin, GUO Chunxiu, *et al.* Review: progress of soil enzymology [J]. *Soils*, 2016, **18**(1): 12 – 21.
- [26] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(2): 202 – 205.
- LUO Dongqi, BAI Jie, XIE Deti. Research on evaluation norm and method of soil fertility [J]. *Soil Environ Sci*,
2002, **11**(2): 202 – 205.
- [27] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, **10**(3): 277 – 280.
- QIU Liping, LIU Jun, WANG Yiquan, *et al.* Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility
[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2004, **10**(3): 277 – 280.
- [28] 韩桂福, 王理德, 王芳林, 等. 石羊河流域下游退耕地土壤酶活性及土壤肥力因子的相关性[J]. 土壤通报, 2014, **45**(6): 1396 – 1401.
- HAN Guifu, WANG Lide, WANG Fanglin, *et al.* Analysis of relationship between soil enzyme activities and fertilities
in the field of grain for green in downstream of the Shiyang River [J]. *Chin J Soil Sci*, 2014, **45**(6): 1396 – 1401.
- [29] 边雪廉, 岳中辉, 焦浩, 等. 土壤酶对土壤环境质量指示作用的研究进展[J]. 土壤, 2015, **47**(4): 634 – 640.
- BIAN Xuelian, YUE Zhonghui, JIAO Hao, *et al.* Soil enzyme indication on soil environmental quality: a review [J].
Soils, 2015, **47**(4): 634 – 640.