

DOI:10.3969/j.issn.1003-0972.2016.04.017

内乡宝天曼自然保护区土壤理化性质和酶活性的海拔特征研究

李彦娇^{1,2*}, 赵燕³, 王立民¹, 赵干卿¹, 魏宝成¹, 王维刚¹, 吴福忠²

(1. 平顶山学院 低山丘陵区生态修复重点实验室, 河南 平顶山 467000;

2. 四川农业大学 生态林业研究所林业生态工程省级重点实验室, 四川 成都 610041;

3. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003)

摘要:以内乡宝天曼自然保护区为研究区域,选择不同海拔下的土壤为研究对象,通过野外采样和室内测试分析,研究土壤理化性质和酶活性的海拔异质性。结果表明:各海拔梯度土壤均为偏酸性土壤,按照全国第二次土壤普查养分分级标准,有机质含量较丰且在较高海拔位置处含量较高,各海拔高度全氮和碱解氮含量均较低,全磷含量处于中等以上的水平,有效磷含量处于缺或极缺水平,土壤全钾和速效钾含量属于中等以上水平。各土层的土壤脲酶、磷酸化酶与土壤各养分指标之间均无显著的相关关系,单一的土壤酶活性指标不能很好地代表土壤肥力状况。

关键词:土壤酶;土壤理化性质;土壤养分;海拔梯度;土壤健康

中图分类号:Q948.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0972(2016)-0560-07

A Study of Soil Physicochemical Property and Soil Enzyme along Altitude Gradient at Neixiang Baotianman Nature Reserve

LI Yanjiao^{1,2*}, ZHAO Yan³, WANG Limin¹, ZHAO Ganqing¹, WEI Baocheng¹, WANG Weigang¹, WU Fuzhong²

(1. Key Laboratory of Ecological Restoration in Hilly Area, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China;

2. Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecology and Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 610041, China;

3. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Physicochemical property and enzyme activities of soils at different altitude of Neixiang Baotianman Nature Reserve, Henan Province, were investigated. Results showed that all of soils were acidic. According to the soil fertility classification of the second soil census, organic matter content was abundant, and increased with altitude. At each altitude, content of the total nitrogen, alkali hydrolysable nitrogen and available phosphorus were low or very low. The content of total phosphorus, total potassium and available potassium content were above medium level. Moreover, correlation analysis showed no significant correlation between soil enzymes (urease and phosphorylase) and fertility factors. Therefore, single enzyme activity of soils should not be enough for reflecting soil fertility in Neixiang Baotianman Nature Reserve.

Key words: soil enzyme; soil physicochemical property; soil nitrogen; altitudinal gradient; soil health

0 引言

土壤是陆地生态系统中物质循环、能量转换和信息传递的核心区域,可以与水、气和植物相互作用来影响环境的波动,又可以反映人类生产经营活动

所导致的生物地球化学循环的变化过程^[1]。土壤酶和土壤理化性质是决定土壤肥力和土壤质量的重要指标,是控制森林植物生长发育的关键生态因子^[2]。研究土壤理化性质和酶活性,有利于了解土

收稿日期:2015-11-09;修订日期:2016-04-25; * 通信联系人, E-mail: lyjiao123@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31301896);河南省科技计划项目(142102310186);河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A180821, 12B180021);河南省林业厅项目(2011021);平顶山学院高层次人才科研启动经费项目(2011005/G);平顶山学院培育基金项目(PXY-PYJJ-2014006)

作者简介:李彦娇(1982—),女,河南南阳人,讲师,博士,主要从事恢复生态学研究。

壤的形成过程、结构和功能,同时也有助于土壤与植物的关系、植被空间格局以及土壤侵蚀、土地利用变化等生态过程的研究^[3].尤其是土壤酶活性能够控制土壤养分循环进程的速率,是土壤微生物及植被有效吸收利用养分的关键因子,是土壤功能多样性有效的指示剂,对于土壤环境状况评价非常重要,而且土壤酶对环境和因素导致的变化具有较强的敏感性,有易于测定的优点,通常被作为比较理想的反映土壤质量的度量指标^[4].

海拔可以反映环境变化,是影响光、热、水、气的因子之一,可直接作用于生境的气候生态学特征,并通过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,进一步影响植物群落结构和类型的演化,最终引起生态系统功能的改变.不同海拔的土壤空间特征,因研究的地理位置和气候条件不同结果不尽相同.长期以来,研究人员对不同海拔下的植被、土壤属性进行了深入细致的研究,取得了较为丰富的研究成果^[5],但由于研究区域的不同,所得出的结论差异较大.这对于正确理解土壤理化性质和土壤酶活性在不同海拔的分布规律带来一定困难.

自然保护区作为人类划分出的特殊管理的自

然区域,其保存了地带性植被和地带性土壤,是濒危物种的避难所,在生物多样性及生物天然生境的保护中起着越来越重要的作用.研究自然保护区土壤理化性质和土壤酶活性特征等生物生存的土壤环境指标,可为经营管理森林提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

内乡宝天曼自然保护区 1988 年经国务院批准为国家级自然保护区,隶属秦岭东段、伏牛山南坡(东经 111°47′~112°04′,北纬 33°20′~33°36′),总面积约 9304 hm²,海拔 600~1870 m.气候为大陆性季风气候,四季分明,冬冷夏热,1 月份平均气温 1.5℃,7 月份平均气温 27.8℃,年均气温 15.1℃,降雨主要集中于 7—9 月份,年均降水量 885.6 mm,年平均相对湿度 70%~80%.保护区地形复杂,整个地势东北高、西南低,山体高大,对太阳辐射、气温、降水有明显的再分配作用,形成生态环境多样性;主要岩石是花岗岩、石灰岩和砂岩,土壤类型随山体海拔由高到低分别为山地棕壤、山地黄棕壤和山地褐土;该区域属于暖温带落叶阔叶林带,乔木主要以栎林和针叶林为主^[6].

表 1 样地基本特征

Tab. 1 Description of the sampling plots

样线编号	海拔 /m	土壤类型	植被类型
1	1750	山地棕壤	华山松(<i>Pinus armandii</i>)、锐齿槲栎(<i>Quercus aliena</i> Blume var. <i>acutiserrata</i>)针阔混交林
2	1650	山地棕壤	华山松、锐齿槲栎针阔混交林
3	1550	山地棕壤	锐齿槲栎、千金榆(<i>Carpinus cordata</i>)阔叶林
4	1400	山地黄棕壤	千金榆、五角枫(<i>Acer oliverianum</i>)阔叶林
5	1350	山地黄棕壤	短柄枹栎(<i>Quercus serrata</i> Murray var. <i>brevipetiolata</i>)、锐齿槲栎、化香(<i>Platycarya strobilacea</i>)阔叶林
6	600	山地褐土	栓皮栎(<i>Quercus variabilis</i>)、茅栗(<i>Castanea seguinii</i>)、山茱萸(<i>Cornus officinalis</i>)阔叶林

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

2014 年 8 月,在内乡宝天曼自然保护区境内,从较高海拔位置至坡底设置 6 条海拔线,各海拔线植被及土壤类型状况如表 1 所示.每条海拔线设置 3 个土壤剖面,共设置 18 个土壤剖面.每个土壤剖面按照土壤的自然发生层次(表土层、心土层和底土层)进行土壤样品的采集.每个土壤剖面的各土

层采集 1 kg 左右的土壤样品,人工去除植物根系和砾石,风干,研磨,过 1 mm 筛,用于土壤养分的测定.

1.2.2 土壤理化性质测定

土壤 pH 值采用酸度计法(水土比 2.5:1);土壤有机质含量采用总有机碳分析仪测定 TC 和 IC 后进行换算;土壤全氮采用凯氏定氮法;土壤全磷采用镍坩埚碱熔-钼锑抗比色法;土壤全钾测定采

用镍坩埚碱熔-火焰光度法;土壤碱解氮测定采用碱解扩散法;土壤速效磷测定采用 HCl-H₂SO₄ 提取-钼锑抗比色法;土壤速效钾的测定采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法^[7].

1.2.3 土壤酶活性测定

土壤脲酶用苯酚-次氯酸钠比色法测定.以每克土壤在 37 °C 下 24 h 内酶解尿素释放 NH₃-N 的微克数表示脲酶活性;磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法测定.以每克土壤在 37 °C 下 24 h 内酶解磷酸苯二钠释放苯酚的微克数表示磷酸酶活性^[8,9].

1.2.4 统计分析方法

表土层、心土层、底土层各土层的 pH 值,有机质、全氮和碱解氮、全磷和有效磷、全钾和速效钾含量,酶活性在海拔间的差异性采用 One-way ANOVA 和 LSD 法分析,土壤理化性质和土壤酶活性之间的相关性采用 Spearman 相关系数进行分析.所有的分析都利用 SPSS16.0 统计分析软件完成.

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤 pH 值和有机质含量变化

由图 1(A)可知,内乡宝天曼自然保护区取样区域的土壤 pH 值在 5.33±0.13~6.14±0.13 之间,按照我国土壤的酸碱度分级标准,该土壤为酸性土,心土层不同海拔线的土壤 pH 值无显著差异($P>0.05$),表土层较高海拔线 1750 m 的土壤 pH

值相对较低,底土层较低海拔线 1350 m 的土壤 pH 值相对较低;图 1(B)显示,表土层土壤的有机质含量在 19.66±1.71 g·kg⁻¹~155.97±3.45 g·kg⁻¹ 之间,心土层土壤的有机质含量在 9.83±2.75 g·kg⁻¹~59.23±9.21 g·kg⁻¹ 之间,底土层土壤的有机质含量在 7.23±0.87 g·kg⁻¹~51.24±7.38 g·kg⁻¹ 之间,依据全国第二次土壤普查养分分级标准^[10],该区域表土层有机质含量在海拔 1750、1650、1550、1400 m 较丰.表土层和心土层较低海拔线 1350 m 和 600 m 的土壤有机质含量显著低于其他较高海拔线($P<0.05$),底土层较高海拔线 1750 m 的土壤有机质含量显著高于其他较低海拔线($P<0.05$).海拔上升,温度下降,土壤有机碳释放速率降低,有机碳储量相对较高,研究中有机质含量基本规律是随海拔梯度降低而有所降低,至于海拔 1750 m 的表土层和心土层的有机质含量较低,可能与山顶受干扰较大,有机质积累量较小有关.另外土壤表土层相对于心土层和底土层更易受到各类干扰,所以表土层有机质含量在海拔间隔较小时,可能会呈现一定的波动,例如海拔 1400 m 的有机质含量就比海拔 1550 m 高.在内乡宝天曼自然保护区,减少人为干扰,尤其是减少对较高海拔位置浅土层的干扰,确保林地生物量的有效归还应成为该区域森林经营管理的重要措施之一.

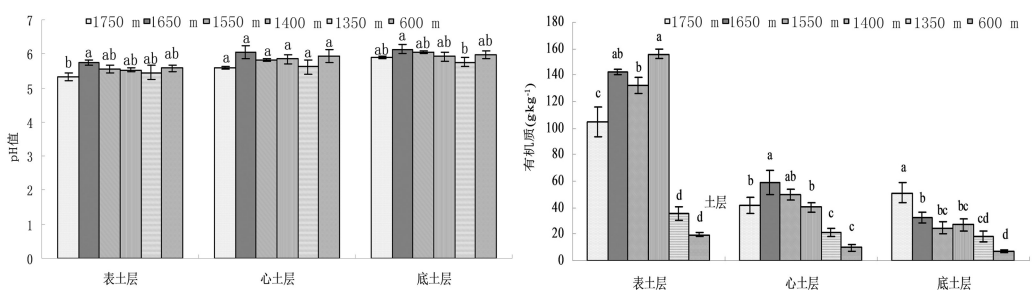


图 1 不同海拔梯度土壤 pH 值(A)和有机质含量(B)

Fig. 1 The pH value (A) and the content of soil organic matter (B) at different altitudinal gradients

注:横线表示标准误($n=3$),不同小写字母表示 6 个海拔高度之间差异显著($P\leq 0.05$)

2.2 不同海拔土壤全氮和碱解氮含量变化

由图 2(A)可知,内乡宝天曼自然保护区取样区域的表土层土壤全氮含量在 0.18±0.04~0.69±0.06 g·kg⁻¹ 之间,心土层土壤全氮含量在 0.14±0.05~0.32±0.02 g·kg⁻¹ 之间,底土层土壤全氮含量在 0.13±0.05~0.23±0.03 g·kg⁻¹ 之间,依据全国第二次土壤普查养分分级标准,该区域全氮

含量在各海拔的各土层均较缺.表土层和心土层较低海拔线 1350 m 和 600 m 的土壤全氮含量显著低于其他较高海拔线($P<0.05$),底土层较低海拔线 600 m 的土壤全氮含量显著低于其他较高海拔线($P<0.05$),全氮含量亦表现出随海拔增加而增加的趋势,海拔升高,气温降低,微生物活性减弱,动、

植物残体的分解速度减慢,土壤有机碳氮矿化速率降低,土壤中全氮积累量增加^[11];图 2(B)显示,表土层土壤碱解氮含量在 $6.86 \pm 0.37 \sim 28.81 \pm 1.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,心土层土壤碱解氮含量在 $3.89 \pm 0.24 \sim 19.65 \pm 1.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,底土层土壤碱解氮含量在 $2.70 \pm 0.13 \sim 20.10 \pm 3.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,依据全国第二次土壤普查养分分级标准,该区域碱解氮含量在各海拔的各土层均较缺,表土层和心土层较低海拔线 1350 m 和 600 m 的土壤碱解氮含量显著低于其他较高海拔线 ($P < 0.05$),底土层较低海拔线 600 m 的土壤碱解氮含量显著低于其他较高海拔线 ($P < 0.05$),土壤碱解氮在较高海拔

梯度含量较高,这可能与土壤全氮含量在高海拔较高有关^[11].内乡宝天曼自然保护区取样区域全氮和碱解氮含量在各海拔高度均较低,尤其是土壤碱解氮,作为反映土壤供氮能力的一个重要指标,其指示土壤氮素动态和近期内供氮水平,而森林土壤氮素主要来源于土壤有机碎屑,通过微生物降解而形成植物可利用的有效态氮,作为生物较易耗竭的营养元素^[12],可能由于生物的需求量大于土壤有机氮矿化速率,所以内乡宝天曼自然保护区取样区域表现为氮缺乏型区域,如何减少该区域森林土壤生态系统中氮的输出,提高土壤氮在生物小循环中的转化利用效率显得尤为重要。

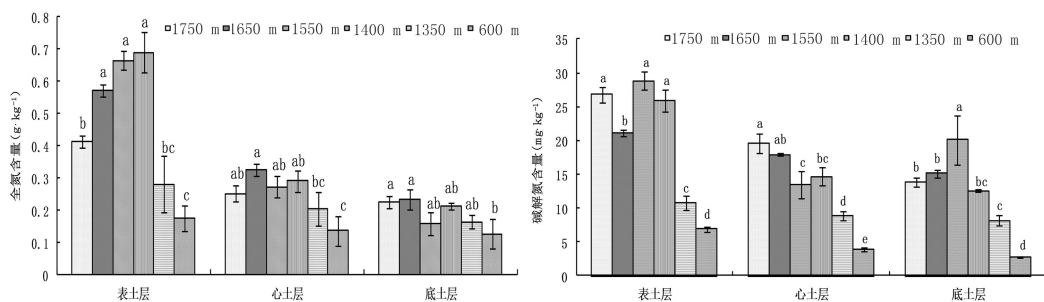


图 2 不同海拔梯度土壤全氮(A)和碱解氮含量(B)

Fig. 2 The content of the total nitrogen (A) and the alkali hydrolysable nitrogen (B) at different altitudinal gradients

注:横线表示标准误($n=3$),不同小写字母表示 6 个海拔高度之间差异显著 ($P \leq 0.05$)

2.3 不同海拔土壤全磷和有效磷含量变化

由图 3(A)可知,内乡宝天曼自然保护区取样区域的表土层土壤全磷含量在 $0.32 \pm 0.07 \sim 1.00 \pm 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,心土层土壤全磷含量在 $0.34 \pm 0.03 \sim 1.00 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,底土层土壤全磷含量在 $0.38 \pm 0.04 \sim 0.82 \pm 0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,表土层较低海拔线 1350 m 和 600 m 的土壤全磷含量显著低于其他较高海拔线 ($P < 0.05$),心土层和底土层高海拔线 1750、1650、1550、1400、1350 m 的土壤全磷含量高,各海拔线间差异不显著 ($P > 0.05$),心土层海拔 1650、1550、1400 m 与较低海拔 600 m 差异显著,底土层海拔 1650、1550 m 与较低海拔 600 m 差异显著 ($P < 0.05$),依据全国第二次土壤普查养分分级标准,该区域土壤全磷含量在高海拔段大于 $0.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量基本处于中等的水平;图 3(B)显示,取样区域的表土层土壤有效磷含量在 $2.78 \pm 0.35 \sim 5.78 \pm 0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,心土层土壤有效磷含量在 $2.93 \pm 0.36 \sim 4.87 \pm 0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,底土层土壤有效磷含量在 $3.19 \pm 0.36 \sim 4.53 \pm 0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,表土层海拔线

1750 m 和 1400 m 的土壤有效磷含量显著高于其他海拔线 ($P < 0.05$),心土层海拔线 1750 m 和 1400 m 的土壤有效磷含量显著高于海拔 1650 m 和 1350 m 的土壤有效磷含量 ($P < 0.05$),底土层各海拔线的土壤有效磷含量差异不显著 ($P > 0.05$).依据全国第二次土壤普查养分分级标准,该区域土壤有效磷含量普遍低于 $5.78 \pm 0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量基本处于缺或极缺水平,可能是因为森林生态系统中的磷元素主要来源于缓慢的岩石风化输入,且磷属于沉积型循环类元素,具有难溶性和难移动性,其输出量也很低,土壤中 95% 以上的磷通常以迟效状态存在,参与生物循环的有效磷只是全磷的很小一部分,另外,内乡宝天曼自然保护区各海拔梯度土壤均为偏酸性土壤,有机质含量较丰,可能也影响着土壤中磷的化学形态和浓度,从而影响着其有效性的发挥,在低 pH 值的酸性土壤中,磷酸盐易于被土壤溶液中大量的 Fe/Al/Mn 氧化物表面吸附或被土壤中游离的 Al 离子所沉淀^[13].

2.4 不同海拔土壤全钾和速效钾含量变化

由图 4(A)知,内乡宝天曼自然保护区取样区

域的表土层土壤全钾含量在 $14.12 \pm 0.83 \sim 23.26 \pm 0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,心土层土壤全钾含量在 $18.32 \pm 1.68 \sim 28.32 \pm 2.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,底土层土壤全钾含量在 $18.29 \pm 1.67 \sim 30.74 \pm 0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,表土层海拔线 1550m 的土壤全钾含量显著低于海拔 1750、1400 和 1350 m ($P < 0.05$),略低于海拔 1650 m 和 600 m 但差异不显著 ($P > 0.05$),心土层和底土层海拔线 1750m 和 600m 显著低于海拔 1400 m ($P < 0.05$),海拔 1650、1550、1400、1350 m 的土壤全钾含量差异不显著 ($P > 0.05$),依据全国第二次土壤普查养分分级标准,该区域土壤全钾含量 $14.12 \pm 0.83 \sim 30.74 \pm 0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量基本处于中等以上的水平,尤其是心土层和底土层全钾含量普遍较高,这应该与成土母质有关;图 4(B)显示,表土层速效钾含量在 $101.92 \pm 17.41 \sim 407.06 \pm 40.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,心土层土壤速效钾

含量在 $68.02 \pm 6.66 \sim 214.74 \pm 42.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,底土层土壤速效钾含量在 $57.99 \pm 3.43 \sim 170.24 \pm 28.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,表土层速效钾含量海拔 1350 m 和 600 m 显著低于其他海拔 ($P < 0.05$),心土层速效钾含量 1650、1550、1400 m 显著高于较低海拔 1350m 和 600m ($P < 0.05$),底土层速效钾含量海拔 1650 m 显著高于海拔 1550、1350 和 600 m ($P < 0.05$),而与海拔 1750、1400 m 差异不显著 ($P > 0.05$).依据全国第二次土壤普查养分分级标准,该区域土壤速效钾含量在 $57.99 \pm 3.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,普遍处于中等水平以上,尤其是表土层的速效钾含量很高.内乡宝天曼自然保护区森林土壤钾元素的研究结果支持了国内学者认为我国北方土壤富钾的结论,作为区域海拔较高、坡度较大地段,如何防止土壤中钾素径流流失应是值得关注的.

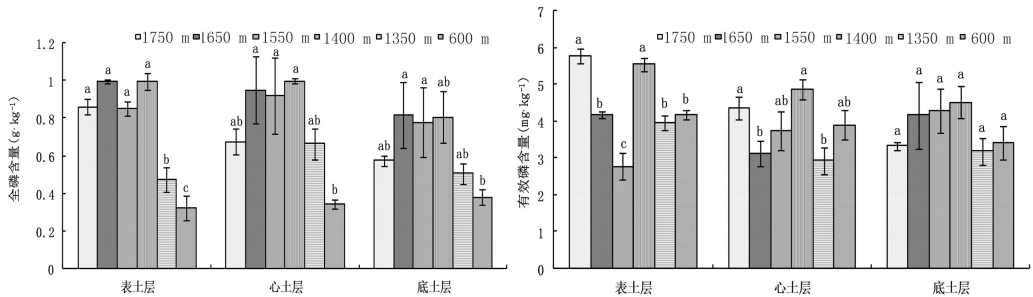


图 3 不同海拔梯度全磷(A)和有效磷含量(B)

Fig. 3 The content of the total phosphorus (A) and the available phosphorus (B) at different altitudinal gradients

注:横线表示标准误($n=3$),不同小写字母表示 6 个海拔高度之间差异显著 ($P \leq 0.05$)

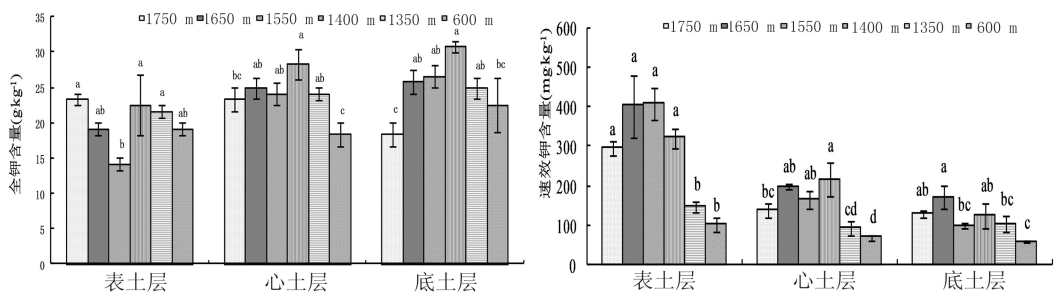


图 4 不同海拔梯度土壤全钾(A)和速效钾含量(B)

Fig. 4 The contents of the total potassium (A) and the available potassium (B) at different altitudinal gradients

注:横线表示标准误($n=3$),不同小写字母表示 6 个海拔高度之间差异显著 ($P \leq 0.05$)

2.5 不同海拔土壤酶活性及与土壤理化性质的相关性分析

由图 5(A)可知,内乡宝天曼自然保护区取样区域的表土层土壤脲酶含量在 $418.76 \pm 9.99 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1} \sim 1843.96 \pm 30.36 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ 之

间,高海拔 1750 m 的脲酶含量较低;心土层土壤脲酶含量在 $135.04 \pm 6.79 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1} \sim 753.36 \pm 7.22 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ 之间,较高海拔 1750、1650、1550、1400 m 的土壤脲酶活性较低;底土层各海拔的脲酶活性差异显著且普遍较低.

由图 5(B)可知,内乡宝天曼自然保护区取样区域的表土层土壤磷酸化酶含量在 $191.62 \pm 1.28 \sim 2790.51 \pm 8.65 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,心土层土壤磷酸化酶含量在 $16.12 \pm 1.72 \sim 1171.98 \pm 22.94 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,表土层和心土层海拔 1400 m 和 1350 m 的土壤磷酸化酶显著高于其他 4 个海拔;底土层较高海拔 1750、1650、1550 m 的土壤磷酸化酶活性较低。Spearman 相关分析各土层的脲酶、磷酸酶活性与

土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾之间的相关关系,均不显著($P > 0.05$),区域复杂的气候、土壤、植被、地形因子状况等综合作用下,土壤酶活性和理化指标之间的直接作用可能表现得不甚明显^[14-16]。这与陈双林等对不同海拔毛竹林土壤酶活性和土壤理化性质的研究结果较一致,土壤理化性质对土壤酶活性的影响不一定显著^[17]。

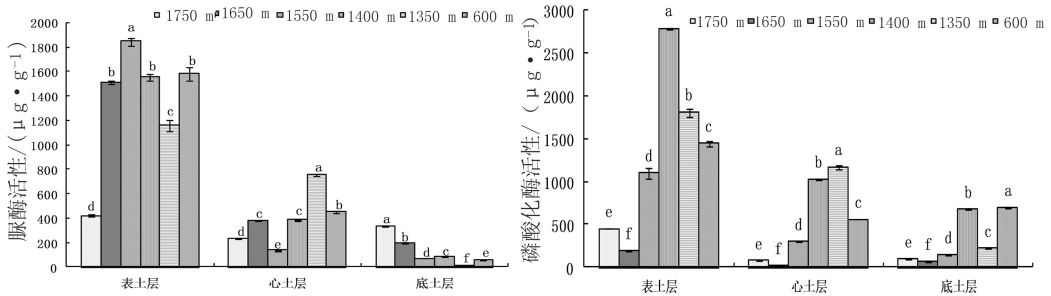


图 5 不同海拔梯度脲酶(A)和磷酸化酶(B)活性

Fig. 5 The catalase (A) and phosphorylase (B) at different altitudinal gradients.

注:横线表示标准误($n=3$),不同小写字母表示 6 个海拔高度之间差异显著($P \leq 0.05$)

3 结论

内乡宝天曼自然保护区各海拔梯度土壤均为偏酸性土壤,土壤有机质含量丰富,全氮和碱解氮含量在各海拔高度均较低,全磷、全钾和速效钾含量基本处于中等以上的水平,有效磷含量在各海拔梯度处于缺或极缺水平,土壤酶活性与土壤养分含量之间未表现出显著的相关性。该区域在森林管理和经营过程中,可考虑适当地人工补充土壤养分,增强土壤肥力,提高林分生产力,特别是增施氮、

磷肥。当然,为避免因施用化学肥料致成土壤酸化,建议施用氮、磷养分含量高的有机肥或专用复混肥。另外,本研究只选取了部分主要的土壤酶活性和理化性质指标进行测定分析,指标仍较单一,今后需对影响酶活性变化的其它众多因素进行深入研究,方能对土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系进行更客观,更全面地解释,以使二者间的影响过程更加明晰。

参考文献:

- [1] 李鹏,李占斌,薛莲,等.不同海拔对干热河谷地区土壤酶活性的影响[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(S1):139-149.
LI Peng, LI Zhanbin, XUE Sha, et al. Effect of altitudinal gradient on soil enzyme activity in dry-hot valley[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(S1): 139-149.
- [2] 刘艳,王成,彭镇华,等.北京市崇文区不同类型绿地土壤酶活性及其与土壤理化性质的关系[J].东北林业大学学报,2010,38(4):66-70.
LIU Yan, WANG Cheng, PENG Zhenhua, et al. Soil enzyme activity and its relationship with soil physico-chemical properties in green areas of Chongwen District of Beijing[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(4): 66-70.
- [3] 刘晓星,吕光辉,杨晓东,等.艾比湖流域 5 种土壤类型的酶活性和理化性质[J].干旱区研究,2012,29(4):579-585.
LIU Xiaoxing, LYU Guanghui, YANG Xiaodong, et al. Enzyme activities and physical and chemical properties of five different soils in the Ebinur Lake Basin[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 579-585.
- [4] 陈彩虹,叶道碧.4 种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J].中南林业科技大学学报,2010,30(6):64-68.
CHEN Caihong, YE Daobi. Study on the relationship between soil enzymes and nutrient of four artificial forests in Changsha urban-rural fringe[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(6): 64-68.
- [5] 魏新,郑小锋,张硕新.秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究[J].西北林学院学报,2014,29(3):9-14.
WEI Xin, ZHENG Xiaofeng, ZHANG Shuoxin. Forest soil physicochemical properties along different altitudinal gradients at Huoditang in the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 9-14.

- [6] 王鹏霄,程许娜,苏金乐. 内乡宝天曼自然保护区悬钩子属植物资源状况及经济价值分析[J]. 西部林业科学, 2011, 40(4): 84-88.
WANG Pengxiao, CHENG Xuna, SU Jinle. Resource status and economic value of rubus plants in Neixiang Baotianman Nature Reserve[J]. Journal of West China Forestry Science, 2011, 40(4): 84-88.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版.北京: 中国农业出版社, 2005:28-29.
BAO Shidan. Soil agrochemical analysis[M]. the third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2005:28-29.
- [8] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986:35-37.
GUAN Songyin. Soil enzyme and its study method[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1986:35-37.
- [9] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987:30-31.
ZHOU Likai. Soil enzyme[M]. Beijing: Science Press, 1987:30-31.
- [10] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998:10-11.
National Soil Survey Office. Chinese soils[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1998:10-11.
- [11] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等. 川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 261-268.
HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al. Variations of soil nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen of *Quercus aquifolioides* forest at different attitudes in Balangshan, Sichuan[J]. Forest Research, 2012, 25(3): 261-268.
- [12] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126-133.
CHEN Fusheng, ZENG Dehui, HE Xingyuan. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 126-133.
- [13] 李茜. 南昌城乡梯度森林土壤磷形态时空分布格局[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
LI Qian. Temporal and spatial patterns of phosphorus fractions in forest soils along an urban-suburban-rural gradient in Nanchang city [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [14] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 152-159.
YANG Wanqin, WANG Kaiyun. Advances in forest soil enzymology[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2): 152-159.
- [15] 卢瑛, 冯宏, 甘海华. 广州城市公园绿地土壤肥力及酶活性特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 160-163.
LU Ying, FENG Hong, GAN Haihua. Soil fertility characteristics and enzyme activity for urban parks in Guangzhou city[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 160-163.
- [16] 林娜, 刘勇, 李国雷, 等. 森林土壤酶研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(4): 21-25.
LIN Na, LIU Yong, LI Guolei, et al. Research progress on forest soil enzyme[J]. World Forestry Research, 2010, 23(4): 21-25.
- [17] 陈双林, 郭子武, 杨清平. 毛竹林土壤酶活性变化的海拔效应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 529-533.
CHEN Shuanglin, GUO Ziwei, YANG Qingping. Soil enzyme activities in Moso bamboo forests along an altitude gradient[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 529-533.

责任编辑:任长江