

秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨*

杨 瑞^{1, 2} 刘 帅¹ 王紫泉¹ 曹永昌¹ 赵翊明¹ 和文祥^{1, 2†} 耿增超¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘 要 秦岭作为我国南北方气候的分界线, 其上生长着许多独特林分, 加之未受到人为活动扰动, 故对其包括土壤酶及养分等在内的土壤效应研究具有重要参比性, 且可为揭示不同林分的土壤效应及筛选最优林分奠定基础。选取秦岭不同海拔生长的五种典型林分(锐齿栎、油松、华山松、云杉及松栎混交)土壤, 分析了7种土壤酶活性和养分变化特征, 并探讨了二者间关系及林分的影响。结果表明: 不同林分下土壤养分及酶活性变化差异较大, 土壤性质强烈受到林分种类及海拔等生态环境条件的影响, 其中云杉土壤的有机质、全氮、碱解氮、速效钾、缓效钾含量均较高, 是秦岭山脉生长较好的树种之一; 且土壤有机质、全氮、碱解氮等养分变化规律较一致; 土壤碱性磷酸酶、荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶及总体酶活性(TEI)与土壤养分呈显著或极显著正相关, 表明林分和海拔对这三种酶的影响与养分是一致的; 采用单独土壤酶活性与土壤酶和化学性质复合开展的主成分分析结果一致, 获得的综合得分与上述三种酶类达显著或极显著正相关, 揭示出它们在一定程度上可表征森林土壤的质量水平, 且单一酶类中土壤碱性磷酸酶活性可更容易、简便地反映土壤肥力状况的变化。

关键词 林地; 土壤养分; 酶活性; 主成分分析; 相关性分析

中图分类号 S714.3 **文献标识码** A

森林作为一个独特的人类和多种生物赖以生存和发展的生态系统^[1], 其中生长的众多植被类型及丰富的植物残体, 均为土壤微生物的生长及酶促反应提供了重要的基质; 加之碳素的高投入, 导致催化碳素循环的酶类在碳分解转化中发挥重要作用, 最终表现出与农田土壤截然不同的性质和特征; 并在改善生态环境, 维持生态平衡等方面发挥着重要作用^[2]。同时, 森林土壤作为未被人类扰动的自然土壤, 对其研究可获知环境条件和人为活动的影响, 具有一定的参比意义。

秦岭是我国南北自然环境和气候的分界线, 海拔达3 767m, 长期演替后其上形成了典型的植物群

落的带谱分布, 对森林土壤产生了独特的作用, 结果导致秦岭不同海拔的典型土壤物理、化学和生物学特征的时空演替特征^[3]。森林土壤是大气碳库来源的主要途径之一, 对秦岭林地土壤的研究, 将会更加准确地理解植被状况对土壤质量及环境的潜在影响, 最终为森林土壤质量的评价提供重要依据。

土壤酶是具有生物活性的蛋白质, 催化了土壤中众多生化反应^[4-5], 在森林生态系统中营养物质循环和能量代谢等过程中扮演着重要角色, 被认为是土壤生态系统的核心^[6], 对其生物活性指标的研究是近年来林学和土壤学研究的热点之一^[7]。

* 国家公益性行业(林业)科研专项(201304307)、国家自然科学基金项目(41571245)和西北农林科技大学“基本科研业务费科研创新重点项目”(ZD2013012)共同资助 Supported by the Special Fund for Forest Science Research in the Public Interest (No. 201304307), the National Natural Science Foundation of China (No. 41571245), and the “Basic Scientific Research Expenses of Major Project of Scientific Research Innovation” of Northwest Agriculture and Forestry University (No. ZD2013012)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wxhe1968@163.com

作者简介: 杨 瑞(1991—), 女, 陕西武功人, 硕士研究生, 主要从事土壤酶研究。E-mail: 1162723825@qq.com

收稿日期: 2015-10-28; 收到修改稿日期: 2016-01-30; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-04-21

近年来,国内外学者从森林土壤根际^[8]、人工林养分^[9]、土壤有机碳^[10]等方面对秦岭山脉土壤酶进行了初步研究,结果显示:根际养分含量及土壤酶活性均大于非根际;土壤养分与酶活性密切相关;有机碳、微生物量碳、水溶性碳及易氧化碳等含量间差异显著;不同林分混交林养分含量较纯林的高^[8-11]。总体看来研究结果不尽一致,而且大多研究仅局限于一种林分或一种酶活性,而秦岭地区林型多样,其间存在着一个长期选择和演替的规律性变化,故对不同林分下土壤养分及酶活性特征的研究十分必要。为此,本文拟选取秦岭地区五种主要典型林分,分析催化土壤碳、氮、磷循环以及微生物活性的七种土壤酶活性变化特征及其与土壤养分间的关系,揭示不同林分的影响,探讨土壤酶作用及主要影响因子,为森林土壤肥力评价、

定向培育森林土壤等提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验样地概况

选取秦岭山脉的马头滩和辛家山林场的典型林地(表1)。其中,马头滩位于秦岭西部主梁两侧,属秦岭腹地,总林地面积34 668 hm²,海拔1 500~2 650 m^[12];该区属北亚热带北缘暖温带山地湿润气候,气候垂直变化明显,光热条件不足;年均气温11℃,年降水量600~900 mm。辛家山位于秦岭西部南坡、秦岭主梁南侧嘉陵江上游,该区属暖温带半湿润山地气候,山地高差悬殊,气候垂直变化明显,年均气温7.6℃,年降水量约900 mm,主要集中于7—9月。

表1 六个典型林分样地基本信息

Table 1 Basic information of the 6 typical forest stands

编号No.	林分 Woodland	位置 Position	经纬度 Latitude and longitude	坡位 Slope position	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type	土壤pH (水土比2.5:1) Soil pH (water: soil=2.5:1)
1	锐齿栎1 <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> 1	马头滩 Matoutan	34°13'34.5"N 106°59'30.7"E	南坡 South slope	1 777	棕壤 Brown soil	4.48
2	锐齿栎2 <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> 2	辛家山 Xinjiashan	34°12'46.0"N 106°35'12.0"E	南坡 South slope	1 639	棕壤 Brown soil	4.34
3	油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	马头滩 Matoutan	34°13'26.5"N 106°59'12.3"E	南坡 South slope	1 591	棕壤 Brown soil	5.09
4	华山松 <i>Pinus armandii</i>	马头滩 Matoutan	34°13'14.0"N 106°59'3.7"E	南坡 South slope	1 605	棕壤 Brown soil	5.09
5	云杉 <i>Picea asperata</i>	辛家山 Xinjiashan	34°16'51.4"N 106°31'38.0"E	南坡 South slope	2 175	暗棕壤 Dark brown soil	5.07
6	松栎混交 Pine-oak mixed forest	马头滩 Matoutan	34°13'18.5"E 106°59'15.1"E	南坡 South slope	1 653	棕壤 Brown soil	4.70

注: 土壤pH是0~20 cm层土壤测定结果 Note: The data of soil pH are values measured of the 0~20 cm soil layer

1.2 土壤样品采集

在上述六个典型林分中分别设置3个20 m×20 m的标准样方,先去除土壤表层的枯枝落叶层,S型采集5个样点的土样,在每个样点采取0~10 cm、

10~20 cm表层土样。混匀、风干过筛后备用。

1.3 化学性质测定

常规方法分析^[13]测定土壤基本化学性质:土壤有机质采用重铬酸钾氧化法;全氮用半微量开

氏 (福斯KJELTE2200半自动凯氏定氮仪, 瑞典) 法; 碱解氮: 碱解扩散法; 速效磷: 钼锑抗比色 (棱光722N可见分光光度计, 上海) 法; 速效钾和缓效钾分别采用醋酸铵和硝酸提取, 火焰光度计 (sherwoodM410型火焰光度计, 英国) 法测定。

1.4 土壤酶活性测定

向风干土样中加入甲苯15 min后, 分别加入底物和缓冲液 (β -葡萄糖苷酶: 水杨酸苷溶液10 ml和pH6.2的醋酸缓冲液20 ml; 纤维素酶: 0.3%的羧甲基纤维素20 ml和pH5.5磷酸缓冲液5 ml; 脲酶: 10%尿素溶液10 ml和pH6.7的磷酸缓冲液20 ml; 磷酸酶: 5%磷酸苯二钠溶液20 ml; 脱氢酶: 3%三苯基四氮唑氯化物溶液 (TTC) 0.5 ml; 荧光素二乙酸 (FDA) 水解酶: 200 μ l的FDA和pH7.6的磷酸缓冲液15 ml), 37 $^{\circ}$ C恒温培养 (除FDA水解酶是30 $^{\circ}$ C下培养) 后, 取样比色法测定土壤酶活性^[14]。每处理重复3次, 并设无土与无底物处理为对照。单位分别用水杨醇、葡萄糖 (Glu)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、酚 (Phenol)、甲胍 (TPF) 和荧光素 ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) 表示。

1.5 数据处理

土壤总体酶活性 (The total enzyme activity index, TEI)^[15]:

$$\text{TEI} = \sum_{i=1}^n \text{EA}_i / \overline{\text{EA}} \quad (1)$$

式中, EA_i 为第*i*种土壤酶实测活性, $\overline{\text{EA}}$ 为同种土壤酶活性平均值, *n*为酶种类的总数。

试验数据基本处理采用Microsoft Excel 2003分析, 多重比较及主成分分析 (PCA) 采用SPSS 17.0软件分析。

2 结 果

2.1 不同林分土壤化学性质变化

土壤有机质是土壤最重要的性质之一, 其含量在一定程度上可反映土壤质量的高低^[16]。从表2看出, 松栎混交与华山松0~10 cm土壤有机质含量分别为最高与最低, 两者相差49.16%。各林地土壤有机质均值为: 松栎混交 > 云杉 > 锐齿栎1 > 油松 > 锐齿栎2 > 华山松, 且随剖面深度增加, 土壤有机质含量下降, 其中油松降幅最大, 松栎混交最小。云杉海拔最高, 虽然其有机质含量低于混交林, 但仍处于较高水平, 揭示植被中混交林较纯林更有利于土壤有机质水平提升, 表明土壤有机质含量受到林分等诸多因素影响。佐证了土壤总有机碳含量随海拔升高而增加的规律^[17]。

表2 供试林地土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties of the forest stands studied

林分编号 Woodland No.	土层 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	碱解氮Alkali- hydrolyzale N (mg kg^{-1})	有效磷 Available P (mg kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})	缓效钾 Slowly available K (mg kg^{-1})
1	0~10	71.32	3.35	352.6	2.22	196.7	589.7
	10~20	38.20	1.99	230.2	1.03	104.4	632.1
2	0~10	42.27	1.98	202.4	2.33	112.4	499.5
	10~20	21.03	0.95	121.8	2.14	88.36	523.5
3	0~10	54.87	2.39	231.5	1.29	136.5	625.0
	10~20	25.82	1.78	141.3	1.13	100.4	536.4
4	0~10	38.35	1.64	192.1	8.09	140.5	795.5
	10~20	24.44	1.51	138.9	4.25	104.4	706.9
5	0~10	72.23	3.46	361.9	2.22	280.9	1 253
	10~20	58.60	2.93	332.7	2.05	176.6	1 208
6	0~10	75.44	3.14	322.4	2.40	176.6	559.9
	10~20	74.02	2.83	296.7	1.73	168.6	493.2

氮是作物生长的主要营养元素之一,其中全氮是土壤氮素总量和供应植物有效氮素的源和库;碱解氮则是反映土壤供氮能力的重要指标^[18],可较好地表征短期内土壤氮素供应状况和氮素释放速率。供试林地全氮含量在0.95~3.46 g kg⁻¹之间,表层土壤含量最高的云杉与最低的华山松相差52.60%。各林地土壤全氮均值:云杉>松栎混交>锐齿栎1>油松>华山松>锐齿栎2。其与有机质呈极显著正相关($r=0.940$)。碱解氮含量为121.8~361.9 mg kg⁻¹,极差为66.35%。其中0~10 cm除华山松外其余林分土壤碱解氮含量较高。各林地土壤碱解氮均值:云杉>松栎混交>锐齿栎1>油松>华山松>锐齿栎2;其与有机质、全氮相关系数达0.944和0.970($p<0.01$)。揭示出林地土壤与农田土壤一样,土壤氮素变化规律与有机质一致。随土壤深度增加,氮素含量降低,其中锐齿栎2的全氮、碱解氮含量降幅最大,华山松的全氮及松栎混交的碱解氮降幅最小。

磷是土壤中重要营养元素之一,其分布与环境保护等密切相关,因过量磷是导致水体富营养化的主要原因之一。与全量养分相比,有效磷可表征直接被植物体吸收利用的含量。表2看出供试林地有效磷含量总体较低,范围在1.03~8.09 mg kg⁻¹间,低于农田土壤磷平均含量(12.89 mg kg⁻¹)^[19]。其中华山松土壤有效磷含量远高于其他林地,油松0~10 cm的含量最低。各林地有效磷均值:华山松>锐齿栎林2>云杉>松栎混交>锐齿栎1>油松。随土壤深度增加,磷含量急剧降低,其中锐齿栎1与云杉降幅分别最大和最小。

钾是植物必需大量营养元素之一,速效钾表征可供植物利用钾素的含量;缓效钾是钾的储备库,当速效钾含量因植物吸收或淋失而降低时,部分缓效钾可转变为速效钾。供试林地速效钾含量在88.36~280.9 mg kg⁻¹之间,其中土壤含量最高的0~10 cm云杉与最低的10~20 cm锐齿栎2相差68.54%。各林地土壤速效钾排序:云杉>松栎混交>锐齿栎1>华山松>油松>锐齿栎2。而缓效钾变幅相对较小,其中云杉的缓效钾含量较高;各林地土壤缓效钾均值为:云杉>华山松>锐齿栎1>油松>松栎混交>锐齿栎2。速效钾与缓效钾间相关系数为0.648,表明在一定程度上二者关系较为密切。随着土壤深度增加,各林地速效钾含量皆降低,其中锐齿栎1变幅最大,松栎混交最小;但锐

齿栎1和锐齿栎2缓效钾含量增加,变化幅较小。

2.2 不同林分土壤酶活性变化

供试林分土壤酶活性见表3。其中纤维素酶与 β -葡萄糖苷酶是参与土壤碳循环的关键酶。土壤纤维素酶活性均值:云杉>锐齿栎2>锐齿栎1>油松>华山松>松栎混交,云杉和锐齿栎2酶活性与其他林地均差异显著,云杉与松栎混交相差66.89%;土层间酶活性除松栎混交外均差异显著。 β -葡萄糖苷酶活性均值:云杉>锐齿栎1>华山松>锐齿栎2>油松>松栎混交,最高与最低间相差69.88%;云杉与除锐齿栎1外的林分差异均达显著水平,而其余林分间酶活性差异不显著,各林地两个土层间差异均显著。 β -葡萄糖苷酶活性与碱解氮、速效钾及缓效钾间表现为显著正相关,且其与纤维素酶达极显著正相关($r=0.742$),揭示出两个影响碳循环的酶类变化是同步的。

脲酶是唯一水解尿素肥料的酶类,对土壤氮素转化起着重要作用。供试土壤脲酶活性均值为:锐齿栎1>华山松>锐齿栎2>油松林>松栎混交>云杉,锐齿栎1与云杉差异显著,与其余林分差异均不显著,云杉与除锐齿栎1外的林分差异均不显著,最高与最低相差35.51%,土层间酶活性除松栎混交外差异均显著。

磷酸酶能酶促有机磷化合物水解为无机磷,提供植物生长需要的磷素,其活性是评价土壤磷素生物转化方向与强度指标,根据其最适pH可分为酸性、碱性和中性磷酸酶。本文检测了酸性和碱性磷酸酶的活性。酸性磷酸酶活性为云杉>锐齿栎1>锐齿栎2>油松>华山松>松栎混交,其间活性最大相差1.95倍;云杉和锐齿栎1与其余林分间均差异显著。各林地土层间均呈显著差异。酸性磷酸酶活性与全氮、碱解氮和速效钾显著相关($r=0.633$ 、 0.671 和 0.636)。所有林地的两层土壤酶活性均达显著差异,但松栎混交和云杉的变幅较小,而其余林地降低一倍左右。碱性磷酸酶活性均值:云杉>锐齿栎1>油松>松栎混交>华山松>锐齿栎2,云杉与锐齿栎1差异不显著,与其余林分均差异显著,林分间酶活性最高与最低相差2.96倍;除松栎混交外,其余各林地土壤酶活性不同层次间显著差异。碱性磷酸酶活性与有机质、全氮、碱解氮、速效钾及缓效钾呈显著或极显著正相关($r=0.642$ ~ 0.901),表明在秦岭山脉中土壤碱性磷酸酶在一定程度上可敏感指示土壤质

表3 供试林地土壤酶活性

Table 3 Soil enzyme activities in the soils of the forests stands

林分编号 Woodland No.	土层 Soil layer (cm)	纤维素酶 Cellulase ($\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase ($\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	脲酶 Urease ($\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	酸性磷酸酶 Acid phosphatase ($\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase ($\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	脱氢酶 Dehydrogenase ($\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$)	荧光素二乙酸 酯水解酶 FDA hydrolase ($\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$)
1	0~10	2.38 ± 0.33a	37.02 ± 1.16a	20.37 ± 1.18a	429.9 ± 17.33a	60.69 ± 3.74a	7.29 ± 0.35 a	51.70 ± 4.33a
	10~20	1.10 ± 0.07b	15.15 ± 0.96b	12.34 ± 0.19b	208.0 ± 7.76b	26.91 ± 0.23b	5.87 ± 0.64 b	31.90 ± 3.67b
	平均Mean	1.74B	26.09AB	16.36A	319.0A	43.80AB	6.58A	41.80AB
2	0~10	3.26 ± 0.18a	23.12 ± 0.36a	15.60 ± 0.49a	310.8 ± 19.74a	27.83 ± 0.05a	4.86 ± 0.05 a	37.58 ± 2.41a
	10~20	2.03 ± 0.18b	6.05 ± 0.22b	8.11 ± 0.51b	136.9 ± 5.77b	11.62 ± 0.19b	2.80 ± 0.13 b	23.04 ± 2.86b
	平均Mean	2.64A	14.59C	11.86AB	223.85B	19.73C	3.83B	30.31C
3	0~10	1.97 ± 0.21a	19.89 ± 1.25a	14.50 ± 1.23a	267.5 ± 7.61a	35.56 ± 0.23a	6.58 ± 1.33a	30.48 ± 8.26a
	10~20	1.36 ± 0.05b	7.38 ± 0.76b	8.92 ± 0.96b	127.7 ± 0.55b	20.60 ± 0.37b	4.81 ± 0.22a	27.39 ± 3.30a
	平均Mean	1.67B	13.64C	11.72AB	197.61B	28.09BC	5.70AB	28.94C
4	0~10	1.68 ± 0.27a	28.69 ± 3.78a	20.09 ± 2.31a	239.0 ± 8.81a	35.56 ± 0.23a	7.60 ± 0.02a	56.25 ± 2.85a
	10~20	1.00 ± 0.09b	10.35 ± 0.85b	9.57 ± 0.48b	118.9 ± 4.13b	17.43 ± 0.19b	6.24 ± 0.20b	36.96 ± 4.47b
	平均Mean	1.34BC	19.52BC	14.83AB	178.96B	26.50BC	6.92A	46.61AB
5	0~10	3.63 ± 0.31a	42.27 ± 1.60a	12.12 ± 0.42a	356.6 ± 13.75a	76.76 ± 3.50a	5.55 ± 0.41a	56.66 ± 0.95a
	10~20	2.41 ± 0.13b	24.99 ± 0.87b	8.98 ± 1.45b	293.39 ± 1.90b	40.11 ± 0.70b	3.99 ± 0.85b	46.78 ± 6.33b
	平均Mean	3.02A	33.63A	10.55B	325.00A	58.44A	4.77B	51.72A
6	0~10	1.02 ± 0.15a	11.44 ± 0.49a	13.30 ± 3.83a	190.0 ± 11.50a	26.74 ± 1.96a	4.54 ± 0.18a	40.60 ± 5.84a
	10~20	0.97 ± 0.10a	8.80 ± 0.54b	10.01 ± 0.30a	142.6 ± 1.90b	27.27 ± 0.09a	4.17 ± 0.01b	35.30 ± 5.20a
	平均Mean	1.00C	10.13C	11.66AB	166.31B	27.01BC	4.36B	37.95BC

注：同列数字后不同小写英文字母表示土层间差异显著 ($p < 0.05$)；同列数字后不同大写英文字母表示林地间差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 level; Different capital letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 level

量的高低。酸性与碱性磷酸酶间呈极显著正相关 ($r=0.848$)。

脱氢酶能酶促脱氢反应，它起着氢的中间传递作用，其活性被认为是土壤微生物活性和功能多样性的重要指标。供试林地脱氢酶活性均值为：华山松 > 锐齿栎1 > 油松 > 云杉 > 松栎混交 > 锐齿栎2，其中，华山松、锐齿栎1与云杉、松栎混交及锐齿栎2差异均显著，林分间酶活性最大相差1.81倍；在除油松林以外的其他林地中，土壤层次间酶活性均达差异显著。

FDA水解酶与总碳、总氮和总磷等土壤养分指标关系密切，能够很好地反映系统间有机质的转化及土壤中微生物的活性。酶活性均值：云杉 > 华山松 > 锐齿栎1 > 松栎混交 > 锐齿栎2 > 油松，云杉与

松栎混交、锐齿栎2及油松间差异显著，华山松和锐齿栎1与锐齿栎2和油松差异显著，林分间酶活性最大相差44.04%；除松栎混交和油松外，其余林地土层间FDA水解酶活性均差异显著。FDA水解酶活性与全氮、碱解氮、速效钾及缓效钾之间呈显著或极显著正相关 ($r=0.582 \sim 0.755$)，揭示了FDA水解酶亦可较好表征森林土壤养分状况。

由于单个土壤酶与土壤化学性质之间关系不完全一致，且各林分的单一酶活性排序也有差异，因此本文计算了土壤总体酶活性TEI (表4)，0~10 cm土壤总体酶活性顺序为：云杉 > 锐齿栎1 > 华山松 > 锐齿栎2 > 油松 > 松栎混交，其中云杉与松栎混交相差51.07%；10~20 cm土壤总体酶活性顺序：云杉 > 锐齿栎1 > 松栎混交 > 华山松 >

表4 供试林地土壤总体酶活性

Table 4 Total enzyme activity index (TEI) in the soil relative to type of forest stand

林分编号Woodland No.	土层 Soil layer (cm)	总体酶活性 TEI	林分编号 Woodland No.	土层 Soil layer (cm)	总体酶活性 TEI
1	0~10	11.01	4	0~10	8.82
	10~20	5.9		10~20	4.92
2	0~10	8.11	5	0~10	11.26
	10~20	4.04		10~20	7.6
3	0~10	7.37	6	0~10	5.51
	10~20	4.53		10~20	4.94

油松 > 锐齿栎2, 云杉与锐齿栎2相差46.84%。土壤总体酶活性在土层间皆为0~10 cm高于10~20 cm, 锐齿栎2土层间相差最大(50.18%), 松栎混交相差最小(0.10%)。土壤总体酶活性与土壤全氮、碱解氮及速效钾呈显著或极显著正相关($r=0.594 \sim 0.722$), 与脲酶显著相关($r=0.691$), 与纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、FDA水解酶呈极显著正相关($r=0.733 \sim 0.988$)。

2.3 土壤酶在表征林地土壤质量中的作用

主成分分析是一种采取降维, 将多个指标减为少数几个综合指标的统计分析方法。为了进一步探讨土壤化学性质与土壤酶在森林土壤养分转化及对土壤肥力指示的作用, 分别对土壤性质进行了主成分分析。

采用土壤化学性质与土壤酶主成分分析后, 得到主成分信息系统 I 的主成分1~3累积方差贡献率82.80%, 故采用前三个主成分可反映秦岭地区土壤的肥力变异信息; 而且第一主成分主要综合了全

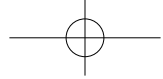
氮、碱解氮、速效钾、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、FDA水解酶及 β -葡萄糖苷酶的变异信息, 第二主成分主要包含了有速效磷、脲酶、脱氢酶的信息, 第三主成分包含有机质、缓效钾的信息。同样利用土壤酶活性分析得到主成分信息系统 II, 前两个主成分累积方差贡献率86.83%, 第一主成分综合 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶、脲酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶及FDA水解酶的信息, 第二主成分包含脱氢酶的信息。

根据特征值和因子载荷量, 得到反映主成分的函数表达式, 将标准化数据分别代入后, 获得土壤肥力信息系统中各林地在主成分上的得分, 计算主成分综合得分^[20](表5)。可看出, 六个林地主成分信息系统 I 0~10 cm土层得分为: 云杉 > 锐齿栎1 > 华山松 > 松栎混交 > 油松 > 锐齿栎2, 10~20 cm的除松栎混交外其余与0~10 cm基本相似; 主成分信息系统 II 的0~10 cm土层得分为云杉 > 油松 > 锐齿栎1 > 华山松 > 锐齿栎2 > 松栎混交, 10~20 cm得分与0~10 cm基本一致。揭示出土壤主成分

表5 土壤化学性质及土壤酶主成分分析的综合得分

Table 5 Integrated scores of the principle component analyses of soil chemical properties and soil enzymes

林地编号 Woodland No.	信息系统 I Information system I		信息系统 II Information system II	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
	1	2.469	-0.796	0.484
2	-0.298	-2.642	-0.560	-1.413
3	-0.014	-1.896	2.380	0.023
4	1.376	-1.167	0.330	-1.774
5	2.587	0.592	3.045	1.937
6	0.201	-0.411	-0.795	-2.530



综合得分可较好表征森林土壤的肥力水平的高低，除油松和松栎混交外，两个信息系统得到的总体排序基本相同。同时信息系统 I、II 综合得分的相关系数达 0.606^{*}，也佐证了其变化规律的一致。

相关分析（表 6）看出土壤总体酶活性与信息系统 I、II 得分呈显著、极显著正相关，揭示出土壤总体酶活性在一定程度上可代表主成分聚类的结

果，表征供试林地土壤的质量水平。单一酶系中的碱性磷酸酶和 FDA 水解酶结果较好，其中碱性磷酸酶与总体酶活性、信息系统 I 和 II 的综合得分都呈极显著相关，FDA 水解酶与总体酶活性和信息系统 I 呈极显著相关。这表明在森林土壤中，对于单个酶而言，土壤碱性磷酸酶能较好地揭示土壤肥力水平状况。

表 6 总体酶活性及酶活性与综合得分之间的相关性（*r* 值）

Table 6 Correlation matrix of integrated scores with TEI and soil enzyme activity (*r* value)

	总体酶活性 TEI	信息系统 I Information system I	信息系统 II Information system II
总体酶活性 TEI	1.00	0.927**	0.695*
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.919**	0.929**	0.730**
荧光素二乙酸酯水解酶 FDA-hydrolase	0.835**	0.933**	0.488

注 Note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

3 讨 论

土壤酶是近年来森林土壤研究的一个重要方向。相较于较为稳定的土壤化学性质，土壤酶活性能够在较短时期内反映出土壤状况的变化，同时土壤酶活性受到多种因素的影响。本研究发现，林分种类是影响酶活性的一个重要因素，这种影响可能主要是通过根系的机械作用改变土壤的物理特性，并借助于根系分泌物、根凋落物、地上部分凋落物以及植被覆盖所导致的土壤微生境的变化等直接或间接地影响土壤微生物的活性，进而导致土壤酶特征的变化^[21-22]。而且由于不同植被类型生态环境条件的差异，导致了不同土壤酶对同一林分的响应有较大差异。如马头滩林场的锐齿栎 1 和华山松是落叶乔木，其林分年凋落量大于华山松，土壤累积的腐殖质较高，且锐齿栎叶的营养元素含量也高于华山松，为土壤酶促反应提供了充足的基质，最终导致锐齿栎 1 除 FDA 水解酶和脱氢酶外，其余土壤酶活性均高于华山松。同时在两个林场的锐齿栎，其生长环境有差异，土壤化学性质差别较大（表 2），导致马头滩林场的锐齿栎 1 除纤维素酶外其余酶活性均大于辛家山林场的锐齿栎 2，可见土壤酶活性不仅受到林分类型影响，而且受到土壤条件及养分含量等因素影响，揭示出森林土壤酶活性是一个综合指标。此外，云杉的养分含量与酶活性在六个林

地中表现最高，其原因可能是云杉土壤类型为暗棕壤，其腐殖质层较棕壤厚，土壤肥沃，土壤中生化反应较为活跃。

对土壤养分及酶活性研究表明，土壤化学性质与土壤酶间有一定的相关性，这与其他人的研究结果相似^[23-24]，但单一土壤酶作用于一种特殊基质，可反映出土壤专一过程或营养循环的强度，而作为土壤肥力指标有一定的局限性。此外各酶活性间存在相关性，这表明土壤酶不仅显示专性特性，同时存在共性特征，为此本文计算了土壤总体酶活性^[14]。由于总体酶活性不考虑酶活性的量纲和每个土样酶活性绝对值大小，最终是个无量纲数值，便于比较；每一种酶权重相同，在土壤中发挥作用平等；且在本试验中，所测七种酶参与土壤中主要营养元素的循环，与土壤养分关系密切。因此，相较于单一酶，总体酶活性能更好地比较不同林地间生化活性大小，更准确地表征供试土壤肥力水平高低。

通过主成分分析和相关性分析发现，碱性磷酸酶和土壤总体酶活性是表征土壤肥力的较优指标。在 pH 为 4~9 的土壤中均可检测到磷酸酶，且酸性、碱性、中性磷酸酶在土壤中相伴存在，本文所研究六个林地土壤均呈酸性，因此酸性磷酸酶较碱性磷酸酶更为活跃。本文结果显示碱性磷酸酶与土壤化学性质间关系更紧密，其与土壤总体酶活性

在一定区域范围内可较好表征土壤肥力水平,可广泛应用于森林土壤的肥力水平评价。

4 结 论

通过对秦岭地区六个典型林分影响下的土壤化学性质及土壤酶活性特征的研究,得到如下主要结论:土壤养分含量强烈地受到典型林分种类、土壤深度的影响,其中尤以云杉的养分含量最高。土壤七种酶活性的变化幅度较大,除脲酶和脱氢酶外,其余酶类在云杉的土壤中活性最高,揭示林分种类直接影响土壤酶活性高低,同时土壤性质也是主要影响因素;土壤碱性磷酸酶和FDA水解酶活性与土壤养分达显著或极显著正相关,揭示此两种酶类在一定程度上表征森林土壤质量水平。土壤总体酶活性与土壤全氮、碱解氮、速效钾、缓效钾等呈显著或极显著正相关,并与碱性磷酸酶和FDA水解酶达极显著相关,揭示采用七种酶类构建的土壤总体酶活性可较好表征土壤肥力水平的变化。土壤酶单独以及土壤养分与土壤酶复合进行的主成分分析,计算获得的综合得分与土壤总体酶活性及碱性磷酸酶、FDA水解酶类呈显著或极显著正相关。

参 考 文 献

- [1] 李文华,李飞.中国森林资源研究.北京:中国林业出版社,1996
Li W H, Li F. China's forest resources research (In Chinese). Beijing: China Forestry Press, 1996
- [2] 中国可持续发展林业战略研究项目组.中国可持续发展林业战略研究总论.北京:中国林业出版社,2002
Chinese Forestry Sustainable Development Strategy Research Group. Research on Chinese forestry sustainable development strategy (In Chinese). Beijing: China Forestry Press, 2002
- [3] 林娜,刘勇,李国雷,等.森林土壤酶研究进展.世界林业研究,2010,(4):21—25
Lin N, Liu Y, Li G L, et al. Research progress on forest soil enzyme (In Chinese). World Forestry Research, 2010, (4): 21—25
- [4] 周礼恺.土壤酶活性的测定方法.土壤通报,1980,(5):37—38
Zhou L K. The determination methods of soil enzyme activity (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1980, (5): 37—38
- [5] 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.土壤,2015,47(4):634—640
Bian X L, Yue Z H, Jiao H, et al. The progress of soil enzyme on the soil environment quality indicator (In Chinese). Soils, 2015, 47(4): 634—640
- [6] Tabatabai M A, Dick W A. Enzymes in soil Research and developments in measuring activities //Burns R G, Dick R P. Enzymes in the environment Activity, ecology, and applications. New York, USA: Marcel Dekker, Inc, 2002: 567—595
- [7] Dick R P. Enzyme activities as integrative indicators of soil health// Parkhurst C E et al. Bioindicators of soil health. Oxon, United Kingdom: CAB International, 1997: 121—156
- [8] 孟令军,耿增超,王海涛,等.秦岭太白山区鹿蹄草根际与非根际土壤养分及酶活性研究.西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(5):157—165
Meng L J, Geng Z C, Wang H T, et al. Soil nutrients and enzyme activities of Pyrola in rhizosphere and non-rhizosphere on Mt. Taibai, Qinling Mountains (In Chinese). Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 157—165
- [9] 刘增文,段而军,高文俊,等.秦岭山区人工林地枯落叶客置对土壤生物、化学性质的影响.应用生态学报,2008,19(4):704—710
Liu Z W, Duan E J, Gao W J, et al. Effects of leaf litter replacement on soil biological and chemical characteristics in main artificial forests in Qinling Mountains (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 704—710
- [10] 王棣,耿增超,余雕,等.秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征.应用生态学报,2014,25(6):1569—1577
Wang D, Geng Z C, She D, et al. Vertical distribution of soil active carbon and soil organic carbon storage under different forest types in the Qinling Mountains (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1569—1577
- [11] 党坤良,雷瑞德,张硕新,等.秦岭南坡锐齿栎林、松栎混交林林地土壤特性研究.西北林学院学报,1996,11(S1):127—131
Dang K L, Lei R D, Zhang S X, et al. Soil characteristics of sharptooth oak forest and mixed forest between pine and oak on south-facing slope of the Qinling Mountains (In Chinese). Journal of Northwest Forestry College, 1996, 11(S1): 127—131
- [12] 杨文杰,徐小茸,方丽,等.国有林场发展问题探讨.西北林学院学报,2005,20(1):189—192
Yang W J, Xu X R, Fang L, et al. On the development

- problems of state forest farms (In Chinese) . Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20 (1) : 189—192
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3 版. 北京: 中国农业出版社, 1997
Bao S D. Analysis of soil agricultural chemistry (In Chinese) . 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1997
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1987
Guan S Y. Soil enzyme and its resrarch methods (In Chinese) . Beijing : Agriculture Press, 1987
- [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. 土壤学报. 2010, 47 (6) : 1232—1236
He W X, Tan X P, Wang X D, et al. Study on total enzyme activity index in soil (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (6) : 1232—1236
- [16] 沈润平, 王海辉, 连楚楚, 等. 稻田土壤有机质氧化稳定性与土壤肥力关系的研究. 江西农业大学学报, 1997, 19 (1) : 1—4
Shen R P, Wang H H, Lian C C, et al. A study on the interrelationship between the fertility and the oxidation stability of organicmatter in paddy soil (In Chinese) . Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis. 1997, 19 (1) : 1—4
- [17] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征. 土壤学报, 2013, 50 (6) : 1246—1251
Zhou C N, Ma H P. Distribution of labile organic carbon in soil as affected by vegetation typical of Sygera Mountains, Tibet, China (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (6) : 1246—1251
- [18] 王晓岚, 卡丽毕努尔, 杨文念. 土壤碱解氮测定方法比较. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2010, 46 (1) : 76—78
Wang X L, Kalibinuer, Yang W N. Comparison of methods for determining alkali-hydrolyzed nitrogen in soil (In Chinese) . Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46 (1) : 76—78
- [19] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. 应用生态学报, 2013, 24 (1) : 260—268
Wang Y Z, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (1) : 260—268
- [20] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析. 北京: 科学出版社, 2002
Yuan Z F, Zhou J Y. Multivariate statistical analysis (In Chinese) . Beijing: Science Press, 2002
- [21] Lucas Y, Luizao F J, Chauvel A. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. Science, 1993, 260 (5107) : 521—523
- [22] Brussaard L, Behan-Pelletier V M, Bignell D. Biodiversity and ecosystem functioning in soil. Ambio, 1997, 26 (8) : 563—570
- [23] 王友保, 张莉, 刘登义. 灰渣场土壤酶活性与植被和土壤化学性质的关系. 应用生态学报, 2003, 14 (1) : 110—112
Wang Y B, Zhang L, Liu D Y. Relationship among soil enzyme activities, vegetation state, and soil chemical properties of coal cinder yard (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (1) : 110—112
- [24] 高祥斌. 森林土壤化学性质与土壤酶活性典型相关分析. 林业科技, 2007, 32 (1) : 11—13
Gao X B. Canonical correlation analysis on forestry chemical properties and soil enzymes activities (In Chinese) . Forestry Science & Technology, 2007, 32 (1) : 11—13

Relationships between the Soil Enzyme Activity and Soil Nutrients in Forest Soils Typical of the Qinling Mountain

YANG Rui^{1, 2} LIU Shuai¹ WANG Ziquan¹ CAO Yongchang¹ ZHAO Yiming¹ HE Wenxiang^{1, 2†}
GEN Zengchao¹

(1 College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】As the Qinling Mountain is the division line between the two climate zones, south and north in China, the mountain, as a result of its huge variation in climate and altitude, has a great

number of unique forest stands that have never been disturbed by human activities. Therefore, the study on the soils under these forests, including soil enzymes and nutrients, can be of great reference value to the studies on other types of soils, and may lay down a foundation for revelation of soil effects relative to forest stand and selection of optimal forest stands. 【Method】 In this study, soils samples were collected from five typical types of forest stands (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*, *Pinus tabuliformis*, *Pinus armandii*, *Picea asperata*, and pine-oak mixture) at various altitudes, for analysis of activities of seven soil enzymes and soil nutrients, so as further to determine relationships between the two as affected by type of the forest stand. 【Result】 Results show that significant differences in soil enzyme activity and soil nutrient existed between the forest stands. Properties of the soils were significantly affected by type of forest and bio-environment conditions, such as attitude. The soil under *Picea asperata* (one of the dominant well-grown species in the Qinling Mountain) was the highest in organic matter, total N, alkalytic N, readily available potassium and slowly available potassium, and what is more, soil organic matter, total N and alkalytic N followed similar trends; soil alkaline phosphatase, fluorescein diacetate (FDA) hydrolase and the total enzyme activity index (TEI) were in significantly positive or extremely significant and positive relationships with soil nutrient, which indicates that forest and altitude have similar influences on the three types of enzymes like soil nutrient does. Principal component analyses (PCA) of sole soil enzyme activity and combination of soil chemical properties and soil enzyme activity were quite similar in result, with integrated scores significantly and positively related to the above-listed three enzymes. 【Conclusion】 So soil alkaline phosphatase, FDA hydrolase and TEI can be used as indicators of quality of forest soils, especially soil alkaline phosphatase that can be easily used as a single enzyme indicator to reflect soil nutrient condition. Other than those, no soil enzymes are found so closely related to soil chemical properties.

Key words Woodland; Soil nutrients; Enzyme activity; Principal component analysis; Correlation analysis

(责任编辑: 陈荣府)