

张海玲, 贾国梅, 向翰宇, 等. 三峡库区不同林龄柑橘土壤酶活性的演变[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2): 121-127.

ZHANG Hai-ling, JIA Guo-mei, XIANG Han-yu, et al. Changes in Soil Enzyme Activities at Different Ages of Citrus Stands in Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(2): 121-127.

三峡库区不同林龄柑橘土壤酶活性的演变

张海玲^{1,3}, 贾国梅^{1,2*}, 向翰宇¹, 程 虎¹, 张宝林¹

(1.三峡大学生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 2.湖北三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡植物管理处, 湖北 宜昌 443111)

摘 要:土壤酶驱动土壤生态系统养分的循环和控制生态系统的功能。本研究以生长年限为 10、20 年和 30 年的柑橘林 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤为研究对象, 主要探讨了土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶活性随着柑橘林龄的延长和土壤深度的增加的变化规律。结果表明, 随着柑橘林龄的延长, 0~20 cm 土层土壤过氧化氢酶活性 10 年和 20 年样地之间无显著性差异, 但都显著大于 30 年的样地; 而 0~20 cm 土层土壤转化酶和脲酶活性逐渐提高, 20 年时达到最大值, 其后又降低。随着土壤深度的增加, 过氧化氢酶、转化酶和脲酶活性在 3 个林龄的柑橘林中都呈现显著的下降趋势。相关性分析的结果表明, 土壤转化酶活性、脲酶活性都与土壤有机碳和微生物量碳氮之间都具有显著的正相关性, 而过氧化氢酶活性与土壤理化特性及其微生物量之间都无显著的相关性。主成分分析结果进一步显示, 土壤转化酶活性、脲酶活性、有机碳和微生物量碳氮均在第一主成分中具有较大的载荷, 对第一主成分的贡献最大。以上结果表明脲酶和转化酶活性能够做为柑橘土壤质量变化的敏感指标。

关键词:柑橘; 脲酶; 转化酶; 过氧化氢酶

中图分类号: S154.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)02-0121-07

doi: 10.13254/j.jare.2016.0167

Changes in Soil Enzyme Activities at Different Ages of Citrus Stands in Three Gorges Reservoir Area, China

ZHANG Hai-ling^{1,3}, JIA Guo-mei^{1,2*}, XIANG Han-yu¹, CHENG Hu¹, ZHANG Bao-lin¹

(1.College of Biological and Pharmaceutical Sciences, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.Hubei International Scientific and Technological Cooperation Center of Ecological Conservation and Management in Three Gorges Area, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3.Management Office of Three Gorges Botanical Garden, Yichang 443111, China)

Abstract: Soil enzyme catalyzes soil nutrient cycles and control the function of ecosystem. The changes in activities of catalase, invertase and urease in 0~20 cm and 20~40 cm soil depths were determined at different ages (ie. 10-, 20-, and 30-years old) of citrus stands in Three Gorges Reservoir Area. The results showed that catalase activity in 0~20 cm soil depth were lower in 30-year-old than those of 10- and 20-year-old sites which had no significant difference. Invertase and soil urease activities in 0~20 cm soil depth increased gradually, and tended to be highest under 20-year old site, and thereafter it decreased again. Soil catalase, invertase and urease activities decreased with soil depth at each citrus stand age. Soil urease and invertase activities showed significant relationship with soil organic C, microbial biomass C, and microbial biomass N whereas soil catalase activity had no significant relationship with soil physical, chemical and microbial properties. The results of principal components analysis showed that invertase activity, urease activity, organic C, microbial biomass C, and microbial biomass N were the major contributors in the first principal component due to more high factorial loads. Therefore, the results indicated that soil urease and invertase activities might be sensitive indicators for the change in soil quality in citrus stand.

Keywords: citrus tree; urease; invertase; catalase

收稿日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51541903); 湖北省自然科学基金(2010CDB10706)

作者简介: 张海玲(1990—), 女, 湖北当阳人, 硕士研究生, 初级工程师, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: 545520061@qq.com

* 通信作者: 贾国梅 E-mail: jijgm@126.com

三峡库区生态环境的好坏与三峡大坝的生态安全紧密相关。然而,三峡库区是亚热带丘陵地区,雨水充足,水土流失严重^[1]。同时,由于该区域人口密度大,经济发展水平低,耕地资源严重不足,是贫困人口相对集中的连片贫困地区,所以经济和生态环境的协调发展是当前库区面临的迫切任务。发展人工经济林,扩大植被的覆盖度,遏制水土的进一步流失,改善当地农民的生活水平,在热带、亚热带,特别在三峡库区已经成为农村的经济发展最具有活力的新的增长点,成为当代林业发展和生态恢复的必然趋势^[2]。

柑橘林广泛分布于长江流域,是三峡库区的支柱产业,由于其树木高大,根系深,分布范围广,能够减少土壤侵蚀和养分损失^[3],所以又成为三峡库区治理水土流失的重要措施和植被恢复的物种之一^[4]。发展柑橘人工经济林既可以提高农民的经济收入,又可以减少水土流失、改善生态环境,这无疑是一种双赢的措施和手段。然而,柑橘林大多是纯人工经济林,密植、中耕除草、喷药和施肥,强化了人为作用对柑橘林土壤的持续扰动,虽然提高了产量,但是改变了土壤营养元素的循环机制,创造了特有的土壤生态系统,导致生态系统单一,这不仅影响柑橘经济林的可持续发展,也影响三峡库区生态环境的恢复和重建。

土壤是柑橘生长和发育的根本,柑橘产量的高低、品质的优劣与土壤质量有着不可分割的联系。土壤酶是土壤组分中最活跃的有机成分之一,参与土壤生境中的碳、氮、磷等养分的循环和控制生态系统的功能,能综合反映土壤生物化学过程的方向和程度^[5],能够敏感指示和预警土壤生境的变化^[6],可作为评价土壤质量和养分供应能力的重要表征^[7-8]。目前虽然有研究报道了不同林龄柑橘土壤^[9]和根际有机碳及其组分的变化^[10],但鲜有报道随着柑橘林龄的增加其土壤酶活性的变化规律。因而,本研究以三峡库区不同林龄的柑橘土壤为研究对象,阐明柑橘土壤酶活性的动态及其与土壤养分之间的关系,揭示三峡库区不同林

龄柑橘土壤酶的变化规律,以期为柑橘园土壤质量的可持续发展提供理论依据,为进一步阐明农业生态系统生物地球化学循环规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于三峡库区首市宜昌市秭归县郭家坝镇。该区位于东经 110°41′25.2″~110°41′51.2″、北纬 30°55′04.8″~30°55′10.2″,海拔在 236~267 m。年平均水量为 1 140~1 200 mm。雨水充足且主要集中在夏季的 6—7 月份,无霜期比较长,全年的平均气温在 17~19 ℃。

1.2 土样采集和实验方法

在郭家坝选取邻近 1 km 左右,以化肥施用为主,定期中耕除草等管理措施基本一致的 3 个林龄(10、20 年和 30 年)的 6 个柑橘样地,每两个相同林龄的柑橘样地作为样地重复(表 1),分别在每个样方用土钻随机取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土样按“S”形布设取样点数 5 个,混合为一个样,捡去枯枝落叶后,分为两部分,一部分自然风干用于土壤有机碳、全氮和土壤酶活性的测定,另一部分过 2 mm 的筛子后,放到 0~4 ℃的冰箱里保存,用于土壤微生物量碳氮的分析。

土壤含水量采用烘干法测定,土壤 pH(1:1)采用酸度计测定,土壤容重采用环刀法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-稀释热法测定,土壤全氮的含量用半微量凯氏定氮法分析测定,土壤微生物量碳和微生物生物量氮采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定。过氧化氢酶的测定是基于过氧化氢与土壤相互作用时,用高锰酸钾滴定酶促反应前后过氧化氢的量^[11]。转化酶的活性用硫代硫酸钠滴定的方法测定^[12],脲酶用靛酚兰比色法测定^[13]。

1.3 数据处理

柑橘林龄和土壤深度及其二者的交互效应应用两

表 1 样地两个取样点的基本情况

Table 1 Status of two replicate sites

样地年龄/年	海拔/m	纬度 N	经度 E	坡向/°	胸径/cm	树高/m
10	250.8	30°55′10.2″	110°41′50.2″	WS45	7	1.85
	235.8	30°55′08.2″	110°41′30.2″	EN36	6.83	1.8
20	252.4	30°55′08.1″	110°41′49″	WS28	15.75	2.87
	247.4	30°55′10.1″	110°41′39″	EN28	13.17	2.56
30	267.0	30°55′04.8″	110°41′51.2″	WS33	20.83	3.0
	252.0	30°55′07.8″	110°41′25.2″	EN41	20	2.76

因素方差分析,当林龄在 0.05 水平上显著时再用 Turkey's-b 单因素方差分析,土壤深度有显著性时,用 T-测验分析。土壤酶活性与土壤理化指标以及微生物量之间的关系采用 Pearson's 相关性分析方法。为了更进一步分析土壤酶活性与各土壤因子之间关系,为了利用少量的指标解释所有指标的信息,采用主成分的分析方法。所有分析在 SPSS11.5 软件上进行。

2 结果与分析

2.1 土壤酶活性的变化

过氧化氢酶是一种促进过氧化氢水解的酶,它的活性增强对于防止过氧化氢对生物体的毒害具有重要意义,进而促进有机物的分解^[1]。本研究通过两因素方差分析的结果表明,柑橘林龄和土壤深度都显著影响土壤过氧化氢酶活性($P<0.001$),但是土壤深度和柑橘林龄的交互效应的影响却不显著(表 2)。不同林龄柑橘 0~20 cm 和 20~40 cm 土层过氧化氢酶活性的大小顺序都为:20 年>10 年>30 年(图 1),但单因素方差分析后多重比较的结果表明,0~20 cm 土层 10 年和 20 年的柑橘过氧化氢酶活性没有显著性差异,而 10 年和 20 年的过氧化氢酶活性显著大于 30 年的;20~40 cm 土层过氧化氢酶只有 20 年的样地显著大于 30 年的样地。随着土壤深度的增加,3 个年龄的柑橘林土壤过氧化氢酶活性都显著降低。

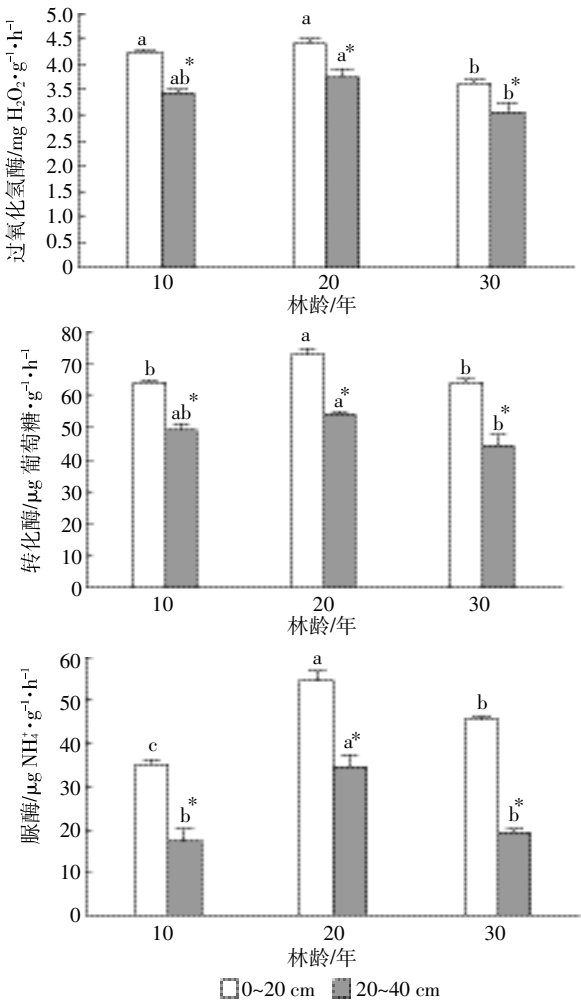
土壤转化酶主要参与土壤有机碳的循环,其活性大小表明土壤中有机碳转化及呼吸代谢强弱的反映。本研究通过两因素方差分析的结果表明,柑橘林龄和土壤深度分别显著影响土壤转化酶活性($P<0.001$),但是两者的交互效应不显著(表 2)。0~20 cm 土层转化酶活性随着柑橘林龄的延长呈现先增大后减小的

趋势,20 年的样地达到最大值,30 年样地又有显著的降低(图 1)。随着土壤深度的增加,3 个年龄的样地的转化酶都呈现显著的下降低趋势;20~40 cm 土层土壤转化酶活性的变化趋势与 20~40 cm 土层土壤过氧化氢酶的变化趋势相似,也是 10 年和 20 年样地之间无显著性差异,10 年和 30 年样地之间也无显著性差异,只有 20 年样地的转化酶活性显著高于 30 年样地。

脲酶是一种与氮循环紧密相关的水解酶,其活性大小和土壤中氮素转化的强弱有关。本研究中,两因素方差分析的结果表明,柑橘林龄和土壤深度分别显著影响土壤脲酶活性($P<0.001$),但是两者的交互效应不显著(表 2)。柑橘不同林龄 0~20 cm 和 20~40 cm 土层脲酶活性的大小顺序为:20 年>30 年>10 年(图 1),表明随着柑橘林龄的增大,土壤脲酶活性逐渐提高,20 年达到最大值,其后有所降低。这说明当柑橘林龄

表 2 林龄和土层对土壤酶活性影响的二因素方差分析
Table 2 Two-way ANOVA about the effects of age and soil depths on soil enzyme activities

指标	方差来源	自由度	均方差	F	P
过氧化氢酶	林龄	2	1.715	19.043	0.000
	深度	1	4.162	46.217	0.000
	林龄×深度	2	0.032	0.360	0.701
转化酶	林龄	2	0.162	12.78	0.000
	深度	1	1.626	128.339	0.000
	林龄×深度	2	0.013	1.036	0.367
脲酶	林龄	2	93.898	46.252	0.000
	深度	1	372.008	183.241	0.000
	林龄×深度	2	5.151	2.537	0.096



不同字母表示不同林龄在同一土层上差异显著;
柱上的“*”表示同一林龄不同土壤深度间差异显著。下同

图 1 不同林龄柑橘土壤酶活性

Figure 1 The activities of enzymes at different ages of citrus

达到 20 年时,土壤氮转化能力处于相对比较活跃的状态,有利于土壤氮素循环。随着土壤深度的增加,3 个林龄的柑橘林土壤脲酶都显著降低。

2.2 土壤理化特性

0~20 cm 和 20~40 cm 土层的含水量、容重和 pH 值在 3 个年龄的样地之间都无显著差异(图 2),表明

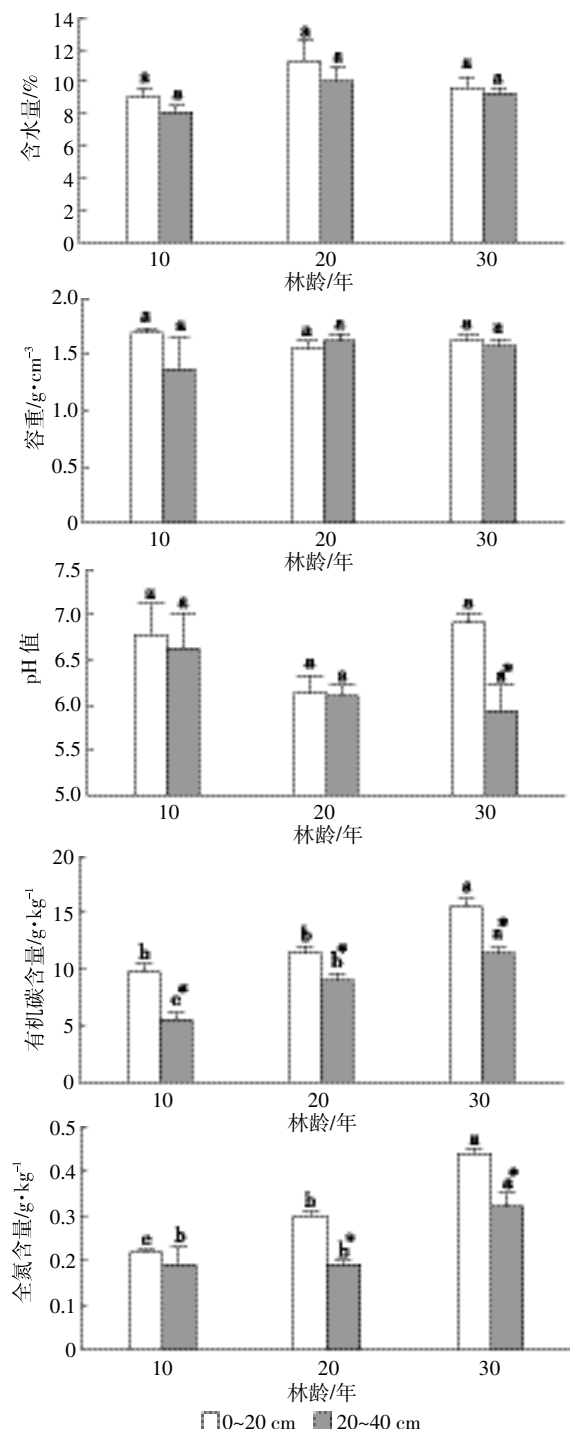


图 2 不同林龄柑橘土壤理化特性

Figure 2 Soil physical and chemical properties at different ages of citrus

柑橘林龄对 0~40 cm 土层含水量、容重和 pH 值并没有显著影响。随着土壤深度的增加,土壤含水量和容重也无显著变化,土壤 pH 值仅在 30 年林龄呈现显著下降趋势。0~20 cm 土层的有机碳含量中 30 年的样地显著大于 20 年和 10 年的样地,而 10 年和 20 年的样地之间无显著差异;20~40 cm 土层的有机碳含量随着柑橘林龄的延长呈现显著增加趋势。随着土壤深度的加深,土壤有机碳含量也逐渐下降。0~20 cm 土层的全氮含量随着柑橘林龄的增大而显著增大,20~40 cm 土层的全氮含量 30 年的样地显著的大于 10 年和 20 年的样地,而 10 年和 20 年的样地之间无显著性差异。随着土壤深度的增加,10 年样地的土壤全氮无显著变化,但 20 年和 30 年样地土壤全氮含量呈显著下降趋势。

2.3 土壤微生物量动态

随着林龄的延长,0~20 cm 土层微生物量碳逐渐提高,20 年的样地达到最大值,30 年样地又降低;20~40 cm 土层土壤微生物碳在 3 个林龄的样地之间无显著差异(图 3)。随着土壤深度的增加,土壤微生物碳在 10 年的样地内无显著变化,但是 20 年和 30 年的样地都呈现下降趋势,这说明柑橘生长前期,虽然土壤有机碳的含量增加,但是能被微生物固持的碳量并没有得到显著提高。随着柑橘林龄的增大,0~20

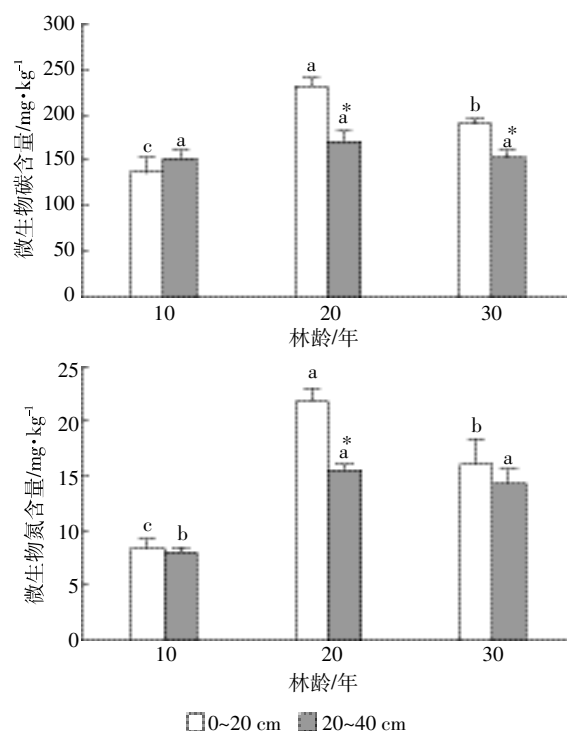


图 3 不同林龄柑橘土壤微生物量

Figure 3 The microbial biomass C, N at different ages of citrus

cm 土层的土壤微生物氮也是逐渐提高,20 年达到最大值,30 年的样地有所降低;20~40 cm 土层土壤微生物氮逐渐提高,20 年的样地达到最大值,其后趋于稳定。随着土壤深度的增加,土壤微生物氮并无明显变化。

2.4 土壤的酶活性与土壤其他特性之间的相关性

相关性分析的结果表明,0~40 cm 土层土壤过氧化氢酶、转化酶和脲酶活性相互之间都具有显著的正相关($P<0.01$)(表 3);转化酶活性与土壤有机碳和微生物碳氮之间具有显著的正相关($P<0.05$);脲酶活性与土壤有机碳($P<0.01$)、全氮($P<0.01$)、微生物碳氮($P<0.01$)和含水量($P<0.05$)之间具有显著的正相关;过氧化氢酶活性与有机碳、全氮、微生物碳氮之间都无显著的相关性。3 种酶的活性与土壤容重以及 pH 值之间都无显著的相关性。

2.5 土壤酶与理化及其微生物量因子的主成分分析

通过不同林龄柑橘 0~40 cm 土层土壤酶活性与

土壤各因子的主成分分析,探讨土壤酶活性与土壤质量的关系,筛选出对土壤质量产生影响的主要因子群。分析结果表明(表 4),第一主成分方差贡献率达 38.86%,第二主成分方差贡献率达 20.11%,第三主成分方差贡献率达 12.48%,第四主成分方差贡献率达 9.75%,前四个主成分之和达到 81.2%。因此,它们能基本能解释土壤质量的信息。通过计算主成分各因子的载荷,第一主成分综合了脲酶、转化酶、有机碳和微生物碳氮的信息(表 5),第二主成分综合了过氧化氢酶、pH 值和全氮的信息,第三主成分解释了容重的信息,第四主成分解释了含水量的信息。第一主成分累积方差贡献率最大,对于土壤的质量起着主要的作用,土壤养分因子有机碳、土壤转化酶和脲酶因子以及微生物生物量碳氮因子均在第一主成分中具有较大的载荷,对第一主成分的影响最大。因此,第一主成分基本反映了土壤综合质量的变化。这说明脲酶和转化酶活性比过氧化氢酶活性能敏感地表征柑橘林土壤质量的变化。

通过因子得分系数矩阵(表 5),获得各因子在不同林龄水平上的得分,最后由各因子方差贡献率和因子得分加权得到各林龄柑橘土壤质量的综合得分。30、20 年和 10 年的柑橘园土壤质量得分分别为-0.56、0.52 和 0.04,大小顺序为 20 年>30 年>10 年,这说明

表 3 土壤酶活性、土壤理化特性、微生物生物量之间的相关性($n=36$)

Table 3 The relationship among soil properties($n=36$)

R	过氧化氢酶	转化酶	脲酶
转化酶	0.79**		
脲酶	0.65**	0.85**	
有机碳	0.10	0.38*	0.54**
全氮	-0.21	0.17	0.45**
微生物碳	0.21	0.39*	0.57**
微生物氮	0.28	0.43**	0.56**
pH 值	0.31	0.26	-0.04
含水量	0.12	0.27	0.42*
容重	0.20	0.14	0.04

注:“**”表示极显著水平 $P<0.01$;“*”表示显著水平 $P<0.05$ 。

表 4 供试土壤信息系统主成分分析

Table 4 The eigenvalues and percent of variance

项目	第一主成分 (PC1)	第二主成分 (PC2)	第三主成分 (PC3)	第四主成分 (PC4)
特征根	3.89	2.01	1.25	0.98
方差贡献率%	38.86	20.11	12.48	9.75
累积方差贡献率%	38.86	58.97	71.45	81.20

表 5 土壤主成分的特征向量

Table 5 Principal compoment eigenvectors of soil information system

项目	第一主成分	载荷 1	第二主成分	载荷 2	第三主成分	载荷 3	第四主成分	载荷 4
过氧化氢酶	0.29	0.57	0.49	0.70	-0.28	-0.31	-0.04	0.08
转化酶	0.41	0.81	0.31	0.44	-0.16	-0.18	0.09	0.05
脲酶	0.47	0.93	0.06	0.08	-0.16	-0.18	0.05	0.04
有机碳	0.36	0.72	-0.2	-0.29	0.47	0.52	-0.46	0.13
微生物碳	0.33	0.66	-0.11	-0.15	-0.1	-0.12	-0.17	-0.53
全氮	0.28	0.55	-0.43	-0.61	0.35	0.39	-0.09	-0.04
微生物氮	0.38	0.75	-0.1	-0.14	0.09	0.10	-0.31	-0.18
pH 值	0.02	0.05	0.49	0.70	0.4	0.45	0.61	-0.30
含水量	0.24	0.47	-0.24	-0.34	-0.31	-0.35	0.49	0.56
容重	0.04	0.09	0.33	0.47	0.5	0.56	0.61	0.49

随着柑橘林龄的增大,土壤质量明显得到了改善,但是在 20 年左右达到最大值,30 年的土壤质量又呈现了一定的降低。

3 讨论

土壤酶在营养的矿化、有机质分解和植物营养循环中都起重要的作用。因而,土壤酶与土壤肥力关系一直是国内外学者关注的热点问题之一^[12]。研究表明,土壤酶活性能够作为土壤肥力和微生物活性的敏感指标^[13]。本研究中,随柑橘林龄延长,转化酶和脲酶活性都逐渐增大,20 年达到最大值,其后呈现降低的趋势。这与国内外大多数果树土壤酶活性的研究结果相似^[14-15],但是与杜静静等^[16]的研究结果不同。出现这种现象的原因可能是:(1)随着柑橘林龄的延长,柑橘生长旺盛,归还土壤凋落物逐渐增多,为土壤微生物群落提供了较多的营养物质,土壤微生物量增大,土壤转化酶和脲酶活性增大,20 年时达到最大值。其后虽然有机质数量也在增加,但是土壤微生物量和酶活性都呈现显著的下降趋势,这说明 20 年后柑橘的生长逐渐变得缓慢,归还土壤的凋落物数量随着增大,有机质数量提高,但是有机质质量已经呈现下降的趋势;(2)可能与果农长期不合理施肥导致土壤某些污染物累积,土壤微生物可利用的有效营养含量减少^[9],从而抑制酶活性有关^[17];(3)随着柑橘林龄的延长,一些参与土壤物质循环的微生物类群的数量下降,一些代谢能力低的类群数量增加^[18],这可能也是土壤酶在柑橘林龄超过 20 年降低的原因之一;(4)果树长期连作并重复施用相同的肥料,果树对营养的需求专一,可能打破了养分之间的平衡,致使土壤酶活性降低^[19]。土壤过氧化氢酶、转化酶和脲酶活性的剖面分异特征规律相似,均表现为随着土壤深度的加深,酶活性下降,这与陈琦等^[20]和万忠梅等^[21]的研究结果相似。这是因为土壤表层(0~20 cm)受人为扰动较大,肥料和柑橘须根主要集中在施用区,凋落物主要分布在土壤表层,酶的底物较多,酶活性提高的缘故。这说明柑橘林与其他的次生林一样,土壤酶活性也具有“表聚效应”^[20]。

本研究中,3 种酶活性之间都具有显著的正相关性,这与王灿等^[22]和叶协锋等^[23]的研究结果相似,这说明 3 种酶在促进土壤有机质的转化和循环中具有共性关系,同时也表明土壤含氮有机化合物、有机碳的转化之间是相互影响的^[22-23]。土壤转化酶和脲酶活性与土壤有机碳及其微生物量碳氮之间都具有显著的

正相关性,但是与土壤容重和 pH 之间并无显著的相关性。这说明土壤转化酶和脲酶活性不仅影响土壤有机质数量的变化,而且极显著影响土壤有机质质量的变化,但是它们受土壤 pH 和容重的影响并不显著。这与 Li 等^[24]和褚洪龙等^[25]的研究结果是相似的。

4 结论

随着柑橘林龄的延长,土壤转化酶和脲酶活性逐渐提高,20 年达到最大值,其后又呈现降低的趋势。随着土壤深度的增加,土壤酶活性都呈现降低的趋势。相关性分析和主成分分析的结果表明,土壤转化酶和脲酶比过氧化氢酶活性更能敏感指示土壤质量的变化。这些结果显示三峡库区柑橘短期的生长(20 年以内)有利于土壤有机质质量和酶活性的提高,但长期种植(大于 20 年),虽然土壤有机质数量逐渐提高,但是土壤微生物生物量和酶活性都呈现下降的趋势,土壤活性有机碳含量下降,土壤酶转化有机物质的能力下降,进而影响土壤质量的可持续性发展。为了柑橘土壤可持续性发展,在柑橘生长到一定年限须进行人为干预,采取合理的措施促进柑橘土壤的可持续性发展。

参考文献:

- [1] Yan T M, Yang L Z, Campbell C D. Microbial biomass and metabolic quotient of soils under different land use in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Geoderma*, 2003, 115(1-2): 129-138.
- [2] Fujikake I. Selection of tree species for plantations in Japan[J]. *Forest Policy and Economics*, 2007, 9(7): 811-821.
- [3] Meng Q H, Fu B J, Yang L Z. Effects of land use on soil erosion and nutrient loss in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Soil Use and Management*, 2001, 17(4): 288-291.
- [4] 王珠娜, 王晓光, 史玉虎, 等. 三峡库区秭归县退耕还林工程水土保持效益研究[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1): 68-72.
WANG Zhu-na, WANG Xiao-guang, SHI Yu-hu, et al. Effects of soil and water conservation of the conversion of farmland to forest in Zigui County of the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(1): 68-72. (in Chinese)
- [5] Dick R P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health [M]//Parkhurst CE, Doube BM, Gupta VVSR, et al. Biological indicators of soil health, Oxon, United Kindom: CAB International, 1997:121-156.
- [6] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 951-956.
WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4): 951-956. (in Chinese)
- [7] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality[M]//Doran J

- W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment, American Society of Agronomy, Madison, WI, 1994: 107-124.
- [8] 刘 艳, 马风云, 宋玉民, 等. 黄河三角洲冲积平原湿地土壤酶活性与养分相关性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 59-61.
LIU Yan, MA Feng-yun, SONG Yu-min, et al. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient of different wetlands in Yellow River Delta[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1): 59-61. (in Chinese)
- [9] Jia Guo-Mei, Xi Ying, Zhang Bao-Lin, et al. Soil labile organic carbon and microbial activity changes with age in citrus (*Citrus sinensis* Osb.) plantations in China[J]. *Australian Forestry*, 2014, 77(3-4): 153-158.
- [10] Jia Guo-Mei, Zhang Bao-Lin, Niu Jun-Tao, et al. Soil labile organic carbon fractions in rhizosphere soil in citrus plantations in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Agroforest Syst*, 2015, 89(6): 1097-1105.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzymes and research[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986. (in Chinese)
- [12] 谭向平, 和文祥, 杨 静, 等. 渭北旱塬苹果园土壤酶特征研究[J]. 园艺学报, 2011, 38(4): 621-630.
TAN Xiang-ping, HE Wen-xiang, YANG Jing, et al. Characteristics of enzyme activities in apple orchard soil in Weibei Arid Region[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(4): 621-630. (in Chinese)
- [13] 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]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18: 229-238.
- [14] 郭恢财, 廖鹏飞, 陈伏生. 脐橙果园土壤养分动态与酶活性的季节变化[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 754-759.
GUO Hui-cai, LIAO Peng-fei, CHEN Fu-sheng. Seasonal changes of soil nutrient supply and enzyme activities in navel orange orchards of south Jiangxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 754-759. (in Chinese)
- [15] Qian X, Gu J, Sun W, et al. Changes in the soil nutrient levels, enzyme activities, microbial community function, and structure during apple orchard maturation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014(77): 18-25.
- [16] 杜静静, 张永清, 马大龙, 等. 不同种植年限苹果园土壤理化性质与酶活性研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(34): 90-95.
DU Jing-jing, ZHANG Yong-qing, MA Da-long, et al. study on the soil physical-chemical properties and enzyme activities in apple orchards with different planting years[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(34): 90-95. (in Chinese)
- [17] Martens da, Johanson J B, Frankenberger W T J R. Production and persistence of soil enzymes with repeated additions of organic residues[J]. *Soil Science*, 1992, 153: 53-61.
- [18] 付学琴, 黄文新. 不同树龄南丰蜜橘根际土壤微生物群落多样性分析[J]. 园艺学报, 2014, 41(4): 631-640.
FU Xue-qin, HUANG Wen-xin. Analysis on microbial diversity in the rhizosphere of Nanfeng tangerine of different tree-age[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(4): 631-640. (in Chinese)
- [19] 王 静, 呼丽萍, 李 昶, 等. 种植年限对樱桃园土壤养分和酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 155-158.
WANG Jing, HU Li-ping, LI Chang, et al. Effects of planting period on soil nutrient and soil enzyme activities in cherry orchards[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4): 155-158. (in Chinese)
- [20] 陈 琦, 尹粉粉, 曹 靖, 等. 秦岭西部不同发育阶段油松和日本落叶松人工林土壤酶活性变化和分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 466-471.
CHEN Qi, YIN Fen-fen, CAO Jing, et al. Variation and spatial characteristics of soil enzyme activities in *Pinus tabulaeformis* and *Larix kaempferi* plantation at different development stages in western Qinling mountains[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(5): 466-471. (in Chinese)
- [21] 万忠梅, 宋长春. 小叶章湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指标的关系[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 249-257.
WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun. Vertical dynamics of soil enzyme activities and its relationship with active organic carbon indicators in *Calamagrostis angustifolia* wetland[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 249-257. (in Chinese)
- [22] 王 灿, 王德建, 孙瑞娟, 等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 688-692.
WANG Can, WANG De-jian, SUN Rui-juan, et al. The relationship between soil enzyme activities and soil nutrients by long-term fertilizer experiments[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 688-692. (in Chinese)
- [23] 叶协锋, 杨 超, 李 正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 445-454.
YE Xie-feng, YANG Chao, LI Zheng, et al. Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 445-454. (in Chinese)
- [24] Li J, Zhou X, Yan J, et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 87: 56-62.
- [25] 褚洪龙, 李 莎, 唐 明. 黄土高原油松根际土壤酶活性及真菌群落多样性研究——以黄龙山林场为例[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 154-161.
CHU Hong-long, LI Sha, TANG Ming, et al. Soil enzyme activity and fungal community diversity in rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* Carr. growing on Loess Plateau: A case study of Huanglongshan forest farm[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 154-161. (in Chinese)