植物营养与肥料学报 2013,19(6):1516-1524
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0629

衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤酶活性特征研究

杨 宁[1,3], 邹冬生[3*], 杨满元[1,2], 陈 璟[1], 陈志阳[1,2], 林仲桂[1], 宋光桃[1]
(1 湖南环境生物职业技术学院园林学院,湖南衡阳 421005; 2 湖南环境生物职业技术学院实验实训中心,湖南衡阳 421005; 3 湖南农业大学生物科学技术学院,长沙 410128)

摘要: 本文以典型的衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段为研究对象,采用空间代替时间序列方法,选用立地条件基本相似的草坡阶段(Grassplot, GT)、灌草阶段(Frutex and grassplot,FG)、灌丛阶段(Frutex, FX)和乔灌阶段(Arbor and frutex, AF),通过调查取样和实验分析,对不同植被恢复阶段的土壤酶、养分与微生物及其相关性进行了研究。结果表明,1)随着恢复阶段的演替,脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶与过氧化氢酶的活性显著增加,在每个恢复阶段,脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶与过氧化氢酶活性随着土层的加深而逐渐减弱,脲酶与多酚氧化酶、蔗糖酶与过氧化氢酶活性呈显著正相关关系,蔗糖酶与脲酶和多酚氧化酶呈极显著正相关。2)随着恢复阶段的演替,土壤养分的时空变化与土壤酶活性的变化趋势基本一致,土壤有机碳、全氮与碱解氮含量呈上升趋势,土壤 pH 随植被恢复和演替而降低,随土壤深度的增加而上升,与土壤酶活性的变化趋势相反;脲酶与有机碳、全氮、碱解氮呈极显著正相关,与 pH 呈显著负相关,多酚氧化酶与有机碳、碱解氮呈极显著正相关,与全氮、速效磷、速效钾呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关,蔗糖酶活性与有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾呈显著正相关。3)不同恢复阶段土壤细菌数量最多,真菌数量和放线菌数量与细菌数量的变化趋势各不相同;细菌平均数量为 AF > FX > FG > GT,真菌数量为 FG > GT > FX > AF,放线菌数量为 GT > FX > FG > AF。4)主成分分析揭示脲酶与多酚氧化酶可作为衡阳紫色土丘陵坡地土壤质量评价的指标。研究结果将丰富该地区植物生态学与恢复生态学的内容,为衡阳紫色土丘陵坡地生态系统的恢复与重建提供了重要依据。

关键词: 土壤酶活性; 土壤养分; 土壤微生物; 植被恢复; 紫色土; 衡阳
中图分类号: S154.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)06-1516-09

Soil enzyme activities in different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, China

YANG Ning[1,3], ZOU Dong-sheng[3*], YANG Man-yuan[1,2], CHEN Jing[1], CHEN Zhi-yang[1,2], LIN Zhong-gui[1], SONG Guang-tao[1]
(*1 Hunan Environmental-Biological Polytechnic College, College of Landscape Architecture, Hengyang, Hunan 421005, China; 2 Hunan Environmental-Biological Polytechnic College, Centre of Experiment Practice and Training, Hengyang, Hunan 421005, China; 3 Hunan Agricultural University, College of Bioscience and Biotechnology, Changsha 410128, China*)

Abstract: By using the spatial series to replace time series, four typical sampling plots, grassplot(GT), frutex and grassplot(FG), frutex(FX), and arbor and frutex(AF), were selected to explore the relationships among the soil enzyme activities, nutrients and microbes. The four communities on sloping-land with purple soils were similar and typical, and denoted four different successive stages in Hengyang of Hunan Province, South-central China. The results showed that the activities of soil URE(Urease), PPO(Polyphenol oxidase), INV(Invertase) and CAT(Catalase) are significantly increased from GT to AF, and these activities are decreased with the increase of soil

收稿日期: 2012-12-16 **接受日期:** 2013-08-05
基金项目: 湖南省重点项目(62020608001);湖南省科技厅项目(S2006N332);湖南省教育厅科学研究项目(12C1057);湖南省普通高校优秀青年骨干教师培养对象资助项目;湖南环境生物职业技术学院南岳学者基金项目(湘环职院[2012]4 号)资助。
作者简介: 杨宁(1974—),男,苗族,湖南绥宁人,博士,副教授,主要从事植物生态学及恢复生态学的教学与研究。
E-mail: yangning668787@sina.com。 * 通信作者 E-mail: zoudongsheng2@sina.com

layer depth in every re-vegetation stages. The URE activity is significantly and positively correlated with the PPO, INV and CAT activities, and the INV activity is very, significantly and positively correlated with the URE and PPO activities. The soil nutrients contents such as SOC (Soil organic C), TN (Total N) and AN (Available N) are increased with the succession of re-vegetation, while soil pH values are decreased. The URE activity is very, significantly and positively correlated with the SOC, TN and AN contents and is significantly and negatively correlated with soil pH. The PPO activity is very, significantly and positively correlated with the SOC and AN contents, is significantly and positively correlated with the TN, AP (Available P) and AK (Available K) contents, and is significantly and negatively correlated with soil pH value. The INV activity is significantly and positively correlated with the SOC, TN, AN, AP and AK contents. The numbers of bacteria are the highest in the four re-vegetation stages, with re-vegetation succession process, the average number of bacteria is in the following order: AF > FX > FG > GT ($P < 0.05$), the order for average fungi count is: FG > GT > FX > AF ($P < 0.05$), and for the actinomycetes is: GT > FX > FG > AF ($P < 0.05$). Principal component analysis shows that the URE and PPO can be regarded as indexes to assess soil quality in sloping-land with purple soils in Hengyang. This study, to some degree, enriches and broadens the vegetation ecology and restoration ecology of this area and provides important theoretical basis for ecosystem restoration and reconstruction in sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China.

Key words: soil enzyme activity; soil nutrient; soil microbe; re-vegetation; purple soil; Hengyang

土壤酶活性是土壤质量、生态环境效应评价中极为重要的指标之一,它在评价土壤肥力、环境监测、和土地利用评价等方面有重要意义,可为土壤健康管理提供科学依据[1]。土壤酶活性大小可反映土壤各种生物化学过程的强度与方向[2-4],其较理化性质的变化更加敏感,几乎所有的土壤生态系统的变化都伴随着不同程度的土壤酶活性的变化[5-7],因此,研究该区域土壤酶活性特征对退化生态系统的恢复有一定的指导意义。

衡阳紫色土丘陵坡地面积 1.625×10^5 hm^2,是湖南省生态环境最为恶劣的地区之一,也是中国南方极具代表性的生态灾难区。由于紫色土极易水蚀,发育期短,地力差,常处于幼年阶段,加上颜色深、吸热性强,夏季地面温度极高,蒸发量大,又因区域性水、热分布等不利环境影响和不合理的开发,致使该区域长期以来不仅植被稀疏,而且水土流失和季节性旱灾严重,因此,植被恢复就成为治理该区域水土流失的关键措施。长期以来,尽管该区域实施的退耕还林还草措施取得了良好的水土保持效益,但以往的研究与评价多集中于减少径流与养分的流失方面[8-9],有关植被恢复阶段对土壤生态系统,特别是土壤酶活性影响的研究相对薄弱。本研究采用"空间序列代替时间序列"的方法[10-12],对衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段的土壤进行对比分析,探讨土壤酶活性与土壤理化性状、土壤微生物的关系,旨在了解衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复过程中土壤性质的变化,为该区域的生态管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

该区域位于湖南省中南部,湘江中游,地理坐标为 110°32′16″～113°16′32″E, 26°07′05″～27°28′24″N。属亚热带季风湿润气候,年平均气温 18℃;极端最高气温 40.5℃,极端最低气温 -7.9℃,年平均降水量 1325 mm,年平均蒸发量 1426.5 mm。平均相对湿度 80%,全年无霜期 286 d。地貌类型以丘岗为主,紫色土呈网状集中分布于该区域中部海拔 60～200 m 的地带,东起衡东县霞流镇、大浦镇,西至祁东县过水坪镇,北至衡阳县演陂镇、渣江镇,南达常宁市官岭镇、塔山瑶族乡和耒阳市遥田镇、大市乡一带,以衡南、衡阳两县面积最大。

1.2　样地设置与取样

2009 年 8～11 月,选择坡度、坡向、坡位和裸岩率等生态因子基本一致的坡中下部沿等高线的有代表性的样地(表 1):1)草坡阶段(Grassplot, GT),2)灌草阶段(Frutex and grassplot, FG),3)灌丛阶段(Frutex, FX),4)乔灌阶段(Arbor and frutex, AF),代表不同恢复阶段,每个样地的面积 > 1 hm^2,演替初期均为撂荒地。在每个 > 1 hm^2 的样地内各设置 3 块 400 m^2(20 m × 20 m)的样方,样方间距 > 20 m,在每个样方内按 S 型或梅花型布点, 分别取 0—20

表1 样地概况

Table 1 Overview of the sampling sites

恢复阶段 Re-vegetation stage	演替年限 Succession year (a)	坡度/坡向 Slope/Aspect (°/)	海拔 Altitude (m)	盖度 Coverage (%)	优势植物 Dominant plant
草坡阶段 GT	2	25/SW	125	40	狗尾草;狗芽根
灌草阶段 FG	5～8	20/SW	115	50	紫薇;糯米条;狗尾草
灌丛阶段 FX	20～25	30/SW	120	65	牡荆;刺槐;糯米条;六月雪
乔灌阶段 AF	<50	25/SW	130	80	枫香;苦楝;牡荆

注(Note): GT—Grassplot; FG —Frutex and grassplot; FX— Frutex; AF—Arbor and frutex. 狗尾草 *Setaria viridis*; 狗芽根 *Cynodon dactylon*; 紫薇 *Lagerstroemia indica*; 糯米条 *Abelia chinensis*; 六月雪 *Serissa japonica*; 牡荆 *Vitex negundo var. cannabifolia*; 刺槐 *Robinia pseudoacacia*; 枫香 *Liquidamdar formosana*; 苦楝 *Melia azedarach*.

cm,20—40 cm 和 40—60 cm 土层土样,将相同生境、相同层次的5个点的土样等比例混合为一个样,去掉土壤中可见的植物根系和残体,重复3次,编号;将土样分为2部分,一部分土壤风干后过2 mm筛,用于测定土壤化学性质与酶活性;另一部分新鲜土样保鲜带回实验室冷藏,测定土壤微生物数量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤化学性质的测定 土壤有机碳用重铬酸钾氧化—外加热法;全氮用半微量开氏法;碱解氮用扩散吸收法;速效磷用 $NaHCO_3$ 提取—钼锑抗显色—紫外分光光度法;速效钾用 NH_4Ac 浸提—原子吸收法测定,pH 值用电极电位法测定[13]。

1.3.2 土壤微生物与酶活性的测定 土壤微生物数量采用稀释平板计数法测定,其中细菌用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌用马丁氏培养基,放线菌用改良高氏1号培养基[14]。脲酶采用苯酚-次氯酸钠比色法;多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法;蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法;过氧化氢酶采用 $KMnO_4$ 滴定法测定[15]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 13.0 软件进行数据统计分析和作图,单因素方差分析(one-way ANOVA)和邓肯氏新复极差检验法(DMRT 法)进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$),采用 Pearson 分析法进行相关分析。所有数据均为3次重复的平均值,表中数据为平均数±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复阶段土壤酶活性

由表2可知,随着植被恢复演替,在0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 各土层中,脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均有增加的趋势,草坡阶段的脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性显著低于其他3个恢复阶段。

在每个恢复阶段,脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性在土壤剖面中均随着土层的加深而逐渐减弱。相关分析表明(表3):脲酶与多酚氧化酶之间呈显著正相关关系($P<0.05$),表明脲酶与多酚氧化酶之间有相互促进作用;蔗糖酶与脲酶、多酚氧化酶之间呈极显著正相关($P<0.01$),说明土壤中的碳循环与氮循环是相互促进的。

2.2 土壤酶活性与土壤养分及 pH 值的关系

土壤有机碳、氮、磷、钾是土壤肥力的重要指标,其高低影响着恢复过程,而土壤酶则参与土壤复杂的生化反应和物质循环,影响土壤肥力。不同恢复阶段的土壤化学性质见表4。

由于紫色土含有丰富的正长石等矿物,风化后保留了相当数量的磷与钾,因此,紫色土的磷与钾含量相对较高,除速效磷与速效钾外,其它营养元素的含量均较低。结合表4可以看出,在恢复各阶段中,土壤中的有机碳、全氮与碱解氮含量的变化与酶活性的变化趋势基本一致,即随着恢复阶段的演替呈上升趋势,从垂直变化看,随土层深度的增加而下降。土壤 pH 值随着恢复的进行逐渐减小,随土壤深度的增加而上升,与土壤酶的变化趋势相反。

相关分析表明(表5),脲酶与土壤有机碳、全氮、碱解氮呈极显著正相关($P<0.01$),与 pH 呈显著负相关($P<0.05$);多酚氧化酶与土壤有机碳、碱解氮呈极显著正相关,与全氮、速效磷、速效钾呈显著正相关, 与 pH 值呈显著负相关;蔗糖酶与土

表 2　不同植被恢复阶段的土壤酶活性

Table 2　Soil enzymes activities in different re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	土层 Soil layer (cm)	脲酶 Urease [μg/(g·d)]	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase [mg/(g·3h)]	蔗糖酶 Invertase [mg/(g·d)]	过氧化氢酶 Catalase [μmol/(g·h)]
草坡阶段 GT	0—20	0.29 ±0.03 Aa	0.18 ±0.04 Ca	0.87 ±0.11 Aa	2.76 ±0.23 Bb
	20—40	0.24 ±0.02 Ba	0.17 ±0.01 Aa	0.55 ±0.10 Cb	2.00 ±0.07 Cb
	40—60	0.10 ±0.01 Ab	0.16 ±0.00 Ba	0.51 ±0.04 Ab	1.32 ±0.03 Ca
灌草阶段 FG	0—20	1.45 ±0.13 Ba	0.41 ±0.03 Aa	1.45 ±0.13 Ba	50.12 ±4.76 Aa
	20—40	0.46 ±0.06 Ab	0.27 ±0.03 Bb	1.35 ±0.12 Aa	30.78 ±3.87 Bab
	40—60	0.22 ±0.01 ABc	0.26 ±0.02 ABb	0.67 ±0.06 Ab	26.89 ±3.00 Ab
灌丛阶段 FX	0—20	1.12 ±0.11 Ba	0.57 ±0.08 Aa	7.54 ±0.87 Ca	76.56 ±6.23 Bc
	20—40	0.80 ±0.09 Cab	0.45 ±0.05 BCab	5.67 ±0.56 Bab	75.34 ±5.98 Ac
	40—60	0.36 ±0.05 ABb	0.34 ±0.01 Ab	2.49 ±0.42 Cb	73.89 ±5.09 Bc
乔灌阶段 AF	0—20	1.67 ±0.15 Ba	1.12 ±0.12 Ba	5.11 ±0.63 Ca	74.12 ±6.76 Aa
	20—40	0.46 ±0.09 Ab	0.68 ±0.05 Cab	4.00 ±0.55 Bab	72.18 ±5.87 Aa
	40—60	0.44 ±0.05 Bb	0.22 ±0.01 ABb	1.06 ±0.12 Bb	70.87 ±5.00 Aa

注(Note): GT—Grassplot; FG —Frutex and grassplot; FX— Frutex; AF—Arbor and frutex. 同列数后不同大写字母表示同一土层不同植被恢复阶段间差异达 0.05 显著水平, 不同小写字母表示同一植被恢复阶段不同土层间差异达 0.05 显著水平 The values followed by different capital letters in a column mean significant differences among different restoration stages at the 0.05 level, and different small letters mean significant differences among different soil layers at the 0.05 level.

表 3　不同植被恢复阶段土壤酶活性的相关性

Table 3　Correlation between soil enzymes activities in different re-vegetation stages

项目 Item	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	蔗糖酶 Invertase	过氧化氢酶 Catalase
脲酶 Urease	0.572*	0.724**	0.498
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase		0.745**	0.502
蔗糖酶 Invertase			0.587*

注(Note): *—$P<0.05$; **—$P<0.01$.

壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾呈显著正相关,与 pH 值相关性不显著;过氧化氢酶与土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 相关性不显著。

上述结果表明,土壤酶活性与养分的相关性较高,特别是脲酶与多酚氧化酶。土壤养分可促进酶活性,而酶活性的提高反过来可加快有机质的分解,从而提高土壤养分含量。随着植被恢复阶段的演替,土壤有机碳增多,使 pH 下降,而使酶活性升高。

2.3　土壤酶活性与土壤微生物的关系

土壤微生物在土壤系列反应中起着重要作用,能分解动植物残体,释放无机养分,与土壤酶活性有较好相关性[16-17]。不同恢复阶段土壤微生物区系的测定结果(表 6)表明,在不同植被恢复阶段,土壤中微生物数量以细菌 > 放线菌 > 真菌,且以细菌数量占 95% 以上,占绝对优势。在 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 各土层中,细菌数量的大小顺序为:乔灌阶段(AF) > 灌丛阶段(FX) > 灌草阶段(FG) > 草坡阶段(GT),其差异达显著水平;真菌数量以 FG 最高,AF 最低,有显著差异;放线菌数量均为 GT > FX > FG > AF,各恢复阶段差异显著,20—40 cm 土层中,放线菌数量以 GT 最高、AF 最低,两个恢复

阶段差异显著。从不同土层的微生物分布可以看出,随土层的加深,细菌、真菌与放线菌的数量均显著减少,其主要原因是由于表层聚集较多的枯枝落叶,营养源充足,水热与通气状况较好,有利于微生物的生长与繁殖。

表4 不同植被恢复阶段的土壤化学性质

Table 4 Soil chemical properties in different re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	土层 Soil layer (cm)	有机碳 Soil organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	pH
草坡阶段 GT	0—20	8.06 ±3.11 Aa	0.77 ±0.17 Aa	41.64 ±15.98 Aa	10.56 ±1.87 Aa	114.98 ±30.12 Aa	7.90 ±0.67 Aa
	20—40	3.98 ±1.54 Ab	0.32 ±0.11 Ab	23.54 ±11.67 Aab	8.09 ±0.99 Ba	53.09 ±13.54 Ab	8.04 ±0.54 Ba
	40—60	2.54 ±1.00 Bb	0.22 ±0.10 Ab	13.98 ±9.65 Ab	7.77 ±0.68 Ca	45.12 ±10.98 ABb	8.06 ±0.37 Ca
灌草阶段 FG	0—20	10.09 ±3.94 Aa	0.66 ±0.32 Aa	52.00 ±13.12 Aa	10.89 ±1.67 Ab	107.67 ±34.21 Aa	7.56 ±0.99 Ab
	20—40	5.21 ±2.43 Aab	0.45 ±0.20 ABab	19.12 ±6.67 Ab	8.67 ±1.00 Bb	60.45 ±18.65 Aab	7.90 ±0.43 Bb
	40—60	3.21 ±1.56 ABb	0.33 ±0.17 ABb	14.54 ±5.89 Ab	8.09 ±1.23 Cb	42.13 ±18.32 ABb	8.00 ±0.45 Cb
灌丛阶段 FX	0—20	13.67 ±4.00 ABa	0.78 ±0.32 Aa	47.34 ±19.90 Aa	10.99 ±2.00 Ac	118.09 ±28.35 Aa	7.43 ±0.83 Ac
	20—40	7.09 ±2.34 ABb	0.64 ±0.23 Ba	35.87 ±16.87 ABa	9.07 ±1.98 Bc	83.12 ±14.56 Bab	7.65 ±0.68 Bc
	40—60	4.59 ±1.58 ABc	0.32 ±0.13 ABb	11.56 ±4.45 Ab	8.76 ±1.54 Cc	28.34 ±9.09 Ab	7.99 ±0.87 Cc
乔灌阶段 AF	0—20	15.43 ±4.78 Ba	0.99 ±0.34 Aa	65.23 ±20.56 Aa	11.00 ±2.12 Ad	143.51 ±31.98 Aa	7.21 ±0.98 Ad
	20—40	9.76 ±2.98 Bb	0.54 ±0.22 Bab	41.76 ±14.76 Bab	9.95 ±1.00 Bd	86.09 ±21.09 Bb	7.56 ±0.65 Bd
	40—60	6.67 ±1.97 Ab	0.39 ±0.12 Bb	29.56 ±13.00 Bb	9.70 ±1.26 Cd	60.45 ±18.64 Bb	7.90 ±0.69 Cd

注(Note): GT—Grassplot; FG —Frutex and grassplot; FX— Frutex; AF—Arbor and frutex. 同列数后不同大写字母表示同一土层不同植被恢复阶段间差异达0.05 显著水平, 不同小写字母表示同一植被恢复阶段不同土层间差异达0.05 显著水平 The values followed by different capital letters in a column mean significant differences among different restoration stages at the 0.05 level, and different small letters mean significant differences among different soil layers at the 0.05 level.

表5 不同植被恢复阶段土壤酶活性与土壤养分含量、pH 值的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between soil enzymes activities and soil nutrients, pH values in re-vegetation stages

项目 Item	有机碳 Soil organic C	全氮 Total N	碱解氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	pH
脲酶 Urease	0.861**	0.854**	0.743**	0.580*	0.500*	-0.584*
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	0.809**	0.635*	0.773**	0.548*	0.475*	-0.571*
蔗糖酶 Invertase	0.578*	0.578*	0.523*	0.565*	0.573*	-0.330
过氧化氢酶 Catalase	0.453	0.447	0.336	0.376	0.299	-0.308

注(Note): *—$P<0.05$; **—$P<0.01$.

从酶活性与土壤微生物数量之间的相关分析可知(表7),脲酶活性与细菌数量呈极显著正相关($P<0.01$),与真菌和放线菌数量呈显著正相关($P<0.05$);多酚氧化酶活性与细菌数量呈极显著正相关;蔗糖酶活性与细菌数量呈显著正相关;过氧化氢酶活性与放线菌数量呈显著正相关。值得注意的是,土壤微生物数量的多少不一定与土壤酶活性强弱一致[18],可能是因为在不同恢复阶段中植物种类有差异,导致其分泌物的种类、数量与性质不同,由于影响土壤生物活性的因子极为复杂,其原因有待

表 6　不同植被恢复阶段的土壤微生物数量

Table 6　The amounts of soil microbes in different re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	土层 Soil layer (cm)	细菌 Bacteria ($\times 10^6$ cfu/g)	真菌 Fungi ($\times 10^4$ cfu/g)	放线菌 Actiomycete ($\times 10^5$ cfu/g)
草坡阶段 GT	0—20	22.65 ±2.09 Aa	7.89 ±1.21 Aa	15.98 ±1.57 Ba
	20—40	11.28 ±1.15 Aab	4.76 ±0.54 ABab	9.65 ±1.00 Aab
	40—60	6.40 ±1.00 Ab	3.89 ±0.87 ABb	5.34 ±0.57 Ab
灌草阶段 FG	0—20	37.65 ±4.23 ABa	9.48 ±1.43 Aa	8.56 ±0.84 Aa
	20—40	16.87 ±1.78 ABb	6.76 ±0.98 Bab	5.93 ±0.65 Bab
	40—60	10.12 ±1.87 ABb	5.46 ±0.56 Bb	2.65 ±0.32 Bb
灌丛阶段 FX	0—20	44.98 ±5.65 Ba	7.98 ±0.98 Aa	12.54 ±1.67 ABa
	20—40	19.34 ±2.12 Bb	2.13 ±0.54 Ab	5.47 ±0.58 Bb
	40—60	14.98 ±1.38 Bb	1.28 ±0.32 Ac	4.75 ±0.46 Ab
乔灌阶段 AF	0—20	124.56 ±15.98 Ca	0.49 ±0.07 Ba	0.28 ±0.03 Ca
	20—40	115.76 ±15.87 Ca	0.28 ±0.02 Cb	0.27 ±0.02 Ca
	40—60	36.90 ±4.98 Cb	0.27 ±0.02 Cb	0.11 ±0.01 Cb

注(Note): GT—Grassplot; FG —Frutex and grassplot; FX— Frutex; AF—Arbor and frutex. 同列数后不同大写字母表示同一土层不同植被恢复阶段间差异达 0.05 显著水平, 不同小写字母表示同一植被恢复阶段不同土层间差异达 0.05 显著水平 The values followed by different capital letters in a column mean significant differences among different restoration stages at the 0.05 level, and different small letters mean significant differences among different soil layers at the 0.05 level.

表 7　不同植被恢复阶段土壤酶活性与土壤微生物之间的相关系数

Table 7　Correlation coefficients between soil enzymes activities and the amounts of soil microbes in different re-vegetation stages

项目 Item	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actiomycete
脲酶 Urease	0.822**	0.587*	0.532*
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	0.726**	0.441	0.452
蔗糖酶 Invertase	0.544*	0.432	0.444
过氧化氢酶 Catalase	0.265	0.389	0.543*

注(Note): *—$P<0.05$; **—$P<0.01$.

进一步研究。

2.4　土壤质量的评价指标分析

为了进一步论证土壤酶活性是反映土壤质量的一个重要指标,将土壤信息系统的土壤酶、微生物、土壤养分和 pH 值进行主成分分析(表 8)[19-21],设 X1 ~ X4 分别表示脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶与过氧化氢酶的活性;X5 ~ X10 分别表示土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾与 pH 值;X11 ~ X13 分别表示细菌、真菌与放线菌数量。由于各种酶、微生物和养分之间的相关性原因,需要 5 个主成分才能解释超过 85% 的信息。第一主成分解释了氨的合成与分解,如土壤有机碳、全氮、碱解氮,合成与分解有机碳的脲酶,方差贡献率为 39.754%;第二主成分解释了有机碳转化的多酚氧化酶的信息,方差贡献率为 18.003%;第三主成分解释了与土壤养分转化有关的土壤微生物的信息,方差贡献率为 13.063%;第四主成分解释了蔗糖酶的信息,方差贡献率为 8.623%;第五主成分解释了过氧化氢酶的信息,方差贡献率为 7.412%。从评价土壤质量的角度看, 土壤酶扮演着重要的角色,

表8 不同植被恢复阶段的土壤信息系统主成分分析

Table 8 The principal component analysis of soil information system in different re-vegetation stages

项目 Item	特征根 Eigen values	方差贡献率(%) Rate of variance	累积贡献率(%) Cumulative rate
第一主成分 1st Component	6.453	39.754	39.754
第二主成分 2nd Component	2.875	18.003	57.657
第三主成分 3rd Component	2.237	13.063	70.879
第四主成分 4th Component	1.798	8.623	79.562
第五主成分 5th Component	1.564	7.412	87.769

其中脲酶和多酚氧化酶是可选的指标。

3 讨论

1）土壤酶对土壤理化特征以及其它环境因子的变化相当敏感，更能直接表达土壤的生物活性，可作为反映土壤营养元素有效性水平的一项生物指标[22-23]。本研究发现，在衡阳紫色土丘陵坡地随着植被恢复阶段的演替，土壤养分与酶活性呈上升趋势，土壤酶活性与养分有显著相关性，与前人的研究结果基本一致[24-25]。植被恢复对土壤酶活性的改善可能与以下几个因素有关：(1)植被恢复后，土壤有机碳在土层积累，显著改善土壤的生物学与理化性状，使得酶类物质在土层富集；(2)植被恢复后在土层形成大量的植物根系，根系代谢释放大量的酶类，从而提高土层酶活性；(3)植被恢复后，土壤含水量升高，土壤容重减小，土壤入渗性能增强，有利于土壤物质随水分运动而迁移，从而促进酶类物质的运动与活性，因此，土壤酶活性也是表征土壤肥力的一个潜在性指标，可作为土壤质量评价的一个重要组成部分。

2）土壤微生物生理类群与数量受土壤物理性状、有机质、温度、水分、植物残体及植物生长等因素的综合影响[26-27]。植被恢复阶段不同，其生物物种就不同，形成了不同的土壤小气候环境，导致不同恢复阶段土壤微生物的组成与数量的不同。植被恢复有利于土壤微生物活性的增强、物质的分解、吸收和转化，使土壤肥力得到提高。本研究发现，在衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段中，细菌是土壤中主要微生物类群，数量大，最大细菌数目高达 1.2456×10^8 cfu/g，DW(表6)，这与细菌的繁殖特点以及调查取样的时间(6月份)有关，该时期该区域气温较高，雨水较多，有利于细菌的繁殖。有学者研究发现细菌的数量在某些土壤中很高，如祁连山山杨(*Populus davidiana*)灌木林土壤细菌数量可达 4.27×10^9 cfu/g[28]。

3）土壤酶活性与土壤养分、微生物数量的关系较为复杂。胡海波等[24]在研究亚热带基岩海岸防护林土壤酶活性、邱莉萍等[25]在研究黄土高原沟壑区土壤酶活性时认为，在一般的自然土壤中有机碳与各类酶均有较好的相关性，过氧化氢酶活性与速效磷呈正相关，与碱解氮呈负相关，与有机碳、全氮、全磷与速效钾相关性不大，过氧化氢酶活性与有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷与速效钾呈负相关。徐秋芳等[29]认为蔗糖酶与过氧化氢酶活性可作为竹林退化的指标。但也有相反的意见，如张猛、孙秀山等认为，因为土壤酶活性不能提供土壤生物状况的完整描述，且其测定时不能提供鉴定土壤总生物活性的恒值，不支持把土壤酶活性作为评价土壤肥力的参数[30-31]。在分析各种酶之间的相关性，同一种酶与同一种土壤养分的相关性时，不同的学者得出不同的结论[32-34]。土壤酶活性与土壤微生物数量的关系也未达成共识，有些研究者认为土壤微生物数量与土壤酶活性没有相关性，而另一些研究者认为某些酶的活性与一些微生物之间具有相关性[35]。造成这些差异的原因可能与研究对象、研究对象所处的环境、以及研究对象与土壤各种成分的相互作用等不同有关[36-37]。这些研究结论的不一致体现了土壤酶活性、土壤养分含量与微生物之间关系的复杂性，因此还需要开展进一步的研究。

参考文献：

[1] 杨宁，邹冬生，杨满元，等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系[J]. 应用生态学报，2013，24(1)：90-96.

Yang N, Zou D S, Yang M Y *et al*. Relationships between

vegetation characteristics and soil properties in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 90-96.

[2] 郝慧荣, 李振芳, 熊君, 等. 连作怀牛膝根际土壤微生物区系及酶活性的变化研究[J]. 中国农业生态学报, 2008, 16(2): 301-311.
Hao H R, Li Z F, Xiong J *et al*. Variation of microbial flora and enzyme activity in rhizospheric soil under continuous cropping of Achyranthes bidentata[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2008, 16(2): 301-311.

[3] 杨宁, 彭晚霞, 邹冬生, 等. 贵州喀斯特土石山区水土保持生态经济型植被恢复模式[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(S1): 474-477.
Yang N, Peng W X, Zou D S *et al*. Eco-economic vegetation restoration model of soil and water conservation in the Karst Mountainous Earth-rock areas in Guizhou[J]. China Popu. Res. Environ., 2011, 21(S1): 474-477.

[4] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植被恢复模式建设[J]. 草业科学, 2010, 27(10): 10-16.
Yang N, Zou D S, Li J G. The vegetation restoration mode construction in sloping-land with purple soils in Hengyang basin [J]. Pratac. Sci., 2010, 27(10): 10-16.

[5] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 等. 大气 CO_2 浓度升高对不同施氮土壤土壤酶活性影响[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 48-53.
Yuan X X, Lin X G, Chu H Y *et al*. Effects of elevated atmospheric CO_2 on soil enzyme activities at different nitrogen levels[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(1): 48-53.

[6] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤微生物量碳的变化及其与土壤理化因子的关系[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 25-30.
Yang N, Zou D S, Yang M Y *et al*. The change of soil microbial biomass carbon and the relationship between it and soil physical-chemical factors in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang[J]. Ecol. Environ. Sci., 2013, 22 (1): 25-30.

[7] 杨满元, 杨宁, 郭锐, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物数量特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 229-232.
Yang M Y, Yang N, Guo R *et al*. Numerical properties of soil microbial population in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang[J]. Ecol. Environ. Sci., 2013, 22 (2): 229-232.

[8] 陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复过程中土壤水文效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 590-597.
Chen J, Yang N. Soil hydrological function at different vegetation restoration stages in purple soil slopelands in Hengyang[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2013, 21(5): 590-597.

[9] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地土壤水分变化动态研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(6): 16-21.
Yang N, Zou D S, Li J G.. Study on dynamic of water content on the sloping-land with purple soils in Hengyang Basin[J]. Res. Soil Water Conserv., 2009, 16(6): 16-21.

[10] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 86-92.
Zhang J Y, Zhao H L, Zhang T H *et al*. Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin sandy land[J]. Acta Phytoecol. Sin., 2004, 28(1): 86-92.

[11] 杨宁, 邹冬生, 李建国, 等. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落自然恢复演替进程中种群生态位动态[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 87-93.
Yang N, Zou D S, Li J G *et al*. Niche dynamics of main plant communities in natural restoration succession process on sloping land with purple soils in Hengyang Basin[J]. Bull. Soil Water Conserv., 2010, 30(4): 87-93.

[12] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉的种群结构和空间分布格局[J]. 西北植物学报, 2011, 31(10): 2100-2105.
Yang N, Zou D S, Yang M Y *et al*. Structure and spatial distribution pattern of *Taiwania flousiana* population in Leigong Mountain, Guizhou[J]. Acta Bot. Bor.-Occid. Sin., 2011, 31 (10): 2100-2105.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil analysis on properties of agro-chemistry(3rd Ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[14] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
Wu J H, Lin Q M, Huang Q Y *et al*. Soil microbial biomass-methods and application[M]. Beijing: Weather Press, 2006.

[15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
Guan S Y. Soil enzymes and research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.

[16] 王启兰, 曹广民, 王长庭. 放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (5): 856-864.
Wang Q L, Cao G M, Wang C T. The impact of grazing on the activities of soil enzymes and soil environmental factors in alpine Kobresia pygmaea meadow[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 856-864.

[17] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落生物量特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(5): 466-469.
Yang N, Zou D S, Li J G. On biomass properties of the main plant communities in sloping-land with purple soils in Hengyang basin[J]. J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci. Ed., 2009, 35 (5): 466-469.

[18] Gallo M, Amonette R, Lauber C *et al*. Microbial community structure and oxidative enzyme activity in nitrogen-amended north temperate forest soils[J]. Microb. Ecol., 2004, 48: 218-229.

[19] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地自然恢复灌丛阶段主要种群空间分布格局[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 996-1001.
Yang N, Zou D S, Li J G. Spatial pattern of main populations of

the natural recovery shrub stage community in sloping-land with purple soils in Hengyang[J]. Ecol. Environ. Sci., 2009, 18(3): 996-1001.

[20] 杨宁，邹冬生，李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植物群落数量分类及物种多样性研究[J]. 农业现代化研究，2009，30(5): 615-619.
Yang N, Zou D S, Li J G. Study on numerical classification and species diversity of plant community in a sloping-land with purple soils in Hengyang Basin[J]. Res. Agric. Modern., 2009, 30(5): 615-619.

[21] 祖元刚，马克明. 分形理论与生态学[A]. 李博. 现代生态学讲座[M]. 北京：科学出版社，1995.
Zu Y G, Ma K M. Fractal theory and ecology[A]. Li B. Modern ecology seminar[M]. Beijing: Science Press, 1995.

[22] 侯彦会，周学辉，焦婷，等. 甘肃永昌县放牧草地土壤脲酶活性与土壤肥力的关系初探[J]. 草业学报，2009，18(4): 111-116.
Hou Y H, Zhou X H, Jiao T *et al*. A preliminary study on the relationship between soil urease activity and soil fertility in the grazing grasslands of Yongchang county, Gansu province[J]. Acta Pratacul. Sin., 2009, 18(4): 111-116.

[23] 杨宁，邹冬生，杨满元，等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析[J]. 农业现代化研究，2012，33(6): 757-761.
Yang N, Zou D S, Yang M Y*et al*. Analysis on soil physio-chemical characteristics in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang[J]. Res. Agric. Modern., 2012, 33(6): 757-761.

[24] 胡海波，张金池，陈顺伟，等. 亚热带基岩海岸防护林土壤酶活性[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2001，15(1): 88-95.
Hu H B, Zhang J C, Chen S W *et al*. Study on soil enzyme activity of main forest types in rocky coastal area[J]. J. Nanjing For. Unv. (Nat. Sci. Ed.), 2001, 15(1): 88-95.

[25] 邱莉萍，刘俊，王益权，等. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(2): 277-280.
Qiu L P, Liu J, Wang Y Q *et al*. Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(2): 277-280.

[26] Van Veen J A, Van Overbeek L S, Van Elass J D. Fate and activity of microorganisms introduced into soil[J]. Microb. Mol. Biol. Rev., 1997, 61(2): 121-135.

[27] 刘宛秋，杨家林，杜天真，等. 重建森林对退化红壤微生物特征的影响[J]. 福建林学院学报，2003，23(1): 65-69.
Liu Y Q, Yang J L, Du T Z *et al*. Effect of rehabilitated forest on soil microbial characteristics of severely degraded red soil region[J]. J. Fujian Coll. For., 2003, 23(1): 65-69.

[28] 郭银宝，许小英. 祁连山不同植被类型下三种土壤微生物群落的数量分布[J]. 青海农林科技，2005，12(1): 16-18.
Guo Y B, Xu X Y. Quantity distribution in three kinds of soil microbe community in different vegetable types in Qlian Mountain[J]. Sci. Techn. Qinghai Agric. For., 2005, 12(1): 16-18.

[29] 徐秋芳，姜培坤. 有机肥对毛竹林间及根区土壤生物化学性质的影响[J]. 浙江林学院学报，2000，17(4): 364-368.
Xu Q F, Jiang P K. Effects of organic manure fertilizing on biological and chemical properties of root region soil under Phyllostachys pubescens forest[J]. J. Zhejiang For. Coll., 2000, 17(4): 364-368.

[30] 张猛，张健. 林地土壤微生物与酶活性研究进展[J]. 四川农业大学学报，2003，21(5): 347-351.
Zhang M, Zhang J. Advance in research on microbe and enzyme activity in forest soil[J]. J. Sichuan Agric. Univ., 2003, 21(5): 347-351.

[31] 孙秀山，封海胜，万书波，等. 连作花生主要微生物类群与土壤酶活性变化及其交互作用[J]. 作物学报，2001，27(8): 617-621.
Sun X S, Feng H S, Wan S B *et al*. Changes of main microbial strains and enzymes activities in peanut continuous cropping soil and their interactions[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(8): 617-621.

[32] 杨涛，徐慧，李慧，等. 樟子松人工林土壤养分，微生物及酶活性的研究[J]. 水土保持学报，2005，19(3): 50-53.
Yang T, Xu H, Li H *et al*. Soil nutrients, microorganism and enzyme activity in Pinus sylvestris plantations[J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(3): 50-53.

[33] Seemen H, Laitamn H, Pikk J. The influence of nutritional conditions on forest-soil microflora[J]. Bal. For., 1998, 4: 2-7.

[34] 蒋智林，刘万学，万方浩，等. 紫茎泽兰与非洲狗尾草，混种群落土壤酶活性和土壤养分的比较[J]. 植物生态学报，2008，32(4): 891-899.
Jiang Z L, Liu W X, Wan F H *et al*. Comparative studies on seasonal dynamics of soil enzymatic activities and soil nutrient availability in mono- and mixed- culture plant communities of ageratina adenophora and setaria sphaclata[J]. J. Plant Ecol., 2008, 32(4): 891-899.

[35] 潘树林，辜彬，李家祥. 岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性[J]. 生态学报，2012，32(20): 6404-6411.
Pan S L, Gu B, Li J X. Soil property and plant diversity of highway rocky slopes[J]. Acta Ecol. Sin., 2012, 32(20): 6404-6411.

[36] 安韶山，黄懿梅，李壁成，刘梦云. 用典型相关分析研究宁南宽谷丘陵区不同土地利用方式土壤酶活性与土壤因子的关系[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(5): 704-709.
An S S, Huang Y M, Li B C, Liu M Y. The relationship between soil enzyme activities and soil properties of different land uses way in Loess Hilly region by canonical correlation analysis[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(5): 704-709.

[37] 陈璟，杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物特性[J]. 生态环境学报，2013，22(5): 739-742.
Chen J, Yang N. Soil microbial properties under different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang[J]. Ecol. Environ. Sci., 2013, 22(5): 739-742.