

衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复对土壤酶活性及土壤理化性质的影响

刘作云¹, 杨宁²

(1. 湖南环境生物职业技术学院 继续教育部, 湖南 衡阳 421005;

2. 湖南环境生物职业技术学院 园林学院, 湖南 衡阳 421005)

摘要: [目的] 研究衡阳市紫色土丘陵坡地恢复对土壤酶活性及理化性质的影响, 以揭示不同恢复阶段土壤性质的变化、土壤生态系统的恢复/退化机理。[方法] 采用时空互代方法, 分析草本(I)、灌草(II)、灌丛(III)和乔灌群落(IV)阶段的 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 土层的土壤酶活性和理化性质变化。[结果] (1) 不同恢复阶段的 Patrick 指数(R)、Shannon—Wiener 指数(H)的大小顺序为: III > IV > II > I, Simpson 指数(D)排序为: I > II > IV > III, Evenness 指数(E)排序为: IV > III > II > I, 各植被地上和地下生物量均显著增加; (2) 随着植被恢复过程的进行, 土壤含水量(SWC)、土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)和有效磷(AP)含量明显上升, 土壤容重(SBD)、pH 值及根土比(R/S)逐渐减小。随着土壤深度增加, SWC、 R/S 、SOM 以及 N、P 养分等明显下降, 而 SBD 和 pH 值逐渐增大; (3) 随着恢复进行, 脲酶(URE)、蛋白酶(PRO)、碱性磷酸酶(APE)、蔗糖酶(INV)、纤维素酶(CEL)和多酚氧化酶(PPO)活性明显上升, 过氧化氢酶(CAT)活性以 III 最高。除 PPO 和 CAT 外, 其他土壤酶活性随土壤深度加深显著减小。[结论] 植被恢复可改善土壤理化性质和提高土壤酶活性。

关键词: 植被恢复; 土壤酶活性; 土壤理化性质; 紫色土; 衡阳市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0020-07

中图分类号: S154.2

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.006

Effects of Re-vegetation on Soil Enzyme Activities and Soil Physio-chemical Properties on Sloping-land with Purple Soils in Hengyang City

LIU Zuoyun¹, YANG Ning²

(1. Department of Extended Education, Hu'nan Environmental-Biological

Polytechnic College, Hengyang, Hu'nan 421005, China; 2. College of Landscape

Architecture, Hu'nan Environmental-Biological Polytechnic College, Hengyang, Hu'nan 421005, China)

Abstract: [Objective] Study the effects of re-vegetation on soil enzyme activities and physio-chemical properties on sloping-lands with purple soils in Hengyang City, in order to reveal the change of soil property in different re-vegetation phases and the mechanism of recovery/degeneration of soil ecology. [Methods] Successional stages were postulated as those communities with different physiognomy, and in which soil samples of 0—10 cm, 10—20 cm and 20—40 cm in plots of grassland(I), frutex and grassplot(II), frutex(III), arbor and frutex community(IV) were collected. Some soil enzyme activities and physio-chemical properties in the postulated stages of re-vegetation were assayed and illustrated. [Results] (1) Patrick richness index(R), Shannon—Wiener index(H) were followed the order as: III > IV > II > I, Simpson index(D): I > II > IV > III, Evenness index(E): IV > III > II > I. The above and under-ground biomass significantly increased along revegetation; (2) SWC(soil water content), SOM(soil organic matter), TN(total nitrogen), TP(total phosphorus), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (nitrate-nitrogen) and AP(available phosphorus) significantly increased along revegetation, whereas SBD(soil bulk density), pH values and R/S ratio(root/soil ratio) gradually decreased. With

收稿日期: 2014-08-18

修回日期: 2014-09-20

资助项目: 湖南省科技厅项目“湖南省紫色土荒山坡地植被恢复技术研究”(S2006N332); 湖南省林业科技创新计划项目(XLK201339; XLK201341); 湖南省衡阳市科技计划项目(2014KN27)

第一作者: 刘作云(1982—), 男(汉族), 湖南省宁乡县人, 硕士, 讲师, 主要从事土壤生态学与环境生态学的教学与研究。E-mail: heshecheng2@sina.com。

通信作者: 杨宁(1974—), 男(苗族), 湖南省绥宁县人, 博士, 副教授, 主要从事紫色土荒山坡地生态植被恢复研究。E-mail: yangning8787@sina.com。

the increase of soil depth, SWC, R/S ratio, SOM, N and P significantly decreased, SBD and pH values gradually increased; (3) The activities of URE (Urease), PRO (protease), APE (alk-phosphatase), INV (invertase), CEL (cellulase) and PPO (polyphenol oxidase) significantly increased, and the activities of CAT (catalase) was the highest in III. With the increase of soil depth, except for PPO and CAT, the activities of the other soil enzyme activities decreased obviously. [Conclusion] Re-vegetation could improve soil physio-chemical properties and increase soil enzyme activities.

Keywords: re-vegetation; soil enzyme activity; soil physio-chemical properties; purple soils; Hengyang City

衡阳紫色土丘陵坡地面积有 1.63×10^5 hm², 该区域水土流失严重, 植被稀疏, 基岩裸露, 有的区域几乎没有土壤发育层, 生态环境十分恶劣, 植被恢复十分困难, 是湖南省生态环境最为恶劣的地区之一^[1-4]。植被恢复是该区域水土保持与生态建设的重要措施, 植被恢复除了有效保持水土、减少土壤侵蚀外, 还可以通过土壤—植物复合系统改善土壤质量。土壤酶是土壤生物化学的一个重要指标, 其活性与土壤理化性质密切相关, 反映植被恢复措施对土壤的改良作用^[5-6]。由于土壤酶活性容易测定及在土壤—植物相互作用中的重要性, 植被恢复下的土壤酶活性已成为生态学、土壤学与微生物学的研究热点^[7]。尽管土壤酶活性变化在恢复过程中具有重要意义, 但针对衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤酶活性的研究相对薄弱, 且大多集中于土壤理化性质方面的研究^[8-9]。由于酶活性与土壤类型、植被特征(植物群落生物量、植被盖度、植物多样性等)、土壤微生物数量及酶本身的性质有关^[10-13], 所以进行衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤酶活性及土壤理化特征的研究, 对揭示不同恢复阶段土壤性质的变化、土壤生态系统的恢复/退化机理以及植被恢复具有重大意义。

1 研究区概况与研究方法

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 $110^{\circ}32'16''$ — $113^{\circ}16'32''$ E, $26^{\circ}07'05''$ — $27^{\circ}28'24''$ N。属亚热带季风湿润气候, 年平均气温 18°C ; 极端最高气温 40.5°C , 极端最低气温 -7.9°C , 年平均降雨量 $1\,325\text{ mm}$, 年平均蒸发量 $1\,426.5\text{ mm}$ 。平均相对湿度 80% , 全年无霜期 286 d 。地貌类型以丘岗为主。呈网状集中分布于该区域中部海拔 $60\sim 200\text{ m}$ 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、东山瑶族乡和耒阳市遥田镇、市炉镇一带, 以衡南、衡阳两县面积最大。

1.2 样地选择

结合当地记载资料, 采用“时空互代”方法^[14-16],

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, 分别代表草本群落阶段(I)、灌草群落阶段(II)、灌丛群落阶段(III)和乔灌群落阶段(IV)4个恢复阶段。草本群落阶段(I)的坡度为 25° , 坡向西南, 海拔 110 m ; 灌草群落阶段(II): 20° , 西南, 115 m ; 灌丛群落阶段(III): 35° , 西南, 125 m ; 乔灌群落阶段(IV): 25° , 西南, 120 m 。在各恢复阶段设置5个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的样方调查乔木, 在每个样方的四角和中心分别设置5个 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的小样方调查灌木, 设置5个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的小样方调查草本植物, 测定每个样方中植物群落的种类组成、盖度、高度和频度等, 对草本植物进行齐地面刈割, 对灌木和乔木采取新萌发的枝叶, 80°C 烘干至恒重称地上生物量(above-ground biomass); 采用 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 样方分层取 $0\sim 10\text{ cm}$, $10\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\sim 40\text{ cm}$ 根系, 5次重复, 过 1 mm 筛后去土, 再用细纱布包裹根系, 用清水洗净, 于 80°C 烘箱中烘至恒重, 称干质量, 得地下生物量(under-ground biomass)。同时采集土壤样品, 过 2 mm 筛后保存于 4°C 的冰箱中, 用于土壤酶活性的测定。

1.3 土壤理化性质的测定

土壤有机质(SOM)含量采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ —浓硫酸外加热法测定, 全氮(TN)含量采用半微量凯氏法, 全磷(TP)含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗显色—紫外分光光度法, 全钾(TK)含量采用 NaOH 熔融—原子吸收法测定, 铵态氮(Ammonium-nitrogen, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$): 酚二磺酸法; 硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)采用 KCl 溶液提取法, 速效磷(AP)采用 NaHCO_3 提取—钼锑抗显色—紫外分光光度法, 速效钾(AK)采用 NH_4Ac 浸提—原子吸收法测定, pH值采用电极电位法, 土壤含水量(SWC)采用烘干法(105°C , 12 h), 土壤容重(SBD)采用环刀法, 根土比(R/S)采用容量瓶法^[17-18]。

1.4 土壤酶活性的测定

脲酶(URE)采用苯酚—次氯酸钠比色法测定, 蛋白酶(PRO)采用茚三酮比色法测定, 碱性磷酸酶(APE)采用对硝基苯磷酸二钠比色法, 蔗糖酶(INV)

采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,纤维素酶(CEL)采用葡萄糖比色法测定,多酚氧化酶(PPO)采用邻苯三酚比色法测定,过氧化氢酶(CAT)采用 KMnO_4 滴定比色法^[19]测定。

1.5 数据处理

采用 Patrick 丰富度指数(R)、Simpson 指数(D)、Shannon—Wiener 指数(H)和物种均匀度指数(E)进行植物群落物种多样性测度^[20],计算公式为:
 $R=S$; $D=1-\sum P_i^2$; $H=-\sum P_i \ln P_i$; $E=H/\ln S$
 式中: S ——物种丰富度(即物种的数量); P_i ——物种 i 的个体数占群落总个体数的比例。

采用 SPSS 13.0 软件进行数据统计分析和作图,采用单因素方差分析法(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($\alpha=0.05$)。所有数据均为 3 次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同恢复阶段植物群落特征

由表 1 可知,不同恢复阶段的 Patrick 丰富度指数(R)、Shannon—Wiener 指数(H)的大小顺序为: III > IV > II > I, Simpson 指数(D)大小顺序为: I > II > IV > III, 物种均匀度指数(E)大小顺序为: IV > III > II > I; 作为对不同恢复阶段土壤理化特征差异的响应,植物群落的地上生物量与地下生物量明显增加。

表 1 研究区不同恢复阶段植物群落丰富度、多样性和生物量

恢复阶段	物种丰富度	Simpson 指数	Shannon 指数	均匀度指数	地上生物量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	地下生物量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
草本群落	5	0.987	2.540	0.840	188.32±12.87 ^A	1 022.76±180.63 ^A
灌草群落	13	0.956	3.347	0.923	240.45±15.43 ^B	1 896.65±100.65 ^B
灌丛群落	20	0.890	3.559	0.946	348.67±20.48 ^C	2 543.06±145.28 ^C
乔灌群落	17	0.953	3.487	0.950	491.65±29.00 ^D	3 429.65±202.44 ^D

注:表中生物量数据为平均数±标准差;不同大写字母表示不同恢复阶段差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 不同恢复阶段土壤理化性质

由表 2 可以看出,在 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 各土层中,随着恢复进行,各土层土壤含水量显著增加($p<0.05$);土壤容重以 I 最高,明显高于 III 与 IV ($p<0.05$);在 0—10 cm 和 20—40 cm 土层中, I 的根土比明显高于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$), 10—20 cm 土层, II 的根土比明显高于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$);在 0—10 cm 土层中,随着恢复进行,土壤有机质含量显著增加 ($p<0.05$), 10—20 cm 土层, III 的土壤有机质含量明显高于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$), 20—40 cm 土层,其含量差异不明显 ($p>0.05$);在 0—10 cm 土层中, I 的全氮含量显著低于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$), 10—20 cm 和 20—40 cm 土层, IV 的全氮含量明显高于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$);在 0—10 cm 土层中,铵态氮含量由高到低的顺序为: II > I > III > IV ($p<0.05$), 10—20 cm 土层, IV 的铵态氮含量显著低于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$), 20—40 cm 土层,随着恢复的进行,铵态氮含量显著降低 ($p<0.05$);在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中, III 和 IV 的硝态氮含量明显高于 I 和 II ($p<0.05$), 20—40 cm 土层, I 的硝态氮含量明显低于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$);在 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 中各土层中, IV 的全磷含量

明显高于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$);在 0—10 cm 土层中, III 和 IV 的速效磷含量显著高于 I 和 II ($p<0.05$), 10—20 cm 土层速效磷含量由高到低的顺序为: III > IV > I > II ($p<0.05$), 20—40 cm 土层, IV 速效磷含量明显高于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$);在 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 各土层,各恢复阶段的全钾和速效钾含量差异不显著 ($p>0.05$),其变化没有一定的规律性;在 0—10 cm 土层, IV 的 pH 值明显低于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$), 10—20 cm 和 20—40 cm 土层,随着恢复的进行,土壤 pH 值逐渐降低 ($p>0.05$)。

在 I, II, III 和 IV 各恢复阶段中,随着土层深度增加,土壤含水量、容重、根土比、土壤有机质、全氮、硝态氮、全磷、速效磷、速效钾明显下降 ($P<0.05$);全钾逐渐降低;在 I, II, III 恢复阶段, 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 各土层的 pH 值差异不明显 ($p>0.05$),在 IV 阶段,随着土层深度的增加, pH 值明显升高 ($p<0.05$)。

2.3 不同恢复阶段的土壤酶活性

由表 3 可知,在 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 各土层中,随着恢复的进行,脲酶活性逐渐增加 ($p>0.05$);蛋白酶活性均以 IV 最高,显著高于其他 3 个恢复阶段 ($p<0.05$);过氧化氢酶活性均以 III 最高,显

著高于其他 3 个恢复阶段 ($p < 0.05$); 碱性磷酸酶活性有增加趋势, 但无显著差别 ($p > 0.05$); 0—10 cm 土层, I 的蔗糖酶活性显著低于其他 3 个恢复阶段 ($p < 0.05$), 10—20 cm 土层, III 和 IV 显著高于 I 和 II ($p < 0.05$), 20—40 cm 土层, III 的活性最高, 显著高于其他 3 个恢复阶段 ($p < 0.05$); 0—10 cm 和 10—20 cm 土层, I 的纤维素酶活性显著低于其他 3 个恢复阶段 ($p < 0.05$), 20—40 cm 土层, I 和 IV 显著高于 II 和 III ($p < 0.05$); 0—10 cm 土层, IV 的多酚氧化酶活性显著高于其他 3 个恢复阶段 ($p < 0.05$), 10—20 cm

土层, III 显著高于其他 3 个恢复阶段 ($p < 0.05$), 20—40 cm 土层, I 显著低于其他 3 个恢复阶段 ($p < 0.05$); 在 I, II, III 和 IV 各恢复阶段中, 随土层深度的增加, 脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性显著降低 ($p < 0.05$); 在 IV 恢复阶段, 随土层深度增加, 多酚氧化酶活性显著降低 ($p < 0.05$), 在 I, II 和 III 恢复阶段中, 多酚氧化酶活性含量由高到低的顺序为: 10—20 cm 土层 > 0—10 cm 土层 > 20—40 cm 土层 ($p < 0.05$); 在 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 各土层中, 过氧化氢酶活性的差异不显著 ($p > 0.05$)。

表 2 研究区不同恢复阶段土壤的理化性质

项目	土层/cm	草本群落	灌草群落	灌丛群落	乔灌群落
土壤含水量/ %	0—10	24.34±0.55 ^{Aa}	28.08±0.44 ^{Ba}	29.67±0.28 ^{Ca}	30.98±0.38 ^{Da}
	10—20	20.54±0.30 ^{Ab}	22.00±0.25 ^{ABb}	25.08±0.25 ^{Bab}	27.87±0.28 ^{Cab}
	20—40	18.09±0.21 ^{Ac}	18.65±0.18 ^{Ac}	21.37±0.20 ^{ABc}	25.90±0.35 ^{Bc}
土壤容重/ (g·cm ⁻³)	0—10	1.23±0.08 ^{Aa}	1.17±0.06 ^{Ba}	1.10±0.08 ^{Ca}	1.08±0.09 ^{Ca}
	10—20	1.34±0.07 ^{Ab}	1.20±0.06 ^{Bab}	1.16±0.09 ^{Cb}	1.14±0.06 ^{Cab}
	20—40	1.45±0.07 ^{Ac}	1.25±0.05 ^{ABb}	1.18±0.07 ^{Bc}	1.18±0.07 ^{Bb}
根土比	0—10	1.53±0.13 ^{Aa}	0.77±0.02 ^{Ba}	0.61±0.07 ^{Ca}	0.60±0.03 ^{Ca}
	10—20	0.23±0.08 ^{Ab}	0.38±0.03 ^{Bab}	0.25±0.03 ^{Cb}	0.23±0.03 ^{Ab}
	20—40	0.15±0.03 ^{Ac}	0.13±0.03 ^{Bb}	0.12±0.03 ^{BCc}	0.11±0.01 ^{Cc}
土壤有机质/ (g·kg ⁻¹)	0—10	112.32±5.34 ^{Aa}	123.09±6.54 ^{ABa}	139.54±5.07 ^{Ba}	143.67±4.97 ^{Ca}
	10—20	88.09±5.00 ^{ABab}	76.98±4.27 ^{Ab}	100.05±5.00 ^{Bab}	82.49±3.31 ^{ABb}
	20—40	56.36±4.45 ^{Ab}	54.67±4.33 ^{Ac}	63.57±4.75 ^{Ab}	59.45±2.87 ^{Ac}
全氮/ (g·kg ⁻¹)	0—10	7.54±0.43 ^{Da}	8.97±0.41 ^{Aa}	8.32±0.41 ^{Ca}	8.35±0.34 ^{Ba}
	10—20	4.32±0.33 ^{Aab}	3.87±0.35 ^{Cb}	4.56±0.36 ^{Ab}	5.15±0.48 ^{Bb}
	20—40	2.41±0.27 ^{Bb}	2.14±0.37 ^{Bc}	2.81±0.39 ^{Bc}	3.90±0.29 ^{Ac}
全磷/ (g·kg ⁻¹)	0—10	0.72±0.03 ^{Ba}	0.77±0.02 ^{Ba}	0.73±0.03 ^{Ba}	0.94±0.02 ^{Aa}
	10—20	0.63±0.02 ^{Aab}	0.60±0.04 ^{Aab}	0.65±0.02 ^{Aab}	0.87±0.01 ^{Bab}
	20—40	0.57±0.02 ^{Bb}	0.52±0.03 ^{Bb}	0.58±0.03 ^{Bb}	0.76±0.03 ^{Ab}
全钾/ (g·kg ⁻¹)	0—10	21.12±0.76 ^{Aa}	20.42±0.80 ^{Aa}	20.87±0.59 ^{Aa}	19.56±0.67 ^{Aa}
	10—20	21.47±0.65 ^{Aa}	20.35±0.75 ^{Aa}	21.47±0.75 ^{Aa}	18.96±0.63 ^{Aa}
	20—40	19.87±0.74 ^{Ba}	18.93±0.69 ^{Ba}	19.85±0.74 ^{Ba}	18.74±0.58 ^{Ba}
铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	0—10	11.77±3.09 ^{Aa}	15.64±4.00 ^{Ca}	9.56±3.43 ^{ABa}	7.58±0.98 ^{Ba}
	10—20	12.54±2.85 ^{Aab}	10.42±3.56 ^{Ab}	11.87±4.98 ^{Ab}	5.96±1.78 ^{Bb}
	20—40	13.18±2.07 ^{Ab}	11.65±3.67 ^{ABc}	10.75±3.64 ^{Bab}	5.00±1.65 ^{Cc}
硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	0—10	6.14±1.76 ^{Aa}	6.87±1.45 ^{Aa}	7.78±1.54 ^{Ba}	8.09±1.59 ^{Ca}
	10—20	6.09±1.28 ^{Aa}	6.17±1.49 ^{Aab}	7.16±1.49 ^{Bab}	7.48±1.43 ^{Cab}
	20—40	3.99±1.33 ^{Ab}	5.09±0.99 ^{Bb}	5.96±1.53 ^{Cb}	6.90±1.75 ^{Db}
速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	0—10	7.87±0.87 ^{Aa}	8.56±0.68 ^{Aa}	9.27±0.37 ^{Aa}	9.76±0.23 ^{Aa}
	10—20	5.09±0.59 ^{Bb}	4.57±0.67 ^{Bb}	7.15±0.65 ^{Bb}	6.89±0.24 ^{Bb}
	20—40	2.54±0.46 ^{Ac}	3.96±0.57 ^{Bc}	3.76±0.60 ^{Bc}	5.74±0.36 ^{Cc}
速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	0—10	361.09±8.64 ^{ABa}	345.98±6.00 ^{Ba}	362.00±18.05 ^{ABa}	298.54±8.05 ^{Aa}
	10—20	185.04±10.47 ^{ABb}	180.95±7.53 ^{Aab}	189.54±12.37 ^{Bb}	160.38±9.45 ^{Cb}
	20—40	135.37±6.59 ^{Ab}	147.05±7.00 ^{ABb}	155.47±8.56 ^{Bc}	159.43±10.57 ^{Cb}
pH 值	0—10	8.12±0.02 ^{Aa}	8.16±0.01 ^{Aa}	8.15±0.03 ^{Aa}	7.77±0.02 ^{Ba}
	10—20	8.29±0.01 ^{Aa}	8.26±0.00 ^{Aa}	8.09±0.02 ^{Aa}	8.09±0.03 ^{Aab}
	20—40	8.39±0.00 ^{Aa}	8.30±0.02 ^{Aa}	8.23±0.01 ^{Aa}	8.30±0.02 ^{Ab}

注: 同行不同大写字母表示相同土层不同恢复阶段差异显著 ($p < 0.05$), 同列小写字母表示相同指标不同土层差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

表 3 研究区不同恢复阶段的土壤酶活性

项目	土层/cm	草本群落	灌草群落	灌丛群落	乔灌群落
脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0—10	1.09±0.07 ^{Aa}	1.20±0.03 ^{Aa}	1.23±0.08 ^{Aa}	1.23±0.05 ^{Aa}
	10—20	0.67±0.04 ^{Ab}	0.68±0.02 ^{Ab}	0.69±0.04 ^{Ab}	0.84±0.04 ^{Ab}
	20—40	0.35±0.02 ^{Ab}	0.36±0.02 ^{Ab}	0.45±0.03 ^{Ab}	0.38±0.01 ^{Ab}
蛋白酶/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0—10	0.93±0.01 ^{Aa}	0.96±0.01 ^{Aa}	0.98±0.02 ^{Aa}	1.39±0.02 ^{Ba}
	10—20	0.81±0.01 ^{Ab}	0.83±0.00 ^{Ab}	0.88±0.01 ^{Ab}	1.05±0.02 ^{Bab}
	20—40	0.78±0.00 ^{Ab}	0.79±0.01 ^{Ab}	0.83±0.01 ^{Ab}	0.84±0.01 ^{Bb}
碱性磷酸酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0—10	1.22±0.02 ^{Aa}	1.26±0.02 ^{Aa}	1.38±0.03 ^{Aa}	1.36±0.03 ^{Aa}
	10—20	0.56±0.02 ^{Ab}	0.54±0.01 ^{Ab}	0.56±0.02 ^{Ab}	0.63±0.02 ^{Ab}
	20—40	0.19±0.01 ^{Ab}	0.20±0.01 ^{Ab}	0.21±0.01 ^{Ab}	0.27±0.02 ^{Bb}
蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0—10	0.54±0.03 ^{Aa}	0.78±0.04 ^{BCa}	0.73±0.02 ^{Ba}	0.80±0.03 ^{Ca}
	10—20	0.43±0.01 ^{Ab}	0.44±0.03 ^{Ab}	0.62±0.03 ^{ABab}	0.65±0.02 ^{Bab}
	20—40	0.38±0.00 ^{ABb}	0.36±0.02 ^{Ac}	0.53±0.01 ^{Bb}	0.36±0.03 ^{Ab}
纤维素酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0—10	1.66±0.03 ^{Aa}	2.15±0.04 ^{Ba}	2.31±0.03 ^{Cab}	2.24±0.02 ^{BCa}
	10—20	1.05±0.03 ^{Bb}	1.50±0.03 ^{Ab}	1.52±0.02 ^{ABa}	1.54±0.03 ^{ABab}
	20—40	1.12±0.02 ^{Ab}	0.90±0.02 ^{Bb}	0.79±0.02 ^{Bb}	1.28±0.03 ^{Ab}
多酚氧化酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 3 \text{h}^{-1}$)	0—10	0.42±0.02 ^{Ab}	0.43±0.03 ^{Ab}	0.51±0.04 ^{ABab}	0.69±0.04 ^{Ba}
	10—20	0.45±0.03 ^{Aa}	0.53±0.03 ^{ABa}	0.62±0.03 ^{Ba}	0.54±0.03 ^{ABab}
	20—40	0.14±0.03 ^{Ab}	0.29±0.01 ^{Bb}	0.28±0.02 ^{Bb}	0.31±0.03 ^{Cb}
过氧化氢酶/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	0—10	75.98±0.76 ^{ABa}	67.65±0.66 ^{Aa}	95.30±0.34 ^{Ba}	76.54±0.87 ^{ABa}
	10—20	75.35±0.54 ^{ABa}	67.34±0.57 ^{Aa}	95.09±0.38 ^{Ba}	76.09±0.35 ^{ABa}
	20—40	76.05±0.38 ^{ABa}	55.87±0.39 ^{Aa}	96.56±0.40 ^{Ba}	77.31±0.34 ^{ABa}

3 结果讨论

(1) 在不同的植被恢复阶段,由于地表的覆盖状况、物种组成和结构的不同,进而影响环境景观,还可以影响着许多生态过程,养分的循环和演替方式,决定着衡阳紫色土丘陵坡地演替的发展方向和速度,改变植被的竞争格局,加速群落内种群的更新,导致生态系统结构功能的改变^[21-23]。不同恢复阶段植物群落特征的影响主要表现在对土壤理化特征以及土壤酶活性的影响^[24]。

(2) 土壤有机质、氮和磷是土壤主要的养分指标,而且土壤有机质还是形成土壤结构的重要物质,直接影响土壤肥力、持水能力、抗蚀能力、土壤容重和 pH 值等,有利于增强土壤孔隙度、通气性和结构性,有显著的缓冲作用和持水力,含有大量的植物营养元素,是土壤微生物的碳源和氮源,能激发土壤微生物酶活性,有利于地下死根和凋落物的及时降解。随着植被恢复的演替进行,土壤有机质与土壤含水量呈上升趋势,土壤理化性质得以改善,使土壤孔隙度和水稳团聚体升高,引起土壤透水性、透气性和水导率上升,土壤微生物的生命活动及土壤酶活性升高,地下死根及凋落物能够得到及时有效及时的降解,提高了土壤微生物量碳、有机质和速效养分的含量,使土壤

根土比与容重得以降低,从而改善了土壤理化性质^[25-26]。土壤中氮素绝大多数以有机态存在,虽土壤库有机氮贮量丰富,可速效氮供不应求,尤以硝态氮最明显,植被恢复使土壤凋落物以及土壤的氮量增加,使土壤中的氮素失调过程得以改观,因此,随着植被恢复的进行,植被地上和地下生物量得以上升^[27-28]。衡阳紫色土丘陵坡地土壤磷素主要以非有效态的矿质磷存在,有机磷及无机磷含量低,磷的有效率甚微。随着植被恢复的进行,使地上部分的归还量增加,土壤有机质和土壤有效养分明显上升,从而改善了土壤水分、有效氮和速效磷等土壤环境因子的限制,使土壤有机质含量和土壤有效养分含量明显上升,助推了土壤和植被的双重进化。衡阳紫色土含有丰富的正长石等矿物,其风化后保留了相当数量的钾,且绝大多数以无机态存在,加之土壤有机质中的钾素以离子态存在,比较容易释放,因此,钾素供应的绝对量和有效率均较大,植被恢复过程中,钾的供应是比较充足的^[1-4]。

(3) 土壤酶是土壤中的生物催化剂,直接参与土壤营养元素的有效化过程,土壤酶的大小可表征生化反应的方向和强度,对维持土壤生态系统的稳定起着重要作用^[29-30]。本研究发现,随着植被恢复的进行,大多数土壤酶活性呈上升趋势,与前人的研究结果基

本一致^[1-2,5-6]。植被恢复对土壤酶活性的改善可能与以下几个因素有关^[31-33]: ① 植被恢复后,土壤有机碳在表层积累,显著地改善了土壤的生物学和理化性状,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,从而提高土层的酶活性; 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。Kandeler 等^[34]认为,土壤酶的功能多样性与土壤功能多样性紧密相关,土壤生态系统的进化都伴随着不同土壤酶活性的提高,因此,植被恢复对维持土壤生态系统的平衡和持续发展具有重大意义。

4 结论

(1) 不同植被恢复阶段植物群落特征存在明显差异,从草本群落阶段(I)、灌草群落阶段(II)、灌丛群落阶段(III)到乔灌群落阶段(IV),植物的 Patrick 丰富度指数(R)、Shannon—Wiener 指数(H)的大小顺序为: III > IV > II > I, Simpson 指数(D): I > II > IV > III, 物种均匀度指数(E): IV > III > II > I, 植物的地上和地下生物量显著增加。

(2) 随着植被恢复的进行,土壤水分、土壤有机质、全氮、全磷、硝态氮、有效磷含量明显上升($p < 0.05$),土壤容重、pH 值及根土比逐渐减小($p > 0.05$);随着土壤深度的增加,土壤水分、根土比、土壤有机质以及氮、磷养分等明显下降($p < 0.05$),而土壤容重和 pH 值逐渐增大($p > 0.05$)。

(3) 随着植被恢复的进行,脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶和多酚氧化酶的活性明显上升($p < 0.05$),III 的过氧化氢酶活性显著高于其他 3 个恢复阶段($p < 0.05$);除多酚氧化酶和过氧化氢酶外,其他土壤酶活性随着土壤深度的加深显著减小($p < 0.05$)。

[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植被恢复阶段土壤酶活性特征研究[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1516-1524.
- [2] 杨宁,杨满元,雷玉兰,等. 衡阳紫色土丘陵坡地土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 生态环境学报,2014,23(4):575-580.
- [3] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J]. 生态学报,2014,34(10):2693-2701.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 金裕华,汪家社,李黎光,等. 武夷山不同海拔典型植被带土壤酶活性特征[J]. 生态学杂志,2011,30(10):1955-1961.
- [7] 蒋智林,刘万学,万方浩,等. 紫茎泽兰与非洲狗尾草单、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.
- [8] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 紫色土丘陵坡地植被恢复过程中土壤微生物生物量碳、微生物熵的变化[J]. 水土保持通报,2014,34(5):39-43.
- [9] 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.
- [10] Groffman P M, Mcdowellb W H, Myersc J C, et al. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(10): 1339-1348.
- [11] Bandick A K, Dick P. Field management effects on soil enzyme activities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999,31(11): 1471-1479.
- [12] Pengthamkeerati P, Motavalli P P, Kremer R J. Soil microbial activity and functional diversity changed by compaction, poultry litter and cropping in a claypan soil [J]. Applied Soil Ecology, 2011,48(1):71-80.
- [13] 杨宁,杨满元,雷玉兰,等. 紫色土丘陵坡地土壤微生物群落季节变化[J]. 生态环境学报,2015,24(1):34-40.
- [14] 杨宁,陈璟,杨满元,等. 贵州雷公山秃杉林不同林冠环境下箭竹分株种群结构特征[J]. 西北植物学报,2013,33(11):2326-2331.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海:上海科学技术出版社,1983:62-107.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京:农业出版社,1986.
- [20] 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.
- [21] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measuring

- of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [22] 李红, 杨宁. 湖南省绥宁县黄桑坪自然保护区珍稀濒危植物长苞铁杉自然种群年龄结构及生态对策[J]. *湖南生态科学学报*, 2014, 1(3): 12-16.
- [23] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物生物量与土壤养分演变[J]. *林业科学*, 2014, 50(12): 144-150.
- [24] 章永松, 林咸永, 罗安成. 有机肥对土壤中磷活化作用及机理研究(II): 有机肥(物)分解产生的有机酸对不同形态磷的活化作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 151-155.
- [25] Kmada K, Sato O, Ohsumi Y, et al. Humus composition of mauntain soil in central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13(5): 151-158.
- [26] Sparling G P, Gupta V V S R, Zhu G Y. Release of ninhydrin-reactive compounds during fumigation of soil to estimate microbial C and N[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(12): 1903-1805.
- [27] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [28] 杨宁, 付美云, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同土地利用模式下土壤种子库特征[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(11): 2324-2330.
- [29] 付美云, 杨宁, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物与养分的耦合关系[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 41-48.
- [30] 陈璟, 杨宁. 亚热带红壤丘陵区 5 种人工林对土壤性质的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(12): 167-173, 178.
- [31] 陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤基础呼吸及代谢熵的变化[J]. *热带亚热带植物学报*, 2013, 21(6): 514-520.
- [32] 刘作云, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地退化植被和恢复植被土壤微生物生物量的研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1739-1743.
- [33] 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.
- [34] 杨昌华, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地微地形对土壤水分及生物量的影响[J]. *湖南生态科学学报*, 2014, 1(4): 16-21.

(上接第 19 页)

- [10] 马正耀, 胡兴林, 蓝永超, 等. 1965—2010 年白龙江上游径流变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 612-618.
- [11] 张秀云, 姚玉璧, 王润元. 白龙江流域气候变化及其对水资源的影响[J]. *资源科学*, 2009, 31(8): 1315-1320.
- [12] 徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 2000—2010 年祁连山植被 MODIS NDVI 的时空变化及影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(11): 87-91.
- [13] 郭小芹, 刘明春, 钱莉, 等. 从 Mann—Kendall 特征看石羊河流域降水量的演变规律[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 593-599.
- [14] 汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. *地理学报*, 1982, 37(4): 383-393.
- [15] 刘贤赵, 李嘉竹, 宿庆, 等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. *地理科学*, 2007, 27(6): 791-795.
- [16] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182.
- [17] 侯钦磊, 白红英, 任圆圆, 等. 50 a 来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1505-1512.
- [18] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. *水文*, 2010, 30(4): 47-51.
- [19] 白红英, 侯钦磊, 马新萍, 等. 50a 来秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应[J]. *地理科学*, 2012, 32(10): 1229-1235.
- [20] 马新萍, 白红英, 侯钦磊, 等. 1959—2010 年秦岭灞河流域径流量变化及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(7): 1298-1305.
- [21] 朱丽, 秦富仓, 姚云峰, 等. 北京市红门川流域森林植被/土地覆被变化的水文响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(16): 4287-4294.
- [22] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 481-487.