

# 湘西北退化侵蚀地植被恢复区土壤养分、微生物与酶活性的典范相关分析\*

漆良华<sup>1</sup> 张旭东<sup>2</sup> 彭镇华<sup>2</sup> 周金星<sup>2</sup>

(1. 国际竹藤网络中心 北京 100102; 2. 中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091)

**摘要:** 以湘西北女儿寨小流域为研究对象,运用典范相关分析法研究退化侵蚀地植被恢复区土壤养分、微生物及酶活性之间的相互关系。结果表明:土壤养分综合因子中起主要作用的为N与P,土壤微生物综合因子中起主要作用的为细菌数量、微生物生物量C、微生物生物量N,土壤酶活性综合因子中起主要作用的为脲酶、多酚氧化酶、磷酸酶和转化酶;脲酶和多酚氧化酶的活性与土壤N、P的转化有关,而N、P的转化与微生物生物量C、微生物生物量N的累积有关;脲酶、多酚氧化酶及磷酸酶的活性对微生物生物量C积累有一定的促进作用,转化酶的活性对微生物生物量N积累有一定的抑制作用,脲酶活性有利于提高土壤N素含量,降低土壤P素水平,多酚氧化酶活性与土壤N素负相关;不同植被恢复群落不同土壤层次的养分、微生物及酶活性在各对典范变量上的聚集趋势可为植被恢复过程中的土壤健康诊断与立地类型划分提供一定的依据。

**关键词:** 植被恢复;土壤养分;土壤微生物;土壤酶活性;典范相关分析

中图分类号:S715.3 文献标识码:A 文章编号:1001-7488(2008)09-0001-06

## Canonical Correlation Analysis on Soil Nutrients, Microorganisms and Enzyme Activities in Vegetation Restoration Areas for Soil Degradation and Erosion in Northwest Hunan

Qi Lianghua<sup>1</sup> Zhang Xudong<sup>2</sup> Peng Zhenhua<sup>2</sup> Zhou Jinxing<sup>2</sup>

(1. International Center for Bamboo and Rattan Beijing 100102; 2. Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091)

**Abstract:** Through canonical correlation analysis the relationships between soil nutrients, soil microorganisms and soil enzyme activities were studied in vegetation restoration areas for soil degradation and erosion in the case of Nüerzhai watershed, northwest Hunan. The results showed that the key factors in soil nutrients, microorganisms and enzyme activities were N and P elements, bacterial number, soil microbial biomass carbon and nitrogen, and the activities of urease, polyphenol oxidase, phosphatase and invertase respectively. The activities of urease and polyphenol oxidase were related to the transformation of N and P elements which had important impact on the cumulation of soil microbial biomass carbon and nitrogen. Moreover, the activities of urease, polyphenol oxidase and phosphatase promoted microbial biomass carbon cumulation, however, invertase activities inhibited the cumulation of microbial biomass nitrogen. Urease activities were also beneficial to the N element content in soil and unfavorable for P element. There existed a negative relationship between the polyphenol oxidase activity and N element content. For every canonical variable group, the gathering tendencies of soil nutrients, microorganisms and enzyme activities in different soil layers in different vegetation restoration communities could offer some scientific basis for soil health diagnosis and site type division in the process of vegetation restoration.

**Key words:** vegetation restoration; soil nutrient; soil microorganism; soil enzyme activity; canonical correlation analysis (CCA)

土壤侵蚀导致的土地退化问题在我国十分严重(彭镇华,2003;漆良华等,2007a;任海等,2001),而植被恢复是治理土地退化、提高土壤健康质量的最有效途径(程水英等,2004)。土壤养分、微生物和酶是土壤生态系统的重要组成部分,是土壤健康评价的重要指标,历来为众多学者所关注(巩杰等,2005;顾峰雪等,2000;何斌等,2002;胡海波等,2001;焦如珍等,1997;谭芳林等,2003;王国梁等,2001;温仲明等,2005)。土壤养分的富集、空间分布和再分配作用对植被生长、发育和演替具有重要影响(巩杰等,2005;焦如珍等,1997;漆良华等,2007b;王国梁等,2001);土壤微生物是土壤生态系统中养分来源的巨大原动力,通过分解

收稿日期:2007-03-26。

基金项目:国家“十一五”林业科技支撑项目“长江中下游低山丘陵生态退化区植被恢复技术试验示范”(2006BAD03A16)。

\*张旭东为通讯作者。

动植物残体而参与森林生态系统的能量流动和物质循环(顾峰雪等,2000;胡海波等,2001;薛立等,2003);土壤酶素有生物催化剂之称,既参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环,又是植物营养元素的活性库(樊军等,2003;何斌等,2002;薛立等,2003)。典范相关分析在群落植被格局、土壤酶活性与营养元素研究等方面中已有成功应用(安韶山等,2005;Doelman,1986;Haanstra,1985;李跃林等,2002),但在退化土地植被恢复区土壤养分、微生物、酶活性研究中应用较少(胡斌等,2002;姜培坤等,2003)。本文以湘西北女儿寨小流域为研究对象,对流域内7种典型植被恢复群落土壤养分、微生物及酶活性的相关性进行研究,以期退化侵蚀区的植被恢复与重建提供理论依据。

## 1 研究区概况

女儿寨小流域位于湖南省张家界市慈利县城关镇两溪村(110°10' E,29°30' N),母岩以板页岩、砂岩为主,土壤主要为山地黄壤。光热充足,雨量充沛,年均日照1440 h,年均气温16℃,年均降水量约1400 mm,全年无霜期216~269 d,属中亚热带山原型季风性湿润气候。流域面积2.81 km<sup>2</sup>,沟口海拔210 m,最高峰海拔917.4 m。小流域内地形复杂,山峦起伏,沟壑纵横,沟壑密度约2.6 km·km<sup>-2</sup>,主沟纵比降约28.4%,土壤侵蚀严重,土地退化程度高。流域自1993年开始实施人工造林和封山育林相结合的植被恢复与重建工程,形成的典型植被恢复模式有马尾松(*Pinus massoniana*)天然林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、杜仲(*Eucommia ulmoides*)人工林、油桐(*Vernicia fordii*)人工林、润楠(*Machilus pingii*)次生林、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)杉木混交林及荒草灌丛等类型(漆良华等,2007b)。主要灌木种类有櫟木(*Loropetalum chinensis*)、苎麻(*Boehmeria nivea*)、悬钩子(*Rubus palmatus*)、白背叶(*Mallotus apelta*)、飞蛾槭(*Acer oblongum*)、油茶(*Camellia oleifera*)等,主要草本植物有铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、白茅(*Imperata* spp.)、香石竹(*Dianthus caryophyllus*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、沿阶草(*Ophiopogon japonicus*)、千里光(*Senecio scandens*)、莎草(*Cyperus rotundus*)、边缘鳞盖蕨(*Microlepia marginata*)、渐尖毛蕨(*Cyclosorus acuminatus*)、凸轴蕨(*Metathelypteris singalensis*)等,以及藤黄檀(*Dalbergia hancei*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)、赤廔(*Thladiantha nudiflora*)、菝葜(*Smilax china*)、木防己(*Cocculus trilobus*)、三叶木通(*Akebia trifoliata*)等层间植物。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与土样采集

对流域内的马尾松天然林、杉木、杜仲、油桐人工林、润楠次生林和竹杉混交林6种森林群落各设置样地3个,荒草灌丛群落样地2个(作为对照),样地面积600 m<sup>2</sup>。于2006年7月13日采集土样。每个样地按对角线分层(0~20 cm,20~40 cm)采集混合土样1 kg。采集土样分成2份,一份4℃低温保存供土壤微生物数量与生物量分析,一份自然风干后待做土壤养分与酶活性测定。

### 2.2 土壤养分、微生物及酶活性测定

重铬酸钾法测定有机质,扩散吸收法(硒粉-硫酸铜-硫酸消化法)测定全氮,钼锑抗比色法测定全磷,碱解扩散法测定水解氮,双酸浸提剂法测定速效磷,火焰光度计法测定速效钾,钾亚胺比色法测定有效硼,硫氰酸钾比色法测定有效铝,原子吸收分光光度法测定有效锌、有效铁、有效铜及有效锰。取新鲜土壤样品,采用平板涂抹法计数测定土壤中细菌、真菌及放线菌数量,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,微生物生物量C/N用氯仿熏蒸法测定。脲酶用苯酚钠比色法,蔗糖酶用三硝基水杨酸比色法,脱氢酶用三苯基四氮唑氯化物(TTC)比色法,过氧化氢酶用KMnO<sub>4</sub>滴定法,多酚氧化酶用邻苯三酚比色法,蛋白酶用茚三酮比色法,磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定(中国科学院南京土壤研究所,1978)。各指标的测定重复3次。

### 2.3 典范相关分析

典范相关分析是研究2组变量之间相关关系的一种多元分析方法。选择有机质( $X_1$ )、全氮( $X_2$ )、全磷( $X_3$ )、水解氮( $X_4$ )、速效磷( $X_5$ )、速效钾( $X_6$ )、有效硼( $X_7$ )、有效铝( $X_8$ )、有效锌( $X_9$ )、有效铁( $X_{10}$ )、有效铜( $X_{11}$ )、有效锰( $X_{12}$ )12个土壤养分指标,细菌数量( $Y_1$ )、真菌数量( $Y_2$ )、放线菌数量( $Y_3$ )、微生物生物量C( $Y_4$ )、微生物生物量N( $Y_5$ )5个土壤微生物指标,脲酶( $Z_1$ )、蔗糖酶( $Z_2$ )、转化酶( $Z_3$ )、过氧化氢酶( $Z_4$ )、多

酚氧化酶( $Z_5$ )、蛋白酶( $Z_6$ )、磷酸酶( $Z_7$ )7 个土壤酶活性指标,构建土壤养分指标、微生物指标和酶活性指标的数据集  $X_{(12 \times 42)}$ ,  $Y_{(5 \times 42)}$  和  $Z_{(7 \times 42)}$ ,建立土壤养分典范变量( $U$ )、土壤微生物典范变量( $V$ )和土壤酶活性典范变量( $W$ )的线性组合函数:

$$U = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p;$$

$$V = b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + \dots + b_q Y_q;$$

$$W = c_1 Z_1 + c_2 Z_2 + \dots + c_r Z_r.$$

式中:  $a_1, a_2, \dots, a_p$  ( $p = 12$ ),  $b_1, b_2, \dots, b_q$  ( $q = 5$ )及  $c_1, c_2, \dots, c_r$  ( $r = 7$ )为待定系数,  $U, V$  与  $W$  之间具有最大典范相关系数。

### 2.4 统计分析

典范相关分析、聚类分析运用 DPS 软件处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤养分与微生物的典范相关分析

由典范相关系数显著性检验结果(表 1)得到 1 对土壤养分与微生物典范变量,典范相关系数为 0.885 5,经 Wilk's Lambda 及  $\chi^2$  检验达极显著水平( $P = 0.000 3$ )。该对典范变量为:

$$U_1 = -0.038 0 X_1 + 0.228 0 X_2 - 0.267 0 X_3 - 0.306 8 X_4 + 0.726 4 X_5 - 0.041 7 X_6 +$$

$$0.155 2 X_7 + 0.135 3 X_8 + 0.344 9 X_9 - 0.415 4 X_{10} - 0.096 1 X_{11} + 0.278 7 X_{12};$$

$$V_1 = -0.607 8 Y_1 + 0.136 8 Y_2 + 0.230 9 Y_3 + 1.251 1 Y_4 - 0.515 6 Y_5.$$

由  $U_1, V_1$  系数可知,土壤养分综合因子中起主要作用的是速效磷( $X_5$ ),土壤微生物综合因子中起主要作用的是微生物生物量 C( $Y_4$ ),说明土壤中 P 的转化与微生物生物量 C 的累积关系最大,正效应明显。

典范冗余分析表明,典范变量  $U_1$  可以解释 23.96% 的土壤养分变异,并能解释土壤微生物 17.85% 的变异;典范变量  $V_1$  可以解释 22.76% 的土壤微生物变异,并能解释土壤养分特性 18.79% 的变异。将各样地土壤养分与微生物的实测数据代入  $U_1, V_1$  方程式,应用最小距离法进行逐步聚类分析,得到各样地在这对典范变量上的排序聚类坐标图(图 1)。图 1 中土壤养分与微生物综合特征在排序图中集结为 I, II 与 III 3 类。I 类:杜仲人工林、油桐人工林、润楠次生林及荒草灌丛 0~20 cm 土层; II 类:马尾松天然林、杉木人工林 0~20 cm 土层,润楠次生林、杜仲人工林、油桐人工林 20~40 cm 土层; III 类:马尾松天然林、杉木人工林、荒草灌丛 20~40 cm 土层,竹杉混交林 0~40 cm 土层。

表 1 典范相关系数显著性检验<sup>①</sup>  
Tab.1 Wilk's Lambda and Chi-square tests of canonical correlation coefficients

项目 Item	典范向量序号 Canonical vector No.	典范相关系数 Canonical correlation coefficients	Wilk's	$\chi^2$	df	P
土壤养分与土壤微生物典范相关分析 CCA of soil nutrients and soil microorganisms	1	0.885 5	0.037 6	104.960 5	60	0.000 3**
	2	0.781 9	0.174 2	55.917 7	44	0.107 4
	3	0.618 6	0.448 2	25.678 4	30	0.691 4
	4	0.420 3	0.726 0	10.245 9	18	0.923 6
	5	0.343 9	0.881 7	4.027 4	8	0.854 6
土壤养分与土壤酶活性典范相关分析 CCA of soil nutrients and soil enzyme activities	1	0.860 4	0.013 0	134.557 2	84	0.000 4**
	2	0.828 4	0.050 2	92.764 3	66	0.016 6*
	3	0.770 6	0.159 9	56.828 1	50	0.235 8
	4	0.580 0	0.393 6	28.903 0	36	0.793 5
	5	0.457 3	0.593 2	16.190 4	24	0.881 1
	6	0.426 7	0.750 0	8.918 0	14	0.836 3
	7	0.288 2	0.917 0	2.687 7	6	0.846 9
土壤微生物与土壤酶活性典范相关分析 CCA of soil microorganisms and soil enzyme activities	1	0.869 8	0.047 8	104.873 8	35	0.000 1**
	2	0.734 2	0.196 6	56.118 9	24	0.000 2**
	3	0.676 5	0.426 6	29.394 6	15	0.014 3*
	4	0.425 7	0.786 5	8.285 1	8	0.406 1
	5	0.198 5	0.960 6	1.387 2	3	0.708 5

① \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

### 3.2 土壤养分与酶活性的典范相关分析

对土壤养分与土壤酶活性进行典范相关分析,得到 2 对典范变量(表 1),其典范相关系数分别为 0.860 4 与 0.828 4。经 Wilk's Lambda 及  $\chi^2$  检验,第 1 对达极显著水平( $P = 0.000 4$ ),第 2 对达显著水平( $P = 0.016 6$ )。第 1 对典范变量为:

$$U_1 = -0.080 5 X_1 - 0.644 8 X_2 + 0.763 0 X_3 + 0.356 9 X_4 - 0.013 6 X_5 - 0.194 1 X_6 - 0.407 4 X_7 - 0.036 7 X_8 + 0.115 0 X_9 - 0.214 0 X_{10} + 0.157 7 X_{11} + 0.512 0 X_{12};$$

$$W_1 = -1.424 4 Z_1 + 0.099 9 Z_2 + 0.288 4 Z_3 - 0.342 5 Z_4 + 0.696 5 Z_5 + 0.340 2 Z_6 + 0.249 3 Z_7。$$

第 2 对典范变量为:

$$U_2 = 0.468 4 X_1 - 0.690 4 X_2 + 0.063 9 X_3 + 0.490 2 X_4 + 0.109 4 X_5 + 0.082 1 X_6 + 0.543 6 X_7 + 0.036 4 X_8 + 0.114 8 X_9 - 0.537 5 X_{10} - 0.273 2 X_{11} + 0.045 2 X_{12};$$

$$W_2 = -0.731 8 Z_1 + 0.264 9 Z_2 + 0.244 3 Z_3 + 0.168 7 Z_4 + 1.381 0 Z_5 + 0.205 5 Z_6 + 0.051 4 Z_7。$$

由典范变量系数可知,第 1 土壤养分综合因子中起主要作用的是全氮( $X_2$ )、全磷( $X_3$ ),第 1 土壤酶活性综合因子中起主要作用的是脲酶( $Z_1$ )、多酚氧化酶( $Z_5$ );第 2 土壤养分综合因子中起主要作用的是全氮( $X_2$ )、有效硼( $X_7$ )、有效铁( $X_{10}$ ),第 2 土壤酶活性综合因子中起主要作用的也是脲酶( $Z_1$ )、多酚氧化酶( $Z_5$ )。这一方面与脲酶催化 N、多酚氧化酶催化 C 的基本规律相符,另一方面也表明脲酶和多酚氧化酶的活性通过影响土壤中的一些生化过程而间接影响 N、P 的转化,其中 N 与脲酶为正效应,N 与多酚氧化酶、P 与脲酶为负效应。

典范变量  $U_1, U_2$  分别可以解释 12.04%, 19.81% 的土壤养分变异,以及 11.52%, 18.50% 的土壤酶活性变异;  $W_1, W_2$  分别可以解释 15.56%, 26.95% 的土壤酶活性变异,以及 8.91%, 13.60% 的土壤养分变异。将各样地土壤养分与酶活性的实测数据代入  $U_1, W_1$  和  $U_2, W_2$  方程式,应用最小

距离法进行逐步聚类分析,得到各样地在这 2 对典范变量上的排序聚类坐标图(图 2)。图 2a 中土壤养分与酶活性综合特征在排序图中集结为 I, II 和 III 3 类。I 类:杜仲人工林、油桐人工林、润楠次生林、荒草灌丛群落 20~40 cm 土层;II 类:杉木人工林、杜仲人工林、油桐人工林、润楠次生林 0~20 cm 土层;III 类:荒草灌丛 0~20 cm 土层,马尾松天然林、竹杉混交林 0~40 cm 土层。图 2b 中土壤养分与酶活性综合特征在排序图中集结为 I, II 与 III 3 类。I 类:马尾松天然林、杉木人工林、杜仲人工林、油桐人工林、润楠次生林、竹杉混交林、荒草灌丛 0~20 cm 土层;II 类:杉木人工林、油桐人工林、润楠次生林 20~40 cm 土层;III 类:马尾松天然林、杜仲人工林、竹杉混交林、荒草灌丛 20~40 cm 土层。

### 3.3 土壤微生物与酶活性的典范相关分析

对土壤微生物与土壤酶活性进行典范相关分析,经 Wilk's Lambda 及  $\chi^2$  检验,得到 3 对典范变量(表 1),其典范相关系数分别为 0.869 8, 0.734 2 及 0.676 5,第 1( $P = 0.000 1$ ),2 对( $P = 0.000 2$ )达极显著水平,第 3 对达显著水平( $P = 0.014 3$ )。第 1 对典范变量为:

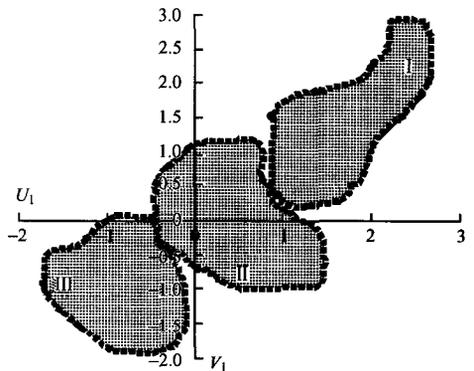


图 1 土壤养分与微生物典范变量排序聚类  
Fig. 1 Ordination and cluster of canonical variables of soil nutrients and microorganisms

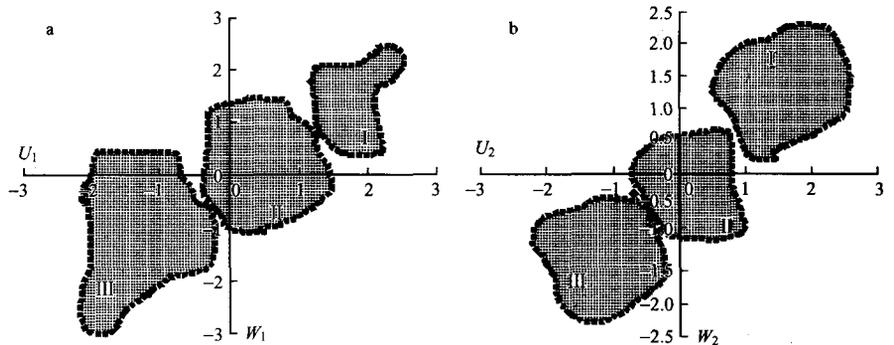


图 2 土壤养分与酶活性典范变量排序聚类  
Fig. 2 Ordination and cluster of canonical variables of soil nutrients and enzyme activities

$$V_1 = -0.6075Y_1 - 0.0749Y_2 - 0.1185Y_3 - 0.8744Y_4 + 0.5313Y_5;$$

$$W_1 = -0.7578Z_1 + 0.0283Z_2 - 0.2989Z_3 - 0.1912Z_4 + 0.2582Z_5 - 0.0208Z_8 - 0.5025Z_7。$$

第2对典范变量为:

$$V_2 = 0.0263Y_1 + 0.4773Y_2 - 0.6195Y_3 - 0.5715Y_4 + 1.2316Y_5;$$

$$W_2 = 0.5682Z_1 - 0.1197Z_2 - 0.8688Z_3 - 0.2719Z_4 - 0.2937Z_5 + 0.0762Z_6 + 0.2171Z_7。$$

第3对典范变量为:

$$V_3 = 0.8574Y_1 - 0.4821Y_2 + 0.2652Y_3 - 1.1973Y_4 + 0.5430Y_5;$$

$$W_3 = 1.8621Z_1 - 0.2964Z_2 + 0.4357Z_3 - 0.3016Z_4 - 2.1026Z_5 + 0.1186Z_6 + 0.1680Z_7。$$

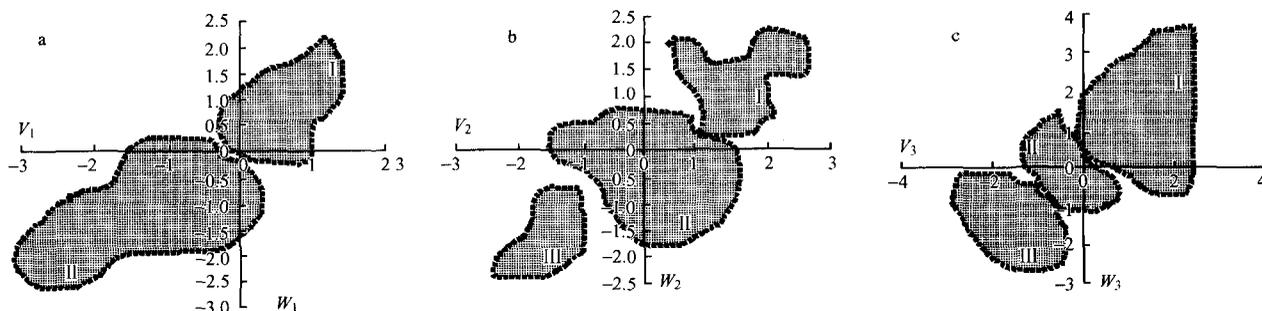


图3 土壤微生物与酶活性典范变量排序聚类

Fig. 3 Ordination and cluster of canonical variables of soil microorganisms and enzyme activities

由典范变量系数可知,第1土壤微生物综合因子中起主要作用的是细菌数量( $Y_1$ )、微生物生物量C( $Y_4$ ),第1土壤酶活性综合因子中起主要作用的是脲酶( $Z_1$ )、磷酸酶( $Z_7$ ),尤其以微生物生物量C和脲酶的正效应最大,说明脲酶有利于微生物生物量C的累积;第2土壤微生物综合因子中起主要作用的是微生物生物量N( $Y_5$ ),第2土壤酶活性综合因子中起主要作用的是转化酶( $Z_3$ ),2个指标之间负效应明显,说明转化酶的活性对微生物生物量N的积累有一定的抑制作用;第3土壤微生物综合因子中起主要作用的是微生物生物量C( $Y_4$ ),第3土壤酶活性综合因子中起主要作用的是多酚氧化酶( $Z_5$ ),说明多酚氧化酶的活性对微生物生物量C的积累有一定的促进作用。

典范变量  $V_1, V_2$  与  $V_3$  分别可以解释 34.52%, 13.98% 及 12.29% 的土壤微生物变异,以及 25.66%, 8.33% 及 2.38% 的土壤酶活性变异;  $W_1, W_2$  及  $W_3$  分别可以解释 33.91%, 15.45% 与 5.19% 的土壤酶活性变异,以及 26.12%, 7.54% 及 5.63% 的土壤微生物变异。将各样地土壤微生物与酶活性的实测数据代入3对典范变量方程式,应用最小距离法进行逐步聚类分析,得到各样地在各对典范变量上的排序聚类坐标图(图3)。图3a中土壤微生物与酶活性综合特征在排序图中集结为I, II 2类,其中I类主要为7种植被群落20~40 cm土层,II类为7种群落0~20 cm土层。图3b中土壤微生物与酶活性综合特征在排序图中集结为I, II与III 3类。I类: 润楠次生林、竹杉混交林 20~40 cm土层,马尾松天然林 0~40 cm土层; II类: 杜仲人工林、杉木人工林 20~40 cm土层,润楠次生林、竹杉混交林、油桐人工林、荒草灌丛 0~20 cm土层; III类: 杜仲人工林、杉木人工林 0~20 cm土层,油桐人工林、荒草灌丛 20~40 cm土层。图3c中土壤微生物与酶活性综合特征在排序图中集结为I, II与III 3类。I类: 竹杉混交林 0~40 cm土层,杉木人工林、马尾松天然林、杜仲人工林、油桐人工林、润楠次生林、荒草灌丛 20~40 cm土层; II类: 马尾松天然林、杉木人工林、杜仲人工林、油桐人工林 20~40 cm土层; III类: 润楠次生林、荒草灌丛 0~20 cm。

#### 4 结论与讨论

土壤养分综合因子中起主要作用的为N与P,土壤微生物综合因子中起主要作用的为细菌数量、微生物生物量C及微生物生物量N,土壤酶活性综合因子中起主要作用的为脲酶、多酚氧化酶、磷酸酶和转化酶。脲酶和多酚氧化酶的活性同土壤N,P的转化有关,而N,P的转化与微生物生物量C、微生物生物量N的累积有关。脲酶、多酚氧化酶及磷酸酶的活性对微生物生物量C的积累有一定的促进作用,转化酶的活性对微生物生物量N的积累有一定的抑制作用,脲酶活性有利于提高土壤N素含量,降低土壤P素水平,而多酚

氧化酶活性则与土壤 N 素之间表现为负相关。可见,在退化侵蚀植被区,由凋落物分解、动植物残体腐解等释放的 N、P 等养分元素一方面决定于细菌等土壤微生物活动,另一方面也间接调控着土壤酶活性及微生物量 C/N 的高低,并反作用于植被恢复进程。

土壤速效钾、真菌与放线菌数量、蔗糖酶、过氧化氢酶、蛋白酶相互之间及与土壤其他生化指标之间的相关性均不显著,这与有关过氧化氢酶的研究结果一致(安韶山等,2005)。但也有研究发现桉树(*Eucalyptus*)人工林土壤过氧化氢酶活性与土壤钾转化及磷固定间存在一定相关性,对土壤中主要营养物质氮素的转化具有重要作用(李跃林等,2002),樊军等(2003)也发现旱地农田过氧化氢酶的水平不但与有机碳的含量有关,而且与速效磷的关系密切。这可能是由于女儿寨小流域土壤侵蚀导致养分流失,土壤 C、N 含量较低,土壤微生物数量与活性下降,植被恢复质量与群落结构较差,每年归还土壤的枯枝落叶与根系分泌物较少,从而导致土壤过氧化氢产生较少,过氧化氢酶活性与土壤养分及微生物因子相关性不明显。

不同植被恢复群落不同土壤层次的养分、微生物及酶活性在各对典范变量上的排序聚类结果表明,综合性质相似的土壤有聚集趋势,该结果可为植被恢复过程中的土壤健康诊断与立地类型划分提供参考。

### 参 考 文 献

- 安韶山,黄懿梅,李璧成,等. 2005. 用典范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肥力因子的关系. 植物营养与肥料学报, 11(5): 704-709.
- 程水英,李团胜. 2004. 土地退化的研究进展. 干旱区资源与环境, 18(3): 38-43.
- 樊军,郝明德. 2003. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究. II. 土壤酶活性与土壤肥力. 植物营养与肥料学报, 9(2): 146-150.
- 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 2005. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究. 水土保持学报, 19(1): 93-96.
- 顾峰雪,文启凯,潘伯荣,等. 2000. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被下土壤微生物的初步研究. 生物多样性, 8(3): 297-303.
- 何斌,温远光,袁震,等. 2002. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究. 林业科学, 38(2): 21-26.
- 胡斌,段昌群,王震洪,等. 2002. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响. 土壤学报, 39(4): 604-608.
- 胡海波,张金池,高智慧,等. 2001. 岩质海岸防护林土壤微生物数量及其与酶活性和理化性质的关系. 林业科学研究, 15(1): 88-95.
- 姜培坤,周国模. 2003. 侵蚀型红壤植被恢复后土壤微生物量碳、氮的演变. 水土保持学报, 17(1): 122-127.
- 焦如珍,杨承栋,屠星南,等. 1997. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化. 林业科学研究, 10(4): 373-379.
- 李跃林,李志辉,彭少麟,等. 2002. 典范相关分析在桉树人工林地土壤酶活性与营养元素关系研究中的应用. 应用与环境生物学报, 8(5): 544-549.
- 彭镇华. 2003. 中国森林生态网络体系建设. 北京: 中国林业出版社.
- 漆良华,彭镇华,张旭东,等. 2007a. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局. 生态学杂志, 26(11): 1697-1702.
- 漆良华,张旭东,周金星,等. 2007b. 湘西北小流域典型植被恢复群落土壤持水量与入渗特性. 林业科学, 43(4): 1-8.
- 任海,彭少麟. 2001. 恢复生态学导论. 北京: 科学出版社.
- 谭芳林,林捷,张水松,等. 2003. 沿海沙地湿地松林地土壤养分含量及酶活性研究. 林业科学, 39(1): 169-173.
- 王国梁,刘国彬,许明祥. 2001. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应. 水土保持通报, 22(1): 1-5.
- 温仲明,焦峰,刘宝元,等. 2005. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化. 应用生态学报, 16(11): 2025-2029.
- 薛立,邝立刚,陈红跃,等. 2003. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. 土壤学报, 40(2): 280-285.
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社.
- Doelman P. 1986. Short and long term effects of heavy metals on urease activity in soils. Biol Fertil Soil, 2: 213-218.
- Haanstra P. 1985. The use of sigmoidal dose response curves in soil ecotoxicological research. Plant Soil, 84: 93-297.

(责任编辑 于静娴)