

侵蚀退化红壤自然恢复下土壤生物学质量演变特征

王晓龙^{1 2}, 胡 锋^{1,*}, 李辉信¹, 刘满强¹, 秦江涛¹, 张 斌³

(1. 南京农业大学 资源与环境学院, 南京 210095 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085 ;
3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 :为了探讨严重侵蚀退化红壤区自然植被恢复过程中土壤生物学质量演变特征 ,对南方严重侵蚀退化红壤自然植被恢复的 4 个演替阶段 (裸地 ,地衣地 ,苔藓地 和草地) ,以及该地区人工马尾松林地的土壤微生物量、酶活性和线虫数量进行了比较研究。结果表明 ,在侵蚀红壤自然恢复过程中土壤生物学性质演变特征明显。在恢复初期 ,地衣和苔藓对土壤生物学性质的改善主要体现在土壤表层。在 0 ~ 2cm 土层地衣地土壤微生物量碳、氮、蔗糖酶和脲酶活性高于裸地 ,但差异不显著 ,苔藓地表层微生物量氮、脲酶和酸性磷酸酶活与人工马尾松林地已无显著差异 ,表明苔藓地是严重侵蚀退化红壤自然恢复过程中土壤质量改善的重要阶段。裸地、地衣地和苔藓地土壤线虫恢复程度低于微生物量和酶活性。草地土壤微生物量碳、氮和 3 种酶活性以及线虫数量则显著高于自然恢复初期各阶段。与人工恢复林相比较 ,自然恢复草地表层土壤生物学质量优于人工马尾松林地 ,但对深层土壤的改善效果不如林地。相关分析表明自然恢复过程中土壤微生物与酶活性的改善程度比较一致 ,而土壤线虫对自然植被恢复响应与微生物和酶活性不尽相同。

关键词 :侵蚀退化红壤 ;自然恢复 ;土壤微生物量 ;土壤酶 ;土壤线虫

文章编号 :1000-0933 (2007) 04-1404-08 中图分类号 :Q143 ,Q958.1 文献标识码 :A

Characteristics of biological property of erosive degraded red soil under nature restoration

WANG Xiao-Long^{1 2} , HU Feng^{1,*} , LI Hui-Xin¹ , LIU Man-Qiang¹ , QIN Jiang-Tao¹ , ZHANG Bin³

1 College of Environmental and Natural Resource Sciences , Nanjing Agriculture University , Nanjing 210095 , China
2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology , Key Laboratory of Systems Ecology Research Center for Eco-environmental Sciences , CAS , Beijing 100085 , China
3. Institute of Soil Science , CAS , Nanjing 210008 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1404 ~ 1411.

Abstract : Hilly red soil region of Southern China is a main producing area for agriculture , pasture and forestry in China. Due to improper land utilization this region is suffering serious soil erosion. This problem has resulted in emergence of large naked lands called “red desert ” and hindrances to local agriculture sustainable development. For this reason , restoring vegetation and improving soil quality become urgently needed in this region. During recent decades , man-made forest restoration was taken as the dominating method to reconstruct the destroyed ecosystem. However , the most effective solution to these naked lands should be nature restoring , on condition that human disturbance stopped. Therefore , exploring the effects of nature restoration on soil quality is very important for reconstruction and management of degraded ecosystems in the

基金项目 :国家自然科学基金资助项目 (49871046)
收稿日期 :2006-04-26 ; 修订日期 :2006-11-28
作者简介 :王晓龙 (1977 ~) 男 , 博士生 , 安徽芜湖人 , 主要从事土壤生态与恢复生态研究. E-mail :wangjie78eo@yahoo. com. cn
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :fhjwc@njau. edu. cn

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 49871046)

Received date 2006-04-26 ; **Accepted date** 2006-11-28

Biography :WANG Xiao-Long , Ph. D. candidate , mainly engaged in soil ecology and restoration ecology , E-mail :wangjie78eo@yahoo. com. cn

hilly red soil region of Southern China.

This study was carried out at the Ecological Experiment Station of Red Soil , Institute of Soil Science , Chinese Academic of Science , which was located in Yujiang County , Jiangxi Province. Four types of erosive degraded red soil (bare land , lichen land , mosses land , grass land) , which represent different stages of natural restoring , and an artificially restored woodland (*Pinus massonina* land) were selected. Soil's biological properties of these five types of land were determined. Results showed that soil's biological properties varied during the process of nature restoration on erosive degraded red soil. At the initial stages of restoration , improvement on the soil biological properties by lichen and moss were represented mainly on surface layer soil. Contents of soil microbial biomass C , N , activities of Sucrase and Urease in lichen land were higher than that in bare land in surface soil layer (0 - 2 cm) , without significant difference between them. Moss land presented significantly higher soil microbial biomass C , N and activities of Sucrase , Urease and Acid Phosphatase compared to bare land and lichen land in surface soil layer. There was no significant difference of soil microbial biomass N and activities of Urease and Acid Phosphatase between moss lan and *Pinus massonina* land. This indicated that moss land was a very important stage for the improvement of degraded red soil quality during nature vegetation restoration process. Resumption of nematode abundances in the bare land , lichen land and mosses land lagged largely to that of soil microbial biomass and enzymes' activities. Grass land illustrated the highest soil microbial biomass , enzymes' activities and nematode abundance among the four stages of nature restoration. Biological properties in surface and sub-surface soil layers of grass land were better than *pinus massonina* land , while in deeper layer the latter presented more effective improvement on soil biological quality. Correlation analysis suggested that resumption of soil microbial biomass was consistent with enzymes' activities in the process of nature restoration , whereas nematode abundance was discrepant.

Key Words : erosive degraded red soil ; nature restoration ; soil microbial biomass ; enzymes activities ; nematode abundances

南方红壤丘陵区是我国重要的农业、牧业和林业生产基地。该地区雨量充沛、热量丰富,生物地球化学循环旺盛。但由于受长期不合理的耕作方式影响,该地区水土流失严重,很多地方土壤侵蚀退化形成理化性质和生物学性质极为低劣的裸地,造成大面积的“红色沙漠”。由于侵蚀引起的土地生产力的急剧下降,已成为我国南方农业可持续发展的主要制约因子之一^[1~3]。为此,基于人工植被重建的生态恢复作为治理红壤退化的重要技术途径在南方得到了广泛的推行,许多研究者也围绕不同植被恢复措施对土壤质量的影响作了深入探讨,为指导红壤丘陵区的恢复实践起到了积极作用^[4~8]。与此同时,由于侵蚀退化裸地生产力极低,人为扰动少,因而自然主导下退化红壤的植被恢复在我国南方侵蚀红壤区更为广泛的进行着,并且这种缓慢的自然植被演替对南方地区严重侵蚀退化红壤的理化性质和生物学质量的改善和复原起着至关重要的作用^[9,10]。但目前对该地区侵蚀退化红壤自然植被恢复过程中土壤质量改善,尤其是土壤生物学质量的动态变化研究较少。由于具有高度的敏感性和较为全面的评价作用,土壤生物学特性能较好地反映植被恢复过程中土壤质量的改善效果,土壤微生物量、酶活性和土壤动物被认为是土壤质量的重要指标^[11~14]。本文以自然植被恢复下南方严重侵蚀退化红壤区为研究对象,研究了不同自然植被恢复阶段土壤微生物量、土壤酶活性和线虫数量变化特征,以期揭示退化红壤自然植被演替过程中土壤质量改善的动态变化,为该地区退化生态系统恢复与管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

本研究在中国科学院红壤生态开放实验站侵蚀退化红壤植被恢复试验区进行。该站位于江西省鹰潭市余江县刘家站(N 28°15'30" , E 116°55'30") ,属中亚热带湿润季风气候区,气候温热多雨,年均日照 1809.5h ,年均气温 17.6℃。多年平均降水量 1794.7mm ,年蒸发量为 1318mm ,降水季节分布不均,4 月至 6 月份降水量

几乎占全年的 50% ,干湿季节变化较为明显 ,夏、秋之间旱情突出。试验区原为严重侵蚀退化的荒坡地 ,坡度 5°~8° ,土壤为第四纪红黏土发育的典型红壤。实验区包括人工植被恢复长期定位试验区和无人为干扰自然植被恢复长期定位试验区。

1.2 样品采集

本研究在无人为干扰自然植被恢复长期定位试验区分别采集 :严重侵蚀红壤裸地 (简称裸地)、地表覆盖地衣结皮的侵蚀红壤 (简称地衣地)、覆盖多年生苔藓的红壤 (简称苔藓地)和植被覆盖较好的灌草地 (简称草地)4 个典型侵蚀退化红壤自然植被恢复阶段红壤。由于严重退化红壤自然演替期长 ,自然植被恢复长期定位试验区缺乏乔木演替阶段 ,因此同时采集恢复期 10 年以上的人工马尾松林 (简称林地)土壤 ,用以比较侵蚀退化红壤自然植被恢复过程中土壤质量演变特征。裸地地表无植被覆盖 ,网纹层 (B 层)出露 ;地衣地地表有较为完整的薄层地衣覆盖 ;苔藓地苔藓高约 2~3cm ,为黄牛毛藓 ,长势浓密 ;草灌地以野古草、白茅和珠芽画眉草为主 ;马尾松林以马尾松为建群种。土样于 2003 年 4 月中旬在上述样地中采集 ,天气晴朗。土样分 0~2cm、2~5cm、5~10cm 和 10~20cm 4 个层次采集 ,每个样品采集 3 个重复。土样带回实验室挑出细根 ,砾石等放入冰箱 4℃ 保存 ,用于土壤生物学性质的测定 ;同时取部分土样风干 ,用于土壤理化性质分析。

1.3 样品分析

土壤微生物量 氯仿熏蒸-0.5mol/L K₂SO₄直接提取法。其中微生物量碳用氧化滴定法 ,即提取液在酸化条件下 ,用重铬酸钾氧化 ,硫酸亚铁回滴 ;微生物量氮采用提取液全氮消煮 ,半微量凯氏蒸馏法^[15]。

土壤酶活性的测定 酸性磷酸酶-磷酸苯二钠比色法 ;蔗糖酶-3 ,5-二硝基水杨酸比色法 ;尿酶-蒸馏法^[16]。

线虫数量调查 蔗糖-离心浮选分离法。然后在生物显微镜下计数 ,其数量换算为条/100g 干土^[17 ,18]。

统计分析采用 SPSS11.0。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物量

侵蚀红壤自然恢复过程不同阶段土壤微生物量分异较大 ,主要体现在表层和亚表层。表 1 和表 2 中 ,0~2 cm 和 2~5 cm 土层的微生物量碳、氮依次为草地>林地>苔藓>地衣>裸地。在 0~2 cm 土层微生物量碳、氮草地和林地显著高于其它阶段 ;苔藓地则显著高于裸地和地衣地 ,后二者差异不明显。在 2~5 cm 土层苔藓微生物量碳显著高于裸地和地衣地 ,而土壤微生物量氮三者之间差异不明显 ,但都显著低于草地和林地。

表 1 自然恢复下侵蚀退化红壤土壤微生物量碳

Table 1 Microbial biomass carbon of erosive degraded red soil under nature restoration (mg/kg)

土层 Soil layer (cm)	裸地 Bare land	地衣 Lichen land	苔藓地 Mosses land	草地 Grass land	马尾松林地 <i>Pinus massonina</i> land
0~2	54.9 (6.8)d	65.5 (8.3)d	293.3 (27.1)c	456.3 (35.6)a	365.6 (38.7)b
2~5	38.5 (5.3)c	38.7 (7.7)c	68.0 (9.7)b	320.8 (32.1)a	289.4 (33.6)a
5~10	31.4 (5.1)b	32.9 (7.4)b	40.3 (7.1)b	238.7 (35.6)a	211.4 (29.8)a
10~20	31.9 (6.3)b	30.8 (6.1)b	38.2 (5.8)b	195.3 (23.7)a	200.4 (26.8)a

* 括号中的数字为平均数的标准误差 ;同一行中 ,具有相同字母平均数表示差异不显著 ($p < 0.05$) ,下同 Numbers in the parentheses are standard errors ; means followed by the same letter in the same row are not significantly different at $p < 0.05$, the same below

表 2 自然恢复下侵蚀退化红壤土壤微生物量氮

Table 2 Microbial biomass nitrogen of erosive degraded red soil under nature restoration (mg/kg)

土层 Soil layer (cm)	裸地 Bare land	地衣 Lichen land	苔藓地 Mosses land	草地 Grass land	马尾松林地 <i>Pinus massonina</i> land
0~2	6.4 (2.3)c	7.1 (1.7)c	38.3 (9.6)b	69.4 (18.7)a	52.3 (12.5)ab
2~5	4.2 (1.1)b	5.0 (1.4)b	6.0 (2.0)b	38.3 (11.9)a	37.4 (9.7)a
5~10	4.0 (0.9)b	4.1 (0.7)b	4.2 (1.1)b	30.3 (5.3)a	31.0 (6.8)a
10~20	4.3 (0.4)b	4.0 (1.3)b	5.5 (1.1)b	25.4 (4.4)a	28.0 (5.1)a

地。5~10cm和10~20cm土层苔藓地、地衣地和裸地土壤微生物量碳、氮含量都很低,相互间区别不大。草地和林地土壤微生物量层次分异趋势不一致,表层土壤微生物量草地高于林地,随土壤层次的加深,林地则逐渐高于草地,但除0~2cm草地微生物量碳显著高于林地外,其余土层二者均没有显著区别。草地和林地土壤微生物量随土层的加深呈递减趋势,这与已有报道一致^[7,19]。

2.2 土壤酶活性

表3、表4和表5分别为3种代表性土壤酶:蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性。由表中可以看出表明退化红壤不同自然植被恢复阶段土壤酶活性差异明显。表2中在0~2cm和2~5cm土层蔗糖酶活性以草地和林地显著最高,其次为苔藓地,而地衣地和裸地则最低,其中苔藓地显著高于地衣地和裸地,而地衣地和裸地无显著区别。在2~5cm和5~20cm土层,苔藓地、地衣地和裸地蔗糖酶活性很低,均为0.02mg/kg·h,显著低于草地和林地,草地蔗糖酶活性最高,但和林地差别不显著。表3中在0~2cm土层脲酶活性依次为草地>林地>苔藓地>地衣地>草地,其中以草地显著最高,苔藓地则显著高于地衣地和裸地,但与林地差异不明显。2~5、5~10cm和10~20cm土层间脲酶活性的不同演替阶段分异较为一致,以草地和林地显著最高,但二者没有显著性区别,苔藓地、地衣地和草地间脲酶活性差异也不显著。表4中裸地和地衣所有土层酸性磷酸酶活性均极低,以至低于测出值。在苔藓土壤表层,3种酶活性已显著高于地衣和裸地,这种积累效果甚至延伸到次表层土壤。表4中裸地和地衣所有土层酸性磷酸酶活性均极低,以至低于测出值。苔藓地5~10cm和10~20cm土层酸性磷酸酶活性也低于测出值,在2~5cm为4.22mg/kg·h,显著低于草地和林地,但在土壤表层(0~2cm)与二者无显著差异。10~20cm土层酸性磷酸酶活性林地为13.47mg/kg·h,显著高于草地,但在其他土层(0~2cm、2~5cm和5~10cm)草地高于林地,但无显著性区别。

表3 自然恢复下侵蚀退化红壤蔗糖酶活性

Table 3 Sucrase activities of erosive degraded red soil under nature restoration (mg/(kg·h))					
土层 Soil layer (cm)	裸地 Bare land	地衣 Lichen land	苔藓地 Mosses land	草地 Grass land	马尾松林地 <i>Pinus massonina</i> land
0~2	0.02 (0.007)c	0.03 (0.09)c	0.18 (0.03)b	0.51 (0.09)a	0.46 (0.07)a
2~5	0.02 (0.004)c	0.02 (0.003)c	0.05 (0.02)b	0.24 (0.06)a	0.22 (0.009)a
5~10	0.02 (0.006)b	0.02 (0.004)b	0.02 (0.007)b	0.17 (0.06)a	0.14 (0.03)a
10~20	0.02 (0.004)b	0.02 (0.003)b	0.02 (0.005)b	0.13 (0.04)a	0.12 (0.02)a

表4 自然恢复下侵蚀退化红壤脲酶活性

Table 4 Urease activities of erosive degraded red soil under nature restoration (mg/(kg·h))					
土层 Soil layer (cm)	裸地 Bare land	地衣 Lichen land	苔藓地 Mosses land	草地 Grass land	马尾松林地 <i>Pinus massonina</i> land
0~2	13.53 (2.60)c	15.33 (2.46)c	23.91 (3.13)b	29.17 (5.11)a	25.42 (4.71)ab
2~5	12.93 (2.21)b	13.07 (1.65)b	13.82 (1.07)b	23.43 (3.01)a	20.15 (2.11)a
5~10	12.73 (0.61)b	12.66 (0.92)b	13.27 (1.33)b	17.21 (1.52)a	17.09 (2.07)a
10~20	12.02 (0.94)b	12.09 (1.13)b	12.52 (1.71)b	17.27 (2.34)a	16.01 (1.44)a

表5 自然恢复下侵蚀退化红壤酸性磷酸酶活性变化

Table 5 Acid Phosphatase activities of erosive degraded red soil under nature restoration (mg/(kg·h))					
土层 Soil layer (cm)	裸地 Bare land	地衣 Lichen land	苔藓地 Mosses land	草地 Grass land	马尾松林地 <i>Pinus massonina</i> land
0~2	—	—	29.32 (4.53)a	34.44 (3.46)a	31.66 (5.29)a
2~5	—	—	4.22 (1.03)b	23.37 (2.66)a	20.48 (4.33)a
5~10	—	—	—	19.79 (2.64)a	19.77 (3.07)a
10~20	—	—	—	6.11 (1.53)b	13.47 (2.11)a

—:表示没有低于检出值,下同 “—”Denote the value under lower determined limit, the same below

2.3 土壤线虫数量

表6中0~2cm土层线虫数量草地>林地>地衣>苔藓>裸地,其中裸地、地衣和苔藓3个阶段线虫数没有明显差异,线虫数量极低,在11.5~19.6条/100g干土之间,远小于草地和林地。草地表土层0~2cm和2~5cm土层线虫数量分别为653.2条/100g干土和579.4条/100g干土,显著高于林地。5~10cm和10~20cm土层中裸地、地衣和苔藓没有分离到线虫,而草地和林地土壤线虫数量也随土层的加深而呈递减趋势,显示线虫的表聚特征^[20],在10~20cm土层林地线虫数量显著高于草地。

表6 自然恢复下侵蚀退化红壤线虫数(条/100g干土)

Table 6 Nematode abundances of erosive degraded red soil under nature restoration (Num/100g dry soil)					
土层 Soil layer (cm)	裸地 Bare land	地衣 Lichen land	苔藓地 Mosses land	草地 Grass land	马尾松林地 <i>Pinus massonina</i> land
0~2	19.6 (5.4)c	19.1 (6.1)c	16.8 (7.3)c	653.2 (64.5)a	472.8 (46.7)b
2~5	16.3 (3.9)c	14.2 (4.4)c	11.5 (6.3)c	579.4 (55.7)a	382.1 (47.1)b
5~10	-	-	-	306.6 (41.2)a	337.8 (31.9)a
10~20	-	-	-	233.7 (19.3)b	286.4 (22.6)a

2.4 土壤生物学指标相关关系

由于在严重侵蚀退化红壤自然植被演替初级阶段(裸地、地衣和苔藓)5cm~20cm土层酸性磷酸酶活性与线虫数量极低,同时演替初期时先锋植物只对表层土壤质量产生影响,因此,表6中只计算了裸地、地衣地、苔藓地和草地0~5cm土层土壤生物学指标的相关系数,结果表明土壤微生物量碳、氮与3种土壤酶活性呈显著或极显著正相关,3种土壤酶两两之间也达到极显著正相关;土壤线虫数量与微生物量和3种土壤酶活性呈正相关关系,但仅与酸性磷酸酶达到显著水平。表明在自然植被恢复过程中侵蚀退化红壤土壤微生物与酶活性的改善程度比较一致,而土壤动物对自然植被恢复响应与微生物和酶活性不尽相同。土壤微生物的代谢活动对土壤酶活性有着显著影响,并且二者对土壤肥力的演变反映敏感,因而在侵蚀退化红壤自然植被恢复过程中显示了较好的相关性,相对而言土壤动物的生长与繁衍不仅需要适宜的土壤理化条件,同时也要求充足的食物来源,因此土壤线虫对土壤状况改善的响应与土壤微生物和酶活性可能不尽一致^[6,21]。

表7 自然植被恢复下侵蚀退化红壤肥力状况与土壤生物质量的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between soil biological properties indicators (0~5cm)						
	微生物碳 Microbial biomass carbon	微生物氮 Microbial biomass nitrogen	酸性蔗糖酶 Sucrase	脲酶 Urease	磷酸酶 Acid Phosphatase	线虫数 Nematode abundances
微生物碳 Microbial biomass carbon	1.000					
微生物氮 Microbial biomass nitrogen	0.904**	1.000				
蔗糖酶 Sucrase	0.817**	0.586*	1.000			
脲酶 Urease	0.812**	0.803**	0.814**	1.000		
酸性磷酸酶 Acid Phosphatase	0.782**	0.767**	0.753**	0.899**	1.000	
线虫数 Nematode abundances	0.221	0.209	0.316	0.308	0.537*	1.000

* * 极显著水平 $p < 0.01$ Significant level at $p < 0.01$; * 显著水平 $p < 0.05$ Significant level at $p < 0.05$ $n = 24$

3 讨论

3.1 侵蚀退化红壤不同自然植被演替阶段土壤微生物量演变特征

土壤微生物量与土壤肥力密切相关,是反映土壤微生物群落的相对大小和土壤健康和土地生产力的一个

重要指标 ,能快速响应土壤理化性状的演变。土壤微生物量碳、氮的高低主要受土壤中可利用碳源和氮源的制约^[22]。一般认为侵蚀退化土壤植被恢复过程中土壤微生物量和微生物区系不断改变^[23]。本研究中不同自然植被演替阶段土壤微生物量差异明显。地衣地表层土壤微生物量碳、氮大于裸地 ,表明在地衣阶段土壤微生物已开始活跃。地衣是由绿藻或蓝绿藻与真菌组成的共生有机体 ,参与地衣共栖的蓝绿藻具有利用分子氮的能力。地衣阶段土壤微生物的代谢和地衣死亡体的腐殖化对侵蚀裸地表层土壤养分的积累有着重要意义 ,为更高级的植被迁入提供了有利条件^[24]。苔藓地表层土壤微生物量碳、氮为裸地的 6 倍左右 ,显著高于裸地和地衣地 ,其中微生物量氮达到 38.3 mg/kg ,与林地已无明显差异。在苔藓阶段真菌微生物与苔藓一起继续参加土壤质量的恢复过程。苔藓能很有效的积累表层土壤有机物 ,同时也能够充分地利用降水和大气中的氮素^[25]。随着表层土壤有机质的增加和养分的积累 ,苔藓阶段土壤持水力增强 ,对环境的控制能力大大优于地衣阶段。生境的改善 ,必然导致土壤微生物数量的激增。裸地、地衣地和苔藓地在 5 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 土层微生物量碳、氮差异不明显 ,但在 2 ~ 5cm 土层苔藓微生物量碳显著高于裸地和地衣 ,表明苔藓对土壤生物学质量的改善不仅集中在土壤表层 ,同时也开始影响到次表层土壤。

草地表层微生物量碳、氮分别为 456.3 mg/kg 和 69.4mg/kg ,超过恢复期 10a 以上的马尾松林 ,也高于刘满强等对该地区几种人工恢复林的调查结果 ,说明自然植被恢复更有利于表层土壤微生物性状的改善^[7] ;但 10 ~ 20cm 土层草地微生物量碳、氮均低于林地 ,表明人工恢复林地对深层土壤微生物性状的改善效果要优于自然植被恢复中的草地阶段。土壤中可降解有机物质数量对微生物活动影响显著^[9]。自然植被恢复草地表层和亚表层土壤微生物量高于林地 ,在自然自卑恢复过程中表层土壤积累了丰富的有机碳源 ,同时每年有大量凋落物回归表层土壤微生物提供了充足的能源物质^[7, 33] ;此外草地表层土壤发达的根系代谢也有利于微生物的活动 ,而人工林地中乔木植物的根系对较深土层的渗透和改善要强于草地 ,从而显示较高的土壤微生物量^[25]。

3.2 侵蚀退化红壤不同自然植被演替阶段土壤酶活性演变特征

土壤酶活性也被认为是极有潜力的土壤质量指示者。许多研究者认为土壤酶几乎在所有的土壤反映中都有重要的作用 ,其专一性和相对稳定性的特点使其具有指示土壤质量的巨大潜力^[26, 34, 35]。本研究探讨了侵蚀退化红壤不同自然植被恢复阶段分别参与土壤碳、氮和磷循环的 3 种代表性土壤酶 (蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶)活性特征。在自然植被恢复过程中 ,3 种酶活性均呈递增趋势。地衣阶段 3 种酶活性在各土层都很低 ,与裸地无明显差异。土壤酶是由生物分泌或生物残体、残骸释放在土壤中 ,地衣对土壤的影响还较弱 ,因而土壤酶积累极为缓慢。裸地和地衣所有土层酸性磷酸酶活性低于测定低限 ,可能与红壤中生物可利用磷含量低有关^[27]。在苔藓土壤表层 ,3 种酶活性已显著高于地衣和裸地 ,从脲酶和酸性磷酸酶活性来看 ,这种积累效果甚至延伸到次表层土壤 (2 ~ 5 cm)。值得注意的是苔藓土壤表层脲酶和酸性磷酸酶活性虽低于林地和草地 ,但已不呈现显著差异 ,说明土壤酶活性的恢复速度可能高于某些土壤养分和生物学指标 ,同时也意味着在侵蚀退化红壤自然植被恢复过程中 ,苔藓阶段是土壤肥力积累和生物学质量提高的一个重要阶段。草地绝大多数土层 3 种土壤酶活性高于林地 (10 ~ 20cm 土层酸性磷酸酶活性显著低于林地) ,表明自然植被恢复更有利于土壤酶的积累。郑诗樟等在对该地区不同生态重建中土壤质量的研究也认为自然植被恢复地这 3 种土壤酶活性高于人工针叶林地^[28]。

3.3 侵蚀退化红壤不同自然植被演替阶段土壤线虫数量演变特征

土壤线虫在有机质分解、养分矿化等生态过程中起着关键作用 ,是土壤生态系统的重要功能组分。长期以来国外对不同环境条件及管理措施下土壤线虫群落变化作了大量研究 ,国内学者也研究了红壤地区人工植被恢复对线虫数量影响^[29, 30]。普遍认为由于土壤线虫对生境变化反映灵敏 ,揭示土壤生态过程有着独特的指示意义。De Goede 等对流沙植被初级演替中线虫群落的系统研究认为植被演替过程中有机物层及微生境差异是影响线虫数量的主导因素^[29]。本研究中裸地和地衣地苔表层和次表层土壤线虫数量极低 ,不超过 20 条/100g 干土 ,远低于农田和林地土壤 ,可能与二者极为低劣的土壤微生境有关。虽然苔藓地表层土壤微生物

物量与土壤酶活性已经有很大改善,但线虫数量也只有 16.8 条/100g 干土。退化生态系统恢复过程中植物多样性是动物和微生物多样性的基础。苔藓地其单一植被的代谢活动会对土壤产生不利因素,从而限制土壤动物(如线虫等)在土壤中大量存在^[31]。此外即使土壤生境适合线虫的生存,线虫迁入和繁衍也有一定的滞后性。在 5~10cm 和 10~20cm 土层中裸地、地衣地和苔藓地没有分离到线虫,这也充分说明生态系统恢复过程中土壤动物群落的重建较为困难。草地表层和次表层土壤线虫数量超过 500 条/100g 干土,显著高于林地,但依然低于 Ekschimit 等对欧洲草地的调查结果^[32]。在较深土层林地线虫数量显著高于草地可能因为林木根系深层土壤的穿透有助于线虫的扩散。

References :

[1] Zhao Q G. Mechanisms and Regulations of Spatial and Temporal Variation of the Soil Degeneration in Red Soil Region , East China. Beijing : Science Press ,2002.

[2] Li H X , Hu F , Xu S R. Affects on the Soil Fertility by Different Utilization and Management Patterns in Red Soil Highland. Journal of Soil Sci , in China , 1996 , 27 (3) :114 – 116.

[3] Lian Y , Zhang T L , Shi D M. Assessment on the Soil Erosion in Red Soil Highland , South China. Red Soil Ecosystem Research. Beijing : Agriculture Science and Technology Press ,1995.

[4] Yu Z Y ,Peng S L. The study on restoration ecology of degraded ecosystems in tropical and sub-tropical region. Guangzhou :Guangdong Science and Technology Press ,1996.

[5] Guo X M ,Niu D K ,Liu W Q *et al.* The vegetation restoration and reconstruction of different types of degraded barren ecosystems in Jiangxi. Acta Ecologica Sinica , 2002 , 22 (6) :878 – 884.

[6] Liu M Q , Hu F , Li H X *et al.* Soil arthropod communities under different artificial woodland restored on degraded red soil , Acta Ecologica Sinica , 2002 , 22 (1) :54 – 61.

[7] Liu M Q , Hu F , He Y Q , *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under differents vegetations restored on degraded red soils , Acta Pedologica Sinica , 2003 , 40 (6) :937 – 944.

[8] Heng H , OuYang Z Y , Wang X K *et al.* Effects of forest restoration types on soil quality in red soil eroded region , Southern China , Acta Ecologica Sinica , 2004 , 24 (9) :1995 – 2002.

[9] Zhao P. Advances in plant ecophysiological studies on re-vegetation of degraded ecosystems. Chinese Journal of Applied Ecology , 2003 , 14 (11) : 2031 – 2036.

[10] Lu S H ,Xiang W S ,Li X K *et al.* A review of vegetation restoration in eroded area of red soil. Guihaia , 2003 , 23 (1) :83 – 89.

[11] Wardle D A . Controls of temporal variability of the soil microbial biomass :A global synthesis. Soil Biol Biochem , 1998 , 30 (13) :1627 – 1637.

[12] Kandeler E ,Tscherko D ,Spiegel H. Long-term monitoring of microbial biomass. N mineralization and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. Biol. Fertil. Soils , 1999 , 28 :343 – 351.

[13] Yang Y S ,He z M ,Qiu R H *et al.* Effects of different recover and restoration measures on plant diversity and soil fertility for serious degradation ecosystem. Acta Ecologica Sinica , 1999 , 19 (4) :490 – 494.

[14] Hu B ,Duan C Q ,Wang Z H *et al.* Effect of vegetation rehabilitation measures on soil fertility and soil enzymatic activity in degraded ecosystem. Acta Pedologica Sinica , 2002 , 39 (4) :604 – 608.

[15] Vance E D , Brookes P C , Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biol Biochem , 1987 , 19 (2) :703 – 707.

[16] Guan S Y. Soil enzymes and their determining methods. Beijing : Agricultural Press. 1986.

[17] Ohlenius B ,Boström S ,Sandor A. Long-term dynamics of nematode communities in arable soil under four cropping systems. Journal of Applied Ecology , 1987 , 24 :131 – 144.

[18] Mao X F , Li H X , Chen X Y , *et al.* Extraction efficiency of soil nematodes by different methods. Chinese Journal of Ecology , 2004 , 23 (3) :149 – 151.

[19] Haynes R J. Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management. Biol. Fertil. Soils , 1999 , 30 (3) :210 – 216.

[20] Yao H Y , He Z L , Huang C Y. Turnover period of microbial biomass nitrogen in red soils and its significance in soil fertility evaluation. Acta Pedologica Sinica , 1999 , 36 (3) :387 – 394.

[21] Ettma C H ,Coleman D C ,Vellidis G , *et al.* Spatiotemporal distributions of bacterivorous nematodes and soil resources in fl restored riparian wetland. Ecology , 1998 , 79 :2721 – 2734.

[22] Yu S ,Li Y ,Wang J H *et al.* Study on the soil microbial biomass as a bioindicator of soil quality in the red earth ecosystem. Acta Pedologica Sinica , 1999 , 36 (3) :413 – 422.

[23] Haack S K. Garchow H M , Klug J *et al.* Analysis of factors affecting the accuracy ,reproducibility ,and interpretation of microbial community carbon source utilization patterns. Applied and Environmental Microbiology , 1995 , 61 (4) :1458 – 1468.

[24] Kefolda B. A , Theory of soil science. Science Press ,1983.

[25] Hao Z Q ,Ye J ,Jing P. Roles of bryophyte in nutrient cycling in dark coniferous forest of Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology. 2005 ,16 (12) 2263 – 2266.

[26] Sakorn P P. Urease activity and fertility status of some lowland rice in the central plain. Thai J Agric Sci ,1987 ,20 :173 – 186.

[27] Xue D ,Yap H Y ,He Z L *et al.* . Relationships between red soil enzyme activity and fertility. Chinese Journal of Applied Ecology ,2005 ,16 (8) : 1455 – 1458.

[28] Zheng S Z ,Wu W D ,He Y Q , *et al.* Biological properties under different ecosystem reconstruction models in hilly red soil region. Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis ,2004 ,26 (5) :792 – 797.

[29] De Goede R G M ,Georgieva S S ,Verschoor B C *et al.* . Changes in nematode community structure in a primary succession of blown—out areas in fl drift sand landscape. Fundam. appl. Nematol ,1993 ,16 (6) 501 – 513.

[30] Li H X ,Liu M Q ,Hu F , *et al.* Nematode abundance under different vegetations restored on degraded red soil. Acta Ecologica Sinica ,2002 ,22 (11) 1882 – 1889.

[31] Sohlenius B. Fluctuations of nematode populations in pine forest soil. Fundamental and Applied Nematology ,1997 ,20 (2) :103 – 114.

[32] Ekschimit K ,Bakonyi G , Bongers M *et al.* Effects of the nematofauna on microbial energy and matter transformation rates in European grassland soils. Plant and Soil ,1999 ,212 (1) :45 – 61.

[33] Li Z A ,Fang W ,Liu D M. Physical and chemical properties of soils in Heshan hilly land. Acta Ecologica Sinica ,1995 ,15supp (A) 93 – 102.

[34] Liu M Y. Chang Q R ,Qi Y B , *et al.* Features of soil enzyme activity under different land uses in Ningnan Mountain area. Chinese Eco-Agriculture , 2006 ,14 (3) :67 – 70.

[35] Qiu L P ,Zhang X C ,Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization. Acta Ecologica Sinica ,2006 ,26 (2) 364 – 372.

参考文献：

[1] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控. 北京 :科学出版社 ,2002.

[2] 李辉信 ,胡锋 ,徐盛荣. 红壤丘陵区不同利用管理方式对土壤肥力的影响. 土壤通报 ,1996 ,27 (3) :114 ~ 116.

[3] 梁音 ,张桃林 ,史德明. 南方红壤丘陵区土壤侵蚀评价. 红壤生态系统研究 ,第三集. 北京 :中国农业科技出版社 ,1995.

[4] 余作岳 ,彭少麟. 热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究. 广州 :广东科技出版社 ,1996.

[5] 郭晓敏 ,牛德奎 ,刘苑秋 ,等. 江西省不同类型退化荒山生态系统植被恢复重建措施. 生态学报 ,2002 ,22 (6) 878 ~ 884.

[6] 刘满强 ,胡锋 ,李辉信 ,等. 退化红壤不同植被恢复下土壤节肢动物群落特征. 生态学报 ,2002 ,22 (1) 54 ~ 61.

[7] 刘满强 ,胡锋 ,何圆球 ,李辉信 ,等. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义. 土壤学报 ,2003 ,40 (6) 937 ~ 944.

[8] 郑华 ,欧阳志云 ,王效科 ,等. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响. 生态学报 ,2004 ,24 (9) :1995 ~ 2002.

[9] 赵平. 退化生态系统植被恢复的生理生态学研究进展. 应用生态学报 ,2003 ,11 (4) 2031 ~ 2036.

[10] 吕仕洪 ,向悟生 ,李先琨 ,等. 红壤侵蚀区植被恢复研究综述. 广西植物 ,2003 ,23 (1) 83 ~ 89.

[13] 杨玉盛 ,何宗明 ,邱仁辉 ,等. 严重退化生态系统不同恢复与重建措施的植物多样性与地力差异研究. 生态学报 ,1999 ,19 (4) :490 ~ 494.

[14] 胡斌 ,段昌群 ,王震洪 ,等. 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 ,2002 ,39 (4) :604 ~ 608.

[16] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京 :农业出版社 ,1986.

[18] 毛小芳 ,李辉信 ,陈小云 ,等. 土壤线虫三种分离方法效率比. 生态学杂志 ,2004 ,23 (3) :149 ~ 151

[20] 姚槐应 ,何振立 ,黄昌勇. 红壤微生物量氮的周转期及其研究意义. 土壤学报 ,1999 ,36 (3) 387 ~ 394.

[22] 俞慎 ,李勇 ,王俊华 ,等. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨. 土壤学报 ,1999 ,36 (3) :413 ~ 422.

[24] B. A. 柯夫达著. 土壤学原理. 北京 :科学出版社 ,1983.

[25] 郝占庆 ,叶吉 ,姜萍 ,等. 长白山暗针叶林苔藓植物在养分循环中的作用. 应用生态报 ,2005 ,16 (12) 2263 ~ 2266.

[27] 薛冬 ,姚槐应 ,何振立 ,等. 红壤酶活性与肥力的关系. 应用生态学报 ,2005 ,16 (8) :1455 ~ 1458.

[28] 郑诗樟 ,吴蔚东 ,何圆球 ,等. 红壤丘陵区不同生态重建中红壤的微生物学性状. 江西农业大学学报 ,2004 ,26 (5) :792 ~ 797.

[30] 李辉信 ,刘满强 ,胡锋 ,等. 不同植被恢复方式下红壤线虫数量特征. 生态学报 ,2002 ,22 (11) :1882 ~ 1889.

[30] 李志安 ,方炜 ,吕冬梅. 鹤山丘陵 4 种土地利用类型土壤之理化性状. 生态学报 ,1995 ,15 (增刊) 93 ~ 102.

[34] 刘梦云 ,常庆瑞 ,齐雁冰 ,等. 宁南山区不同土地利用方式土壤酶活性特征研究. 中国生态农业学报 ,2006 ,14 (3) :67 ~ 70.

[35] 邱莉萍 ,张兴昌 ,张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布. 生态学报 ,2006 ,26 (2) 364 ~ 372.