

红壤侵蚀裸地不同植被恢复后林地土壤微生物特性的研究^①

王会利^{1,2}, 乔洁^{1,3}, 曹继钊², 毕利东¹, 邓欢¹, 张斌^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 广西林业科学研究院, 南宁 530001;

3 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

摘要: 本研究以中国科学院红壤生态实验站侵蚀地植被恢复试验区为依托, 调查侵蚀裸地不同植被恢复类型林地表层土壤微生物特性。结果表明: 侵蚀裸地种植植被后, 表层土壤酸化程度减小, 土壤养分含量和孔隙度显著提高, 微生物生物量增加、活性增强; 不同植被恢复类型相比, 各指标的大小顺序均为樟树>胡枝子>马尾松; 侵蚀裸地植被恢复前后表层土壤均以细菌为主, 其中马尾松林地表层土壤真菌比例最高; 植被恢复林地土壤有机 C 处于累积阶段, 土壤微生物对 C 的利用率显著提高, 但不同植被恢复类型之间无显著差异。

关键词: 侵蚀裸地; 植被恢复; 土壤呼吸速率; 微生物生物量; 麦角固醇

中图分类号: S714

土壤退化成为当今全球普遍关注的紧迫问题之一^[1], 而且也是我国面临的重大环境问题之一。而植被恢复是防止土壤退化、改良土壤功能的最有效措施之一^[2]。植被恢复过程其实也就是土壤物理性状改善、土壤养分累积和植物多样性提高的过程^[3-4]。在生态系统中, 植被是生态系统物质循环和能量交换的枢纽, 是防止生态退化的物质基础^[5], 而土壤是植物赖以生存的基础。两者之间的相互影响、相互制约的有机联系是生态系统广泛而复杂的重要关系之一。尽管土壤微生物生物量 C 仅占土壤有机 C 的 2%~4%, 但土壤微生物数量及其活性影响土壤有机质转化和养分循环, 是维持土壤质量的基础^[6]。在植被和土壤间的相互作用的过程中, 土壤微生物扮演着非常重要的角色。大量有关研究表明, 植被恢复可以显著改善退化土壤的理化性状, 提高土壤养分、微生物特性及酶活性^[7-9]。目前, 关于退化土壤植被恢复生态系统的土壤生物作用过程的研究报道较少。

我国东南部红壤丘陵区是我国热带、亚热带经济林果及名特优产品生产的重要基地, 而多年来, 由于自然与人为因素的干扰, 已成为我国水土流失范围最广、程度较高的地区, 严重程度仅次于黄土高原^[10], 环境日趋恶化, 是我国治理土壤侵蚀和水土流失的重点区域

之一。人们已经意识到红壤退化的严重性, 并在退化红壤植被恢复区开展大量的研究, 主要集中在土壤理化性质和生物性质上^[7-9]。侵蚀裸地植被恢复是一个生物学过程, 其中土壤微生物起着关键作用, 但微生物过程很少被关注。为此, 本研究以中国科学院红壤生态实验站侵蚀地植被恢复试验区为依托, 调查侵蚀裸地不同植被恢复类型林地表层土壤微生物特性, 将增强我们对土壤生物学过程的认识。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

土壤样品采自江西鹰潭刘家站中国科学院红壤生态实验站侵蚀地植被恢复试验区 (28°15'20" N, 116°55'30" E)。采样地区属于中亚热带湿润季风气候区, 年均降雨量 1794 mm, 年均温 17.6°C, >10°C 积温为 5528°C, 无霜期 262 d。土壤为发育于第四纪红黏土, 根据中国土壤系统分类^[11], 属于富铁土。土壤中黏土矿物主要以高岭土为主。

试验区为低丘岗地, 坡度 5°~8°。上世纪 60、70 年代, 调查区植被被完全砍伐, 表土出现严重侵蚀, 导致土壤母质层网纹层裸露, 1987 年人工种植马尾松、胡枝子、樟树等恢复侵蚀退化裸地。2004 年 10

①基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目 (编号: 405220130223)、"退化恢复红壤的稳定性与恢复力及影响因素研究" 和广西自治区林业局林业专项项目 "广西桉树人工林土壤肥力测定、评价及平衡施肥技术应用" 和广西林科院业务费项目 "桉树生理性缺素病症及防治措施研究" 共同资助。

* 通讯作者 (bzhang@issas.ac.cn)

月，调查马尾松 (*Pinus massoniana*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、樟树 (*Cinnamomum camphora*) 3 种植物恢复林地土壤微生物学特性，同时选取露出网纹层的侵蚀裸地 (Eroded bare land) 作为对照。

双蒸水，离心，上清液转入分液漏斗中，加 25 ml 环己烷，萃取、分液，将上层环己烷转移至浓缩瓶中，用旋转蒸发仪 40℃ 条件下蒸干，用甲醇洗浓缩瓶并定容于 1 ml 容量瓶中待测。检测仪器为高效液相色谱仪，色谱条件为色谱柱 ODS C18、流动相

①基金项目：国家自然科学基金重大国际合作项目（编号：405220130223）“退化恢复红壤的稳定性与回复力及影响因素研究”和广西区林业局林业专项项目“广西桉树人工林土壤肥力测定、评价及平衡施肥技术应用”和广西林科院业务费“桉树生理性缺素病症及防治措施研究”共同资助。

*通讯作者(bzhang@issas.ac.cn)

作者简介：王会利（1982-），女，湖北襄樊人，硕士，中级工程师，主要从事恢复生态学方面研究。E-mail: wanghui6@163.com

表层土壤样品混合，裸地为裸露的母质按 0 ~ 5 cm 采样，同时采环刀样。土壤样品用塑料袋密封带回实验室，挑去植物残根和石块，其中一部分鲜土风干过筛（100 目），用于测定土壤有机 C 和全 N 含量，另一部分鲜土过 2 mm 筛，4℃ 下保存，用于土壤呼吸速率、微生物生物量及麦角固醇的测定。

1.3 测定方法

土壤 pH 采用电位法测定，水土比为 2.5:1；孔隙度采用环刀法测定土壤体积质量（容重），根据土壤体积质量和土壤密度计算土壤总孔隙度，土壤密度取 2.65 g/cm³；土壤有机质测定采用浓硫酸重铬酸钾外加加热法；土壤全 N 测定采用半微量凯氏法；土壤微生物生物量 C、N 采用氯仿熏蒸浸提法；土壤呼吸速率采用室内密闭培养法^[12]。

麦角固醇含量：采用外标法按峰面积进行定量^[13-15]。根据土壤有机质含量称取 1 ~ 3 g 鲜土，加入 20 ml KOH-醇溶液（甲醇：乙醇=1:3），漩涡振荡，然后在水浴锅中 75℃ 皂化 1 h，冷却至室温，再加入 5 ml

响。所有统计用 SPSS 13.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

表1结果显示，与侵蚀裸地相比，经马尾松、胡枝子、樟树等植被恢复后林地表层土壤有机 C 含量分别提高了 5.2、6.7、7.6 倍，全 N 分别提高了 3.9、5.0、5.6 倍，林地表层土壤总孔隙度分别提高了 8.9%、22.2%、33.3%。不同类型植被恢复林地表层土壤有机 C、全 N 含量和土壤孔隙度的大小排列顺序均为樟树 > 胡枝子 > 马尾松。这是因为胡枝子和樟树凋落物量大，且易分解，而马尾松凋落物量少并难贴地面、分解慢。与侵蚀裸地相比，植被恢复林地土壤 pH 显著提高，但都呈酸性。这说明植被恢复降低了土壤的酸化程度。针叶树种凋落叶的灰分少，含树脂、单宁等酸性物质，致使马尾松林地土壤 pH 值比樟树和胡枝子林地低。

表 1 不同植被恢复林地表层土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils under different vegetation restorations

植被类型	表层土深度 (cm)	有机 C (g/kg)	全 N (g/kg)	总孔隙度 (%)	pH (H ₂ O)
侵蚀裸地	—	3.45 d	0.36 c	45 c	3.9 c
马尾松	2	21.24 c	1.76 b	49 b	4.2 b
胡枝子	4	26.50 b	2.16 a	55 ab	4.3 ab
樟树	3	29.64 a	2.37 a	60 a	4.6 a

注：每列字母相同表明不同植被恢复类型间的差异不显著(p<0.05)，下同。

2.2 土壤呼吸速率和微生物生物量

经植被恢复后，林地表层土壤呼吸速率显著提高（图1）。侵蚀裸地土壤呼吸量仅为 7.42 mg/(kg·d)，而侵蚀裸地经马尾松、胡枝子和樟树恢复后林地表层土

壤呼吸强度达到 51.44 ~ 87.66 mg/(kg·d)。土壤呼吸速率是衡量土壤生物活性的总指标，由此可见，植被恢复提高林地土壤的养分含量，改善了土壤水、热、气、温等状况，增强了土壤生物的活性。3 种植被类型土

壤呼吸速率的大小顺序为樟树>胡枝子>马尾松。

侵蚀裸地植被恢复前后表层土壤微生物生物量变化情况如图 2 所示。侵蚀裸地经植被恢复后,林地表层土壤微生物生物量 C、N 含量显著提高。土壤微生物生物量 C、N 含量自高向低的排列顺序是樟树>胡枝子>马尾松>侵蚀裸地。马尾松、胡枝子、樟树林

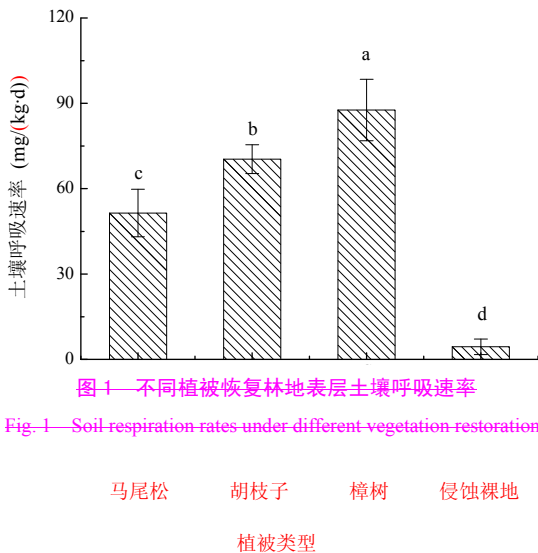
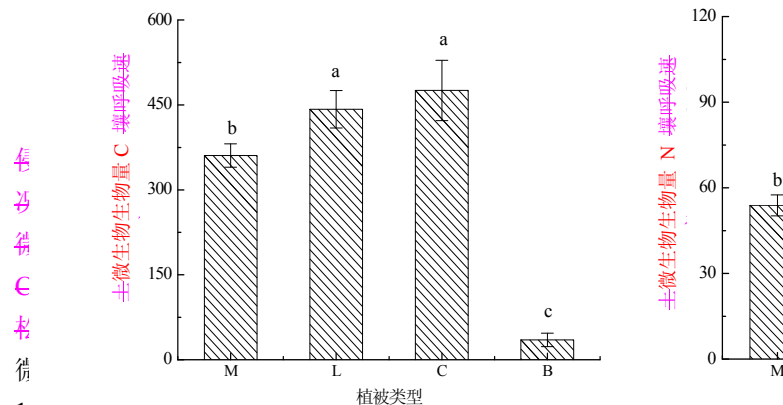


图 1—不同植被恢复林地表层土壤呼吸速率

Fig. 1—Soil respiration rates under different vegetation restorations (直方柱上标相同字母表示不同植被恢复类型间的差异不显著($p < 0.05$); M代表马尾松 (*Pinus massoniana*); L代表胡枝子 (*Lespedeza bicolor*); C代表樟树 (*Cinnamomum camphora*); B代表侵蚀裸地 (Eroded bare land)。(下同))



侵蚀裸地的 7.8、9.2、12.7倍。不同植被恢复类型对土壤微生物生物量有显著的影响。樟树和胡枝子林地表层土壤微生物生物量 C 的含量显著高于马尾松,但樟树与胡枝子相比无显著差异,仅略高于胡枝子。对表层土壤微生物生物量 N 含量而言,樟树显著高于胡枝子和马尾松,胡枝子与马尾松相比无显著差异。

2.3 土壤微生物群落结构

一般情况下,细菌 C/N 比在 5:1 左右,而真菌在 10:1 左右,放线菌在 6:1 左右^[6]。侵蚀裸地植被恢复前后土壤微生物生物量 C/N 比在 5.40~6.92 之间,说明了土壤微生物以细菌为主。与侵蚀裸地相比,植被恢复林地土壤 C_{mic}/N_{mic} 显著提高,其中胡枝子略大于马尾松,且均显著大于樟树(表 2)。

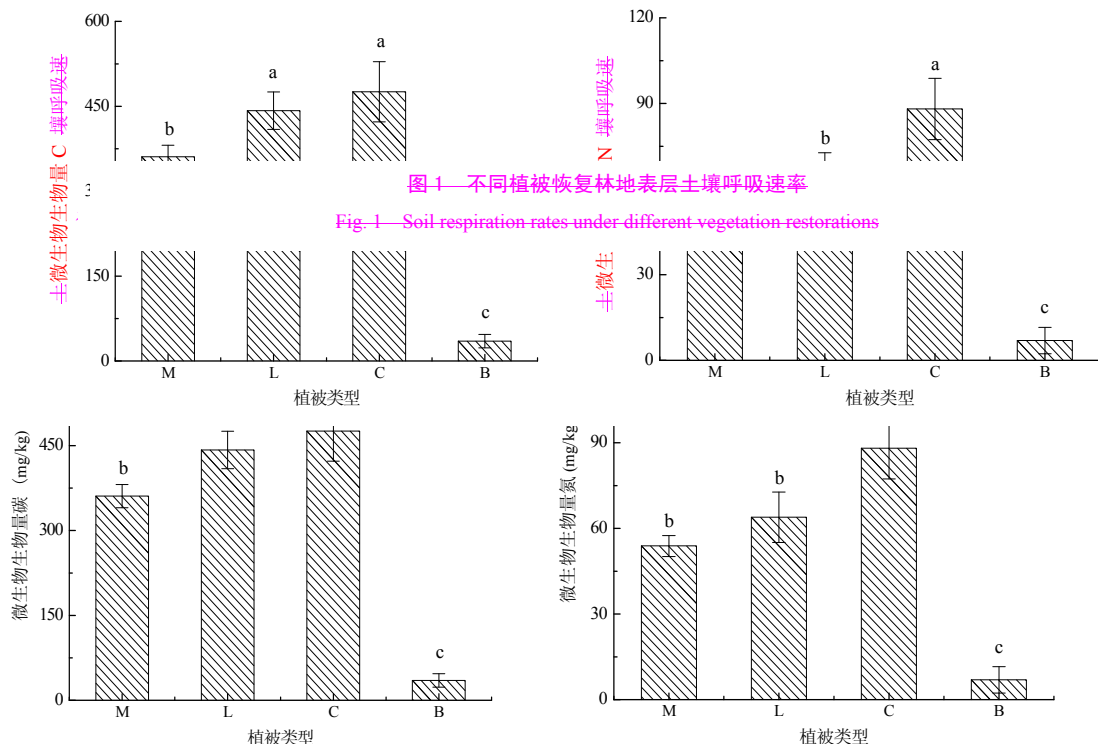


图 1—不同植被恢复林地表层土壤呼吸速率
Fig. 1—Soil respiration rates under different vegetation restorations

图 2 不同植被恢复林地土壤微生物生物量

Fig. 2 Soil microbial biomass carbon and nitrogen under different vegetations of restoration

2.3 土壤微生物群落结构

一般情况下,细菌 C/N 比在 5:1 左右,而真菌在 10:1 左右,放线菌在 6:1 左右^[16]。侵蚀裸地植被恢复前后土壤微生物生物量 C/N 比在 5.40~6.92 之间,说明了土壤微生物以细菌为主。与侵蚀裸地相比,植被恢复林地土壤 C_{mic}/N_{mic} 显著提高,其中胡枝子略大于马尾松,且均显著大于樟树(表 2)。

表 2 不同植被恢复林地表层土壤微生物生物量 C/N 比及其与有机 C、全 N 比值及微生物代谢熵

Table 2 Ratios of C_{mic} to C_{org} , N_{mic} to N_{total} and metabolic quotients under different vegetation restorations

植被类型	C_{mic}/N_{mic}	C_{mic}/C_{org} (%)	N_{mic}/N_{total} (%)	代谢熵 (mg/(g·h))
侵蚀裸地	5.05 c	1.02 b	1.93 c	3.03 a
马尾松	6.70 a	1.70 a	3.06 b	1.07 b
胡枝子	6.92 a	1.67 a	2.96 b	0.96 b
樟树	5.40 b	1.60 a	3.72 a	0.83 b

麦角固醇是真菌细胞膜中的主要固醇类物质^[17],真菌死亡后麦角固醇将迅速分解,其相对含量可以作为真菌活性的优良指标^[18-19]。侵蚀裸地植被恢复前后表层土壤麦角固醇-C 含量如图 3 所示。侵蚀裸地麦角固醇-C 含量仅为 0.11 $\mu\text{g/g}$,经马尾松、胡枝子和樟树恢复后林地表层土壤麦角固醇-C 含量显著提高,在 3.37~3.80 $\mu\text{g/g}$ 之间,分别提高 30.7、33.3、34.7 倍。不同植被恢复林地土壤麦角固醇含量之间无显著差异。

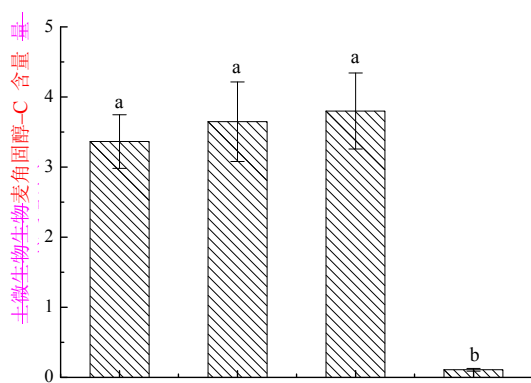


图 3—不同植被恢复林地表层土壤呼吸速率

Fig. 1—Soil respiration rates under different vegetation

图 3—不同植被恢复林地表层土壤麦角固醇-C 的含量

Fig. 3—Soil ergosterol-C concentrations under different vegetation

restorations

Fig. 3 Soil ergosterol-C concentrations under different vegetation restorations

土壤中麦角固醇-C 与微生物生物量 C 的比值含量越高,真菌在土壤微生物总量中所占的比重越大。侵蚀裸地土壤麦角固醇-C 含量极低,致使麦角固醇-C 与微生物生物量 C 的比值比较低。与樟树和胡枝子相比,马尾松林地土壤麦角固醇-C 与微生物生物量 C 的比值明显提高。马尾松的凋落物难分解,而真菌能分解纤维素、半纤维素和木质素等难分解物质,因此马尾松林地土壤真菌比较活跃,麦角固醇-C 与微生物生物量 C 的比值最高。

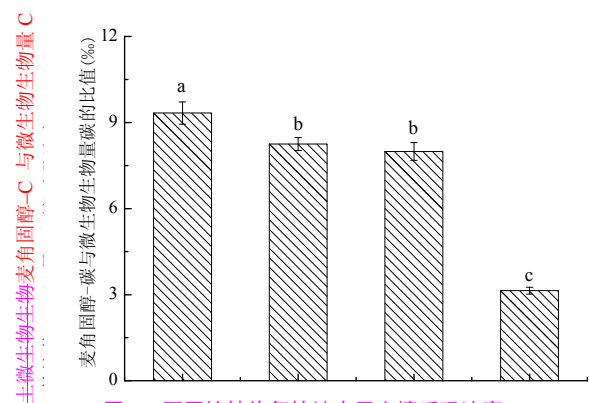


图 4—不同植被恢复林地表层土壤呼吸速率

Fig. 1—Soil respiration rates under different vegetation

restorations

图 4 不同植被恢复类型麦角固醇-C 与微生物生物量 C 的比值

Fig. 4 Ratios of soil ergosterol-C concentration to soil microbial biomass carbon under different vegetation restorations

2.4 土壤碳的累积与损失及微生物对碳的利用

C_{mic}/C_{org} 是衡量一个生态系统土壤有机 C 积累或损失的一个重要指标,该比值越高表示土壤 C 的积累越高。如表 2 所示,侵蚀裸地 C_{mic}/C_{org} 比值是 1.02%,经不同植被恢复后林地表层土壤的 C_{mic}/C_{org} 比值显著提高,其值在 1.60%~1.70% 之间变化,但不同植被恢复类型之间无显著差异。这说明侵蚀裸地经植被恢复后林地表层土壤有机 C 处于相对累积阶段。

土壤微生物代谢熵是指土壤微生物呼吸和土壤微生物生物量 C 的比率,用每克 C_{mic} 每小时释放的 CO_2-C 毫克数来表示,是衡量土壤微生物对土壤 C 利用效率的一个重要依据。一般来说,土壤熟化程度越高,土壤代谢熵逐渐减小。由表 2 可以看出,侵蚀裸地的代谢熵最大,C 的利用效率最低,植被恢复后表层土壤微生物对 C 的利用率显著提高。3 种不同植被恢复类型相比,其代谢熵的大小排列顺序为马尾松>胡枝子>樟树,马尾松林地土壤微生物对 C 的利用率最低。

3 结论

侵蚀裸地种植植被后,由于植被凋落物、根表脱落物和根系分泌物等的输入,土壤养分得到显著提高。土壤养分是维持生物分解功能所必需的,其含量提高促进了土壤生物生长,使土壤微生物数量增加,土壤微生物活性增强。从而,促进土壤有机质转化和养分循环,土壤理化性状得到改善,有利植物生长及凋落物归还。植被与土壤相互作用,促进了土壤有机 C 的增长和稳定。本研究结果证实,植被恢复林地土壤有机 C 处于相对累积阶段,土壤微生物对 C 的利用率亦得到显著提高,土壤的真菌比例提高,进一步促进了土壤有机 C 的积累与稳定。

侵蚀裸地植被恢复前后,土壤 C_{mic}/N_{mic} 比值在 5.40~6.92 之间变化,微生物均以细菌为主。植被恢复林地土壤 C_{mic}/N_{mic} 比值和土壤麦角固醇-C 与微生物生物量 C 的比值显著高于侵蚀裸地。不同植被恢复类型相比,胡枝子林地土壤 C_{mic}/N_{mic} 比值略大于马尾松,且均显著大于樟树,而马尾松林地土壤麦角固醇-C 与微生物生物量 C 的比值明显高于樟树和胡枝子。这是因为土壤 C_{mic}/N_{mic} 并不是指示土壤微生物群落

结构的敏感指标^[20],而麦角固醇被认为是指示土壤真菌含量的重要指标^[14]。

致谢:感谢南京农业大学张卫建教授和中国科学院南京土壤研究所马毅杰研究员在文章修改中提出宝贵建议。

参考文献:

- [1] Stanley SW, Pierre CUS. Soil erosion rates-myth and reality. *Science*, 2000, 289: 248-250
- [2] 杨玉盛,何宗明,林光耀,罗学升. 退化红壤不同治理模式对土壤肥力的影响. *土壤学报*, 1998, 35(2): 276-282
- [3] 谢宝平,牛德奎. 华南严重侵蚀地植被恢复对土壤条件影响的研究. *江西农业大学学报*, 2000, 22(1): 135-139
- [4] 杨玉盛,何宗明. 严重退化生态系统不同恢复和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
- [5] 吕仕洪,向悟生,李先琨,唐润琴. 红壤侵蚀区植被恢复研究综述. *广西植物*, 2003, 23 (1): 83-89
- [6] Jeffries P, Gianinazzi S, Perotto S, Turnau K, Barea JM. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37: 1-16
- [7] 刘满强,胡锋,何园球,李辉信. 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] 何园球,沈其荣,王兴祥. 红壤丘岗人工林恢复过程中的土壤养分状况. *土壤*, 2003, 35(3): 222-226
- [9] 彭新华,张斌,赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176-2183
- [10] 史德明,周伏健,徐朋. 我国南方土壤侵蚀动态与水土保持发展趋势. *福建水土保持*, 1993(3): 9-13
- [11] 龚子同等著. 中国土壤系统分类—理论·方法·实践. 北京: 科学出版社, 1999
- [12] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 2000
- [13] Morten K, Erland B. Estimation of conversion factors for fungal biomass determination in compost using ergosterol and PLFA 18:2 ω 6,9. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 57-65
- [14] Montgomery HJ, Monreal CM, Young JC, Seifert KA. Determination of soil fungal biomass soil ergosterol analyses. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1207-1217
- [15] Eash NS, Stahl PD, Parkin TB, Karlen DL. A simplified method for extraction of ergosterol from soil^[14]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 60: 468-471

- [16] 姜培坤, 周国模. 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, 2003,17(1):112-114, 127
- [17] Weete AD. Structure and function of sterols in fungi. *Advance in Lipid Research*, 1989, 23: 115-167
- [18] West AW, Grant WD. Use of ergosterol, diaminopimelic acid and glucosamine contents of soils to monitor changes in microbial populations. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19: 607-612
- [19] Davis MW, Lamar RT. Evaluation of methods to extract ergosterol for quantification of soil fungus biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24: 189-198
- [20] Joergensen RG, Seheu S. Depth gradients of microbial and chemical properties in moder soils under beech and spruce. *Pedobiology*, 1999, 43: 134-144

Soil Microbial Characteristics under Different Vegetations Restoration on a Severely Eroded Red Soil

WANG Hui-li^{1,2}, QIAO Jie^{21,3}, CHAO Ji-zhao⁴², BI Li-dong²¹, DENG Huan²¹, ZHANG Bin^{21-*}

(1-Guangxi Academy of Forestry Sciences, Nanning 530001, China; Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 Guangxi Academy of Forestry Sciences, Nanning 530001, China; Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

3 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: This study reports the effects of different vegetation restoration on soil microbial characteristics, based on a long-term experiment established in 1987 at the Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences. This experiment included different types of vegetation planted on eroded bare land. The results showed that soil pH, soil nutrients, soil total porosity, soil microbial biomass and soil respiration rate increased significantly under different vegetations restoration compared with the eroded bare land. The concentrations of indices measured under *Cinnamomum camphora* were higher than that under *Lespedeza bicolor*, *Pinus massoniana* forest had the lowest the concentrations of indices measured. Soil microbial community was mainly composed of bacteria in all treatments. The ratio of ergosterol-C to microbial biomass carbon was the highest under *Pinus massoniana* among all treatments. Soil organic matter accumulated with vegetation restoration land. At the same time, the availability of carbon for soil microbe increased significantly, but not significantly different among vegetation types.

Key words: Eroded bare land, Vegetation restoration, Soil respiration rate, Soil microbial biomass, Ergosterol

注: 请将文中所有原图件激活, 以便排版人员能打开图件进行线条和图例等的统一性修改和文字编辑
——英文摘要中作者单位排序与文章中作者单位排序标注不一致