

不同森林恢复方式对我国南方红壤区土壤质量的影响*

王芸 欧阳志云** 郑华 曾静 陈法霖 张凯

(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)

摘要 2008—2009年在我国南方红壤区,研究了3种典型森林恢复方式(自然恢复的天然次生林、人工恢复的本地种马尾松人工林和引进种湿地松人工林)对林地土壤质量的影响。结果表明:天然次生林的土壤含水量、土壤容重、土壤粒径构成、土壤全碳、全氮、全磷、有机碳、速效氮、速效磷、速效钾含量均优于两种人工林。综合土壤物理性状、化学性状和微生物性状得到土壤质量综合指数。天然次生林土壤的综合质量指数(1.20 ± 0.10)显著高于马尾松人工林(0.59 ± 0.03)和湿地松人工林(0.59 ± 0.06),而两种人工林之间差异不显著。在我国南方红壤区,自然恢复的天然次生林土壤质量优于人工恢复的马尾松林和湿地松林。

关键词 森林恢复方式 生态系统服务 土壤质量 主成分分析 红壤区

文章编号 1001-9332(2013)05-1335-06 **中图分类号** S158.3 **文献标识码** A

Effects of different forest restoration approaches on the soil quality in red soil region of Southern China. WANG Yun, OUYANG Zhi-yun, ZHENG Hua, ZENG Jing, CHEN Fa-lin, ZHANG Kai (State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(5): 1335-1340.

Abstract: In 2008-2009, an investigation was conducted on the effects of three typical forest restoration approaches, *i. e.*, naturally restored secondary forest, artificially restored native species *Pinus massoniana* plantation (Masson pine plantation), and introduced species *Pinus elliottii* plantation (slash pine plantation), on the soil quality in red soil region of Southern China. The results showed that the soil moisture content, bulk density, particle composition, and the contents of total carbon (C), total nitrogen (N), total phosphorus (P), organic C, available N, available P, and available potassium (K) in natural secondary forest were all superior to those in artificial plantations. The soil physical, chemical, and microbial properties were integrated into a soil quality index, which was significantly higher (1.20 ± 0.10) in natural secondary forest than in Masson pine plantation (0.59 ± 0.03) and slash pine plantation (0.59 ± 0.06). Our results suggested as compared with the restoration with native species *P. massoniana* and with introduced *P. elliottii*, natural restoration could be a better forest restoration approach to improve the soil quality in red soil region of Southern China.

Key words: forest restoration approach; ecosystem services; soil quality; principal component analysis; red soil region.

森林恢复是一个投资大、耗时长工程。森林恢复方式决定了生态系统服务水平的高低,因而森林恢复方式的选择至关重要。土壤肥力维持功能是生

态系统功能的重要内容^[1-2],合理的森林恢复方式能够改善土壤理化性状^[3-4],进而提高生态系统服务功能^[5-6]。

当前关于森林恢复对土壤肥力影响的研究多集中于不同演替阶段^[7-8],针对不同恢复方式土壤肥力差异的研究较少^[4]。研究表明,纯林或非本地种植会造成森林土壤肥力的降低^[4,9-10],乃至森林生态系统服务功能的下降^[10-11]。次生林的土壤质量

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN406)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC09B07-2)、国家自然科学基金项目(40871130)和中国博士后基金项目(2012M520406)资助。

** 通讯作者。E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

2012-07-03 收稿,2013-02-20 接受。

优于人工营造的混交林^[12]. 自然恢复的森林生态系统具有较高的土壤肥力^[8,13], 生态系统服务功能较高^[5,10-11]. 而这些研究大都集中在一个较小的区域, 或者指标较少或单一. 扩大研究范围, 综合分析土壤理化性质和微生物性质, 可以更好地揭示森林恢复引起的土壤质量变化.

红壤本身较高的粘粒含量及其所处的地理位置^[13], 导致其易于受侵蚀, 在红壤区研究森林恢复方式对土壤质量的影响具有重要意义. 本地种马尾松 (*Pinus massoniana*) 适应能力强, 是我国分布最广的松科植物^[14]; 引进种湿地松 (*Pinus elliottii*) 生长快、材质好, 在我国得以大面积种植. 马尾松人工林和湿地松人工林的面积占我国人工林总面积的 59%^[15]. 本文在我国南方红壤区, 研究了本地种马尾松人工林恢复、引进种湿地松人工恢复和自然恢复 3 种森林恢复方式土壤质量的差异, 旨在阐明不同森林恢复方式对土壤肥力维持功能的影响, 为我国南方红壤区的森林恢复提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区设在我国湖南省衡阳县、江西省安福县和广西省的桂林地区 (24. 890°—27. 318° N, 110. 150°—114. 549° E). 研究区属亚热带湿润季风气候, 年均气温 18. 4 °C, 最高气温 5. 4 °C, 最低气温 5. 8 °C, 年降水量 1452 ~ 1950 mm, 降雨集中在 5—8 月, 无霜期 270 d. 土壤属于红壤, 自然植被为亚热带常绿阔叶林.

1.2 样地设置及土壤取样

采用单因素随机试验设计: 森林恢复方式设置 3 个水平, 自然恢复 (天然次生林, NF)、本地种人工恢复 (马尾松人工林, MP) 和引进种人工恢复 (湿地松人工林, SP). 每种森林恢复方式选取 15 个样地, 所选样地的恢复时间约 20 年. 其中, 天然次生林自恢复后人为干扰较少; 马尾松人工林和湿地松人工林在最初种植的 3 ~ 4 年抚育一次, 包括乔木下表土疏松和林下植被的砍伐, 以后不再进行人工管理.

每个样地选取 3 个 10 m × 10 m 样方, 每个样方中按“S”形于 0 ~ 10 cm 深度取 5 个土样^[16], 取样孔距离优势树种主干 50 cm^[17], 并把土样混合为一个样品, 共取土样 135 份, 放在冰盒中运回实验室. 土样过 2 mm 筛后, 一部分放在 4 °C 冰箱中, 用于土壤微生物生物量和微生物碳源代谢功能分析, 另一部分风干后, 用于土壤理化性状分析.

1.3 分析方法

土壤全碳和全氮含量采用元素分析仪 (Vario EL III, Germany) 完成; 土壤颗粒组成用激光粒度仪 Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, Malvern, England) 测定^[18]; 土壤 pH 值采用 1 : 5 的土水比混合后, 玻璃电极测定; 土壤全磷、全钾、有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量均采用常规方法^[19]. 土壤微生物生物量碳和碳源代谢功能的测定参见文献^[20].

1.4 数据处理

土壤粒级采取美国制^[21], 并通过土壤粒级组成由式 (1) 计算土壤分形维数 (D)^[22].

$$\frac{V(r < R_i)}{V_t} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: $V(r < R_i)$ 为小于某一径级 R_i 的土壤粒级的体积; V_t 为所有径级的土壤体积总和; R_{\max} 为土壤径级的最大值.

综合土壤理化性状、土壤微生物生物量碳和微生物碳源利用丰富度和香农多样性指数, 计算土壤肥力综合质量指数 (Q_i)^[23]:

$$Q_i = \sum W_i Q(x_i) \quad (2)$$

式中: W_i 为指标权重; $Q(x_i)$ 为指标的隶属度.

容重、粘粒、分形维数采用降型分布函数, 其高值通常表示土壤质量的退化^[23].

$$Q(x_i) = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

土壤化学性状和微生物性状采用升型分布函数^[22]:

$$Q(x_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

式中: X_{\max} 和 X_{\min} 分别为土壤第 i 个指标的最大值和最小值; X_i 为第 i 个指标的值.

土壤微生物性状包括土壤微生物生物量碳、微生物碳源利用多样性和丰富度指数^[20].

1.5 数据处理

采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 分析恢复方式对土壤性状是否有显著影响 ($\alpha = 0.05$). 当森林恢复方式对土壤性状影响显著时, 采取 Turkey 距离进行多重比较. 用主成分分析法确定因子权重. 单因素方差分析和主成分分析均通过 SPSS 16.0 软件实现; 采用 SigmaPlot 软件作图.

2 结果与分析

2.1 不同森林恢复方式的土壤物理性状

土壤粒级分布影响着土壤的肥力状况、水力特

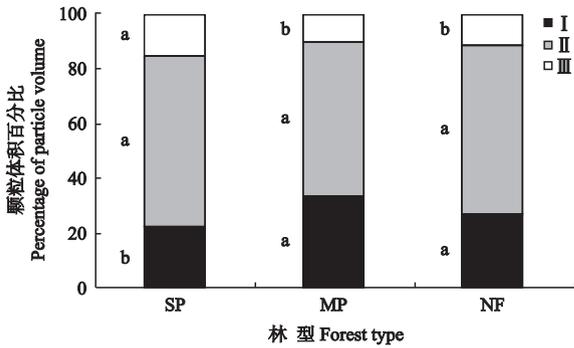


图1 不同林型的土壤粒径构成

Fig.1 Soil particle composition of different forest types ($n = 15$, mean \pm SE).

SP: 湿地松人工林 Slash pine plantation; MP: 马尾松人工林 Masson pine plantation; NF: 天然次生林 Natural secondary forest. 同一指标不同小写字母表示不同恢复方式间的差异显著 ($P < 0.05$) Different letters of the same index meant significant difference between forest restoration approaches. 下同 The same bellow. I: 粘粒 Clay ($< 2 \mu\text{m}$); II: 粉粒 Silt ($20 \sim 50 \mu\text{m}$); III: 砂粒 Silt ($50 \sim 2000 \mu\text{m}$).

性及侵蚀等,是重要的土壤物理特性之一^[18]. 单因素方差分析表明,不同森林恢复方式显著影响林地的土壤粒径分布(图1). 引进种湿地松人工林(SP)的土壤粘粒含量显著高于天然次生林(NF)和本地种马尾松人工林(MP);马尾松人工林的土壤砂粒含量高于天然次生林和湿地松人工林,其中两种人工林之间差异显著;而土壤粉粒含量在不同森林恢复方式之间无显著差异.

土壤分形维数是反映人为扰动情况下土壤粒径分布的较好指标^[18,24]. 由图2可以看出,恢复方式显著影响土壤分型维数:湿地松人工林的土壤分型维数高于马尾松人工林和天然次生林,其中湿地松人工林与天然林之间差异显著. 天然次生林的土壤含水量显著高于湿地松人工林和马尾松人工林,两种人工林之间差异不显著. 天然次生林的土壤容重显著低于湿地松人工林和马尾松人工林,两种人工林之间差异不显著.

2.2 不同森林恢复方式的土壤化学性状

2.2.1 土壤全量养分和 pH 值

由图3可以看出,天然次生林土壤的全碳、全氮含量显著高于湿地松人工林和马尾松人工林,两种人工林之间无显著差异;天然次生林土壤全磷含量显著高于湿地松人工林,其他森林恢复方式之间无显著差异;土壤全钾含量变化范围为 $(7.9 \pm 0.8) \sim (8.9 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,不同恢复方式的土壤全钾含量无显著差异. 3种森林类型的土壤 pH 值为 $(4.34 \pm 0.07) \sim (4.39 \pm 0.10)$,不同森林恢复方式土壤 pH 值差异不显著.

2.2.2 土壤有机质和速效养分含量

维持土壤有机质含量是森林恢复的一个重要标准^[25]. 天然次生林中土壤有机质含量 $(28.4 \pm 2.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ 显著高于马尾松人工林 $(17.1 \pm 1.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ 和湿地松人工林 $(17.4 \pm 1.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$,两种人工林之间无显著差异(图3).

天然次生林土壤速效氮含量 $(203.3 \pm 22.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 显著高于马尾松人工林 $(83.5 \pm 6.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 和湿地松人工林 $(83.3 \pm 8.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$. 土壤速效氮、速效磷和速效钾含量表现为相同的规律,即天然次生林显著高于马尾松人工林和湿地松人工林,两种人工林之间无显著差异.

2.3 不同森林恢复方式的土壤质量

综合以上土壤理化性状以及土壤微生物性状(微生物生物量碳、Biolog 碳源利用丰富度和碳源利用强度),进行主成分分析. 共提取到4个主成分,能解释所涉及土壤性质变异的79.6%. 各个指标的权重如表1所示,其中速效氮权重最大,其次为速效磷和微生物碳源利用强度.

天然次生林的土壤综合质量指数 (1.20 ± 0.10) 显著高于马尾松人工林 (0.59 ± 0.03) 和湿地松人工林 (0.59 ± 0.06) ,两种人工林之间差异不显著(图4).

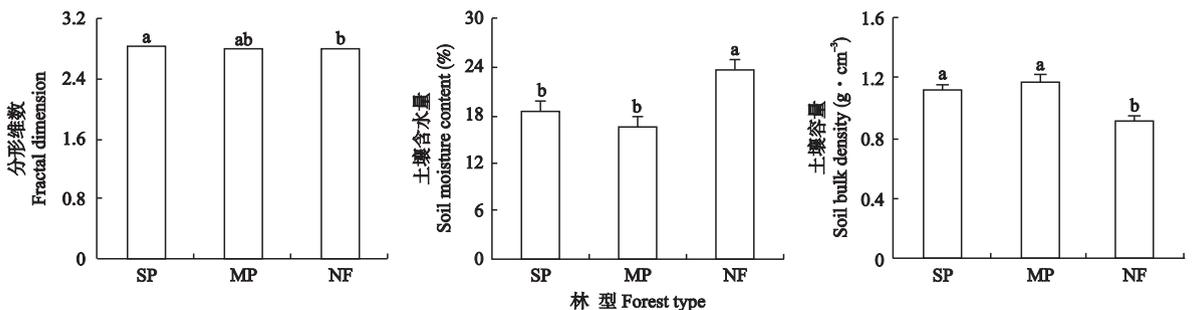


图2 不同林型的土壤物理性状

Fig.2 Soil physical properties of different forest types ($n = 15$, mean \pm SE).

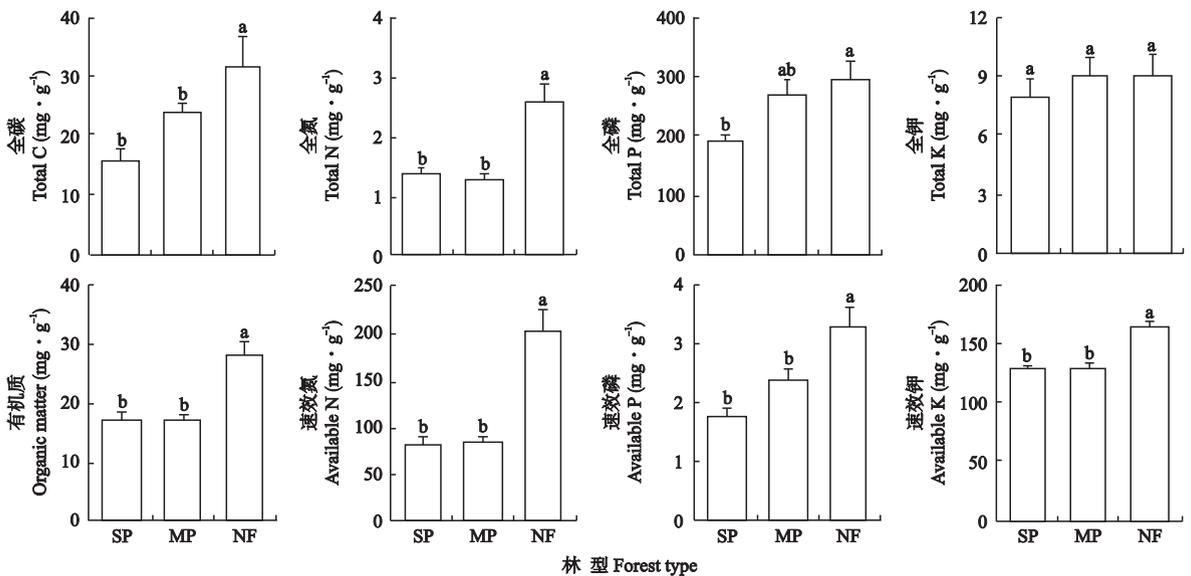


图3 不同林型的土壤化学性质

Fig. 3 Soil chemical properties of different forest types ($n = 15$, mean \pm SE).

表1 土壤各指标权重

Table 1 Weight of each soil property

Clay	Silt	Sand	FD	pH	TC	TN	TP	AN	SOC	AP	AK	MBC	CR	CI
0.030	0.044	-0.027	0.007	0.087	0.194	0.207	0.174	0.221	0.160	0.215	0.187	0.177	0.196	0.209

Clay: 粘粒; Silt: 粉粒; Sand: 砂粒; FD: 分型维数 Fractional dimension; TC: 全碳 Total carbon (C); TN: 全氮 Total nitrogen (N); TP: 全磷 Total phosphorus (P); AN: 有效氮 Available N; SOC: 有机碳 Organic C; AP: 速效磷 Available P; AK: 速效钾 Available potassium; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass C; CR: 碳源利用丰富度 C source utilization richness; CI: 碳源利用强度 C source utilization intensity.

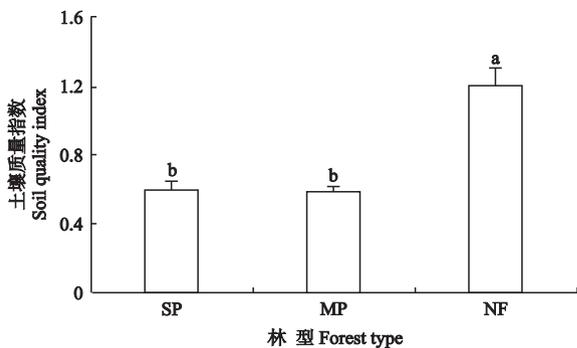


图4 不同林型的土壤质量指数

Fig. 4 Soil quality index of different forest types ($n = 15$, mean \pm SE).

3 讨论

以往关于森林恢复方式对土壤质量影响的研究大多在一个较小的区域内进行^[3,13],没有排除由地点所产生的生物和非生物因素的影响^[5].本研究扩大了研究范围,并且综合考虑了土壤理化性状和微生物性状,更全面地反映了不同森林恢复方式对红壤土壤质量的影响.

3.1 森林恢复方式对土壤物理性状的影响

凋落物在土壤团聚体乃至空隙的形成中起重要

作用,并且土壤容重与凋落物失重率有负相关关系^[26].天然次生林较高的凋落物量和凋落物分解速率^[26-27],可能是其容重较低的重要原因.天然次生林的土壤含水量显著高于两种人工林,可能与天然次生林较高的植被盖度^[20]、较大的凋落量有关^[26-27],从而提高了天然次生林凋落物的分解速率^[26-27].

土壤中细颗粒物伴随着养分容易受水蚀而发生流失,湿地松人工林较高的土壤粘粒含量导致的侵蚀高于其他两种恢复方式.且湿地松人工林的水土流失量显著高于天然次生林^[10].研究表明,土地利用方式影响土壤分形维数^[18].本研究中,森林恢复方式也显著影响了土壤分形维数,湿地松人工林的土壤分形维数显著高于马尾松人工林.这可能与湿地松人工林的粘粒含量较高有关^[19,24].

3.2 森林恢复方式对土壤化学性状和综合质量指数的影响

本研究中天然次生林的土壤化学性状以及土壤综合质量指数显著高于两种人工林,马尾松人工林的土壤质量指数略高于湿地松人工林.这与以前的研究有相似之处:在南方亚热带地区,由于土壤物理

性状的破坏,凋落物质量和微生物功能下降,导致人工恢复的油茶林和湿地松林土壤肥力低于自然恢复的天然次生林^[13];在我国秦岭山系,天然次生林的土壤理化性状优于油松(*Pinus tabulaeformis*)林^[3];在黄土丘陵区,人工林土壤水分及土壤养分含量相对较低,而封禁自然恢复的植物群落土壤水分及养分含量相对较高^[8],自然恢复的灌木层因具有“肥岛效应”而土壤质量最高^[23]。

不同森林恢复方式具有独特的自肥机制^[25],森林恢复通过根系分泌物、根系脱落物、植物残体和凋落物的种类、数量、质量和凋落时间等因素影响土壤质量^[26-27]。本研究中,马尾松和湿地松松针具有较高的几丁质含量、较低的氮含量和释放速率,导致其分解速率较低^[28]。天然次生林凋落物的量以及分解速率高于湿地松人工林^[27,29],马尾松松针的分解速率高于湿地松松针的分解速率^[28]。因而,与两种人工林相比,天然次生林的地上部分植物向土壤输入更多的养分,马尾松人工林比湿地松人工林输入的养分量更多,土壤微生物生物量和碳源代谢能力更高^[20],进而导致其全量养分含量更高。天然次生林较好的土壤理化性状和微生物性状导致其具有较高的土壤综合质量指数。因而,天然次生林较高的凋落物数量和质量以及根系是其维持较好土壤质量的重要途径^[26-27]。

3.3 对森林恢复的启示

在我国南方红壤区,自然恢复的土壤质量优于人工恢复,本地种马尾松人工恢复和引进种湿地松人工恢复的土壤质量相差不大。郑华等^[13,27]基于较小区域的长期定位试验表明,天然次生林的土壤质量优于人工恢复林。本研究扩大了研究范围和取样数量,包含了更多的土壤肥力变异,更能代表区域上森林恢复方式对土壤质量的影响,结果更具有普适性。

本研究得出森林恢复的启示与以前自然恢复的理念有相似之处:对弃耕地不进行干扰^[30],提倡自然恢复^[10,24]。Chazdon^[5]指出,自然恢复的成本最低,见效最快,生态系统服务功能最高,本地种恢复次之,以林产品为目标的商业化恢复最差;本地种植也在景观管理^[31]和森林恢复^[32]中被推崇,以使生态风险最小化。还有研究指出,应采取包括自然恢复和以本地种为主的人工恢复相结合的综合恢复措施^[32-33]。Benayas等^[6]进一步指出,森林生态恢复方式取决于土壤恢复的程度、残留的植被以及恢复目标,即应综合考虑土壤物理条件、生物多样性的临界

水平和可提供种源的景观基底值^[4,32]。如在极度退化的热带地区,必需实施人工辅助恢复,营造多树种的混交林优于先锋林和光裸地^[4]。

4 结 论

在我国南方红壤区,天然次生林的土壤含水量、土壤容重、土壤粒径构成、土壤全量养分、速效养分都优于两种人工林,马尾松人工林和湿地松人工林之间差异不显著。综合土壤物理性状、化学性状和微生物性状,得到土壤质量综合指数。自然恢复的天然次生林土壤综合质量指数(1.20±0.10)显著高于马尾松人工林(0.59±0.03)和湿地松人工林(0.59±0.06),两种人工林之间差异不显著。总之,在我国南方红壤区,自然恢复的天然次生林土壤质量显著优于人工恢复的本地种马尾松林和引进种湿地松人工林。

参考文献

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-260
- [2] Ouyang Z-Y (欧阳志云), Wang X-K (王效科), Miao H (苗 鸿). A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(5): 607-613 (in Chinese)
- [3] Zhang KR, Dang HS, Tan SD, *et al.* Vegetation community and soil characteristics of abandoned agricultural land and pine plantation in the Qinling Mountains, China. *Forest Ecology and Management*, 2010, **259**: 2036-2047
- [4] Ren H (任 海), Li Z-A (李志安), Shen W-J (申卫军), *et al.* The changes of biodiversity and ecosystem services in forest restoration process in southern China. *Science in China Series C: Life Sciences* (中国科学C辑·生命科学), 2006, **36**(6): 563-569 (in Chinese)
- [5] Chazdon RL. Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 2008, **320**: 1458-1460
- [6] Benayas JMR, Newton AC, Diaz A, *et al.* Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis. *Science*, 2009, **325**: 1121-1124
- [7] Wen Z-M (温仲明), Jiao F (焦 峰), Liu B-Y (刘宝元), *et al.* Natural vegetation restoration and soil nutrient dynamics of abandoned farmlands in forest-steppe zone on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2025-2029 (in Chinese)
- [8] Jiao J-Y (焦菊英), Jiao F (焦 峰), Wen Z-M (温仲明). Soil water and nutrients of vegetation communities under different restoration types on the hilly-gullied

- Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(5): 667-674 (in Chinese)
- [9] Tian D-L (田大伦), Xiang W-H (项文化), Yan W-D (闫文德). Comparison of biomass dynamic and nutrient cycling between *Pinus massoniana* plantation and *Pinus elliottii* plantation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(10): 2207-2210 (in Chinese)
- [10] Zheng H, Chen FL, Ouyang ZY, *et al.* Impacts of reforestation approaches on runoff control in the hilly red soil region of Southern China. *Journal of Hydrology*, 2008, **356**: 174-184
- [11] Zheng H, Ouyang ZY, Wang XK, *et al.* Effects of regenerating forest cover on soil microbial communities: A case study in hilly red soil region, Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2005, **217**: 244-254
- [12] Yi H-Y (易海燕), Gong Y-B (宫渊波), Chen L-W (陈林武), *et al.* Soil nutrient status and microbiological properties in the mountain forests/arid valley ecotone in the upper reaches of Minjiang River after converting farmland to forest. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2010, **17**(2): 130-135 (in Chinese)
- [13] Zheng H, Ouyang ZY, Wang XK, *et al.* How different reforestation approaches affect red soil properties in Southern China. *Land Degradation & Development*, 2005, **16**: 387-396
- [14] Mo J-M (莫江明), Peng S-L (彭少麟), Brown S, *et al.* Response of biomass production to human impacts in a pine forest in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(2): 193-200 (in Chinese)
- [15] Ren H, Shen WJ, Lu HF, *et al.* Degraded ecosystems in China: Status, causes, and restoration efforts. *Landscape and Ecological Engineering*, 2007, **3**: 1-13
- [16] Meyer C, Baer S, Whiles M. Ecosystem recovery across a chronosequence of restored wetlands in the Platte River valley. *Ecosystems*, 2008, **11**: 193-208
- [17] Saetre P, Bååth E. Spatial variation and patterns of soil microbial community structure in a mixed spruce-birch stand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 909-917
- [18] Wang D, Fu BJ, Zhao WW, *et al.* Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2008, **72**: 29-36
- [19] Bao S-D (鲍士旦). *Soil and Agricultural Chemical Analysis*. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [20] Wang Y, Ouyang ZY, Zheng H, *et al.* Carbon metabolism of soil microbial communities of restored forests in Southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**: 789-799
- [21] Huang C-Y (黄昌勇). *Soil Science*. Beijing: China Agriculture Press, 2001 (in Chinese)
- [22] Tyler SW, Wheatcraft SW. Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**: 362-369
- [23] Fu BJ, Liu SL, Chen LD, *et al.* Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape. *Ecological Research*, 2004, **19**: 111-118
- [24] Liu X, Zhang GC, Heathman GC, *et al.* Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China. *Geoderma*, 2009, **154**: 123-130
- [25] Li M-B (黎孟波), Zhang X-W (张先婉). Evaluation of soil fertility based on physical and chemical characteristics// Zhang X-W (张先婉), ed. *Progress in Soil Fertility*. Beijing: China Science and Technology Press, 1991: 208-213 (in Chinese)
- [26] Lin B (林波), Liu Q (刘庆), Wu Y (吴彦), *et al.* Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in subalpine coniferous forests of western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2003, **9**(4): 346-351 (in Chinese)
- [27] Zheng H (郑华), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Wang X-K (王效科), *et al.* Effects of forest restoration types on soil quality in red soil eroded region, Southern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(9): 1994-2002 (in Chinese)
- [28] Zhang T-P (张太平), Ren H (任海), Peng S-L (彭少麟), *et al.* The ecological and biological characteristics of *Pinus elliottii*. *Ecological Science* (生态科学), 1999, **18**(2): 8-12 (in Chinese)
- [29] Chen F-L (陈法霖), Jiang B (江波), Zhang K (张凯), *et al.* Relationships between initial chemical composition of forest leaf litters and their decomposition rates in degraded red soil hilly region of South China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(3): 565-570 (in Chinese)
- [30] Zhang JT, Dong YR. Factors affecting species diversity of plant communities and the restoration process in the loess area of China. *Ecological Engineering*, 2010, **36**: 345-350
- [31] Hedman CW, Grace SL, King SE. Vegetation composition and structure of southern coastal plain pine forests: An ecological comparison. *Forest Ecology and Management*, 2000, **134**: 233-247
- [32] Parrotta JA, Turnbull JW, Jones N. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forest Ecology and Management*, 1997, **99**: 1-7
- [33] Melillo JM, Aber JD, Muratore JF. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, **63**: 621-626

作者简介 王芸,女,1982年生,博士.主要从事土壤微生物生态学研究. E-mail: wangyunsd@yahoo.cn

责任编辑 李凤琴