

退化红壤重建森林初期细根特征及其作用机理研究^{*}刘苑秋^{1* * *} 罗良兴² 刘亮英¹ 杨家林³ 夏晓兰¹⁽¹⁾ 江西农业大学林学院, 南昌 330045; ⁽²⁾ 江西省泰和县林业局, 泰和 343700; ⁽³⁾ 南昌市林业局, 南昌 330000)

【摘要】 以江西泰和严重退化红壤上不同模式重建的森林第 10 年森林生态系统为对象, 分析了细根分布特征及其与土壤性状相关性。结果表明, 各重建森林模式的土壤细根主要分布在 0~ 20 cm 土层, 占 0~ 40 cm 土层的 73. 39% ~ 87. 41%; 不同重建森林模式细根的营养贮量有较明显差异, 中等栽植密度晚松纯林细根的全 N、全 P 和全 K 贮量远远高于其它林地, 细根中全 N、全 P、全 K、Ca、Mg 贮量分别达 84. 47、5. 55、38. 42、17 和 10. 76 kg·hm⁻²; 土壤有机质、全 N、有效 N、有效 K、pH 值与细根现存量相关显著 ($P < 0. 05$), 细根对物理性状的影响主要体现在毛管孔隙度和总孔隙度上; 植物细根显著提高了 > 5 mm 土壤水稳性团聚体及 > 0. 25 mm 水稳性团聚体含量, 从而增加了土壤结构的稳定性; 土壤细根与土壤细菌和微生物总数相关性显著。

关键词 退化红壤 重建森林 细根 作用机理

文章编号 1001- 9332(2005) 09- 1735- 05 中图分类号 S728. 1 文献标识码 A

Fine root character and its action mechanism of forest at its initial reestablished stage on degraded red soil.

LIU Yuanqiu, LUO Liangxing, LIU Liangying, YANG Jialin, XIA Xiaolan (Forestry College of Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(9): 1735~ 1739.

This paper studied the fine root character and its action mechanism of forest reestablished by different models for 10 years on a seriously degraded red soil, and analyzed their correlation with soil property. The results showed that fine roots mostly distributed in 0~ 20 cm soil layer, accounted for 73. 39% ~ 87. 41% of those in 0~ 40 cm soil layer. There were notable differences in nutrient storage of fine roots under different reestablishment models. The fine roots of medium density pure *Pinus serotina* forest had a much higher storage of total nitrogen, phosphorus and potassium, with the content of total nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium being 84. 47, 5. 55, 38. 42, 17. 00 and 10. 76 kg·hm⁻², respectively. Soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available potassium and pH had significant correlations with fine root biomass ($P < 0. 05$). The effects of fine roots on soil physical properties mainly reflected on soil capillary porosity and total porosity. Fine roots obviously increased the contents of > 0. 25 mm and > 5 mm soil waterstable aggregates, and improved soil structure stability. The correlations between fine roots and soil bacteria and microbial quantities were significant.

Key words Degraded red soil, Forest reestablishment, Fine root, Action mechanism.

1 引言

根系特别是细根在森林生态系统的养分循环、地力维持及土壤结构改善中起着重要作用^[10, 13, 14, 23]。细根周转对土壤 N 和 C 的贡献比枯落物大 18% ~ 58%, 对土壤有机质的积累, 细根的 C 贡献可能大于地上部分^[18]。地下凋落物占总输入(细根生产和地上枯落物输入)的 6. 2% ~ 88. 7%, 平均 50% 左右^[1]; 细根周转直接参与森林生态系统养分循环过程^[6, 28], 在生产力分配中有重要作用^[3, 9, 19]。小于 1 mm 的植物根系能够显著增强黄土的抗冲性, 而地上部分对土壤抗冲性却无显著效果^[11]。由此可见, 退化红壤生态系统恢复与重建过程将与细根的生长密切相关。以往对恢复与重建生态系统的研究侧重于系统的地上部分, 对地下部分特别是细根的研究则往往因量小且较难研究而被忽

略^[5]。因此, 研究退化生态系统的恢复与重建过程中的根系特别是细根的特征(包括系统内细根的分布、生物量、养分贮量及其周转规律)及其与土壤结构稳定性、土壤微生物、土壤化学特性的相关性, 对于进一步揭示红壤区退化生态系统恢复与重建的生态过程及根系作用机理具有重要的理论和实际意义。

2 材料与方法

2.1 供试材料

试验地位于江西省中部的泰和县螺溪乡(26°44'N, 115°04'E), 为吉泰盆地的重要组成部分。该地属于亚热带季风湿润性气候, 土壤为第四纪红粘土发育的红壤, 地类属典型的

* 国家自然科学基金项目(30371150)和江西省自然科学基金资助项目(0230037)。

* * 通讯联系人。

2004- 08- 17 收稿, 2005- 03- 07 接受。

表 1 样地基本情况
Table 1 General situation of experimental plots

样地号 Plot No.	重建模式 Rehabilitation model	栽植密度 Density (plant·hm ⁻²)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	平均胸径 Average DBH (cm)	平均地径 Average basal diameter (cm)	平均树高 Average height (cm)	平均冠幅 Average crown width (m)
泰 5 Tai 5	A	9 990	3.70	S	< 10	6.71	8.99	425	1.68
泰 13 Tai 13	B	1 665	12.1	W	12	11.20	15.57	593	2.82
泰 15 Tai 15	C	1 850	0.84	N	15	7.27	8.2	462	2.12
泰 42 Tai 42	A	4 995	12.3	N	13	8.36	10.56	518	1.35
泰 54 Tai 54	D	2 501	14.2	E	< 10	4.93	10.13	430	2.48
泰 66 Tai 66	E	4 995	14.0	S	< 10	6.43	9.31	574	1.93
						8.17	11.76	468	1.79
泰 78 Tai 78	F	2 501	14.9	E	< 10	4.34	4.43	244	1.78
泰 83 Tai 83	G	2 501	10.7	S	< 10	5.13	7.55	486	3.08
						9.47	13.65	461	2.54

A: 晚松纯林 *Pinus serotina* pure forest; B: 湿地松纯林 *P. elliotii* pure forest; C: 桉树纯林 *Liquidambar formosana* pure forest; D: 木荷纯林 *Schima superba* pure forest; E: 枫香×马尾松混交林 *Liquidambar formosana* × *P. massoniana* mixed forest; F: 枫香纯林 *Liquidambar formosana* pure forest; G: 枫香×湿地松混交林 *Liquidambar formosana* × *P. elliotii* mixed forest. 下同 The same below.

红壤低丘岗地. 由于长期的强度樵采、割茅、挖菟和过牧, 原生森林早已不复存在, 水土流失严重, 试验区内遍布侵蚀沟和裸地, 几乎没有腐殖质层, 表层石砾含量较多, pH 为 4.9. 现存植被以丝茅 (*Imperata koenigii*)、橘草 (*Cymbopogon goeringii*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、野古草 (*Arunfinella anomala*)、黄茅 (*Heteropogon contortus*) 和狗芽根 (*Cynodon dactylon*) 为主. 1991 年采取不同模式重建森林. 2001 年对其中的 8 种模式 and 对照区 (CK) 设立面积 600 m² 的样地.

2.2 测定方法

细根采集采用土钻法^[12, 27], 每个样地选取 3~4 株标准株, 按东、南、西、北方向分别距树干 40 cm、55 cm 和 70cm 处, 按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土层用直径 5 cm 的土钻挖取土柱, 用水清洗出直径 ≤2 mm 的细根, 风干称取鲜重后放入烘箱 80 °C 下烘干, 并用常规方法测定细根样品养分及土壤理化性状.

3 结果与分析

3.1 细根现存量及其垂直分布特征

由表 2 可以看出, 人工重建 10 年的森林中, 中等栽植密度晚松 (*Pinus serotina*) 纯林模式的 0~40 cm 细根现存量最大, 其次是湿地松 (*P. elliotii*) 与枫香 (*Liquidambar formosana*) 行间混交模式及木荷纯林模式. 同等初植密度下不同林分类型也表现出差异, 针阔混交林模式的细根现存量大于木荷 (*Schima superba*) 纯林和枫香纯林, 而马尾松 (*P. massoniana*) 枫香混交林的细根现存量小于晚松纯林. 初植密度对细根现存量有明显影响, 同为晚松纯林, 高初植密度 (9 990 株·hm⁻²) 的 5 号样地林地细根现存量明显低于中等初植密度的 42 样地 (4 995 株·hm⁻²).

不同模式重建森林 10 年后的细根分布呈相似的规律性, 细根集中分布在表层 0~20 cm, 占总细

根量的 73.39%~87.41%, 随土层的加深其生物量明显减少. 在 40 cm 深的剖面内, 0~10 cm 集中了 50% 以上的细根生物量, 最高为 78 号样地, 达 69.68%; 最低为对照区, 为 51.10%; 20~40 cm 土层中细根生物量不足总量的 1/4, 最高的只有 23.98%. 林地表层土壤丰富的养分条件是细根集中于表层的重要原因之一^[16], 积累在土壤表面的枯落物促进了养分积累, 从而促进细根积累, 特别是在贫瘠土壤上生长的高生产力林分, 表层表现出细根集结的特征^[2, 4]. 另外, 土壤温度从地表向下迅速下降也是细根集中于表层的重要原因^[8].

3.2 不同模式重建森林细根养分贮量

在森林生态系统中, 不同树种根系的养分浓度状况既反映了树种本身的特性, 也反映了林地的立地状况和不同生态系统对土壤养分的吸收和利用状况^[1, 7]. 表 3 结果表明, 不同模式重建森林中细根的养分贮量有明显差异. 而且不同初植密度的晚松林地中, 中等栽植密度的 42 号样地的细根全 N、全 P、全 K、Ca、Mg 贮量均高于密度大的 5 号样地, 表明密

表 2 不同模式重建森林细根现存量及垂直分布
Table 2 Standing stock of fine root and vertical distribution of different rehabilitated forest models

样地号 Plot No.	重建模式 Rehabilitation model	细根现存量 Standing stock (kg·hm ⁻²)	各层所占比例 Percent of every soil layer (%)			
			0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
CK		6208.8	51.02	26.82	11.8	10.38
5	A	5775.1	66.13	21.28	7.83	4.76
13	B	6307.6	60.72	17.23	11.08	10.97
15	C	6812.9	53.06	20.33	9.96	16.66
42	A	11571.3	55.18	24.49	14.38	9.18
54	D	7525.5	53.65	24.47	11.75	10.13
66	E	6225.9	59.86	21.07	10.73	8.34
78	F	7043.3	69.68	15.46	8.81	6.04
83	G	9297.2	64.31	18.28	11.15	6.26

表 3 不同模式重建森林细根养分状况(0~ 40 cm 土层平均值)
Table 3 Nutrition status of fine root of different rehabilitated forest models

样地号 Plot No.	土壤养分浓度 Soil nutrient density (g•kg ⁻¹)			细根养分贮量 Nutrient storage of fine root (kg•hm ⁻²)				
	全 N	全 P	全 K	全 N	全 P	全 K	Ca	Mg
	Total N	Total P	Total K	Total N	Total P	Total K		
CK	0.69	0.29	8.3	27.93	3.1	9.44	8.31	5.14
5	0.29	0.17	10.5	28.88	2.59	29.04	9.06	4.74
42	0.74	0.24	8.6	84.47	5.55	38.42	17.00	10.76
13	0.63	0.28	8.7	46.68	3.59	22.14	6.55	4.47
54	0.73	0.23	7.9	30.10	3.76	31.31	15.13	10.84
78	0.70	0.26	8.6	32.88	2.51	25.29	8.31	5.32
83	0.56	0.21	8.6	66.00	4.46	39.69	14.78	8.18
15	0.40	0.20	8.0	46.33	3.47	25.55	18.94	6.47
66	0.65	0.20	8.3	34.87	3.11	23.60	10.77	5.54

度过大不利用细根养分的积累;同等栽植密度下,不同森林类型细根养分贮量也有明显差异.湿地松与枫香混交林地的细根中全 N、全 P、全 K 贮量均高于同等密度的木荷和枫香阔叶纯林;而枫香与马尾松混交林细根的全 N、全 P、全 K、Ca、Mg 贮量均低于同等密度的晚松针叶纯林,与细根现存量有同样的规律.木荷纯林细根的 Mg 含量远高于其它样地,说明木荷对 Mg 有很强的吸收和利用能力.

3.3 细根与土壤养分相关分析

廖利平等^[12]对杉木人工林土壤和细根养分含量的研究表明,第 1 代林分无论活细根生物量还是死细根生物量都明显地高于第 2 代,说明土壤有机质、NO₃⁻-N 和速效磷含量在第 1 代和第 2 代林分之间的显著差异性;同时,细根养分浓度随土层下降的趋势也与土壤养分随土层下降的趋势吻合,说明细根直接影响土壤养分状况^[24,25].本调查结果表明,退化红壤重建森林第 10 年土壤的全 K、全 P、盐基代换量、有效 P、pH (KCL) 与细根现存量没有明显的相关关系,而土壤有机质、全 N、有效 N、有效 K、pH (H₂O) 与细根有一定的线性相关关系(表 4).与王兴祥等^[26]的研究结果相似.

表 4 重建森林细根量与土壤养分线性回归分析(n= 44)
Table 4 Linear regression analysis on the relationship between fine root standing biomass and soil nutrient in different rehabilitated forests

变量 Variable	参数估计 Parameter estimate	标准误差 S. E.	t	P
有效 K	b ₀ 18.985604	1.842686	10.303	0.0001
Available K	b ₁ 0.002113	0.000750	2.816	0.0080
全 N	b ₀ 0.039274	0.004688	8.377	0.0001
Total N	b ₁ 0.000011	0.000002	5.953	0.0001
有效 N	b ₀ 23.462395	2.162725	10.849	0.0001
Available N	b ₁ 0.002816	0.000881	3.197	0.0030
	b ₀ 4.754161	0.036178	131.403	0.0001
pH (H ₂ O)	b ₁ - 0.000041	0.000015	- 2.772	0.0090
有机质	b ₀ 0.650973	0.115146	5.653	0.0001
Organic matter	b ₁ 0.000275	0.000047	5.871	0.0001

3.4 细根与土壤物理特性及土壤结构稳定性相关性

由表 5 可以看出,退化红壤重建森林第 10 年土壤的容重、毛管孔隙度、总孔隙度与细根现存量存在一定的线性回归关系,土壤容重有随细根量增加而减小的趋势(b₁ < 0),但线性关系不很显著(P > 0.05).而毛管孔隙、总孔隙与之有一定的线性相关关系(P < 0.1),说明细根对物理性状的影响主要体现在毛管孔隙和总孔隙上;在重建 10 年的森林生态系统中细根对土壤物理性状的影响没有对化学性状的影响大.

表 5 细根与土壤物理特性线性回归分析(n= 44)
Table 5 Linear regression relationship between fineroot and soil physical characters

变量 Variable	参数估计 Parameter estimate	标准误差 S. E.	t	P
毛管孔隙度	b ₀ 42.323966	1.160082	36.484	0.0001
Capillary porosity	b ₁ 0.000894	0.000472	1.893	0.0669
总孔隙	b ₀ 46.056643	1.329628	34.639	0.0001
Total porosity	b ₁ 0.000937	0.000541	1.731	0.0925
容重	b ₀ 1.434043	0.022868	62.710	0.0001
Volume weight	b ₁ - 0.000012	0.000009	- 1.320	0.1957

由表 6 可见,土壤细根的现存量及土壤有机质与土壤不同粒径水稳性团聚体、水稳性指数、不稳定性团聚指数之间存在不同程度的相关关系,表明植物细根能显著提高> 5 mm 土壤大结构水稳性团聚体及> 0.25 mm 水稳性团聚体含量,增加土壤有机质的含量,从而提高土壤中的水稳性团聚体总量,改善了土壤团粒结构,增加了土壤结构的稳定性.

3.5 细根与土壤微生物及土壤酶活性相关分析

细根具有很高的生长速率和死亡分解率,其分解产物为土壤微生物的生长和繁殖提供了养分来源^[20~ 22].此外,在植物细根的周围还将分泌一定数量的糖类、有机酸等根际分泌物,有利于土壤微生物的生长与繁殖.因此,细根是土壤微生物生存和发展的重要物质基础,细根量的多少将影响土壤微生物

表 6 细根、土壤有机质与各粒级水稳性团聚体的相关性
Table 6 Correlation analysis among fine roots, organic matter and water stable aggregate(n= 44)

相关系数 Correlation coefficient	粒径% Soil particle distribution						重量百分数 Weight Percentage	E_{LT}	水稳性指数 Waterstable index K
	> 5 mm	5~ 2 mm	2~ 1 mm	1~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	< 0.25 mm			
细根现存量 Standing stock of fine root	0.582 ^{**}	0.184	- 0.186	- 0.405 [*]	- 0.529 [*]	- 0.528 [*]	0.572 ^{***}	- 0.563 ^{***}	0.488 [*]
有机质 OM	0.563 ^{***}	0.377 [*]	0.047	- 0.294	- 0.612 ^{***}	- 0.648 ^{***}	0.666 ^{***}	- 0.625 ^{***}	0.429 [*]

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

数量和活性. 土壤细根量与土壤细菌数和微生物总数存在显著相关关系 ($P < 0.05$), 与放线菌数量和呼吸强度存在极显著相关关系 ($P < 0.01$), 而与土壤真菌数量相关性不显著. 这说明土壤细根对土壤细菌、放线菌、微生物总数和呼吸强度产生一定程度的影响.

土壤酶活性与土壤细根生物量之间存在显著的正相关:

土壤蔗糖酶活性:
$$y = 3.05227 + 0.00128x, F = 58.543^{**},$$
$$n = 44, R = 0.7997^{***}$$

土壤脲酶活性:
$$y = 0.17379 + 0.000021x, F = 17.480^{**},$$
$$n = 44, R = 0.5885^{***}$$

土壤过氧化氢酶活性:
$$y = 7.21144 + 0.00191x, F = 45.759^{**},$$
$$n = 44, R = 0.7622^{***}$$

土壤蛋白酶活性:
$$y = 0.96812 + 0.000023x, F = 10.073^{**},$$
$$n = 44, R = 0.4836^{**}$$

土壤酸性磷酸酶活性:
$$y = 6.87758 + 0.000634x, F = 30.301^{**},$$
$$n = 44, R = 0.6919^{***}$$

这也表明细根在影响土壤微生物特性的同时, 对土壤酶活性产生了显著影响; 而且影响程度最大的是蔗糖酶. 因为蔗糖酶是表征土壤生物活性的重要水解酶, 其产物是植物和微生物的营养源. 土壤蔗糖酶的活性在一定程度上表示了土壤熟化程度和肥力水平, 这一结果说明细根量的增加能加快土壤熟化进程.

4 结 论

4.1 土壤细根分布呈明显的层次性. 一般随土层深度增加而逐渐减少.

4.2 同等初植密度下针阔混交林的细根现存量和养分贮量高于阔叶纯林模式, 低于针叶纯林模式.

4.3 土壤有机质、全 N、有效 N、有效钾、pH 值与细

根量的线性相关关系达显著水平 ($P < 0.05$). 细根对物理性状的影响主要体现在毛管孔隙度和总孔隙度上.

4.4 植物细根提高了土壤中的水稳性团聚体总量, 改善土壤团粒结构, 提高抗蚀性, 增加了土壤结构的稳定性.

4.5 土壤细根与土壤细菌和微生物总数存在显著的相关性, 与放线菌数量和呼吸强度存在极显著相关. 土壤酶活性与土壤细根现存量之间存在显著的线性相关关系, 并呈正相关.

参考文献

1 Bajrang S, Tripathi KP. 2000. Fine root biomass and tree species effects on potential N mineralization in afforested sodic soils. *Plant Soil*, **219**: 81~ 89

2 Comeau PG, Kimmins JP. 1989. Above and below ground biomass and production of Lodgepole pine on sites with different soil moisture regimes. *Can J For Res*, **19**: 447~ 454

3 Chen X-M (陈小梅), Bledsoe CS. 2002. Contrasting seasonal patterns of fine root production for blue oaks (*Quercus douglasii*) and annual grasses in California oak woodland. *Plant Soil*, **240**: 263~ 274

4 Dietrich H, Christoph L. 2002. A comparison of four different fine root production estimates with ecosystem carbon balance data in a *Fagus-Quercus* mixed forest. *Plant Soil*, **239**: 237~ 251

5 Gerier CC, Vogt KA, Keyes MR, et al. 1981. Biomass distribution and above and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades. *Can J For Res*, **11**: 155~ 167

6 Genenger M, Zimmernann S. 2003. Fine root growth and element concentrations of Norway spruce as affected by wood ash and liquid fertilisation. *Plant Soil*, **255**: 253~ 264

7 Jeffrey SP, Ronald LH. 1998. Fine root length production, mortality and standing root crop dynamics in an intensively managed sweet gum (*Liquidambar styraciflua* L.) coppice. *Plant Soil*, **205**: 193~ 201

8 Jackson RB, Canadell J, Ehleringer JR, et al. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, **108**: 389~ 411

9 Kyotaro Noguchi, Tadashi Sakata, Takeo Mizoguchi, et al. 2004. Estimation of the fine root biomass in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation using minirhizotrons. *J For Res*, **9**(3): 261~ 264

10 Klinge H. 1973. Root mass estimation in lowland tropical rainforest of central Amazonia I. Fine root mass of a pale yellow latosol and a giant humus podzol. *Tropocol*, **14**: 29~ 38

11 Li Y (李勇), Xu X-Q (徐晓琴), Zhu X-M (朱显謨). 1992. Pilot study on increasing anti-erode of vegetation root in loess altiplano. *China Sci* (中国科学·B辑), (3): 254~ 259

12 Liao L-P (廖利平), Yu X-J (于小军), Huang Z-Q (黄志群), et al. 2000. Effect of fertilization on fine root and biomass growth of Chinese fir saplings planted on different soils of successive rota

tions. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **11**(supp.): 159~ 162 (in Chinese)

13 Li L-H(李凌浩), Lin P(林 鹏), Xing X-R(邢雪荣). 1998. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **9**(4): 337~ 340 (in Chinese)

14 Liao L-P(廖利平), Yang Y-J(杨跃俊), Wang S-L(汪思龙), et al. 1999. Distribution decomposition and nutrient return of the fine root in pure *Cunninghamia lanceolata*, *Michelia macclurei* and the mixed plantations. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **19**(3): 342~ 346(in Chinese)

15 Liao L-P(廖利平), Chen G-Y(陈楚莹), Zhang J-W(张家武), et al. 1995. Turnover of fine roots in pure and mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* forests. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **6**(1): 7~ 10(in Chinese)

16 Livesley SJ, Gregory PJ. 2000. Competition in tree row agroforestry systems 1. Distribution and dynamics of fine root length and biomass. *Plant Soil*, **227**: 149~ 161

17 Lopez B, Sabate S. 2001. Annual and seasonal changes in fine root biomass of a *Quercus ilex* L. forest. *Plant Soil*, **230**: 125~ 134

18 Makela A, Petteri V. 2000. Estimation of fine root mortality and growth from simple measurements: A method based on system dynamics. *Træs*, **14**(6): 316~ 323

19 Persson H. 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant Soil*, **71**: 87~ 101

20 Shan J-P(单建平), Tao D-L(陶大立). 1992. Overseas research on tree fine root. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **11**(4): 46~ 49(in Chinese)

21 Shan J-P(单建平), Tao D-L(陶大立), Wang M(王 淼), et al. 1993. Fine roots turnover in a broad leaved Korean pine forest of Changbai mountain. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **4**(3): 241~ 245(in Chinese)

22 Samina U, Singh SP. 1999. Fine root productivity and turnover in two evergreen central *Himalayan* forests. *Ann Bot*, **84**(1): 87~ 94

23 Shi P-L(石培礼), Zhong Z-C(钟章成), Li X-G(李旭光). 1996. A study on root system of alder and cypress mixed plantation. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **16**(6): 623~ 631(in Chinese)

24 Terrell T B, William H, Conner B, et al. 2001. Fine root productivity and dynamics on a forested floodplain in south Carolina. *Soil Sci Soc Amer J*, **65**: 545~ 556

25 Vogt KA, Grier CC, Vogt DJ. 1986. Production, turnover and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forest. *Adv Ecol Res*, **15**: 303~ 337

26 Wang X-X(王兴祥), Meng G-F(孟赐福). 1999. Rule and Measure of Restoration and Rehabilitation of Soil Nutrient Pool. Mechanism and Prevention of Degraded Red Soil in China. Beijing: Agricultural Press. (in Chinese)

27 Zhang X-Q(张小全), Wu K-H(吴可红). 2000. Dieter munach a review of methods for fine root production and turnover of trees. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **20**(5): 875~ 883(in Chinese)

28 Zhang X-Q(张小全), Wu K-H(吴可红). 2001. A study on forest fine root production and turnover. *Sci Silvæ Sin* (林业科学), **37**(3): 126~ 138(in Chinese)

作者简介 刘苑秋, 女, 1964 年生, 博士, 教授. 主要从事植被恢复与重建、农林复合经营、流域生态建设等方面的研究, 发表论文 20 篇. Tel: 0791 3813243; E-mail: liuyq404@163.com.
