

# 黄土丘陵半干旱区人工林细根分布特征及土壤特性

王琳琳<sup>1</sup>, 陈云明<sup>1,2</sup>, 张飞<sup>1</sup>, 王锋利<sup>3</sup>, 李寰<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 浙江中冶勘测设计有限公司, 浙江 杭州 310009)

**摘要:** 采用连续钻取土芯法对黄土丘陵半干旱区典型林分和荒坡地进行了根系采样, 分析了人工林生长发育过程中的细根垂直分布特征及其土壤特性。结果表明, 7个林分细根的生物量、根长密度、表面积、比根长等形态测定参数均具有明显的垂直分布特征, 即随着土层深度的增加而显著减小。0—60 cm 土层的平均值, 细根生物量、根长密度、细根表面积指标均以 14 龄沙棘林最大, 30 龄刺槐林次之, 10 龄刺槐林最小, 比根长则以 10 龄刺槐林最大, 14 龄沙棘林与 30 龄刺槐林最小。不同类型林分 150 cm 以下土层均存在明显的干层现象, 乔灌种差异对其影响很小, 随着林龄的增加, 土壤干燥化程度增加; 乔木刺槐林对土壤容重的改善作用大于 2 种灌木林, 随林龄增加改善土壤容重的深度增加; 不同林分土壤有机碳垂直分布特征与根系一致, 0—60 cm 土层的土壤有机碳平均含量, 以 24 龄沙棘和 50 龄柠条林最高, 10 龄刺槐林最低。  
**关键词:** 黄土丘陵区; 人工林; 细根参数; 土壤特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0027-05

中图分类号: S157.5, S181

## Distribution Characteristics of Fine Roots of Plantations and Soil Properties in Semi-arid Loess Hilly Area

WANG Lin-lin<sup>1</sup>, CHEN Yun-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Fei<sup>1</sup>, WANG Feng-li<sup>3</sup>, LI Huan<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Zhongye Survey and Design Limited Company of Hangzhou, Hangzhou, Zhejiang 310009, China)

**Abstract:** By employing soil core method, an investigation in the semi-arid loess hilly area was made on the vertical distribution of fine root characteristics and soil properties in the recovery of typical plantations. Results showed that fine root biomass, root length density (RLD), root surface area, and specific root length (SRL) decreased significantly as soil depth increased. In the 0—60 cm soil layer, the averages of the fine root biomass, RLD, and root surface area for 14 a *Hippophae rhamnoides* (HR) were the highest; for 30 a *Robinia pseudoacacia* (RP), less; and for 10 a RP, the lowest. The SRL of 10 a RP was the highest and the SRLs of 14 a HR and 30 a RP were the lowest. Dry layers obviously existed below soil depth of 150 cm in different plantations and the difference between arbor and shrub forests did not influence them significantly. Soil dry degree increased with the increasing of growth age. The improvement of tree forest to soil bulk density, which was greater than that of the two shrub forests, increased with the increasing of growth age. The vertical distribution of soil organic carbon was similar to roots. In the 0—60 cm soil layer, organic carbon contents of 24 a HR and 50 a RP were the highest and organic carbon content of 10 a RP was the lowest.

**Keywords:** loess hilly area; plantation; fine root characteristic; soil property

植被生态系统中, 植物地上部分与地下部分结构和功能的关联主要是通过根系实现, 而细根 ( $\leq 2$  mm) 作为根系中重要的组成部分<sup>[1-4]</sup>, 不仅是植物吸

收水分和养分的主要器官, 还影响着森林生态系统中有机质和矿物养分循环<sup>[5-6]</sup>, 土壤结构<sup>[7]</sup>等。一些研究结果表明<sup>[8-9]</sup>, 森林中细根生产量等于甚至大于地

收稿日期: 2009-12-13

修回日期: 2010-01-27

资助项目: 陕西省科学院科技计划重点项目“陕北黄土丘陵区植被恢复与动物多样性保护关键技术”(2008K-04); 国家科技支撑重点课题“植被优化配置与可持续建设技术”(2006BAD09B03); 中科院西部行动计划课题“林草植被恢复潜力与生态稳定性”(KZCX2-XB2-05-03)

作者简介: 王琳琳(1985—), 女(汉族), 河南省辉县市人, 硕士研究生, 研究方向为人工林恢复。E-mail: wanglinlin1220@163.com。

通信作者: 陈云明(1967—), 男(汉族), 陕西省澄城县人, 博士, 研究员, 研究方向为植被生态。E-mail: ymchen@ms.iswc.cn。

上部分枯落物量,占净初级生产量的 1/2 以上,细根的死亡可以产生高达 5 倍于树叶的腐殖质<sup>[10]</sup>。同时,当土壤资源有效性增加时,有机碳向地下分配增多,促进细根生长和生物量的积累,其吸收养分和水分的能力增强<sup>[11-12]</sup>。然而,相对于植被地上部分的研究成果,由于地下部分的研究比较困难,目前的研究资料仍然十分有限,特别是对细根特征研究更显不足。

黄土丘陵半干旱区气候干旱少雨,水土流失严重,生态环境脆弱,原始的天然林植被已破坏殆尽,大部分已经成为次生或人工植被。目前这一地区人工植被存在的退化、衰败问题十分突出,需要从其生长机制及其与土壤环境间的相互关系方面进行解决。在该区现有的细根研究中,主要集中于退耕草地植被的细根分布特征,对于存在问题较多的人工林,则少见报道<sup>[13]</sup>。为此,选取黄土高原主要造林乔灌种不同林龄林地,进行细根垂直分布特征和土壤特性分布的研究,可为该区植被恢复重建和生态建设提供理论依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中部陕西省安塞县纸坊沟流域(109°13′46″—109°16′03″E, 36°42′42″—36°46′28″N),面积 8.27 km<sup>2</sup>,属典型黄土丘陵沟壑区,海拔 1 100~1 400 m,地形破碎,沟壑纵横,生态环境脆弱;年均气温为 8.8 °C,≥0 °C 的积温 3 733.5 °C;年均降水量 549.1 mm,年均蒸发量为 1 463 mm,干燥度 1.5,无霜期 157~194 d。土壤以黄绵土为主,占总面积的

95%。植被分区上属于森林草原带,天然森林植被破坏殆尽,现有植被主要为 1978 年实施综合治理及退耕还林过程中形成的人工林和封禁后恢复的天然灌丛及草地,乔木以刺槐和小叶杨(*Populus simonii*)等为主,灌丛主要有柠条和沙棘等人工林灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛。

本研究以纸坊沟流域的主要水土保持林种柠条(*Caragana intermedia*; CI)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*; HR)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*; RP)为对象,分林龄阶段选取柠条林地 3 块,沙棘林地 2 块,刺槐林地 2 块和 30 a 荒坡地一块(CK),分析其生长过程中的细根垂直分布特征及土壤特性变化(表 1)。

### 1.2 研究方法

1.2.1 细根参数的测定 于 2007 年 7 月下旬采集根样。在对样地内植株进行每木检尺的基础上,选择一株标准丛,以 1/4 样圆法<sup>[14]</sup>作为参考,在以 1/2 株距为半径的 1/4 个圆上均匀取 3 个点,1/4 株距为半径的 1/4 个圆上均匀取 2 个点,用专用生物钻(Φ=9 cm)在 0—60 cm 土层,分层(10 cm)钻取土样,拣出所有根系编号后装入塑封袋,在实验室内用清水冲洗干净、晾干后,将直径小于 2 mm 的细根平铺在透明胶片上用扫描仪扫描,对扫描图像用 CIAS 2.0 图像分析系统(CID, Inc., USA)逐根统计根长、直径和根面积;扫描后的根系样品置入 80 °C 烘箱中,烘干至恒重,分别称重和记录。通过根长和生物量的比值计算各层的比根长,由根长和 10 cm 土芯体积计算根长密度。

表 1 调查人工林样地概况

样地	坡度/ (°)	坡向	胸径/ cm	树高/ cm	冠幅/ (m×m)	密度/ (m×m)	地上生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	枯落物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	林下植被
14 龄柠条	26	阳坡	—	155	174×171	2×1.5	189	82	铁杆蒿+ 芨芨
24 龄柠条	25	阳坡	—	158	167×165	2×1.5	589	103	铁杆蒿
50 龄柠条	26	阳坡	—	161	145×127	2×1.5	751	124	芨芨+ 铁杆蒿+ 披针苔
14 龄沙棘	30	半阴坡	20	302	215×180	1×1.5	3 309	260	臭草+ 铁杆蒿
24 龄沙棘	32	半阴坡	24	375	225×260	1×1.5	3 497	330	铁杆蒿+ 长芒草
10 龄刺槐	31	半阳坡	20	610	150×225	2×3	1 357	262	芨芨
30 龄刺槐	31	阳坡	35	906	330×280	2×3	6 763	226	长芒草+ 阿尔泰狗娃花
30 a 荒坡	27	阳坡	—	—	—	—	132	43	铁杆蒿+ 芨芨

注:铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*); 芨芨(*Artemisia giraldii*); 披针苔(*Carex lanceolata*); 臭草(*Melica scabrosa* Trin); 阿尔泰狗娃花(*Heteropogon ussuriensis*)。

1.2.2 土壤特性测定 土壤水分测定采用土钻法。测定深度为 0—500 cm,0—100 cm 土层每 10 cm 取样 1 次,100—500 cm 土层每 20 cm 取样 1 次。每个样地取 3 个重复。

土壤容重采用环刀法测定。测定深度为 0—60

cm,每 20 cm 取样 1 次。3 个重复。

土壤有机碳用重铬酸钾外加热法测定。测定深度为 0—60 cm,每 20 cm 取样 1 次。

带回室内风干、磨细过 0.25 mm 筛后测定。3 个重复。

## 2 结果分析

### 2.1 不同样地细根参数分布特征

2.1.1 细根生物量 不同林龄的细根生物量及其垂直分布可以反映出植物改善土壤理化性质的作用大小及空间分布,也可了解林分的生长状况及潜势。在所测定的8个样地中(图1a),0—60 cm 土层平均单位体积细根生物量大小依次为:10龄 RP < 14龄 CI < 24龄 CI < 50龄 CI < 24龄 HR < CK < 30龄 RP < 14龄 HR,以14龄沙棘林最大,达到  $1.25 \text{ mg/cm}^3$ ,10龄刺槐林最小为  $0.30 \text{ mg/cm}^3$ ,这与乔木造林时初始密度较小,幼龄林阶段生长发育较慢有关;除沙棘林外,刺槐、柠条林的细根生物量均随林龄增加而明显增加,且以刺槐林的增加速度最快,30龄时已达到  $1.12 \text{ mg/cm}^3$ ,仅次于14龄沙棘林;灌木柠条和沙棘林相比,以沙棘林细根发育较好,在林分生长盛期的14龄时,沙棘林单位体积细根生物量远大于柠条林,在林分相对稳定的24龄时,单位体积细根生物量差异较小,其值分别为  $0.44$  和  $0.51 \text{ mg/cm}^3$ ,这可能与沙棘林分在生长盛期林下草本群落生长旺盛,群落盖度较高,后期林相与柠条林相类似有关。从图中还可以看出,柠条林与荒坡的细根生物量在土壤剖面上的分布规律相似,14龄、24龄、50龄柠条林及荒坡在0—20 cm 土层的细根生物量分别为0—60 cm 土层平均值的1.55、1.35、1.64、2.06倍;说明其细根生物量主要分布在浅层土壤。沙棘与幼龄刺槐林的细根主要分布在0—40 cm 土层,其单位体积细根生物量均显著高于40—60 cm 土层,但随着林龄的增加,沙棘林细根生物量则趋于集中在0—20 cm 表层土壤,刺槐林则在深层40—60 cm 土层明显增加,30龄刺槐林在这一层次的细根生物量占到0—60 cm 土层平均值的1.22倍。

2.1.2 根长密度与细根表面积 不同样地根长密度的垂直分布规律比较相似(图1b),主要分布在0—20 cm 土层,分别是各样地0—60 cm 土层其平均根长密度的1.52~1.98倍,以14龄的柠条林最大,沙棘林最小,反映出同为灌木林的柠条与沙棘林具有不同的根长密度分布特征。不同的植被类型比较,以荒坡根长密度最大,0—60 cm 土层平均值为  $7.30 \text{ mm/cm}^3$ ,远大于其它乔灌木;不同林龄的乔木及灌木林根长密度差异较小,0—60 cm 土层平均值的变化范围为  $3.18$ ~ $4.96 \text{ mm/cm}^3$ ,以14龄沙棘、50龄柠条、30龄刺槐较大,与生物量的变化规律相似。不同样地细根表面积垂直分布规律与根长密度相似(图1c),主要集中在0—20 cm 土层,分别是0—60 cm 土层其平均细

根表面积的1.29~1.93倍,以14龄柠条林为最高,30龄刺槐林最低;20—40 cm 土层,以14龄、24龄沙棘林,30龄刺槐林的分布较高,接近0—60 cm 土层深度平均值,说明沙棘林相对于柠条林具有更合理的根系分布。在所测定的样地中,0—60 cm 土层平均细根表面积以14龄沙棘最大,达  $7.02 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$ ,10龄刺槐林最小,仅为  $3.38 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$ ,也反映出处于幼龄期的乔木林,其吸收养分的能力相对较弱;除沙棘林外,随着林龄的增加,柠条、刺槐林0—60 cm 土层细根表面积呈增加趋势,以30龄刺槐林最为显著,达到  $6.52 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$ ,沙棘林的细根表面积与细根生物量变化相似,即随林龄增加而减小,林相也出现明显的衰败特征,不利于沙棘林的持续发展。

2.1.3 细根比根长 比根长是根长和生物量的比值,可以表征根系收益和花费的关系<sup>[15]</sup>。植物根系吸收水分和养分的能力更多的取决于根长而不是生物量,所以具有较大比根长的植物在根系生物量投入方面比具有较小比根长的植物更有效率<sup>[16]</sup>。由图1d可看出,测定的不同林分中,随着土层深度的增加,细根比根长呈逐渐减小的趋势,但0—20 cm 土层的比根长明显高于其它层次,分别是0—60 cm 土层其平均细根比根长的1.14~1.61倍,20—40 cm 与40—60 cm 土层的细根比根长差异不明显。随着林龄的增加,柠条、槐林0—60 cm 土层平均细根比根长值明显减小,14龄柠条、10龄刺槐的比根长分别达13.82和19.82 mm/mg,沙棘林变化不明显,维持在6.37~8.26 mm/mg 之间,有较大比根长的植物在水分和养分获取方面更为有利<sup>[17]</sup>,说明沙棘适应环境的能力弱于柠条、刺槐。

### 2.2 不同样地土壤特性的分布特征

2.2.1 土壤水分 土壤干燥化问题在黄土高原森林草原区和典型草原区人工林普遍存在,是影响人工林稳定性的关键因素。由图2可以看出,在森林草原区安塞不同类型的人工林中,自150 cm 土层以下,均存在一个明显的干化层,其土壤含水量介于5.0%~8.0%之间。乔灌种的差异对其影响有限,林龄相似时,以柠条林对土壤水分的消耗最多;和对照荒坡相比,林龄变化对土壤含水量具有一定的影响,即随着林龄的增大,土壤干燥化程度加重。24龄沙棘林因在220 cm 土层深度以下为石质层,土壤含水量较高。结合其它研究结果<sup>[18-19]</sup>表明,生长季末,该区土壤水分恢复深度介于100—150 cm,水分恢复的强度与当年生长季末期降水量有关,当枯水年土壤水分恢复的强度较低时,次年4—5月旱季,林分就会通过增加枯枝量或者死亡株数来适应土壤水分的缺乏,影响了林分的稳定性。

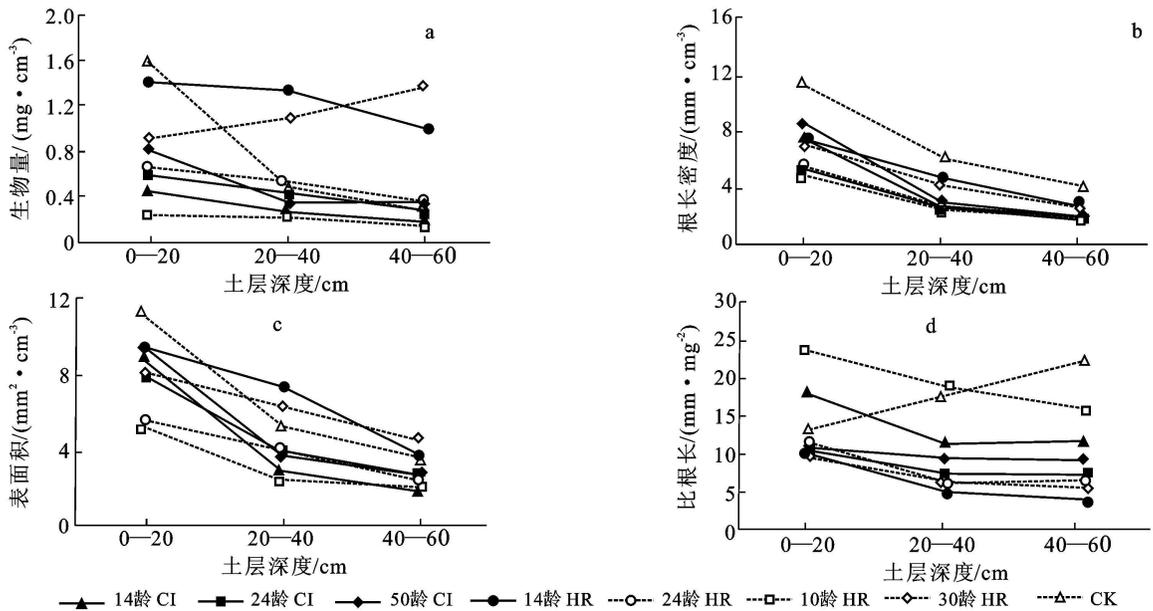


图 1 不同样地细根生物量(a)、根长密度(b)、表面积(c)和比根长(d)的垂直分布

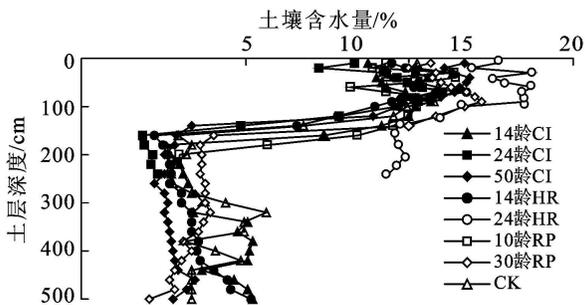


图 2 不同样地土壤含水量垂直分布

**2.2.2 土壤容重** 土壤容重大小反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力的高低。人工林在生长发育过程中对土壤容重有一定的改善作用(图 3)。乔木刺槐林在 10 龄时,对 0—20 cm 土层的土壤容重具有明显的改善作用,30 龄时可明显改善 0—60 cm 土层的土壤容重,其容重值小于  $1.18 \text{ g/cm}^3$ ;灌木沙棘和柠条林对土壤容重的改善作用与荒坡类似,但小于刺槐林。在测定的 14, 24 龄柠条林和沙棘林及多年荒坡地中,仅 0—20 cm 土层的土壤容重得到明显改善,50 龄柠条林在 0—40 cm 土层得到明显改善,均低于相似林龄的刺槐林,这可能与刺槐的根系较深有关。

**2.2.3 土壤有机碳** 土壤有机碳不仅是衡量土壤肥力的一个重要指标,也是当前土壤碳库动态研究的重要内容。由图 4 可以看出,随着林分的生长发育,对土壤有机碳含量的垂直分布产生了显著影响,测定样地的土壤有机碳主要富集在 0—20 cm 土层,分别占到 0—60 cm 土层其总有机碳的 42.0%~59.5%,以 30 龄刺槐林和 24 龄柠条林最为突出,0—20 cm 土层

的有机碳含量分别是 20—40 cm, 40—60 cm 土层的 3 倍以上;随着林龄的增加,各林分 0—60 cm 土层的平均有机碳含量及深层有机碳含量均呈明显的增加趋势,以 24 龄沙棘林平均有机碳含量最高,达  $5.4 \text{ g/kg}$ ;在 0—60 cm 土层,林龄相似时,沙棘、柠条灌木林的平均有机碳含量明显大于刺槐乔木林。

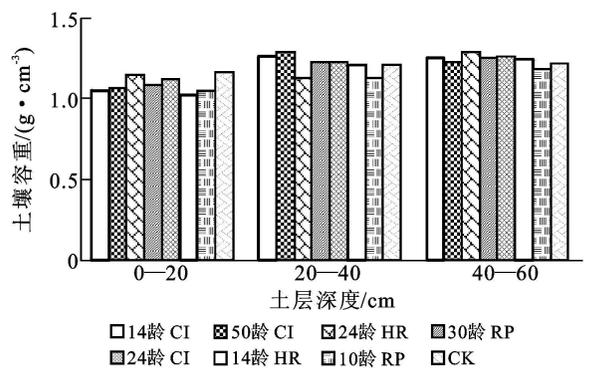


图 3 不同样地土壤容重垂直分布

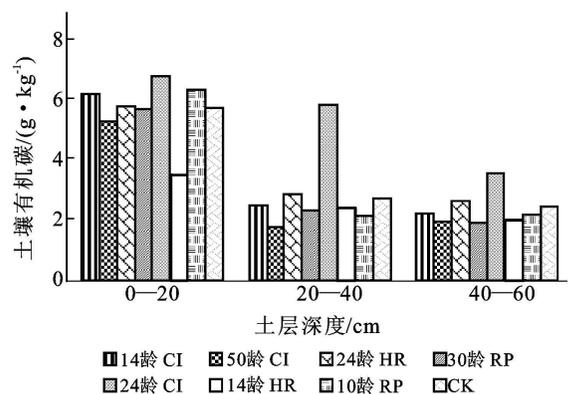


图 4 不同样地土壤有机碳垂直分布

### 3 结论

从根系特征指标细根生物量、根长密度、表面积、比根长等 0—60 cm 平均值分析, 14 龄沙棘林均高于 24 龄沙棘林, 且高于不同林龄的柠条林和刺槐林, 说明沙棘林在 10 龄左右生长最为旺盛, 具有良好的水土保持功能, 但随着林龄的增加, 沙棘林各项指标显著减小, 在 24 龄时所测定的根系指标值均低于同龄的柠条林, 说明沙棘林衰退较快, 与柠条林相比在持续性和稳定性方面较差, 沙棘林的这一根系发育特征可能与其生物生态学特性有关, 也应该在今后的林分抚育管理中引起重视; 刺槐林在 10 龄左右的幼龄期, 除比根长外的各项测定指标均差于同龄段的沙棘和柠条林, 说明这一时期刺槐林的水土保持功能次于灌木林, 但随着林龄的增加, 30 龄刺槐林的各项指标值显著增加, 大于 2 种 24 龄的灌木林, 说明乔木林在持续性和稳定性方面优于同龄段的灌木林。在对土壤环境的影响上, 随着林龄的增加, 林分对所选土壤指标的作用能力加强, 不同类型林分下均存在土壤干层现象, 相似林龄树种间的水分消耗差异不明显, 但随林龄增加, 土壤干燥化加重; 刺槐幼林改善土壤容重的作用与 2 种灌木林相似, 到 30 龄林时, 明显大于同龄段的 2 种灌木林, 相同龄段的 2 种灌木林没有明显差别; 各林地土壤有机碳的垂直分布与根系分布具有显著地正相关性, 随着林龄的增加, 林地的土壤有机碳呈增加趋势, 沙棘林地的有机碳含量显著高于其它相似林龄的 2 种林分, 相似林龄的柠条和刺槐林差异则不显著。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Gill R A, Jackson R. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems[J]. *New Phytol.*, 2000, 147: 13-31.
- [ 2 ] Gaudinski J B, Trumbore S E, Davidson E A, et al. The age of fine root carbon in three forests of the eastern United States measured by radio carbon[J]. *Oecologia*, 2001, 129: 420-429.
- [ 3 ] Wells C E, Eissenstat D M. Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters[J]. *Ecology*, 2001, 82: 882-892.
- [ 4 ] Ostonen I, Lohmus K, Pajuste K. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and in growth core methods[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 212: 264-277.
- [ 5 ] McLaugherty C A, Aber J D, Melillo J M. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems[J]. *Ecology*, 1982, 63: 1481-1490.
- [ 6 ] Fogel R. Root system demography and production in forest ecosystems [ M ] // Atkinson D. Plant root growth: An ecological perspective. special publication No 10 of the British Ecological Society, 1991.
- [ 7 ] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 611-619.
- [ 8 ] Keyes M R, Grier C C. Above and below ground root production in 40 year old Douglas fir stands in low and high productivity sites[J]. *Can. J. For Res.*, 1981, 11: 599-605.
- [ 9 ] Burke M K, Raynal D J. Fine root growth phenology, production and turnover in a northern hardwood forest ecosystem[J]. *Plant Soil*, 1994, 162: 135-146.
- [ 10 ] Joslin J D, Henderson G S. Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand[J]. *For. Sci.*, 1987, 33: 330-346.
- [ 11 ] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. *Proc. Nat Acad Sci. USA*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [ 12 ] King J S, Albaugh T J, Allen H L, et al. Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine[J]. *New Phytologist*, 2002, 154: 389-398.
- [ 13 ] 成向荣, 赵忠, 郭满才, 等. 刺槐人工林细根垂直分布模型的研究[J]. *林业科学*, 2006, 46(6): 40-47.
- [ 14 ] 李鹏, 李占斌, 赵忠. 根系调查取样点数确定方法的研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 146-149.
- [ 15 ] Fitter A H. Characters and functions of root systems [ M ] // Waisel Y, Eshel E, Kafkafi U. *Plant Roots: The hidden half*. New York : Dekker, 1991: 3-25.
- [ 16 ] Eissenstat D M. Costs and benefits of construction roots of small diameter[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, 15: 763-782.
- [ 17 ] Eissenstat D M, Caldwell M M. Competitive ability is linked to rates of water extraction: A field study of two arid land tussock grasses[J]. *Oecologia*, 1989, 71: 1-7.
- [ 18 ] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1943-1950.
- [ 19 ] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 77-83.