

青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化*

燕 辉¹ 刘广全^{1,2,3**} 李红生¹

(¹ 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100; ² 国际泥沙研究培训中心, 北京 100048; ³ 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘 要 在植物生长季节, 采用钻取土芯法对秦岭北坡 50 年生青杨人工林根径 ≤ 2 mm 和 2 ~ 5 mm 根系的生物量、表面积和根长密度进行测定. 结果表明: 在青杨人工林根系 (< 5 mm) 中, 根径 ≤ 2 mm 根系占总生物量的 77.8%, 2 ~ 5 mm 根系仅占 22.2%; 根径 ≤ 2 mm 根系表面积和根长密度占根系总量的 97% 以上, 而根径 2 ~ 5 mm 根系不足 3%. 随着土层的加深, 根径 ≤ 2 mm 根系生物量、表面积和根长密度数量减少, 根径 2 ~ 5 mm 根系生物量、表面积和根长密度最小值均分布在 20 ~ 30 cm 土层. ≤ 2 mm 根系生物量、表面积和根长密度与土壤有机质、有效氮呈极显著相关, 而根径 2 ~ 5 mm 根系的相关性不显著.

关键词 青杨人工林 根系生物量 根表面积 根长密度

文章编号 1001-9332(2010)11-2763-06 **中图分类号** S718 **文献标识码** A

Changes of root biomass, root surface area, and root length density in a *Populus cathayana* plantation. YAN Hui¹, LIU Guang-quan^{1,2,3}, LI Hong-sheng¹ (¹Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100044, China; ³China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(11): 2763–2768.

Abstract: By using soil core method, the biomass, surface area, and length density of roots ≤ 2 mm and 2–5 mm in diameter in a 50-year-old *Populus cathayana* plantation on the northern slope of Qinling Mountains were determined during growth season. Among the roots < 5 mm in diameter, those ≤ 2 mm and 2–5 mm in diameter accounted for 77.8% and 22.2% of the total root biomass, respectively. The surface area and length density of the roots ≤ 2 mm in diameter accounted for more than 97% of the total, and those of the roots 2–5 mm in diameter only occupied less than 3%. The biomass, surface area, and root length density of roots ≤ 2 mm in diameter decreased with soil depth, while those of the roots 2–5 mm in diameter were the least in 20–30 cm soil layer. The biomass, surface area, and length density of roots ≤ 2 mm in diameter were significantly correlated with soil organic matter and available nitrogen, but no significant correlations were found for the roots 2–5 mm in diameter.

Key words: *Populus cathayana* plantation; root biomass; root surface area; root length density.

根系是植物与土壤的动态界面, 具有支持、吸收、合成和储存有机物等功能, 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. 随着全球碳循环研究的开展, 国内外学者对根系生物量、生产和周转、生物量及其空间分布以及影响因素方面进行了大量的研究. Gale 等^[1]研究了不同演

替阶段不同树种根系分布特征, 提出了一个根系垂直分布的模型, 来反映根系的垂直分布特征. Vogt 等^[2]对大量研究数据加以分析, 发现气候因子和养分状况是决定细根生物量的重要因素, 而细根生产则主要受养分条件的控制. 这些研究对认识根系结构和生理功能具有重要意义.

植物根系通过调节直径的大小表现出对环境的适应^[3–4], 因此, 直径是根系重要的结构特征, 其粗细反映不同的生理功能^[5]; 同一植物直径大小不同的根系, 生理功能存在差异^[6]. 长期以来, 植物根系

* 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD09B06、2006BAD03A0308) 和国家水利部“948”项目 (200207) 资助.

** 通讯作者. E-mail: gqliu@iwhr.com

2010-04-20 收稿, 2010-09-03 接受.

通常按直径大小来划分,但根径分级尚未形成统一的标准^[7].近年来,随着对林木细根研究的深入,根径 ≤ 2 mm 作为划分细根的标准已被普遍采用^[8-9].而根径 2~5 mm 的根系被划分为另一等级.目前关于根系的研究仅是针对一种根系径级类型进行^[10-12],而对两种不同径级类型的根系比较研究报道较少.本文以秦岭北坡青杨(*Populus cathayana*)人工林为研究对象,利用连续钻取土芯法,研究不同等级青杨根径(≤ 2 mm 和 2~5 mm)根系生物量、表面积和根长密度的分布格局,及其与土壤资源有效性的关系,旨在为根系径级划分提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于秦岭北坡户县南部山区(108°22′—108°46′ E, 33°46′—34°16′ N),海拔 600 m 左右.该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季冷暖干湿分明,年平均气温 11℃~12℃,其中最热月(7月)平均气温为 24℃,最冷月(1月)平均气温为-3℃,极端最低气温为-22℃,年平均降水量 800 mm 左右,年平均日照时数 1800 h,无霜期 200 d.植被类型以针阔叶混交林为主,其间穿插部分退耕还林地,主要植物种类有青杨(*Populus cathayana*)、柿树(*Diospyros kaki*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等.土壤以褐土、棕色森林土为主.

1.2 研究方法

研究对象为青杨人工林,平均林龄 50 年,平均树高 22.65 m,平均胸径 22.25 cm.乔木层盖度为 60%,灌草层盖度为 30%~50%.地表主要植被除青杨外,主要还有多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)、小叶悬钩子(*Rubus parvifolia*)、野菊(*Dendranthema indicum*)、野甘菊(*Dendranthema lavandulifolium*)、茜草(*Rubia coriifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)和细叶苔草(*Carex rigescens*)等.

采用连续钻取土芯法,于 2007 年 5—9 月每月的月末进行青杨根系采集.每次在人工青杨林地中沿相距 10 m 的 3 条线走“S”形,等距离选取样点 24 个(每条线取 8 个).各样点用内径 90 mm 的土钻分 5 层(0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm)钻取土芯.将取出的土芯样品编号后放入密封袋内带回,在实验室用筛孔为 0.2 mm 筛子在流水中冲洗,将洗净后的青杨根系按直径 $\Phi_R \leq 2$ mm 和 2 mm

$< \Phi_R < 5$ mm 分为 2 级.用根系扫描仪及根系形态学和结构分析应用系统 DT-SCAN (Delta-T Devices Ltd, UK) 对直径 $\Phi_R \leq 2$ mm 和 $2 \text{ mm} < \Phi_R < 5$ mm 的根系分别进行根长、根表面积等指标的测定分析,并根据根长和土芯体积计算根长密度.扫描后的两种不同径级根系样品分别置入 80℃烘箱中烘干至恒量,称量并记录根生物量.并将各根指标换算为单位体积生物量($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)、表面积($\text{mm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$)和根长密度($\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$).

从样地表面每 10 cm 为一层,共分 5 层采集土样,带回实验室风干后,过筛,分别测定有机质和有效氮含量.其中有机质含量测定采用重铬酸钾法;有效氮含量测定采用扩散法^[13].

1.3 数据处理

所有数据采用 SPSS 软件进行分析.采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系.

2 结果与分析

2.1 不同径级青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度

在青杨人工林根系(< 5 mm)中,根径 ≤ 2 mm 根系生物量为 $4.44 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ (表 1),占测定根系(< 5 mm)生物量的 77.76%;根径 2~5 mm 根系生物量为 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$,占测定根系(< 5 mm)生物量的 22.24%.就根表面积、根长密度而言,根径 ≤ 2 mm 根系分别占测定根系的 97% 以上,根径 2~5 mm 根系不足测定根系的 3%,说明在青杨人工林根系(< 5 mm)中,根径 ≤ 2 mm 根系生物量较大(77.8%),并且绝大多数的根表面积和根长密度(97% 以上)均由其构建.方差分析表明,根径 2~5 mm 根系的生物量、表面积和根长密度在土层中的变异系数均明显大于根径 ≤ 2 mm 根系,表现出根系直径越大的,其变异系数越大^[14].这说明直径越大的根系,其空间分布的异质性越大^[15].

2.2 不同径级青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度的垂直分布格局

青杨人工林根系在各土层中的分布不同(表 1).根径 ≤ 2 mm 根系具有垂直分布上的差异:其生物量的 46.4%、表面积的 40.7% 和根长密度的 34.2% 均分布在 0~10 cm 土层;仅 10.6%、11.5%、13.3% 的根系生物量、表面积和根长密度分布在 40

表 1 青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度及其垂直分布
Tab.1 Vertical distribution of root biomass, surface area and root length density of *Populus cathayana* plantation

根系径级 Root diameter	土层深度 Soil depth (cm)	生物量 Biomass(mg · cm ⁻³)				表面积 Surface area(mm ² · cm ⁻³)				根长密度 RLD(mm · cm ⁻³)			
		均值 Mean	标准差 SD	变异 CV	比例 Percent	均值 Mean	标准差 SD	变异 CV	比例 Percent	均值 Mean	标准差 SD	变异 CV	比例 Percent
$\Phi_R \leq 2\text{ mm}$	0~10	2.06a	0.78	0.38	46.4	55.04a	13.58	0.25	40.7	5.50a	1.47	0.27	34.2
	10~20	0.67b	0.24	0.36	15.1	24.65b	5.98	0.24	18.2	3.24b	0.6	0.19	20.2
	20~30	0.71b	0.23	0.32	16.0	24.15b	7.58	0.31	17.9	3.08b	0.66	0.21	19.2
	30~40	0.53bc	0.44	0.83	11.9	15.76c	8.35	0.53	11.7	2.12c	0.98	0.46	13.2
	40~50	0.47c	0.17	0.36	10.7	15.55c	7.09	0.46	11.5	2.13c	0.86	0.4	13.3
	0~50	4.44	0.42	0.09	100	135.15	22.69	0.17	100	16.07	2.96	0.18	100
2 mm< Φ_R	0~10	0.35a	0.49	1.4	27.6	0.92a	1.39	1.51	27.2	0.13a	0.19	1.46	27.7
<5 mm	10~20	0.36a	0.46	1.28	28.4	0.85a	0.99	1.16	25.2	0.11ab	0.12	1.1	23.4
	20~30	0.12c	0.18	1.5	9.5	0.37c	0.6	1.62	11.0	0.06c	0.11	1.83	12.8
	30~40	0.23b	0.21	0.91	18.1	0.72b	0.67	0.93	21.3	0.10b	0.09	0.9	21.3
	40~50	0.21b	0.31	1.48	16.5	0.52c	0.72	1.38	15.4	0.07c	0.09	1.29	14.9
	0~50	1.27	1.56	1.23	100	3.38	4.00	1.18	100	0.47	0.55	1.17	100

同列数值后不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$) Different letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level (t -test).

~50 cm 土层. 根径 $\leq 2\text{ mm}$ 根系生物量、表面积和根长密度垂直分布格局基本一致,均随土层深度的增加而减少. 这主要与有效性土壤资源的分布格局有关^[16],其分布特征可以提高根系吸收养分的效率^[15].

根径 2~5 mm 根系的分布格局则与根径 $\leq 2\text{ mm}$ 细根不同,但其生物量、表面积和根长密度的垂直分布具有一致性. 0~20 cm 土层是根径 2~5 mm 根系的集中分布区,55.9% 的生物量,52.4% 的表面积和 51.1% 的根长密度都分布在该区;而根径 2~5 mm 根系生物量、表面积和根长密度在 20~30 cm 土层却分布较少,仅占其总量的 9.5%、11.0% 和

12.8%;30~50 cm 土层根径 2~5 mm 根系生物量、表面积和根长密度均呈随土层加深而减少的垂直分布格局. 根径 2~5 mm 根系各土层中变异系数均明显大于根径 $\leq 2\text{ mm}$ 细根,说明其在各土层中分布格局的空间异质性较 $\leq 2\text{ mm}$ 细根更大.

2.3 不同径级青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度与土壤资源有效性的关系

土壤资源具有高度的空间异质性^[17],显著表现在各土层土壤养分的空间分布差异. 有机质是各种养分的主要来源,氮是植物生长必需的大量矿质元素之一. 研究表明,有机质、有效氮的空间分布对植物根系生长、发育、寿命及呼吸有重要影响^[18-19]. 根

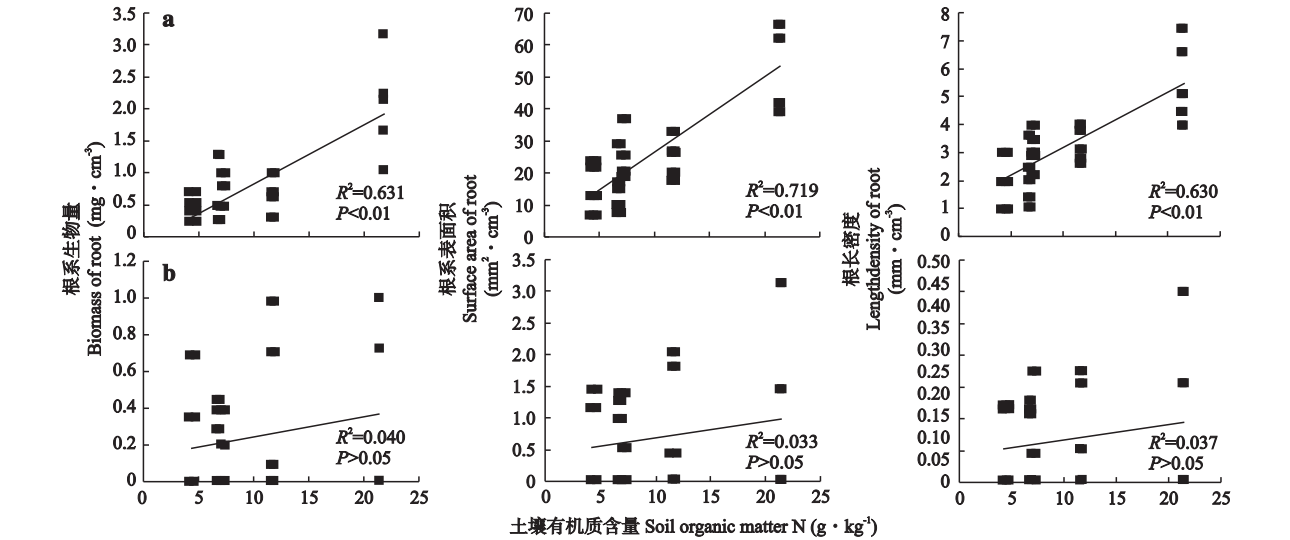


图 1 青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度与土壤有机质含量的关系
Fig.1 Relationships of root biomass, surface area and root length density with soil organic matter in *Populus cathayana* plantation.
a) $\Phi_R \leq 2\text{ mm}$; b) $2\text{ mm} < \Phi_R < 5\text{ mm}$.

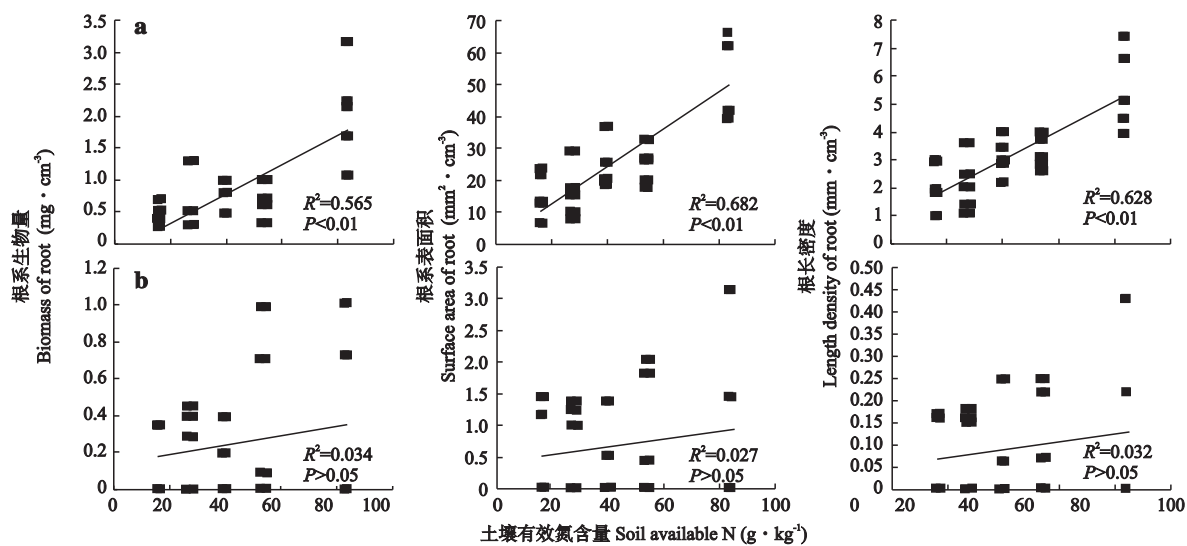


图2 青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度与土壤有效氮含量的关系
Fig.2 Relationships of roots biomass, surface area and root length density with soil available nitrogen in the *Populus cathayana* plantation.

径 ≤ 2 mm 细根生物量、表面积和根长密度与土壤有机质、有效氮含量呈极显著相关关系(图1、图2)。而根径2~5 mm 根系生物量、表面积和根长密度与土壤有机质和有效氮含量不相关(图1、图2)。这表明在土壤有机质和有效氮含量较高的土层中,分布着较多的细根生物量、根表面积,并且具有较高的根长密度;有机质、有效氮较低的土层中细根生物量、根表面积分布较少,根长密度也相对较低;而根径2~5 mm 根系生物量、表面积和根长密度则较少受到这种土壤资源有效性的限制。

3 讨 论

林木根系将地上部分庞大的林冠和主干固着于土壤中,并通过吸收土壤中的水分和养分供应树木地上部分生长,维持生命活动所需的物质和能量。细根是林木根系中木质化程度较低、直接与根尖连接,具有吸收水分和养分功能的那部分根系。Caldwell等^[20]研究认为,根系的动态主要是细根的动态,维持细根的生理生态功能主要是保持细根的吸收能力。本研究结果表明,在青杨人工林 <5 mm 根系中,根径 ≤ 2 mm 细根生物量占78%,表面积和根长密度在97%以上。维持如此庞大的细根生物量、表面积和根长密度,保证了林木水分、养分的供应和正常生长。同时,这种生物量(78%)与根表面积、根长密度(97%以上)不对称的比例关系,说明细根构建和维持单位长度消耗的碳水化合物较少,对行使细根的吸收功能有利^[5],反映了根径 ≤ 2 mm 细根和根

径2~5 mm 根系功能上的差异。

土壤环境具有高度的异质性,不同土层深度根系的生长、分布不仅受自身遗传特性的影响,也受到土壤环境的影响^[21]。当土壤资源有效性增加时,C向地下分配增多,促进细根生长和生物量的积累^[22-23]。土壤养分含量高的土层,植物细根尽可能多地投入碳水化合物,扩大与土壤的接触面积,增加单位体积根长密度,从而吸收更多的养分;而在土壤养分资源相对匮乏的土层,其细根生物量、表面积和根长密度的投入较少。多种土壤养分因子对林木细根生物量、表面积和根长密度的影响程度不同,细根的垂直分布主要由土壤中氮含量控制^[24],土壤含碳量与细根生物量的分布也存在相关关系^[18]。杨树人工林根径 ≤ 2 mm 细根随土层增加而减少,生物量、表面积和根长密度与土壤有机质、有效氮含量呈极显著相关,说明细根作为植物对土壤资源有效性反应最敏感的器官^[25],具有较强的可塑性。为了最大限度地获取土壤资源,它会对养分的空间异质性产生各种可塑性反应,如调整细根的直径、分枝角、节间距以及空间构型等,来实现养分斑块的高效利用^[26];或依赖细根的其他特征的调整(如细根直径变小、比根长增加等)来实现养分斑块的开发^[27]。这也是根系适应空间异质性的策略^[28]。这种受土壤资源空间异质性影响的细根碳投入差异,形成了细根的空间分布格局,也使青杨人工林林细根生物量、表面积和根长密度均与土壤资源有效性呈现出显著的正相关关系。

细根是植物吸收养分的重要器官^[15]. 根径 2 ~ 5 mm 根系生物量、表面积和根长密度与土壤有机质、有效氮含量不相关,说明根径 2 ~ 5 mm 根系对土壤资源有效性的反应不敏感. 粗根主要起机械支撑和构架作用^[29]. 相对于细根,粗根具有较高的运输效率,可以免受不良环境伤害和病原菌侵染,以及土壤植食性动物(如线虫)的啃食等^[30]. 在青杨人工林中,直径为 2 ~ 5 mm 的根系的生长和分布主要受哪些外界因素限制? 还需进一步试验验证

参考文献

- [1] Gale MR, Grigal DE. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, **17**: 829–834
- [2] Vogt KA, Vogt DJ, Palmiotto PA, *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, forest type and species. *Plant and Soil*, 1996, **187**: 159–219
- [3] Eissenstat DM, Wells CE, Yanai RD. Building roots in a changing environment: Implications for root longevity. *New Phytologist*, 2000, **147**: 32–42
- [4] Forde BG, Lorenzo H. The nutritional control of root development. *Plant and Soil*, 2001, **232**: 51–68
- [5] Wang X-R (王向荣), Wang Z-Q (王政权), Han Y-Z (韩有志), *et al.* Variations of fine root diameter with root order in *Manchurian ash* and *Dahurian larch* plantations. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(6): 871–877 (in Chinese)
- [6] Guo DL, Mitchell RJ, Hendricks JJ. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. *Oecologia*, 2004, **140**: 450–457
- [7] Lin X-H (林希昊), Wang Z-H (王真辉), Chen Q-B (陈秋波). Research advances in fine roots of *Hevea brasiliensis*. *Chinese Journal of Tropical Crops* (热带作物学报), 2008, **29**(3): 390–395 (in Chinese)
- [8] Li P-Z (李培芝), Fan S-H (范世华), Wang L-H (王力华), *et al.* Productivity and turnover of fine roots in poplar tree and grass roots. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(6): 829–832 (in Chinese)
- [9] Yang L-Y (杨丽韞), Li W-H (李文华). Fine root distribution and turnover in a broad-leaved and Korean pine climax forest of the Changbai Mountain in China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2005, **27**(2): 1–5 (in Chinese)
- [10] Chen J-L (陈金林), Xu X-J (许新健), Jiang Z-L (姜志林), *et al.* Studies on the turnover of fine roots in the secondary oak forest of Kongqing Hill. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 1999, **23**(1): 6–10 (in Chinese)
- [11] Chesney P. Nitrogen and fine root length dynamics in a tropical agroforestry system with periodically pruned *Erythrina poeppigiana*. *Agroforestry Systems*, 2008, **72**: 149–159
- [12] Wang S-T (王树堂), Han S-J (韩士杰), Zhang J-H (张军辉), *et al.* Woody plant fine root biomass and its spatial distribution in top soil of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(3): 583–589 (in Chinese)
- [13] Li Y-K (李酉开). Chemistry Analysis Method of Agriculture Soil. Beijing: Science Press, 1983 (in Chinese)
- [14] Yang X-Y (杨秀云), Han Y-Z (韩有志), Zhang Y-X (张芸香), *et al.* Fine-root biomass of *Larix principis-rupprechtii* and seasonal dynamics of forests. *Journal of Shanxi Agricultural University* (山西农业大学学报), 2007, **27**(2): 116–119 (in Chinese)
- [15] Mei L (梅 莉), Wang Z-Q (王政权), Han Y-Z (韩有志), *et al.* Distribution patterns of *Fraxinus mandshurica* root biomass, specific root length and root length density. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(1): 1–4 (in Chinese)
- [16] Schenk HJ, Jackson RB. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 2002, **72**: 311–328
- [17] Yang X-Q (杨秀清), Han Y-Z (韩有志), Li-L (李乐), *et al.* The effect of heterogeneous spatial distribution of soil nitrogen on regeneration of *Larix principis-rupprechtii* seedlings in typical naturally-regenerated montane forests of Northern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(9): 4656–4664 (in Chinese)
- [18] Yang L-Y (杨丽韞), Luo T-X (罗天祥), Wu S-T (吴松涛). Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, North-east China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(9): 3609–3617 (in Chinese)
- [19] Yu L-Z (于立忠), Ding G-Q (丁国泉), Zhu J-J (朱教君), *et al.* Effects of fertilization on fine root biomass of *Larix kaempferi* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(4): 713–720 (in Chinese)
- [20] Caldwell MM, Pearcy RW. Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Below Ground. San Diego: Academic Press. 1994

- [21] Wei L-Y (韦兰英), Shangguan Z-P (上官周平). Vertical distribution of the fine root of the natural *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* forest in Ziwuling Loess Plateau. *Journal of Northwest A & F University* (西北农林科技大学学报), 2007, **35**(7): 70–74 (in Chinese)
- [22] King JS, Albaugh TJ, Allen HL, *et al.* Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist*, 2002, **154**: 389–398
- [23] Burton AJ, Pregitzer KS, Hendrick RL. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, **125**: 389–399
- [24] Cavelier J. Fine root biomass and soil properties in a semideciduous and a lower montane rain forest in Panama. *Plant and Soil*, 1992, **142**: 187–201
- [25] Aerts R, Chapin FS. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, **30**: 1–67
- [26] Wang Q-C (王庆成), Cheng Y-H (程云环). Response of fine roots to soil nutrient spatial heterogeneity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 1063–1068 (in Chinese)
- [27] Mou P, Michell RJ, Jones RH. Root distribution of two tree species under a heterogeneous environment. *Journal of Applied Ecology*, 1997, **34**: 645–656
- [28] Jackson RB, Canadell JR, Ehleringer JR, *et al.* A global analysis of root distribution for terrestrial biomass. *Oecologia*, 1996, **108**: 389–411
- [29] Zhang Y-Q (张宇清), Zhu Q-K (朱清科), Qi S (齐实), *et al.* Vertical distribution characteristics of root system of several shrub species on terrace banks. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2006, **28**(2): 34–38
- [30] Eissenstat DM, Yanai RD. The ecology of root lifespan. *Advances in Ecological Research*, 1997, **27**: 2–59

作者简介 燕辉,男,1984年生,博士研究生.主要从事生物节水与生理生态研究. E-mail: hnyanhui@yeah.net

责任编辑 李凤琴
