

黄土高原4种植被类型的细根生物量和年生产量*

邓强^{1,2} 李婷³ 袁志友^{1,4} 焦峰^{1,4**}

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ⁴西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 细根(≤ 2 mm)在陆地生态系统净初级生产力的分配中占有重要地位,在碳循环和水土保持方面具有重要意义. 本文采用土钻法和内生长法,以黄土高原刺槐人工林、落叶灌木、退耕草地和沙蒿群落4种主要植被类型为对象,研究0~40 cm土层细根生物量、垂直分布和细根年生产量. 结果表明:细根生物量与纬度呈线性负相关. 4种植被类型0~40 cm土层细根生物量的大小顺序为落叶灌木($220 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) > 刺槐人工林($163 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) \approx 退耕草地($162 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) > 沙蒿群落($79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). 退耕草地直径 ≤ 1 mm细根生物量占直径 ≤ 2 mm总细根生物量的74.1%,在4种植被类型中最高;4种植被类型细根生物量随着土层深度的增加而减少,最大值均出现在0~10 cm土层. 退耕草地0~10 cm土层细根生物量占0~40 cm土层总细根生物量的44.1%,显著高于其他3种植被类型;细根年生产量与纬度呈线性负相关. 4种植被类型0~40 cm土层细根年生产量大小顺序为退耕草地($315 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > 落叶灌木($249 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > 刺槐人工林($219 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > 沙蒿群落($115 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),其中退耕草地显著高于其他3种植被类型. 退耕草地0~10 cm土层细根生产量占0~40 cm土层总细根生产量的40.4%,在4种植被类型中最高. 退耕草地细根周转时间为0.51 a,低于其他3种植被类型.

关键词 刺槐人工林 落叶灌木 退耕草地 沙蒿群落 细根生物量 生产量

文章编号 1001-9332(2014)11-3091-08 中图分类号 Q948.1 文献标识码 A

DOI:10.13287/j.1001-9332.20140829.014

Fine root biomass and production of four vegetation types in Loess Plateau, China. DENG Qiang^{1,2}, LI Ting³, YUAN Zhi-you^{1,4}, JIAO Feng^{1,4} (¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁴Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(11): 3091-3098.

Abstract: Fine roots (≤ 2 mm) play a major role in biogeochemical cycling in ecosystems. By the methods of soil cores and ingrowth soil cores, we studied the biomass and annual production of fine roots in 0-40 cm soil layers of four main vegetation types, i. e., *Robinia pseudoacacia* plantation, deciduous shrubs, abandoned grassland, and *Artemisia desertorum* community in Loess Plateau, China. The spatial patterns of fine root biomass and production were negatively associated with latitudes. The fine root biomass in the 0-40 cm soil layer was in the order of deciduous shrubs ($220 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), *R. pseudoacacia* plantation ($163 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), abandoned grassland ($162 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) and *A. desertorum* community ($79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). The proportion of ≤ 1 mm fine root biomass (74.1%) in the 0-40 cm soil layer of abandoned grassland was significantly higher than those in the other three vegetation types. The fine root biomass of the four vegetation types was mainly distributed in the 0-10 cm soil layer and decreased with soil depth. The proportion of fine root biomass (44.1%) in the 0-10 cm soil layer of abandoned grassland was significantly higher than those in other three vegetation types. The fine root productions of four vegetation types were in the order of abandoned grassland ($315 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > deciduous shrubs ($249 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > *R. pseudoacacia* plantation ($219 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > *A. desertorum* community ($115 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), and mainly concentrated

* 国家自然科学基金项目(41271043, 31370455)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-406)和中国科学院知识创新工程“百人计划”项目资助.

** 通讯作者. E-mail: Jiaof@ms.iswc.ac.cn

2014-03-17 收稿, 2014-08-23 接受.

in the 0–10 cm top soil layer and decreased with the soil depth. The proportion of the annual production (40.4%) in the 0–10 cm soil layer was the highest in abandoned grassland. Fine roots of abandoned grassland turned over faster than those from the other three vegetation types.

Key words: *Robinia pseudoacacia* plantation; deciduous shrubs; abandoned grassland; *Artemisia desertorum* community; fine root biomass; production.

细根(直径 ≤ 2 mm)是植物吸收水分和养分的主要途径^[1]。细根生物量虽然只占植物总生物量的5%左右^[2],但由于其相对较短的寿命和快速的周转,维持细根的动态过程需要消耗大量的植物初级生产力。对于森林生态系统,地下根系的生产力平均占总生产力的33%甚至75%^[3]。通过细根周转进入土壤的养分和有机质是土壤肥力维持和碳循环的重要来源^[4]。研究表明,细根的生长和死亡与生态系统的内因(植被组成、林龄)和外因(土壤特性、气候等)有关^[5]。对细根生长、分布、生产与周转、细根动态及其与环境之间的关系等方面的研究,有助于了解细根的功能及其与环境因子之间的关系^[6]。

根系生物量反映了植物的地下碳分配策略,是环境因子和群落结构共同作用的结果^[7]。对全世界不同森林生态系统100多个细根生物量分析发现,从北方森林到寒温带、暖温带、热带森林,细根生物量呈增加趋势^[8]。同一气候带下不同植被类型、植物多样性和演替阶段的群落细根生物量差异较大。例如,宁夏大罗山4种主要植被类型0~40 cm土层的细根(活细根和死细根)生物量顺序为油松(*Pinus tabulaeformis*)纯林>青海云杉(*P. crassifolia*)纯林>落叶灌木>荒漠草原^[9];中亚热带森林总细根生物量随着树种多样性的增加而增加^[10];加拿大北方森林细根生物量随着演替的进行逐渐增加^[6]。对同一地区不同植被类型细根生物量的研究,有助于了解同一气候带下不同植被类型细根生长的差异与联系,对于揭示植物对生境的适应具有重要意义。而细根生产是细根生物量动态变化的结果。不同气候、土壤、森林类型的细根生产变化较大。目前,关于北方森林、寒温带和热带森林生态系统的细根研究较多,对于暖温带森林生态系统的研究较少^[6,8]。

黄土高原地处黄河中游,处于我国由湿润、半湿润气候向干旱、半干旱气候过渡的中间地带,也是暖温带阔叶落叶林向典型草原和荒漠草原过渡的地带。降水量由东南向西北逐渐减少,植被类型按森林→灌丛→草地→沙地的顺序变化^[11]。由于气候干燥少雨,且受到人类活动的强烈影响,黄土高原原始植被破坏严重,大部分已经成为次生或人工植被,

水土流失严重。自20世纪开始,黄土高原进行大规模林、草植被建设,但一直存在重乔轻灌草问题。人工乔木林分结构单一,林下植被稀疏,对黄土高原植被生产力的恢复、多样性保护和水土保持不利^[12]。研究黄土高原不同植被类型的细根动态可以揭示植被对干旱环境的响应,反映植物或生态系统水平的健康状况,对于黄土高原水土保持和生态修复具有积极意义^[13]。为此,本文对黄土高原4种主要植被类型细根生物量及年生产量进行研究,以为该区植物群落对环境的适应特性和植被建设研究提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

在黄土高原丘陵区的富县、甘泉县、安塞县、靖边县、横山县和榆林市榆阳区,由南至北分别选取具有典型代表性的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林、落叶灌木、退耕草地和沙蒿群落作为研究对象。地理位置在35°57′—38°18′N,108°55′—109°49′E,海拔1085~1553 m。研究区属暖温带大陆性季风气候,年降雨量为360~520 mm,年均温为8.5~9.2℃。从东南到西北,降雨、温度具有明显的梯度变化特征^[12]。主要土壤类型为黄土母质上发育的黄绵土和绵沙土,土质疏松,抗蚀抗冲性差,土壤侵蚀剧烈,水土流失严重。研究区最北部处于毛乌素沙地南缘和黄土高原北部接壤地带,年降水量<400 mm,土壤类型为风沙土。在每种植被类型下随机设置4~6块20 m×20 m样地,共计21块,样地植被基本概况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 细根生物量测定 2012年8月上旬,用内径7 cm的根钻在样地内随机选取10个点进行取样,以10 cm为间隔将土层分为0~10、10~20、20~30和30~40 cm 4层,用0.2 mm筛子冲洗,拣出细根(直径 ≤ 2 mm)并分成2个径级(≤ 1 和1~2 mm)。将挑出的细根于80℃烘箱烘干至恒量后称干质量。细根生物量($g \cdot m^{-2}$) = 平均每根土芯细根干质量/ $[\pi \times (0.07/2)^2]$ 。

表 1 调查样地概况

Table 1 Status of experimental plots

地点 Site	经纬度 Latitude and longitude	植被类型 Vegetation type	优势植物 Dominant species	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type	年均降水量 Annual average precipitation (mm)	林分密度 Stand density (tree · hm ⁻²)	盖度 Coverage (%)
富县 1 Fuxian 1	35°57' N, 109°22' E	I	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1085	黄绵土 Loessial soil	510 ~ 520	1200	39
富县 2 Fuxian 2	35°06' N, 109°23' E	I	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1088	黄绵土 Loessial soil	510 ~ 520	1250	73
甘泉 3 Ganquan 3	36°13' N, 109°21' E	I	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1095	黄绵土 Loessial soil	505 ~ 511	950	24
甘泉 4 Ganquan 4	36°22' N, 109°23' E	I	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1247	黄绵土 Loessial soil	505 ~ 511	1250	65
甘泉 5 Ganquan 5	36°41' N, 109°25' E	I	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1190	黄绵土 Loessial soil	505 ~ 511	1100	55
安塞 6 Ansai 6	36°45' N, 109°15' E	II	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	1200	黄绵土 Loessial soil	395 ~ 507	-	93
安塞 7 Ansai 7	36°50' N, 109°16' E	III	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> 、茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> 、角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	1168	黄绵土 Loessial soil	395 ~ 507	-	55
安塞 8 Ansai 8	36°50' N, 109°16' E	III	早熟禾 <i>Poa sinatenuata</i> 、铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	1183	黄绵土 Loessial soil	395 ~ 507	-	79
安塞 9 Ansai 9	36°51' N, 109°18' E	II	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	1108	黄绵土 Loessial soil	395 ~ 507	-	89
安塞 10 Ansai 10	36°51' N, 109°18' E	III	香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> 、达乌里胡 枝子 <i>Lespedeza davurica</i> 、白羊草 <i>Bothriochloa isochemum</i>	1100	黄绵土 Loessial soil	395 ~ 507	-	77
安塞 11 Ansai 11	37°00' N, 109°10' E	III	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i> 、芦苇 <i>Phragmites australis</i> 、达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	1220	黄绵土 Loessial soil	395 ~ 507	-	64
安塞 12 Ansai 12	37°08' N, 109°02' E	III	披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i> 、达乌里胡 枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	1260	黄绵土 Loessial soil	395 ~ 507	-	69
靖边 13 Jingbian 13	37°15' N, 108°58' E	II	柠条 <i>Caragana korshinskii</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	1422	绵沙土 Loess sandy soil	386 ~ 396	-	77
靖边 14 Jingbian 14	37°19' N, 108°55' E	III	角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i> 、沙棘 <i>Hippophae rham- noides</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	1553	绵沙土 Loess sandy soil	386 ~ 396	-	65
靖边 15 Jingbian 15	37°41' N, 108°51' E	II	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	1408	绵沙土 Loess sandy soil	386 ~ 396	-	72
靖边 16 Jingbian 16	37°45' N, 108°56' E	II	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	1350	绵沙土 Loess sandy soil	386 ~ 396	-	44
横山 17 Hengshan 17	37°52' N, 109°03' E	II	沙柳 <i>Salix psammophila</i> 、紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	1158	绵沙土 Loess sandy soil	371 ~ 389	-	42
横山 18 Hengshan 18	38°03' N, 109°22' E	IV	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	1053	风沙土 Aeolian sandy soil	371 ~ 389	-	33
横山 19 Hengshan 19	38°05' N, 109°21' E	IV	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i> 、克氏针茅 <i>Stipa krylovii</i>	1135	风沙土 Aeolian sandy soil	371 ~ 389	-	29
榆林 20 Yulin 20	38°18' N, 109°49' E	IV	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	1163	风沙土 Aeolian sandy soil	360 ~ 372	-	24
榆林 21 Yulin 21	38°11' N, 109°27' E	IV	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i> 、小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	1144	风沙土 Aeolian sandy soil	360 ~ 372	-	19

I: 刺槐人工林 *Robinia pseudoacacia* plantation; II: 落叶灌木 Deciduous shrubs; III: 退耕草地 Abandoned grassland; IV: 沙蒿群落 *Artemisia desertorum* community.

1.2.2 细根生产量和周转时间测定 细根生长量的测定采用内生长土芯法^[2]。在样地内用内径 7 cm 的土钻随机钻取出 10 个土芯,深度 40 cm。将过筛无根土装入直径 7 cm、高 40 cm 尼龙网袋,埋入土洞中,周围用该样地的土壤(除去根系和杂物)混入少量细沙填充。一年后(2013 年 8 月)取出土芯,测定不同深度土柱的细根生物量(包括活根和死根)。细根年生产量($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) = 平均每根土芯细根干质量 / [$\pi \times (0.07/2)^2 \times 1$] , 周转时间(a) = 细根生物量($g \cdot m^{-2}$) / 细根年生产量($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)^[14]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析,细根生物量、年生产量与纬度之间的关系采用线性回归分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小差异显著法(LSD)比较不同植被类型和土层细根生物量和细根年生产量的差异($\alpha = 0.05$)。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 4 种植被类型细根生物量

由图1可以看出,不同纬度细根生物量为64 ~

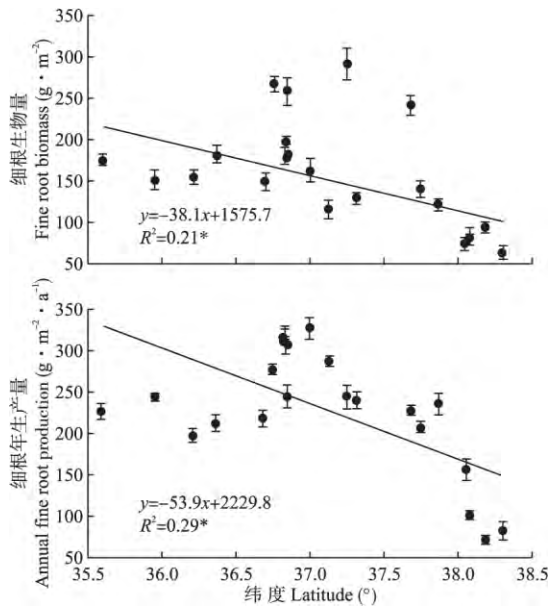


图 1 细根生物量和细根年生产量随纬度的变化
Fig. 1 Variation of fine root biomass and annual production with latitude.
 * $P < 0.05$.

292 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$. 细根生物量随纬度升高呈显著减小趋势. 由表 2 可以看出 4 种植被类型下 0~40 cm 土层细根 (≤ 2 mm) 生物量大小为: 落叶灌木 ($220 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > 刺槐人工林 ($163 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) \approx 退耕草地 ($162 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > 沙蒿群落 ($79 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$). 其中, 落叶灌木的细根 (≤ 2 mm) 生物量显著高于其他 3 种植被类型. 退耕草地直径 ≤ 1 mm 细根生物量占直径 ≤ 2 mm 总细根生物量的 74.1%, 是 4 种植被类型中最高的, 其次为落叶灌木 (70.9%)、刺槐人工林 (68.7%)、沙蒿群落 (62.0%).

2.2 4 种植被类型细根生物量的垂直分布

4 种植被类型不同径级 (≤ 1 和 1~2 mm) 细根生物量均随着土层深度的增加而降低 (图 2). 沙蒿群落不同土层细根 (≤ 2 mm) 生物量无显著差异, 刺

表 2 4 种植被类型细根现存生物量
Table 2 Fine root standing biomass of the four vegetation types ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)

植被类型 Vegetation type	直径 Diameter (mm)		
	≤ 1	1~2	≤ 2
刺槐人工林 <i>Robinia pseudoacacia</i> plantation	112 \pm 15b	51 \pm 7b	163 \pm 22b
落叶灌木 Deciduous shrub	156 \pm 22a	64 \pm 6a	220 \pm 27a
退耕草地 Abandoned grassland	120 \pm 22b	42 \pm 5b	162 \pm 28b
沙蒿群落 <i>Artemisia desertorum</i> community	49 \pm 14c	30 \pm 10b	79 \pm 22c

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters indicated significant difference at 0.05 level.

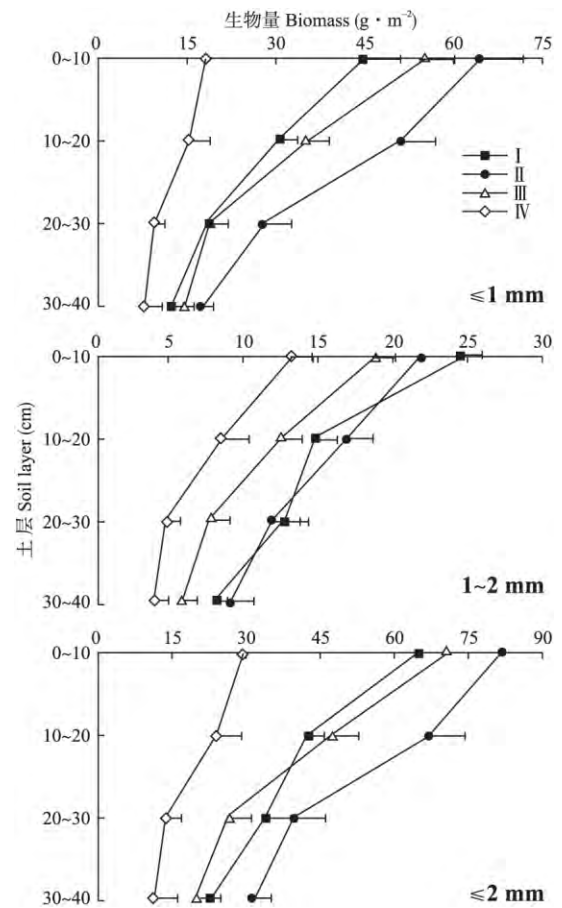


图 2 4 种植被类型细根生物量的垂直分布
Fig. 2 Vertical distribution of fine root biomass in four vegetation types.

I: 刺槐人工林 *Robinia pseudoacacia* plantation; II: 落叶灌木 Deciduous shrub; III: 退耕草地 Abandoned grassland; IV: 沙蒿群落 *Artemisia desertorum* community. 下同 The same below.

槐人工林 10~20 和 20~30 cm 土层细根生物量差异不显著, 落叶灌木和退耕草地不同土层细根生物量差异显著. 刺槐人工林、落叶灌木和退耕草地 0~10 cm 土层细根 (≤ 2 mm) 生物量无显著差异, 但都显著高于沙蒿群落. 0~10 cm 土层细根 (≤ 2 mm) 生物量占 0~40 cm 土层总细根生物量的比例大小顺序为退耕草地 (44.1%) > 刺槐 (38.9%) \approx 沙蒿群落 (37.5%) \approx 落叶灌木 (37.2%), 其中, 退耕草地显著高于其他 3 种植被类型.

2.3 4 种植被类型细根年生产量

与细根生物量相似, 细根年生产量随纬度的增加呈显著减小的趋势 (图 1). 4 种植被类型中, 0~40 cm 土层细根生产量最高为退耕草地 ($315 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 其次为落叶灌木 ($249 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、刺槐人工林 ($219 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、沙蒿群落 ($115 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). 其中, 退耕草地细根生产量显著高于其他 3 种植被类型 (图 3). 10~20、20~30 和 30~

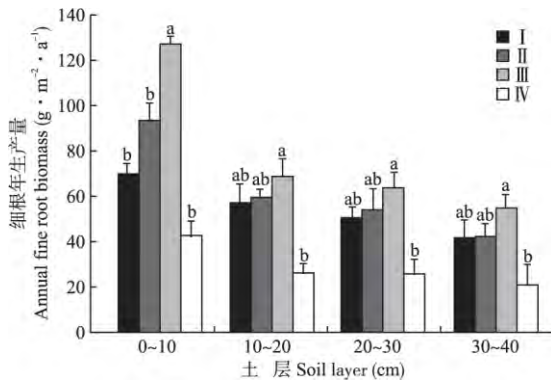


图 3 4 种植被类型细根年生产量

Fig. 3 Annual production of fine root in four vegetation types. Different small letters in the same soil layer indicated significant difference among different vegetation types at 0.05 level.

40 cm 土层退耕草地细根生产量高于其他 3 种植被类型,但是与刺槐人工林和落叶灌木之间的差异不显著。细根年生产量具有明显的垂直分布规律,随着土层的加深而降低。4 种植被类型年生产量最大值均出现在 0~10 cm 土层,最小值均在 30~40 cm 土层。0~10 cm 土层细根生产量占 0~40 cm 土层总细根生产量的比例最大为退耕草地(40.4%),其次为落叶灌木(37.8%)、沙蒿群落(35.5%)和刺槐人工林(32.1%)。4 种植被类型中,退耕草地 0~40 cm 土层细根周转时间为 0.51 a,低于沙蒿群落(0.68 a)、刺槐人工林(0.74 a)和落叶灌木(0.88 a)。

3 讨 论

3.1 4 种植被类型的细根生物量和垂直分布特征

黄土高原丘陵区属暖温带大陆性季风气候,由东南至西北年平均降水量和温度逐渐递减^[12]。本研究中 21 个样地的细根生物量随纬度升高呈减小趋势,与对北方森林^[6]的研究结果一致。除了降水和温度的影响,不同植被类型细根生物量差异较大。刺槐人工林平均细根生物量为 $163 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,远低于暖温带落叶阔叶林细根生物量的平均值($737 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)^[8],这可能与不同研究采样深度和细根分级有关。刺槐是耗水性强的树种,对土壤水分过度消耗导致的林地土壤干化可以影响根系生长^[15]。由于本研究样地为刺槐纯林,林分结构单一,加之造林时全面整地,天然草灌被破坏,因而群落细根生物量较低^[12]。柠条、沙棘和沙柳是黄土高原地区的 3 种主要造林灌木树种,根茎比大,根系发达,细根主要在 0~80 cm 土层间生长和伸展^[16-19]。相对于刺槐人工林,柠条、沙棘和沙柳灌丛密度较大,采样位

置与植株主干的水平距离对细根生物量的影响较小。因此,落叶灌木细根生物量显著高于刺槐人工林。与乔木和灌木相比,草本植物根系细小,主要利用土壤表层水分,其主要分布在 0~10 cm 土层^[20]。本研究中,退耕草地直径 $\leq 1 \text{ mm}$ 细根生物量占 $\leq 2 \text{ mm}$ 总细根生物量的比例是 4 种植被类型中最高的。有研究发现,黄土高原子午岭北部 9 a 退耕草地 0~40 cm 土层细根生物量为 $272 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[20],高于本研究中退耕草地细根生物量平均值,这可能是由年降水量和植被盖度的差异引起的。本研究中,沙蒿群落位于毛乌素沙地南缘和黄土高原北部接壤地带,属中温带半干旱气候,沙蒿为该区典型草本植物,多呈片状或斑块状分布。由于降水稀少,蒸发量远大于降水量,土壤中各种养分贫瘠,这些因素都限制植物细根的生长^[21]。研究发现,黄土高原北部神木六道沟流域沙蒿群落细根生物量低于沙棘、沙柳林和刺槐人工林^[17],与本研究结果一致。4 种植被类型直径 $\leq 1 \text{ mm}$ 细根生物量占直径 $\leq 2 \text{ mm}$ 总细根生物量的比例均 $> 62.0\%$,说明直径 $\leq 1 \text{ mm}$ 细根在细根中占有重要地位。

植物根系生长发育动态及形态特征是生物学特性和环境因素共同作用的结果^[22-23]。本研究中,4 种植被类型细根生物量随深度增加而递减,这可能与土壤浅层是提供根系水分、养分和热量的主要场所有关^[24]。细根垂直分布特征还受植被种类的影响。暖温带半湿润大陆性气候下北方杨树(*Populus simonii*)人工林在 0~10 cm 土层中细根生物量占 0~40 cm 剖面根系总生物量的 40%~50%,平均为 42%,这与本文刺槐人工林细根垂直分布结果一致^[25]。长白山北坡 5 种垂直植被带典型植物群落类型中, $> 72\%$ 的细根集中于土壤表层 0~10 cm^[26],远高于本研究中刺槐人工林。干旱胁迫会增加植物对根的资源配置,促进细根生长,尤其是刺激细根向下伸长以获取深层土壤的水分和养分^[27]。在黄土高原地区,刺槐是深根性树种,其根系在深层土壤中有较多分布^[28]。生长在半干旱区的沙蒿群落,水分极大地限制了植物的生长,细根生物量显著低于刺槐人工林、沙棘、柠条和沙柳林。但方差分析表明,刺槐人工林、落叶灌木、沙蒿群落 0~10 cm 土层细根生物量占 0~40 cm 土层总细根生物量的比例无显著差异,这说明在黄土高原丘陵区养分贫瘠和水分匮乏的情况下,植物用以摄取土壤资源的碳分配策略相似,根系发育具有明显的表聚现象。由于草本植物根系分布较浅,退耕草地细根集中分布于

0~10 cm 土层 0~10 cm 土层细根生物量占 0~40 cm 土层总细根生物量的比例显著高于其他 3 种植被类型。

3.2 4 种植被类型的细根年生产量

本研究中,细根年生产量和细根生物量具有类似的变化规律,均与纬度呈显著负相关。随着纬度的升高,年平均降水量和温度逐渐递减,限制了细根的生产^[29]。本研究中,刺槐人工林细根年生产量为 $219 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,在世界森林细根年生产量的范围内($140 \sim 1150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[8]。与其他森林(取样深度 40 cm 左右,径级 $\leq 2 \text{ mm}$)相比,刺槐人工林 0~40 cm 土层细根年生产量低于亚热带季风常绿阔叶林($390 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中亚热带武夷山的甜槠林(*Castanopsis eyrei*) ($730 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)以及暖温带阔叶红松林(*Pinus koraiensis*) ($486 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)与暖温带杨树人工林($235 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)相近^[25,30-32]。一般认为,在温暖气候条件下,细根的周转较快,这是亚热带森林细根年生产量高于刺槐人工林的主要原因^[8]。而且,本研究中刺槐林是人工林,林内没有形成良好的乔-灌-草植被系统,细根年生产量小于天然林。相比之下,柠条、沙棘和沙柳林植被覆盖度高于刺槐人工林,而且都是耐干旱的树种,根系发达,细根年生产量较高。研究表明,晋西北黄土区柠条的细根生长速率明显高于同一地区乔木林,说明柠条长期适应干旱环境,具有较高的细根生产潜力^[33]。本研究中,退耕草地细根年生产量与内蒙古锡林郭勒盟典型草原地下生产力接近,均处于世界中等偏下水平^[34]。安塞县天然铁杆蒿和长芒草(*Stipa bungeana*)群落细根年生产量平均值为 $294 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[35],与本研究结果相似。本研究中,纬度最高的沙蒿群落细根年生产量是 4 种植被类型中最低的。关于干旱、半干旱区生态系统的研究表明,限制细根生产力的最主要因素是水分^[36]。因此,沙蒿群落长期处于干旱缺水状态是导致细根生产量低的主要原因。同一植被类型,不同土层间细根年生产量不同,可能与不同深度土壤资源的有效性密切相关。上层土壤有效性资源丰富,但是变化剧烈,下层土壤有效性资源贫瘠,变化相对稳定,这导致细根寿命在不同土层之间不同^[22,37]。本研究中,4 种植被类型 36.5% 的细根生产发生在 0~10 cm 土层,随着土层的加深细根生产逐渐减低,30~40 cm 土层年细根生产量最小,与前人研究结果一致^[37-38]。由于草本植物根系分布较浅,退耕草地 0~10 cm 土层细根年生产量占 0~40 cm 土层总细

根年生产量的比例显著高于其他 3 种植被类型。

细根周转是碳和养分归还土壤的主要途径,对于提高土壤肥力具有重要作用^[39]。细根周转除了受到环境条件的影响,还与植物种类有关^[6]。本研究中,退耕草地的细根平均周转时间为 0.51 a,是 4 种植被类型中最短的。原因可能是:草本植物多为 1 年生植物,根系没有木质化过程,其周转速度较快;而且,由于维持高的细根生物量需要消耗大量碳,因此保持较高的细根周转率可能是草本植物降低能量消耗的一种适应策略^[8]。这表明,在黄土高原,受环境因素和植被类型的共同影响,不同植被类型的细根生物量及年生产力不完全一致。进一步研究环境因子(如降水、蒸发、温度及土壤养分)对不同植被类型细根动态的影响,有助于深入了解黄土高原生态系统植物根系与环境的动态作用机制。

3.3 黄土高原后续植被建设探讨

黄土高原林、草植被建设中,过分强调经济效益,一直存在着重乔轻灌草问题^[12]。但经济效益最好的造林方式不一定是有利于长期土壤碳循环、立地生产力、多样性保护和生态系统功能维持的最佳方式。根据细根现存生物量推测,本研究中 4 种植被类型的固碳能力大小顺序为:落叶灌木 > 刺槐人工林 \approx 退耕草地 > 沙蒿群落。退耕草地和落叶灌木细根生产都高于刺槐人工林。细根生产是植物总生产力中的重要组成部分,通过细根生产进入土壤中的有机质是土壤肥力的重要来源,对整个生态系统 C、N、P 循环具有重要作用^[39]。因此,未来在黄土高原森林和森林草原地带,应更加重视建造乔、灌、草复层植被,提高植物多样性^[12]。植物种类增加,不同物种利用根系错位(生态位分离)增加对不同土壤层次水分和养分资源的利用,有利于提高生态系统地下生产力和土壤水分、养分条件^[7,40]。建造人工复层林草植被,最终形成接近天然林的稳定混交植被,可以提高植被建设的生态效益。

参考文献

- [1] Jackson RB, Mooney HA, Schulze E. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, **94**: 7362-7366
- [2] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil*, 1983, **71**: 87-101
- [3] Gill RA, Jackson RB. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, **147**: 13-31
- [4] Gordon WS, Jackson RB. Nutrient concentrations in

- fine roots. *Ecology*, 2000, **81**: 275 – 280
- [5] Yuan ZY, Chen HY. A global analysis of fine root production as affected by soil nitrogen and phosphorus. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, **279**: 3796 – 3802
- [6] Yuan ZY, Chen HY. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: Literature review and meta-analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2010, **29**: 204 – 221
- [7] Liu C, Xiang WH, Lei PF, et al. Standing fine root mass and production in four Chinese subtropical forests along a succession and species diversity gradient. *Plant and Soil*, 2014, **376**: 445 – 459
- [8] Zhang X-Q (张小全), Wu K-H (吴可红). Fine-root production and turnover for forest ecosystems. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37**(3): 126 – 138 (in Chinese)
- [9] Su J-S (苏纪帅), Cheng J-M (程积民), Gao Y (高阳), et al. Fine root biomass of four main vegetation types in Daluo Mountain of Ningxia, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(3): 626 – 632 (in Chinese)
- [10] Liu C (刘聪), Xiang W-H (项文化), Tian D-L (田大伦), et al. Overyielding of fine root biomass as increasing plant species richness in subtropical forests in central southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(5): 539 – 550 (in Chinese)
- [11] Zhou X-H (周晓红), Zhao J-B (赵景波). Climatic change and vegetation restoration on the Loess Plateau. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2005, **22**(1): 116 – 119 (in Chinese)
- [12] Chen Y-M (陈云明), Liang Y-M (梁一民), Cheng J-M (程积民). The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **26**(3): 339 – 345 (in Chinese)
- [13] Bloomfield J, Vogt KA, Vogt DJ. Decay rate and substrate quality of fine roots and foliage of two tropical tree species in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Plant and Soil*, 1993, **150**: 233 – 245
- [14] Yang YS, Chen GS, Lin P, et al. Fine root distribution, seasonal pattern and production in four plantations compared with a natural forest in Subtropical China. *Annals of Forest Science*, 2004, **61**: 617 – 627
- [15] Shan C-J (单长卷), Liang Z-S (梁宗锁), Hao W-F (郝文芳). Review on growth of locust and soil water in Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2003, **23**(8): 1341 – 1346 (in Chinese)
- [16] Niu X-W (牛西午). Study on the biological characteristics of *Caragana korshinskii*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 1998, **13**(4): 123 – 130 (in Chinese)
- [17] Cheng X-R (成向荣), Huang M-B (黄明斌), Shao M-A (邵明安). Vertical distribution of representative plantations fine root in wind-water erosion crisscross region, Shenmu. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2007, **27**(2): 321 – 327 (in Chinese)
- [18] Xun J-J (荀俊杰), Li J-Y (李俊英), Chen J-W (陈建文), et al. Relationships of fine root standing length of *Caragana korshinskii* seedlings with environment factors. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2009, **33**(4): 764 – 771 (in Chinese)
- [19] Liu J (刘健), He X (贺晓), Bao H-L (包海龙), et al. Distribution of fine roots of *Salix psammophila* and its relationship with soil moisture in Mu Us sandland. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2010, **30**(6): 1362 – 1366 (in Chinese)
- [20] Wei L-Y (韦兰英), Shangguan Z-P (上官周平). Relationship between vertical distribution of fine root in different successional stages of herbaceous vegetation and soil environment in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(11): 3740 – 3748 (in Chinese)
- [21] Wallace A, Bamberg SA, Cha JW. Quantitative studies of roots of perennial plants in the Mojave Desert. *Ecology*, 1974, **55**: 1160 – 1162
- [22] Pregitzer KS, Zak DR, Maziasz J, et al. Interactive effects of atmospheric CO₂ and soil-N availability on fine roots of *Populus tremuloides*. *Ecological Applications*, 2000, **10**: 18 – 33
- [23] Steele SJ, Gower ST, Vogel JG, et al. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiology*, 1997, **17**: 577 – 587
- [24] Zhang L-D (张良德), Xu X-X (徐学选), Hu W (胡伟), et al. Spatial distribution of fine roots of a *Robinia pseudoacacia* plantation in Yangou Watershed in the Hilly Region of the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2011, **47**(11): 31 – 36 (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] Guo Z-L (郭忠玲), Zheng J-P (郑金萍), Ma Y-D (马元丹), et al. A preliminary study on fine root biomass and dynamics of woody plants in several major forest communities of Changbai Mountain, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(9): 2855 – 2862 (in Chinese)
- [27] Metcalfe DB, Meir P, Aragão LO, et al. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. *Plant and Soil*, 2008, **311**: 189 – 199
- [28] Zhao Z (赵忠), Cheng X-R (成向荣), Xue W-P (薛文鹏), et al. Difference of fine root vertical distribution of *Robinia pseudoacacia* under the different climate regions in the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42**(11): 1 – 7 (in Chinese)

- [29] Jiang H-Y (姜红英), Gu J-C (古加存), Qiu J (邱俊), *et al.* Seasonal variations of fine root production and mortality in *Larix gmelinii* plantation in 2004 - 2008. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2465 - 2471 (in Chinese)
- [30] Shan J-P (单建平), Tao D-L (陶大立), Wang M (王淼), *et al.* Overseas researches on tree fine root. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1993, **4**(3): 241 - 245 (in Chinese)
- [31] Li L-H (李凌浩), Lin P (林鹏), Xing X-R (邢雪荣). Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9**(4): 2 - 5 (in Chinese)
- [32] Wen D-Z (温达志), Wei P (魏平), Kong G-H (孔国辉), *et al.* Production and turnover rate of fine roots in two lower subtropical forest sites at Dinghushan. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1999, **23**(4): 74 - 82 (in Chinese)
- [33] Wang M-B (王孟本), Chen J-W (陈建文), Shi J-W (史建伟), *et al.* The seasonal change patterns of production and mortality of fine roots in young *Caragana korshinskii* plantation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(19): 5121 - 5130 (in Chinese)
- [34] Dai C (戴诚), Kang M-Y (康慕谊), Ji W-Y (纪文瑶), *et al.* Responses of underground productivity to biomass and environment factors in Xilingol Grassland, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland* (中国草地学报), 2012, **34**(3): 54 - 60 (in Chinese)
- [35] Zhang N (张娜), Liang Y-M (梁一民). Comparative studies on below-ground growth and its relationship with soil moisture of two kinds of natural grassland in loess hilly region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 1999, **19**(4): 699 - 706 (in Chinese)
- [36] Pei Z-Q (裴智琴), Zhou Y (周勇), Zheng Y-R (郑元润), *et al.* Contribution of fine root turnover to the soil organic carbon cycling in a *Reaumuria soongorica* community in an arid ecosystem of Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(11): 1182 - 1191 (in Chinese)
- [37] Shi J-W (史建伟), Wang Z-Q (王政权), Yu S-Q (于水强), *et al.* Estimating fine root production, mortality and turnover with minirhizotrons in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(2): 333 - 342 (in Chinese)
- [38] Lin X-H (林希昊), Chen Q-B (陈秋波), Hua Y-G (华元刚), *et al.* Soil moisture content and fine root biomass of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations at different ages. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(2): 331 - 336 (in Chinese)
- [39] Eissenstat DM, Wells CE, Yanai RD, *et al.* Building roots in a changing environment: Implications for root longevity. *New Phytologist*, 2000, **147**: 33 - 42

作者简介 邓强男, 1989年生, 硕士研究生. 主要从事地下生态学研究. E-mail: dengqiang1989@126.com

责任编辑 孙菊
