

毛乌素沙地臭柏 (*Sabina vulgaris*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 群落的细根分布特征

张国盛^{1,*}, 吴国玺¹, 王林和¹, 秦 艳¹, 胡永宁¹, 张忠山²

(1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019; 2. 毛乌素沙地开发整治研究中心, 鄂尔多斯 017300)

摘要:用根钻法和细根分级的方法研究了毛乌素沙地臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落的细根 ($D \leq 2$ mm, D 为根直径) 垂直分布, 并用渐近线方程 $Y = 1 - \beta^d$ [Y 为从地表到一定深度的根量百分比累积值 ($0 \sim 1$), d 表示土层深度 (cm), β 为根系削弱系数] 描述根系分布与土壤深度的关系。对不同径级臭柏、油蒿细根的 β 值、根长密度及根面积指数进行计算, 结果表明: 以 15 cm 为取样深度级, 臭柏和油蒿群落活细根 ($D \leq 2$ mm) 的各月生物量平均值, 在 0 ~ 15 cm 范围内最大, 并且随土壤深度增加而减少。臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落细根生物量垂直分布的 β 值差异不显著 ($P > 0.5$), 但相应层次上的月平均细根生物量, 臭柏群落是油蒿群落的 6.7 ~ 14.6 倍 ($P < 0.05$), 臭柏灌丛是油蒿群落的 14.0 ~ 19.2 倍 ($P < 0.05$)。 $D \leq 1$ mm 与 $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm 的细根重量百分比与土壤深度都呈对数关系, 但 $D \leq 1$ mm 的细根与土壤深度的相关程度更高。根长密度与根面积指数在各土层的分布有极大的相似性。在臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落中, $D \leq 2$ mm 的细根根长密度和根面积指数随土壤深度的增加而减小。月平均值中, $D \leq 2$ mm、 $D \leq 1$ mm、 $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm 的细根在 0 ~ 90 cm 的根面积指数总和的大小都是: 臭柏灌丛 > 臭柏群落 > 油蒿群落。

关键词:臭柏; 油蒿; 细根分布; 根系削弱系数; 根长密度; 根面积指数

文章编号: 1000-0933(2009)01-0018-10 中图分类号: Q145, Q948 文献标识码: A

Fine root distribution characteristics of *sabina vulgaris* and *Artemisia ordosica* communities in the Mu Us Sandland of Inner Mongolia, China

ZHANG Guo-Sheng^{1,*}, WU Guo-Xi¹, WANG Lin-He¹, QIN Yan¹, HU Yong-Ning¹, ZHANG Zhong-Shan²

¹ College of Ecology and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, China 010019, China

² Research Center of Development and Management in the Mu Us Sandland, Ordos, China 017300, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0018 ~ 0027.

Abstract: Soil coring was used to obtain live fine roots ($D \leq 2$ mm, D is root diameter) sampled from each site taken randomly in the northern part of the Development and Management Research Center in the Mu Us Sandland. Root samples were collected five times from April to October of 2005 using 8 cm diameter cores. Roots were separated into $D \leq 1$ mm and $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm diameter classes and dry weights were determined. A well-established asymptotic equation $Y = 1 - \beta^d$ [β = root persistence coefficient, d = soil depth (cm), and Y = percentage of total root weight from soil surface to depth d] was used to describe the relationship between the fine root vertical distribution and soil depth for the *Sabina vulgaris* community, the *Sabina vulgaris* cluster and the *Artemisia ordosica* community. The average root diameter was defined as the median of the root diameter distribution, and the root length density (RLD) and root area index (RAI) were calculated according to the regression equations obtained by a pilot experiment. The results are the following: (1) The means of biomass by month for live fine roots ($D \leq 2$ mm) reached a maximum at the 0 – 15 cm depth interval, but decreased with

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30471423); 国家重大基础研究前期研究专项资助项目 (2004CCA03000)

收稿日期: 2007-07-26; 修订日期: 2008-08-12

致谢: 在本文的完成过程中, 得到王效平、郝云龙、王敏、杨红艳、王卓的帮助, 深表谢意!

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zgsemail@163.com

the increase in soil depth. About 50% of the fine roots occurred in the 0—20 cm depth and 90% occurred in the 0—59.7 (or -73.7) cm depth. The fine root distribution pattern was similar in the *S. vulgaris* community, the *S. vulgaris* cluster and the *A. ordosica* community. However, differences were found in the average biomass for the same depth, in which the value for the *S. vulgaris* community was 6.7—14.6 times that of the *A. ordosica* community ($P < 0.05$), and the value for the *S. vulgaris* cluster was 14.0—19.2 times that of the *A. ordosica* community ($P < 0.05$). (2) In both *S. vulgaris* (community or cluster) and *A. ordosica* communities, the dry mass percentages of the roots of diameter classes of both $D \leq 1$ mm and $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm had a logarithmic relationship with soil depth, though the correlation was stronger for the former class (with a correlation coefficient of $R^2 > 0.97$ and $0.81 < R^2 < 0.94$, respectively). In the *S. vulgaris* community, the weight percentage for the fine root diameter class of $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm reached a maximum in the 15—30 cm depth range and then decreased with increasing soil depth, however, for both the *S. vulgaris* cluster and the *A. ordosica* community, the maximum occurred in the 0—15 cm depth range. (3) The monthly average of *RLD* for the $D \leq 1$ mm diameter class decreased with the soil depth. In April, the *A. ordosica* community had the maximum *RLD* and *RAI* in the 15—30 cm depth, however, the maximum for *S. vulgaris* cluster (also in the 15—30 cm depth) occurred in October. The remaining maxima lie in the 0—15 cm depth range for the $D \leq 1$ mm diameter class of fine roots. In terms of the monthly average of *RLD*, the value for the *S. vulgaris* community was 11.2 times ($P < 0.05$) and for the *S. vulgaris* cluster, 14.5 times ($P < 0.05$) that of *A. ordosica* community. The distributions of *RAI* across soil layers were similar for all three community types. The monthly means of the sums of the *RAI* within the 0—90 cm depth for the diameter classes of $D \leq 2$ mm, $D \leq 1$ mm and $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm decreased in this order: *S. vulgaris* cluster $>$ *S. vulgaris* community $>$ *A. ordosica* community.

Key Words: *Sabina vulgaris*; *Artemisia ordosica*; fine root distribution; root extinction coefficient; root length density; root area index

植物根系不但起着固定植物体的作用,还是植物摄取、运输和贮存碳水化合物和营养物质以及合成一系列有机化合物的器官,在森林生态系统能量和物质循环中发挥着十分重要的作用^[1]。自从 1727 年 Hales 对根系的分布特征进行研究以来^[2],对根系的研究逐步深入,依据不同的测定目标形成了多种测定方法,可概括为直接和间接两大类。直接测定方法主要包括挖掘法、整段标本法、根钻法、根室法、土柱法、剖面法、玻璃壁法、微根管法、生长袋法等;间接测定方法有氮平衡法、生态系统碳平衡法、碳通量法、淀粉含量法、同位素示踪法、非生物变量相关法等^[3]。每种测定方法均有其优、缺点,因此,到目前还没有形成十分有效的细根生物量生产和周转的测定方法。应用间接方法来估计细根生物量生产与周转要求特定的假设条件或大量与林分生产和碳、氮分配有关的基础数据,难以直接应用,所以,在野外直接测定成为目前研究细根生物量生产和周转的主要方法。如根钻法、微根管法和生长袋法尽管都存在一些不足,但却是目前细根研究最适用、应用最广泛的研究方法。根钻法可对细根生物量生产进行测定,结果直观,且仪器成本低,但工作量大^[1,4]。细根作为根系中最活跃的部分,不仅参与生态系统的能量流动^[5]和物质循环^[6~8]两大生态过程,而且细根还可能分泌多种物质,包括无机和有机组分,产生化学他感作用^[9]。单建平等^[7]对长白山红松阔叶林细根周转的研究表明,尽管细根量占该群落林分总根量的比例很小,而其年生产量占总生产力的比例却达 19.4%。因此,在生态系统中,开展细根生产与周转的研究具有十分重要的理论意义和实际应用价值^[10]。在毛乌素沙地生态系统中分布着以臭柏(*Sabina vulgaris*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)为单优势的群落,对沙地地面的稳定起着重要的作用^[11]。臭柏对于干旱、半干旱气候条件以及沙土基质环境有着很强的适应能力,成为主要的固沙灌木。所以从臭柏生理生态学特性入手研究其适应机理,对臭柏天然资源的保护、臭柏灌丛的营造等都有重要意义。油蒿也是毛乌素沙地中分布最广的优势半灌木^[12],是我国草原区南部沙地及阿拉善东部沙漠广泛分布的建群种,其分布中心在鄂尔多斯高原毛乌素沙地^[13]。它长期适应干旱的沙地环境条件,具有耐沙埋、抗风蚀、耐贫瘠、分枝和结实性能好的生物生态学特性,对鄂尔多斯高原的系统稳定性起着关键的作用。作为生理生

态学特性之一的根系分布和根生物量的研究,能充分揭示臭柏和油蒿群落的适应性机理,固沙、固土能力及水分吸收利用特征,为臭柏和油蒿群落资源保护、沙地绿化提供科学依据^[14]。本文通过对臭柏、油蒿细根根长密度,根面积指数特征的研究,揭示其水分与养分利用特性、固土与成土作用,为进一步开展臭柏和油蒿群落的细根生产与周转、资源保护等研究奠定基础。

1 自然概况和研究方法

1.1 自然概况

调查地位于内蒙古鄂尔多斯市乌审旗图克苏木境内的毛乌素沙地开发整治中心北试验区,地理位置为北纬 $38^{\circ}57' \sim 39^{\circ}1'$,东经 $109^{\circ}2' \sim 109^{\circ}17'$,海拔 $1\,200 \sim 1\,350\text{ m}$ 。本地区总面积 87.14 km^2 ,其中流动沙地占 65% ,固定、半固定沙地占 10% ,滩地占 25% ^[15]。该区属温带大陆型气候区,年平均降水量 360 mm ,降水主要集中在 7、8、9 月 3 个月份,约占年降水量的 $60\% \sim 70\%$,年平均蒸发量为 $2\,300\text{ mm}$,是年均降水量的 6 倍多。风大沙多,年均风速 3.3 m/s ,大风多发生在 4~5 月份间,春秋季节以西北风为主,夏季盛行东南风。该区的地带性土壤为栗钙土,但沙地为风沙土,土壤剖面发育不明显。天然植被以油蒿(*Artemisia ordosica*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、牛心朴子(*Cynanchum komarovii*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、臭柏(*Sabina vulgaris*)、乌柳(*Salix cheilophila*)等为主,人工植被主要有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、杨柴(*Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、中间锦鸡儿等^[16]。

研究对象为天然分布的油蒿群落和臭柏群落,按照群落的连片程度、外貌特征和生长状况选择 7 块样地,分别记为 A~G,其中 A~E 为臭柏样地,覆盖度达 70% 以上,平均高度 $50 \sim 80\text{ cm}$;F、G 为油蒿样地,覆盖度达 40% ,平均高度 50 cm 。在臭柏样地中将有明显的扩展中心,面积在 200 m^2 左右,周围是其它种类植物的臭柏株丛称为臭柏灌丛,即 B、C 两块样地;将集中连片,面积在 1000 m^2 以上,并且没有明显的辐状扩展中心的称为臭柏群落。图 1 中各样地内的小黑点为取样中心,上为北。其中, A 样地的面积最大,为 $2\,822\text{ m}^2$, C 样地面积最小,为 179 m^2 (GPS72 定位)。

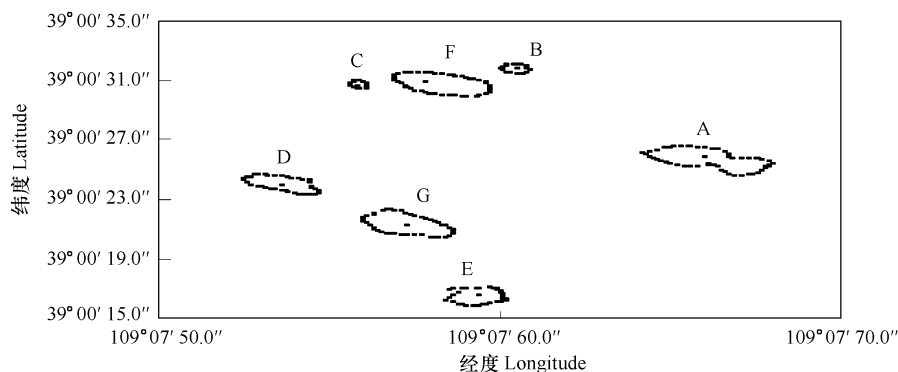


图 1 样地位置及相对大小

Fig. 1 Sampling sites and their relative scale

1.2 研究方法

1.2.1 取样

2005 年 4~11 月间,每块样地中心安置 HN-CH 型温湿度记录仪记录样地的温湿度,探头位置离地面 30 cm 。用内径为 8 cm ,高为 15 cm 的根钻抽取根样。分别在油蒿和臭柏群落样地内,分别按照东中(样地东边界到中心连线的中间区域,下同)、东边(东边界处,下同)、南中、南边、西中、西边、北中、北边 8 个方位和一个中心区域随机设置 9 个取样钻孔位,重复 1 次。每个样地共设 18 个钻孔。臭柏灌丛样地,因面积较小,在同一样地内没有设置重复,按东、西、南、北 4 个方向,从灌丛的中心、中间及边缘放射式设置上 9 个钻孔。每个钻孔以 15 cm 为一层连续取样,共分 6 层取样(总深度为 90 cm),在每个取样层位用 HH_2Read 土壤水分测定仪测各层的土壤体积含水率,重复 3 次。取出的原状土柱过筛(网孔 $0.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$)去掉沙土,剩余部分

立即全部装入密封袋并做好标记。取回的根样先用清水洗干净,手工除去非目标植物根,目标植物根依据根的外形、颜色、弹性区分活死根^[17],然后纵切根系,并用 2% 的 TTC 在 37℃ 条件下,避光染色 40 min 加以验证,形成层部分变为红色的为活根。挑选直径均匀的根系,用精度为 0.02 mm 的游标卡尺把活根分为 $D > 5$ mm, $2 \text{ mm} < D \leq 5 \text{ mm}$, $1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$, $D \leq 1 \text{ mm}$ 4 部分,在 75℃ 下烘干至恒重,用万分之一天平分别称重。

1.2.2 根系消弱系数(root extinction coefficient) β 的计算

Gale M. R. 和 Grigal D. E.^[18]等人通过对不同演替阶段不同树种根系的分布特征的研究,提出了一个根系垂直分布模型:

$$Y = 1 - \beta^d$$

式中, Y 为从地表到一定深度的根系根量累积百分比, d 表示土层深度(cm), β 为根系消弱系数。根据 $Y = 1 - \beta^d$ 计算 R_{50} (含 50% 总根长密度(或根量)的根系深度)、 R_{90} (含 90% 总根长密度(或根量)的根系深度)^[19]。其中 β 值越大说明根系在深层土壤中分布的百分比越大,反之 β 值越小,则说明有更多的根系集中于接近地表的土层中。 β 值的大小与根系体积或者根系密度无关,只是说明了根系的垂直分布特征与深度的关系^[18,20,21]。本文引入 β 值描述臭柏、油蒿群落细根分布与土壤深度间的关系。

1.2.3 细根根长密度与根面积指数的测定

根长密度(root length density, RLD)是单位土壤体积的根长,反映出植物在某一土壤层次根长的多少。根长密度对根系吸水影响较大^[22]。将洗净、烘干的不同径级的臭柏和油蒿根系分别随机抽取 20~40 根,用游标卡尺测量其直径(D , mm)、长度(L , cm),用天平(1/10000)测定其重量(M , g),将根系按直径分为 $D \leq 1 \text{ mm}$, $1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$ 两个径级,计算根系体积,并对根系体积和根系重量进行相关分析,得到回归方程(图 2)。对 $D \leq 1 \text{ mm}$ 径级的取 0.5 mm 为该直径范围内的平均直径; $1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$ 的直径取 1.5 mm 为平均直径,利用回归方程,由称得的根系重量计算相应土层内的根系长度、依据根钻体积(753.6 cm³)和横截面计算出根长密度(RLD)和根面积指数(root area index, RAI) = 根面积/地表面积。

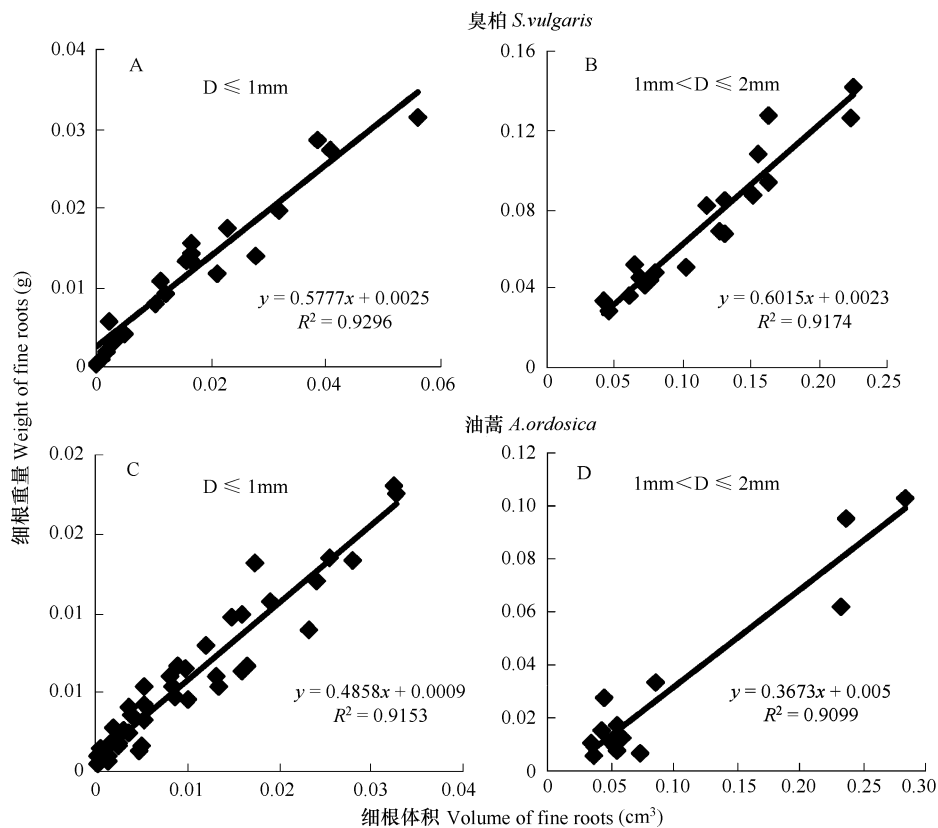


图 2 不同直径的细根重量与体积的线性回归

Fig. 2 The linear regress of weight and volume about different diameter fine roots

测定数据用 excel 软件进行整理计算,用 SAS8.1 统计分析软件对数据进行相关分析。臭柏、油蒿细根生物量、根长密度和根面积指数的差异性用 T 检验。

2 结果与分析

2.1 臭柏、油蒿细根垂直分布特征

$D \leq 2$ mm 的细根生物量最大值,在臭柏群落中出现在 4 月份的 15 ~ 30 cm 土层,臭柏灌丛中出现在 10 月的 15 ~ 30 cm 土层。臭柏灌丛、臭柏群落和油蒿群落 1a 中,各月生物量的平均值在表层 0 ~ 15 cm 出现最大值,并且随土壤深度的增加而减小(图 3 A)。50% 的细根生物量分布在距地表 18.0 ~ 22.2 cm 的范围内(即 R_{50} 值),而 90% 的细根生物量分布在距地面 59.7 ~ 73.7 cm(表 1),其中臭柏灌丛的细根生物量分布最深, $R_{50} = 22.2$ cm, $R_{90} = 73.7$ cm, $\beta_1 = 0.967$ 。虽然,臭柏群落、臭柏灌丛和油蒿群落的细根生物量百分比垂直分布特征比较相似,但相应层次上的月平均细根生物量(图 3 B),臭柏群落是油蒿群落的 6.7 ~ 14.6 倍($P < 0.05$),臭柏灌丛是油蒿群落的 14.0 ~ 19.2 倍($P < 0.05$)。

表 1 臭柏、油蒿细根分布深度特征

Table 1 The fine roots trait of *S. vulgaris* and *A. ordosica* distribution

直径等级 Diameter scale(mm)		臭柏群落 <i>S. vulgaris</i> community	臭柏灌丛 <i>S. vulgaris</i> cluster	油蒿群落 <i>A. ordosica</i> community
$D \leq 2$	根系消弱系数 Root extinction coefficient β_1	0.9621	0.9670	0.9662
	相关性 Correlation (R^2)	0.9753	0.9990	0.9984
	R_{50} (cm)	18.0	22.2	20.6
	R_{90} (cm)	59.7	73.7	68.5
$D \leq 1$	根系消弱系数 Root extinction coefficient β_2	0.9610	0.9690	0.9685
	相关性 Correlation (R^2)	0.9789	0.9999	0.9985
	R_{50} (cm)	17.4	22.0	21.7
	R_{90} (cm)	57.9	73.1	72.0
$1 < D \leq 2$	根系消弱系数 Root extinction coefficient β_3	0.9667	0.9704	0.9630
	相关性 Correlation (R^2)	0.9609	0.9983	0.9977
	R_{50} (cm)	20.4	23.1	18.4
	R_{90} (cm)	67.9	76.8	61.1

R_{50} (或 R_{90}) 表示含 50 % (或 90 %) 总根长密度 (或根量) 的根系深度 R_{50} (or R_{90}) is the root depth which account for 50% (or 90%) in total RLD (or weight)

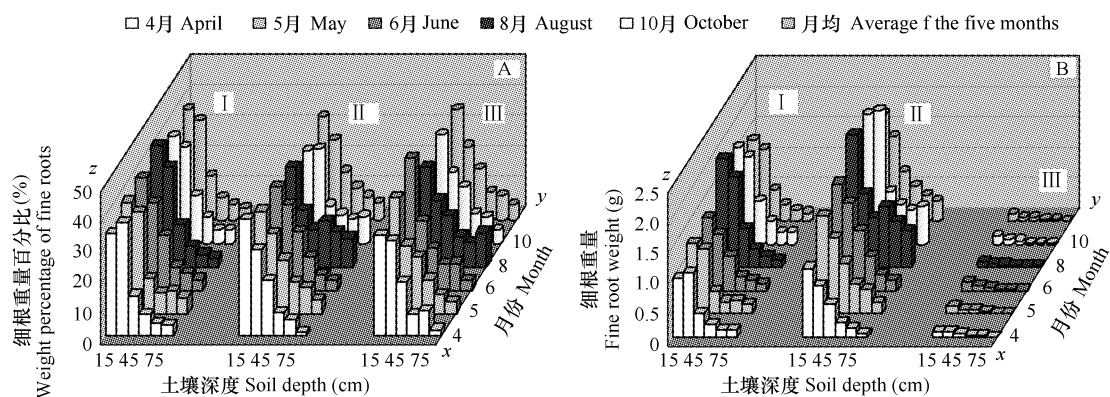


图 3 各月臭柏群落 (I) 臭柏灌丛 (II) 油蒿群落 (III) 细根重量百分含量与干重

Fig. 3 The monthly weight percentage of fine roots and fine root weight about *S. vulgaris* community(I), *S. Vulgaris* cluster(II), *A. ordosica* community(III) per month

在臭柏群落、臭柏灌丛和油蒿群落中, $D \leq 1$ mm 的细根重量百分比与土壤深度间呈对数关系 ($R^2 > 0.97$, 图 4 A、B、C), R_{50} 值出现在距地表 17.4 ~ 22.0 cm 处, R_{90} 值在 0 ~ 57.9 ~ 73.1 cm 处。1 mm $< D \leq 2$ mm 的细根重量百分比与土壤深度间也呈对数关系 ($0.81 < R^2 < 0.94$, 图 4 D、E、F), R_{50} 值在距地表 18.4 ~ 23.1 cm 处, R_{90} 值在 61.1 ~ 76.8 cm, 在臭柏灌丛地, 两个直径级的 R_{50} 、 R_{90} 值最大。经 t -检验, 臭柏群落、臭柏灌丛、油

蒿群落中两个直径级的 R_{50} 、 R_{90} 值差异都不显著 ($P > 0.5$)。除臭柏群落 $1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$ 的细根重量百分比的最大值出现在 $15 \sim 30 \text{ cm}$ 土层内(图 4, D), 其余两个直径级的细根重量百分比的最大值, 不论是臭柏群落和臭柏灌丛, 还是油蒿群落均出现在 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层中, 并随着土层深度增加而递减(图 4A、B、C、E、F)。

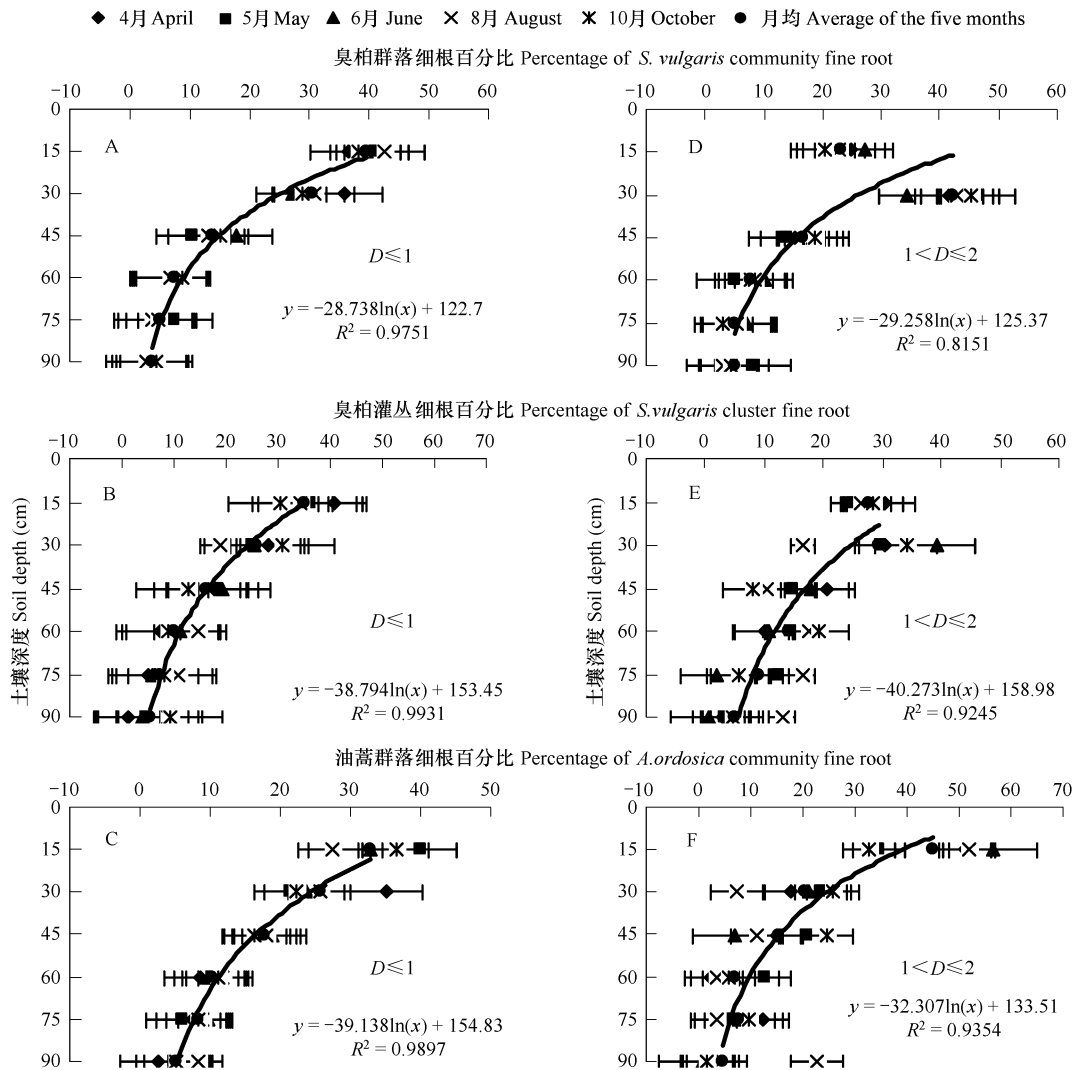


图 4 不同径级臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落细根根量垂直分布特征

Fig. 4 The vertical distributions of different diameter classes of fine roots of the *S. vulgaris* community, the *S. vulgaris* cluster and the *A. ordosica* community

2.2 臭柏、油蒿细根根长密度及根面积指数

$D \leq 1 \text{ mm}$ 的细根根长密度在臭柏群落、臭柏灌丛和油蒿群落中的月平均最大值出现在 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层内(图 5 A), 并随土层深度的增加而减小。各月中臭柏灌丛的细根根长密度最大值为 1.448 cm/cm^3 , 是臭柏群落的 1.3 倍; 油蒿群落的 16.8 倍。 $D \leq 1 \text{ mm}$ 的细根根长密度最大值, 除了油蒿群落(4 月份)和臭柏灌丛(10 月份)出现在 $15 \sim 30 \text{ cm}$ 土层内以外, 其它各月均出现在 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层中; $1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$ 的细根根长密度的最大值在臭柏群落与臭柏灌丛中多出现在 $15 \sim 30 \text{ cm}$ 处, 而在油蒿群落中, 都出现在 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 处(图 5 B)。 $D \leq 2 \text{ mm}$ 的细根根长密度的最大值, 臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落均出现在 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层中(图 5C), 其月平均细根根长密度值分别是 0.864 、 1.120 、 0.077 cm/cm^3 , 各个层次细根根长密度的月平均, 臭柏群落是油蒿群落的 11.2 倍 ($P < 0.05$), 臭柏灌丛是油蒿群落的 14.5 倍 ($P < 0.05$)。

臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落细根根面积指数与细根根长密度呈相似的规律, 各月中, 臭柏灌丛在 $D \leq 1$

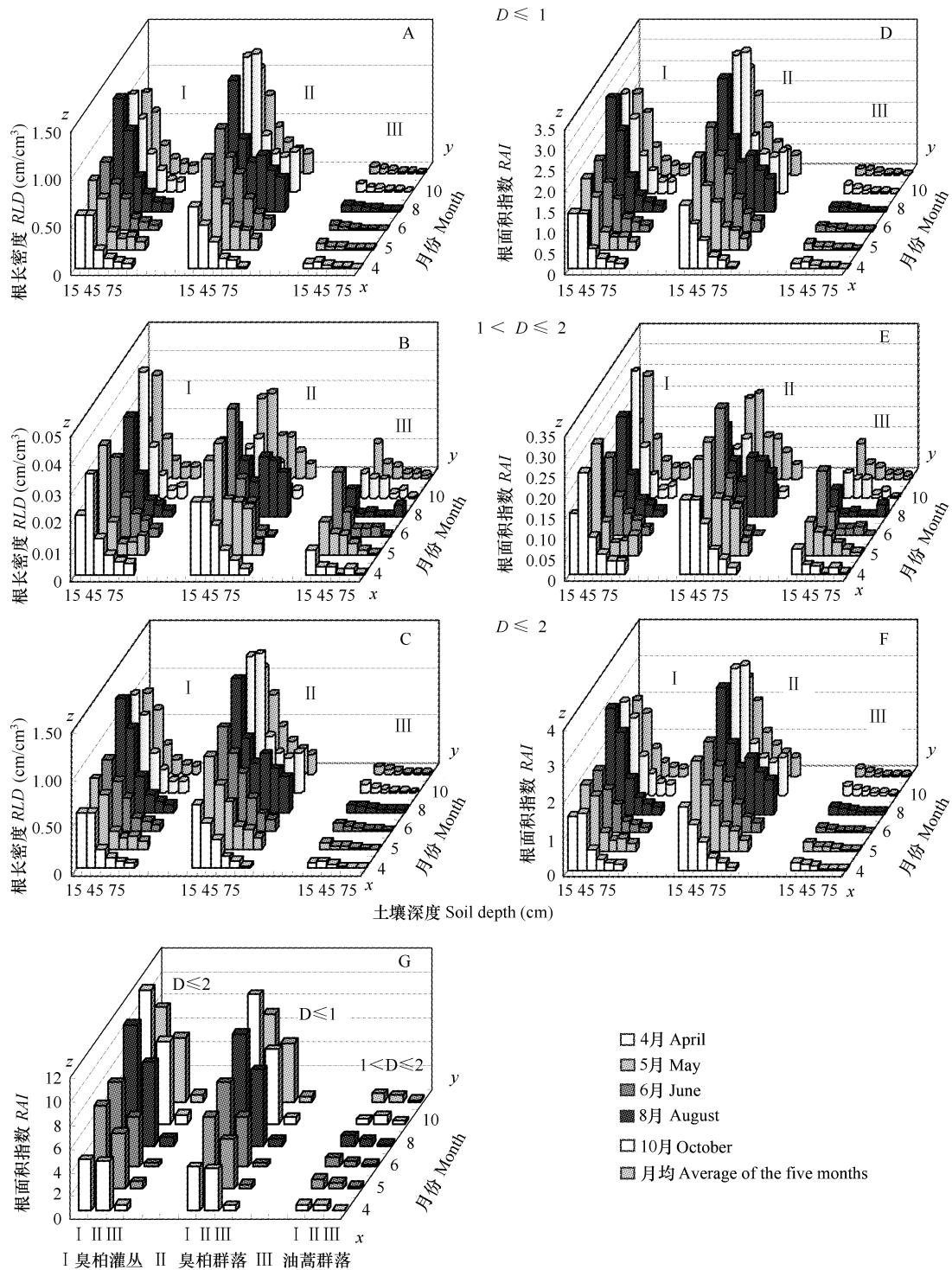


图5 臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落各径级细根根长密度及根面积指数

Fig. 5 Root length densities (RLD) and root area indices (RAI) for roots of different diameter classes in the *S. vulgaris* community, the *S. vulgaris* cluster and the *A. ordosica* community

G: 各取样层的根面积指数总和在不同群落(灌丛)间的差异 The difference of total RAI between the *S. vulgaris* community, the *S. vulgaris* cluster and the *A. ordosica* community

mm 与 $D \leq 2$ mm 两个直径级上都有最大细根根面积指数(图 5D、F), 出现在 10 月 15 ~ 30 cm 土层中, 分别为 3.411 与 3.557; $1 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$ 的最大细根根面积指数则出现在 6 月份 15 ~ 30 cm 土层中, 其值为 0.310(图

5E)。在0~90 cm的土层内,样地中, $D \leq 2$ mm、 $D \leq 1$ mm、 $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm的细根根面积指数总和由大到小的顺序是:臭柏灌丛>臭柏群落>油蒿群落, $D \leq 2$ mm的细根根面积指数分别是8.100、5.494、0.604(图5 G)。

3 结论与讨论

长期以来,人们对于植物根系的分布特征,尤其是根系的垂直分布特征进行了大量的研究,并且认识到强大的根系是地上部分能够良好生长所必须的,并且在实践中证实,采用不同的营林措施可以有效地促进林木地上部分的生长^[23]。可见植物的根系分布因植物种及生存环境而变,对臭柏群落、臭柏灌丛、油蒿群落7块样地细根调查研究表明, $D \leq 2$ mm细根生物量不论是臭柏还是油蒿都集中在0~15 cm的土层内,并且随土层深度增加而减少。该调查结果与大多数研究者报道基本一致^[14,24~27]。根系分布深度反应了植物对于干旱环境的响应^[28],张喜英报道沙漠植被根系分布的 β 值为0.975($R^2 = 0.95$),若分析全球平均植物群落1 m以上土壤中的根系分布, β 的平均值是0.966($R^2 = 0.89$)^[3],对臭柏群落、臭柏灌丛和油蒿群落细根分布调查中获得 $D \leq 2$ mm细根的 β 值分别是0.9621、0.9670和0.9662,略低沙漠植物根系分布的 β 值,与全球平均植物群落1 m以上土壤中根系分布的 β 值更相近。

水分可利用性是制约植物生长的最重要因素,对根系空间分布也有重要影响^[12],决定了根系生物量在不同层次的分配。旱生植物为了维持植物体的正常代谢,将大量的营养物质投入到根系,以保证水分与养分的正常供应。因此,在沙地生态系统中,沙生植物地上生物量及植被覆盖度明显低于草原和森林生态系统。吉川贤报道,在毛乌素沙地生态系统中10~20a以上的臭柏群落地上部分的现存量 $1000 \sim 4000 \text{ g/m}^2$,油蒿的现存量为 $60 \sim 500 \text{ g/m}^2$ ^①,臭柏是油蒿的2~66倍,臭柏群落的覆盖度是油蒿群落的2倍^[29]。对臭柏和油蒿地下活细根生物量调查获得的结果分别为 $590 \sim 1417 \text{ g/m}^2$ 和 $59 \sim 79 \text{ g/m}^2$,臭柏是油蒿的7~24倍,可见庞大细根生物量是臭柏维持其高地上生物量和覆盖度的基础,与同一生境条件下的油蒿群落有着不近相同的适应机理。

在多数研究中认为,上层的根系比下层的要细一些^[13,30,31],臭柏群落和臭柏灌丛与油蒿群落相比 $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm的细根最大根长密度值,前者多出现在15~30 cm土层,后者则在0~15 cm土层。 ≤ 1 mm的细根最大根长密度值不论是臭柏还是油蒿均出现在0~15 cm土层。也有学者提出,表层的细根主要功能是吸收养分^[32],深层的细根往往起吸收水分的作用^[33,34],在对作物的研究中发现,根系分布深浅的不同对植物的抗旱性有很大的影响,对小麦的研究表明,小麦抗旱品种根系发达,下扎快,分布深,深层根量比例大^[35]。而臭柏和油蒿细根分布调查结果与此不完全相同,可能与其生境条件有关。在毛乌素沙地,一次降雨量小于20 mm的降雨频率占全年降水总次数的90%左右^[29],再加上灌木层截留和地表的土质化导致的地表持水能力加强,因而大气降水能够补给深层土壤的量很少,大部的降水被贮藏在浅层土壤中,所以充分利用浅层土壤中的大气降水对该区植物的生存和生长至关重要。此外,沙地热容量小,昼夜温差大,容易形成凝结水,对这部分水分的利用也是植物提高抗旱能力的有效途径之一。因此,臭柏和油蒿通过将大量细根投放到地表及浅层土壤中来提高对土壤水分的摄取量,维持其群落稳定。这种细根分布特征也是与当地的降水特征相适应的自然选择结果。

References:

- [1] Zhang X Q, Wu K H, Dieter M. A review of methods for fine-root production and turnover of tree. *Acta Ecologica Sinica* 2000,20(5):875—883.
- [2] Hales S. 1727. *Vegetable Staticks*, London. Reprint: London macdonaid, 1961 in Zhang X Y. *Crop Root System and Soil Water Utilization*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 10:28—29.
- [3] Zhang X Y. *Crop Root System and Soil Water Utilization*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 10:7—24.
- [4] Annikki Mäkelä, Petteri Vanninen. Estimation of fine root mortality and growth from simple measurements: a method based on system dynamics, *trees*, 2000, 14:316—323.

① 吉川贤. 毛乌素沙地植物群落的现存量. 中国干旱地区沙漠化成因和动态分析——关于毛乌素沙地绿化及农业开发的基础性研究.

- [5] Chapman K, *et al.* Functioning of mixed-species stand sat Gisburn, NW England. In: The Ecology of Mixed- Species Stands of Trees. Edited by M. G. R. Cannell *et al.* Blackwell Scientific Publications LTD, London, 1992. 124 — 158.
- [6] Comeau P G, Kimmins J P. Above-and below-ground biomass and production of lodge-pole pine on sites with differing soil moisture regimes. *Can. J. For. Res.*, 1989, 19: 447 — 454.
- [7] Gholz H L, *et al.* Organic matter dynamics of fine roots in plantation of slash pine (*Pinuselliottii*) in north Florida. *Can. J. For. Res.*, 1986, 16: 529 — 538.
- [8] McLaugherty C A, *et al.* The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 1982, 63: 1481 — 1490.
- [9] Smith W H. Character and significance of forest tree root exudates. *Ecology*, 1976, 57: 324 — 331.
- [10] Liao L P, Chen C y, Zhang J W, *et al.* Turnover of fine roots in pure and mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclure* forests. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(1): 7 — 10.
- [11] Zhang G S, Gao R H, Wang L H, *et al.* Study on community structure and biodiversity of *Sabina vulgaris* of Mu Us Sandy Land. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2001, 12(4): 88 — 91.
- [12] Nobel P S. Ecophysiology of roots of desert plants, with special emphasis on agaves and cacti. In: Waisel Y, Eshel A, Kafafi U, eds. *Plant roots: the hidden half*. Second edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 1996, 823 — 844.
- [13] Hendrick R L, Pregitzer K S, Ronald L, Hogel R. The demography of fine roots in response to patches of water and Nitrogen. *New Phytologist*, 1993, 125(3): 575 — 580.
- [14] Zhang G S, Wang L H, Li Y L, *et al.* Root Distribution and Root Weight of *Sabina Vulgaris* in Mu Us Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 1999, 12(4): 378 — 383.
- [15] Yao H L, Wei C Q, Liao R T, *et al.* Center of Development and Management in Mu Us Sandland Inner Mongolia, Research Center of Development and Management in Mu Us Sandland, Huhhot: Inner Mongolia University Press, 1992.
- [16] Zhang G S, Li Y L, Wang L H, *et al.* The preliminary study on *Sabina vulgaris* afforested in the semiarid region. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1999, 3(1): 21 — 25.
- [17] Li P Z, Fan S H, Wang L H, *et al.* Productivity and turnover of fine roots in poplar tree and grass roots. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 829 — 832.
- [18] Gale M R, Grigal D E. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *For. Res.*, 1987, (17): 829 — 834.
- [19] He W M. Distribution characteristics of root area of *Sabina vulgaris* under different habitats. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 9(5): 17 — 21.
- [20] Bohn W. Xue D R translated. *Root research method*. Beijing: Science Press, 1985. 28 — 181.
- [21] Zhang J S, Meng P, Song Z M. Numerical Simulation on Characteristics of Water Consumption in Agro forestry: Model Establishment and Verification. *Forest Research*, 1996, 9(4): 331 — 337.
- [22] Hao Z Y, Yang P L. Experimental Investigation on Root System Distribution of Apple Tree. *Journal of China Agricultural University*, 1998, 3(6): 63 — 66.
- [23] Li P, Zhao Z, Li Z B, *et al.* Research on Root Distribution Parameters of *Robinia pseudoacaci* on Different Sites in Chunhua County. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(5): 32 — 36.
- [24] Zhao I F, Chen G S, Lin P. Morphology, Distribution and Dynamics of Root Systems of *Artemisia halodendron* and *Caragana microphylla*. *Grassland of China*, 1994, 3: 15 — 19.
- [25] Yang Y C, Chen G S, Lin P, *et al.* fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1719 — 1730.
- [26] Han Y Z, Liang S F. A Research on the Tree Root Distribution and Biomass of North-china larch. *Shanxi Forestry Science And Technology*, 1997, 3: 36 — 40.
- [27] Nobel P S. Ecophysiology of roots of desert plants, with special emphasis on agaves and cacti. In: Waisel Y, Eshel A, Kafafi U eds. *Plant roots: the hidden half*. Second edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 1996. 823 — 844.
- [28] Schulze E D, Mooney H A, Sala O E, *et al.* Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. *Oecologia*, 1996, 108: 503 — 511.
- [29] Zhang G S, Wang L H, Dong Z, *et al.* A study on water balance of main fixed-duneshrubs (arbors) in mu-us. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2002, 23(3): 1 — 9.
- [30] Fahey T J, Hughes J W. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem. Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Journal of Ecology*, 1994, 82(3): 533 — 548.
- [31] Mou P, Jones R H, Mitchell R J, Zutter B. Spatial distribution of roots in sweet gum and loblolly pine monocultures and relations with above-

ground biomass and soil nutrients. *Functional Ecology*, 1995, 9: 689—699.

- [32] Jackson R B, Canadell J R, Mooney H A, *et al.* A global analysis of root distribution for terrestrial biomass. *Oecologia*, 1996, 108: 389—411.
- [33] Pregitzer K S, Hendrick R L, Fogel R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. *New Phytologist*, 1993, 125: 575—580.
- [34] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389—399.
- [35] Schulze E D, Mooney H A, Sala O E, *et al.* Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. *Oecologia*, 1996, 108: 503—511.

参考文献:

- [1] 张小全, 吴可红, Dieter Murac. 树木细根生产与周转研究方法评述. *生态学报*, 2000, 20(5): 875—883.
- [2] Hales S. 1727. *Vegetable Staticks*, London. Reprint: London Macdonald, 1961 in 张喜英. 作物根系与土壤水分利用. 北京: 气象出版社, 1999. 10: 28—29.
- [3] 张喜英. 作物根系与土壤水分利用. 北京: 气象出版社, 1999, 10: 7—24.
- [10] 廖利平, 陈楚莹, 张家武, 等. 杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究. *应用生态学报*, 1995, 6(1): 7—10.
- [11] 张国盛, 高润宏, 王林和, 等. 毛乌素沙地臭柏群落结构和生物多样性组成研究. *内蒙古农业大学学报*, 2001, 12(4): 88—91.
- [14] 张国盛, 王林和, 李玉灵, 等. 毛乌素沙地臭柏根系分布及根量. *中国沙漠*, 1999, 12(4): 378—383.
- [15] 姚洪林, 魏成秦, 廖汝堂, 等. 内蒙古毛乌素沙地开发整治中心概况. 毛乌素沙地开发整治研究中心研究文集, 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1992.
- [16] 张国胜, 李玉灵, 王林和, 等. 半干旱地区臭柏造林初步研究. *内蒙古林学院学报*, 1999, 3(1): 21—25.
- [17] 李培芝, 范世华, 王力华, 等. 杨树细根及草根的生产力与周转的研究. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 829—832.
- [19] 何维明. 不同生境中沙地柏根面积分布特征. *林业科学*, 2000, 9(5): 17—21.
- [20] Bohn W. 薛德榕译. 根系研究法. 北京: 科学出版社, 1985, 28—181.
- [21] 张劲松, 孟平, 宋兆民. 农林复合模式耗水特征的数值模拟——模型的建立与检验. *林业科学研究*, 1996, 9(4): 331—337.
- [22] 郝仲勇, 杨培岭. 苹果树根系分布特性的试验研究. *中国农业大学学报*, 1998, 3(6): 63—66.
- [23] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 等. 淳化县不同立地上刺槐根系的分布参数. *南京林业大学学报*, 2002, 26(5): 32—36.
- [24] 赵爱芬. 差巴嘎蒿和小叶锦鸡儿根系分布及生长动态的初步研究. *中国草地*, 1994, 3: 15—19.
- [25] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. *生态学报*, 2003, 23(9): 1719—1730.
- [26] 韩有志, 梁胜发. 华北落叶松人工林根系分布及根系生物量研究. *山西林业科技*, 1997, 3: 36—40.
- [27] 杨玉盛, 陈光水, 何宗明, 等. 杉木观光木混交林细根的分布. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(2): 111—117.
- [29] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙地主要固沙灌(乔)木林地水分平衡研究. *内蒙古农业大学学报*, 2002, 23(3): 1—9.
- [32] 王法宏, 王旭清, 刘素英, 等. 根系分布与作物产量的关系研究进展. *山东农业科学*, 1997, 4: 48—51.