科尔沁沙地 3 种草本植物根系生长动态

黄 刚^{1 2} 赵学勇¹ 苏延桂¹

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所奈曼沙漠化研究站,兰州 730000) (2 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要 利用微管对狗尾草(*Setaria viridis*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)根系生长动态进行了观测。结果表明:1)在观察期内,狗尾草和黄蒿的根系生长表现出先增后减的“抛物线”型,而沙米的根系成指数生长。在 7 月末至 8 月初狗尾草、黄蒿和沙米根系具有最高的生产量,其根量密度分别为 4 690.91、2 975.76 和 2 354.55 条·m⁻²;在 8 月末,狗尾草和黄蒿根系都表现出不同程度的衰减,沙米根数保持增加。2)狗尾草优先生长表层根系,根系主要生长在 0~30 cm 的土层内,根长密度最大时为 2.23 cm·cm⁻²;黄蒿生长前期表层根长密度大,生长后期下层根长密度开始增加,沙米优先发展下层根系,快速生长期后,地下 30~50 cm 处的根长密度增加高于上层。3)生长前期和快速生长期 0~50 cm 狗尾草根长密度最大,黄蒿次之,沙米最小,生长末期,沙米根长密度大于狗尾草。

关键词 微管 草本植物 根系生长动态 科尔沁沙地

ROOT DYNAMICS OF THREE GRASSES IN HORQIN SANDY LAND OF CHINA

HUANG Gang^{1 2}, ZHAO Xue-Yong¹, and SU Yan-Gui¹

¹Naiman Desertification Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China, and ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aims We selected three representative grasses in Horqin Sandy Land and measured their root dynamic by minirhizotrons, a nondestructive, *in situ* method for directly viewing and studying root dynamics.

Methods The experiment was conducted on three quarters (2 m × 2 m) of Naiman Desertification Research Station, Chinese Academy of Sciences during the 2005 growing season. The sandy soil was transported from a sandy dune and sifted through a 0.5 mm sieve. On May 15, seeds of *Setaria viridis*, *Artemisia scoparia* and *Agriophyllum squarrosum* were cultivated in each quarter, respectively. Three minirhizotrons (50 cm long and 7 cm outer diameter) per treatment were installed at right angles. A black cover blocked light from entering the section of the transparent tube left above ground. For each treatment, three tubes were installed in the center parallel to the plant row, 10 cm from the row. Each quarter was supplied with enough water until June 5, and thereafter precipitation was the only water source. According to plant needs, seedlings of three grasses were kept 15 cm apart in rows and 20 cm apart between rows. The number of roots on the minirhizotron wall was obtained using a mirror, and root length was estimated counting the number of intersections of roots with a 1 cm-mesh grid, using the modified Newman-Line-Intersect method.

Important findings The curves of total root number of *S. viridis* and *Artemisia scoparia* after seed germination fitted a cubic regression model, while that of *Agriophyllum squarrosum* showed exponential increase. The production of *S. viridis* and *Artemisia scoparia* peaked by the end of July or the beginning of August and then decreased, while *Agriophyllum squarrosum* showed an opposite trend. Roots of *S. viridis* were concentrated within the top 30 cm of the soil profile where the maximum root length intensity achieved 2.23 cm·cm⁻². Vertical root distribution of *S. scoparia* had an almost symmetrical pattern. At the prophase of growth period, it preferentially developed superficial roots, while at the end of the growth period, roots occurred dominantly in deep soil. In contrast, *Agriophyllum squarrosum* showed an opposite growth process. *S. viridis* had the highest root length intensity during the prophase and early in the growth period, but root length intensity of *Agriophyllum squarrosum* was higher than *S. viridis* at the end of the growth period.

Key words minirhizotrons, annual grasses, root growth dynamic, Horqin Sandy Land

根系是植物在长期演化过程中适应陆地生活的产物,它是构成植物的主要部分,约占植物总干重的

50% ,是陆地生态系统的重要组成部分。在干旱区 ,植物根系生态学的研究具有重要意义。首先 ,只有将地下与地上统一的联系才是完整的生态系统 ,才能够准确地量化陆地生态系统的碳分配。据估计 ,地下生物量占总生物量的 20% ~ 80% ,并且存在很大的不确定性(Lauenroth , 2000 ;贺金生等 , 2004)。姜恕等(1985)对我国内蒙古羊草(*Leymus chinensis*)草原和大针茅(*Stipa grandissmirh*)草原生物量的比较研究得出 ,其根系生物量分别占总生物量的 81% 和 73%。在森林生态系统中 ,这个值约为 7% ~ 76% (Vogt , 1991)。在退化的沙质草地上 ,由于生态系统的剧烈波动 ,使得这一地区碳的地上和地下分配格局具有更大的差异。因此 ,搞清沙地根系生产力在沙地生态系统中的变化 ,对于完善陆地生态系统中的碳过程和分配理论 ,了解根系生产力在全球变化下的动态具有重要意义。其次 ,在降雨多变、沙面不稳定、高温和干旱的沙地生境 ,植物根系的生长和分布是植物逆境调节的方法。通过观测根系的生长动态和地下分布 ,就可能更好地理解植物根系在群落中的功能及其对生境的适应。同时 ,知道了根系的动态变化 ,就能够完整模拟植物根系在整个生活史中的空间变化及其与相邻植物根系的竞争 ,结合植物地上部分的变化就能够完整地模拟植物生长变化 ,描述其生存策略及其对环境变化的响应 ,为沙漠化过程中的植被适应对策研究和恢复提供理论支持。

一年生草本植物由于具有较强的入侵性和对生境的快速适应能力 ,在干旱和半干旱区占有很大的分布面积(Boulos & Al-Dosari , 1994 ; Ludwig *et al.* , 1998 ;梁存柱等 , 2003)。许多研究发现 ,由于在空间和时间上同优势植物具有分异 ,一年生草本在植物恢复过程中扮演了重要的角色(Michael , 2004 ; Cheng & Caroline , 2005)。另外 ,一年生植物能够在较短的时间内完成其生活史 ,观测期内的生长过程便是其生活策略的展现。然而 ,植物根系动态的研究大多集中在农作物和木本植物上 ,对一年植物根系生长动态的观测研究较为稀少(Itoh , 1985 ; Taylor *et al.* , 1990 ; Wilcox *et al.* , 2004 ; Pietola , 2005)。

以往研究根系的生长和分布多依赖于挖掘和根

钻 ,然而传统的挖掘法、土钻法破坏性大 ,重复性差 ,根系淘洗繁琐、枯燥 ,且结果强烈依赖于淘洗网眼的大小(刘士刚等 , 2003 ;张立桢等 , 2005 ;张志山等 , 2006)。Livesly 等(1999)指出 ,用洗根法测量两种树种根系的长度时 ,结果强烈地依赖于筛网网眼的大小 ,若将网眼的尺寸从 1 mm 减小到 0.5 mm ,所增加的根毛量大约是原来的 50%。微管法是目前应用最为广泛的根系原位、重复测量方法之一 ,它能够对根系生长动态、功能、穿透、根系死亡、周转速率进行长期定位观测。目前应用这项技术已经对草本、木本植物及植物菌根和一些地下动物进行了有益的观测(Hendrick & Pregitzer , 1992 , 1993 , 1996 ; Johnson *et al.* , 2001 ; Joslin & Wolfe , 1999 ; McMichael & Taylor , 1987 ; Pierret *et al.* , 2005)。本文作为尝试 ,在均一、稳定的环境条件下 ,通过选取流动沙地先锋植物——沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和固定沙地先锋植物——黄蒿(*Artemisia scoparia*) ,以及在 3 种沙地类型上均有分布的狗尾草(*Setaria viridis*)为代表植物(刘新民等 , 1996) ,利用微管对其根系生长动态进行了观测 ,以增加对草本植物根系生长动态的认识 ,为沙地植被恢复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验地位于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所奈曼沙漠化研究站内水分平衡观测场(120°43' E , 42°55' N , 363 m asl.)。该区属温带大陆性半干旱气候区。年平均气温为 6.1 ~ 6.4 ℃。极端最低气温为 - 29.7 ℃ ,极端最高气温为 41 ℃ ;年平均降水量为 366 mm ,主要集中在 6 ~ 8 月 ,年蒸发量为 1 937 mm ,干燥度为 3.9。地表承接了大量松散的第四纪沉积物 ,在风力作用下形成以沙丘和丘间低地、沙质平地相间分布为主要特征的地貌类型。地带性土壤为沙质栗钙土 ,在风的长期作用下退化为风沙土。试验所用栽培土壤为从野外沙丘上挖回的风沙土 ,通过了直径 0.5 mm 的筛子 ,以去除土壤中原有有机物质。沙层厚达 2 m ,地下水不能为植物所利用。主要养分含量特征见表 1。

表 1 试验地土壤物理、化学特性
Table 1 Soil physical and chemical characteristics of experiment areas

砂粒 Sand (%)	粉粘粒 Silt and clay (%)	容重 Buck density (g·cm ⁻³)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	pH
77.6	22.4	1.43	8.258	0.433	0.472	7.26

1.2 试验设计

试验在3块养分池(2 m × 2 m)中进行,四壁皆有水泥围护,避免了外部根系混入。于2005年5月15日沿中线,在每块养分池垂直安设了3根有机透明玻璃管(直径7 cm,地下埋深50 cm,可观测面积0.11 m²)。管外壁用黑色记号笔画有5 cm × 5 cm的方格标记系统。埋入时,先用直径相当的土钻垂直将地下土壤取出,然后插入微管,四壁再用细沙漏下,使管壁同土壤紧密接触,埋设示意图如图1。地上部分用黑色胶布包扎,防止光线进入,管口加盖,定期通气,排出管内的水汽,同时在平行于微管两侧各10 cm处,播下沙米、黄蒿、狗尾草种子,行距为20 cm,株距为15 cm。6月5日(3个种均已出苗)定苗前都是充分供水,此后没有进行过人工灌水,降雨成为唯一的补给水源。于7月1日统一开始观测,以后定期每隔10 d观测一次,统计落入微管内壁各网格内的根数。假定在微管壁上所观测的根系是与微管相交的根系,越长的根系与其上任意直线的交点就越多。因此假定将微管侧面划分为1 cm × 1 cm的网格,所计数的根数便是与网格线的交点,利用公式:

$$R = \frac{\pi NA}{2H}$$

式中:R是整个根长,N是根与直线的交点,A是矩形的面积,H是所有直线的长度(Tennant, 1975)。求得微管剖面的根系长度,即可得到微管观测的单位面积根长密度。

图1 微管安置示意图(仿照 Bohm(1974)的方法)
Fig.1 Sketch map of minirhizotron tubes installation
(according to method of Bohm(1974))

2 结果与分析

2.1 根系发育动态

观测时统计微管内壁的根系总数,试验期间共测得7次数据。3种植物的根系生长曲线表现出各自的形态(图2)。狗尾草和黄蒿的根系生长在观察期内表现出“抛物线”型,而沙米的根系成指数生长。

在观察期内,狗尾草的根系仅出现一个峰值,发生在出苗后54 d,黄蒿在生长期出现了两个峰值,一个在出苗后34 d左右,一个在出苗后54 d左右,沙米的根系在观察的两个月内没有出现衰减,在最后一次观察时有最高的根数统计。狗尾草的根系生长最为迅速,达到峰值所需时间最短,衰减也较慢,黄蒿、沙米都表现出递进增长的特点,在达到最大峰值之前,根数会达到一个小的峰值。另外,狗尾草的根系生长曲线较为平缓,峰值衰减缓慢,黄蒿根系增长曲线较陡,在高峰降落后出现了轻微的上升,沙米根系在第一个峰值后出现了负增长,随后保持了高的增长率,在观察期内还没有出现衰减。

图2 沙地狗尾草、沙米、黄蒿根数动态曲线
Fig.2 Curves of root numbers of *Setaria viridis*, *Agriophyllum squarrosum* and *Artemisia scoparia* in sand land

2.2 根系垂直分布规律

从地下各层次根系在不同生长期的数量分配入

手,可以对根系生长过程中根系发育的空间特征有大概了解。3种植物根系地下分布的变化都不相同(图3)。狗尾草地下根长密度在生长初期各土层间较为一致,在进入快速生长期后,上层的根长密度增加明显。30 cm处是狗尾草根系分布的分界线,0~30 cm的根长密度在 $0.19 \sim 2.23 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间,45 cm以下最大的根长密度为 $0.97 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$,这说明狗尾草根系主要生长在0~30 cm的土层内,是比较典型的浅层根系植物;黄蒿根系在生长初期和快速生长期,深度越深,根长密度越小;生长后期,下层(40~50 cm)的根长密度有所增加,最终根长密度在各层间的分配较为一致,在 $0.32 \sim 0.61 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间;沙米在生长初期,表层的根长密度略高于下层,进入快速生长期后,地下30~50 cm处的根长密度

增加高于上层,但在生长末期上层的根长密度突然间增加,并且高于下层。

生长前期,在0~50 cm的土层内狗尾草的根长密度最大,黄蒿次之,沙米最小,如:出苗后34 d,狗尾草的根长密度为 $0.96 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$,黄蒿和沙米的根长密度分别为 0.72 和 $0.14 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$;在快速生长期,狗尾草整个深度的根长密度依然最高为 $1.66 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$,黄蒿和沙米的根长密度都有所升高,分别为 0.99 和 $0.19 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$;在生长末期,狗尾草和黄蒿的根长密度都下降,狗尾草下降最大,出苗后84 d分别为 0.85 、 0.34 和 $0.86 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$,特别是0~30 cm的土层内,狗尾草和黄蒿的根长密度降低明显,沙米的根长密度增加,在数量上超过了狗尾草。

图3 根长密度的垂直分布
Fig.3 Vertical distribution of root length intensity (RLI) measured by minirhizotrons

3 结论与讨论

3种植物根系的变化具有明显的季节特征,在7月末至8月初,狗尾草、黄蒿和沙米根系具有最高的生产量,其根量密度分别为 $4\,690.91$ 、 $2\,975.76$ 和 $2\,354.55 \text{ 条} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在8月末,狗尾草、黄蒿根系都表现出不同程度的衰减,而沙米保持增加。根系的这种周转变化的同以往研究者的结论相似(Sindhoj *et al.*, 2000)。在很多生态系统中,根系的生长都表现出随季节变化的特点。例如,温带落叶树在春季根

系生物量会优先于冠层达到峰值,根系生长最快的时间发生在6和7月,而衰减发生在8和9月(Lyr & Hoffmann, 1967)。郭忠玲等(2006)对长白山主要森林群落木本植物细根生物量的动态的研究表明,春季所有群落都会产生大量的细根,一些群落在初秋(9月)出现另一个较高的峰值,生长季末群落死亡细根生物量往往是最高的。赵爱芬等(1993)指出两种春小麦(*Triticum aestivum*)根系生长的动态也表现出如此趋势,而且结果显示小麦地上的分蘖峰值要比根系峰值提前25 d左右,地上部分相对生长率最

高值出现在分蘖期 ,而根系最大值出现在抽穗期 ,地上部和根系衰老都开始于旗叶完全展开后。根系这种波动性生长大多都是受土壤温度和水分的影响 (黄学文等 ,1997 ;Forbes *et al.* , 1997)。例如许多植物根系生长在仲夏时节时表现出衰退 ,通常是与此时的干旱和高温气候相联系的 ,另外 ,此时也正是冠层成为光合作用碳分配的主要碳汇的缘故 (Mooney , 1972 ; Waring & Schlesinger , 1985)。沙米根系生长曲线没有出现衰减 ,可能是因为沙米的侧根分解较慢 ,它的立枯和主根能够持续到下一个季节 (张继义等 , 2003) ,分解的细根对于整个根系总量影响不大。由于在研究中未能对单个根系进行连续观测 ,无法获得单根的生长进程和衰减过程 ,因而对根系生命周期、活根存留、死根分解等时间无法进行准确推算。

狗尾草根系生长迅速 ,相对于黄蒿和沙米两种直根系植物 ,其根数众多 ,达到最大根数峰值所需时间最短 ,生长过程中狗尾草优先生长表层根系 ,根系主要生长在 0 ~ 30 cm 的土层内 ,表现出明显的浅层特征。根系的表层化生长有利于植物在土壤水分较低的情况下充分利用降雨 ,从而具有比同一生境中相邻植物更强的竞争能力 (Mark & José , 2003)。黄蒿、沙米根系都表现出深根性的特点 ,在生长前期表层根长密度大 ,生长后期下层根长密度开始增加。野外调查发现沙米种子萌发快 ,主根发达 ,生长迅速 ,主根能够快速伸入下层湿沙层中吸收水分 ,通常沙米主根可伸入土层达 60 cm ,但沙米细根稀少 ,侧根多同主根成 60° ~ 80° 的夹角水平分布 ,主要生长在 20 ~ 30 cm 的土层中。另外 ,沙米的根重占总干重的比例很小 ,冠根比约为 10 ~ 20。本次观测中沙米根长密度始终较低 ,但其下层根系在生长过程中却明显增加 ,这对于生长在 地上植被盖度不高 ,土壤水分较好生境中的植物充分利用深层土壤储水有积极意义。

微管法避免了对土壤进行破坏 ,减少了人力劳动和洗根的时间消耗 ,并且能够对单个根系进行全程观测 ,有利于研究根系的动态、周转及衰减过程。

虽然在数据采集上节约了时间 ,但在数据分析上 ,微管法由于缺乏快速、准确的自动程序对收集的微管观测录像进行分析 ,大批的数据处于闲置和停留在定性分析的基础上。可以用微管观测得到的参数主要有根数、根长密度、比根长、延长指数、净根系生产长度、根生长速率、根死亡速率等 (Machado & Oliveria , 2003 ; Vamerali *et al.* , 2003) ,其中仅有根数可以直接读取和统计。目前获取根长密度的方法有交叉网格法、基于根数和土钻取样的拟合方法 ,以及图像分析处理方法。显然 ,只有根数的获取最为直接和简单 ,所以许多研究者都以其同根长密度间的相关关系为基础 ,希望能够仅利用根数间接地获得根长密度 (Tracey *et al.* , 2003)。本次实验利用网格交叉法将根数转化为根长密度值 ,其结果又较大地依赖于计数者个体间的差异和网格的大小 ,这两个因素对数据变异的影响分别为 10% 和 7% (William & Mark , 1990)。在 8 月 1 日对狗尾草微管表面根数的数据检查 (表 2) ,变异系数的分布情况说明 ,随着深度的增加 3 个微管观测的结果变异程度加大。这主要是因为用肉眼观测 ,视距增加 ,误判机率增加 ;另一方面也是根系本身的变异引起的 (van Noordwijk *et al.* , 1985) ,许多研究者用微管观测 ,其结果变异程度都很大 ,用它对根系的分布进行显著性分析 ,也很难得到统计显著性。大多数研究者通常用微管观察同时辅以土钻法 ,对根系地下分布进行调查。然后将微管获得的根数、根长强度同土钻法获得的根长密度和根生物量进行回归分析 ,最后获得根长密度值。然而就整个土壤剖面而言 ,它们的相关性很差 ,因此 ,一些研究者将表层和下层根系分别进行回归 ,得到了较好的结果 (Sanders & Brown , 1978 ; Upchurch & Ritchie , 1983)。影响微管观测数据可靠性的因素还有微管的材质与微管安装时对土壤的扰动程度。观测的时间间隔也是非常重要的 ,因为细根的存活时间在 3 d 左右 ,太长的时间间隔往往会将根系的这种变异掩盖。本次实验相邻数据间的差值很大 (图 2) ,即说明这种问题。

表 2 高峰期微管观测数据
Table 2 Data observed by minirrhization at ripe period

植物 Plant	深度 Depth (cm)	根数 Number of roots			平均数 Means	CV
		管 1 Minirrhization 1	管 2 Minirrhization 2	管 3 Minirrhization 3		
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	10	139	136	128	134.33	4.23
	20	121	119	121	120.33	0.96
	30	107	111	131	116.33	11.05
	40	82	107	115	101.33	16.99
	50	57	107	98	87.33	30.52

适当地将观测时间缩短为 3 d 左右,获得的数据将会更准确地反映根系生长动态。

参 考 文 献

- Bohm W (Translated by Xue DR (薛德榕), Tan XL (谭协麟)) (1974). *Research Methods on Root System* (in English). Science Press, Beijing, 168 – 171. (in Chinese)
- Boulos L, Al-Dosari M (1994). Checklist of the flora of Kuwait. *Journal of the University of Kuwait* (Science), 21, 203 – 218.
- Cheng XM, Caroline SB (2005). Effects of annual grass senescence on $^{15}\text{NH}_4^+$ and ^{15}N -glycine uptake by blue oak (*Quercus douglasii*) seedlings and soil microorganisms in California oak woodland. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 551 – 559.
- Forbes PJ, Black KE, Hooker JE (1997). Temperature induced alteration to root longevity. *Plant and Soil*, 190, 87 – 90.
- Guo ZL (郭忠玲), Zheng JP (郑金萍), Ma YD (马元丹), Han SJ (韩士杰), Li QK (李庆康), Yu GR (于贵瑞), Fan CN (范春楠), Liu WD (刘万德), Shao DK (邵殿坤) (2006). 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), 26, 2855 – 2862. (in Chinese with English abstract)
- He JS (贺金生), Wang ZQ (王政权), Fang JY (方精云) (2004). Issues and prospects of belowground ecology with special reference to global climate change. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 49, 1226 – 1233. (in Chinese)
- Hendrick RL, Pregitzer KS (1992). The demography of fine roots in a northern hardwood forest. *Ecology*, 73, 1094 – 1104.
- Hendrick RL, Pregitzer KS (1993). Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature*, 361, 59 – 61.
- Hendrick RL, Pregitzer KS (1996). Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems. *Plant and Soil*, 185, 293 – 304.
- Huang XW (黄学文), Zhao AF (赵爱芬), He ZY (何宗颖) (1997). Study on root growth dynamic of spring wheat in arid land. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 17, 90 – 95. (in Chinese with English abstract)
- Itoh S (1985). *In situ* measurement of rooting density by micro-rhizotron. *Soil Science & Plant Nutrition*, 31, 59 – 61.
- Jiang S (姜恕), Qi QH (戚秋慧), Kong DZ (孔德珍) (1985). A comparative study on production of *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* steppe communities at Baiinsile livestock farm in Inner Mongolia region. *Research on Grassland Ecosystem* (草原生态系统研究), 3, 12 – 23. (in Chinese)
- Johnson MG, Tingey DT, Phillips DL, Storm MJ (2001). Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, 45, 63 – 89.
- Joslin JD, Wolfe MH (1999). Disturbances during minirhizotron installation can affect root observation data. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 218 – 221.
- Lauenroth WK (2000). *Methods in Ecosystem Science*. Springer-Verlag, New York, 58 – 71.
- Liang CZ (梁存柱), Liu ZL (刘钟龄), Zhu ZY (朱宗元), Wang W (王伟) (2003). Specific diversity and distribution characteristics of annual synusia in Alashan desert. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 14, 898 – 903. (in Chinese with English abstract)
- Liu SG (刘士刚), Piao SJ (朴顺姬), An MZ (安卯柱), Liu F (刘芳) (2003). Distribution dynamics of *Artemisia halodendron* absorbent roots in different kinds of sandy land. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 27, 684 – 689. (in Chinese with English abstract)
- Liu XM (刘新民), Zhao HL (赵哈林), Zhao AF (赵爱芬) (1996). *Wind-Sandy Environment and Vegetation in the Horqin Sandy Land, China* (科尔沁沙地风沙植被与环境). Science Press, Beijing, 57 – 70. (in Chinese)
- Livesly SJ, Stacey CL, Gregory PJ, Buresh RJ (1999). Sieve size effects on root length and biomass measurements of maize (*Zea mays*) and *Grevillea robusta*. *Plant and Soil*, 207, 183 – 193.
- Ludwig JA, Cunningham GL, Whitson PD (1988). Distribution of annual plants in North American deserts. *Journal of Arid Environment*, 15, 221 – 227.
- Lyr H, Hoffmann G (1967). Growth rates and growth periodicity of tree roots. In: JA Romberger, Mikola P eds. *International Review of Forestry Research*, Vol. 2. Academic Press, New York, 191 – 236.
- Machado RMA, Oliveria MRG (2003). Comparison of tomato root distributions by minirhizotron and destructive sampling. *Plant and Soil*, 255, 375 – 385.
- Mark RH, José MF (2003). Competition and resource availability in an annual plant community dominated by an invasive species, *Carrichtera annua* (L. Aschers.), in South Australia. *Plant Ecology*, 167, 19 – 29.
- McMichael BL, Taylor HM (1987). Applications and limitations of rhizotrons and minirhizotrons. In: Taylor HM ed. *Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics*. ASA Special Publication, Madison, USA, 1 – 14.
- Michael DR (2004). Growth and abundance of desert annuals in an arid woodland in Oman. *Plant Ecology*, 174, 137 – 145.
- Mooney HA (1972). The carbon balance of plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 3, 315 – 346.
- Pierret A, Moran CJ, Doussan C (2005). Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytologist*, 166, 967 – 980.
- Pietola LM (2005). Root growth dynamics of spring cereals with discontinuation of mould board ploughing. *Soil & Tillage Research*, 80, 103 – 114.
- Sanders JL, Brown DA (1978). A new fibre optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions. *Agronomy Journal*, 70, 1073 – 1076.
- Sindhøj E, Hansson A-C, Andrén O, Kätterer T, Marissink M,

Pettersson R (2000). Root dynamics in a semi-nature grassland in relation to atmospheric carbon dioxide enrichment, soil water and shoot biomass. *Plant and Soil*, 223, 253 – 263.

Taylor HM, Upchurch DR, McMichael BL (1990). Application and limitation of rhizotrons and minirhizotrons for root studies. *Plant and Soil*, 129, 29 – 35.

Tennant D (1975). A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology*, 63, 995 – 1001.

Tracey LC, Ron LH, Roger W, Kurt SP, Andrew JB, Michael FA, Shan JP, Lawrence AM (2003). Substituting root numbers for length: improving the use of minirhizotrons to study fine root dynamics. *Applied Soil Ecology*, 23, 127 – 135.

Upchurch DR, Ritchie JR (1983). Root observations using a video recording system in minirhizotrons. *Agronomy Journal*, 75, 1009 – 1015.

Vamerali T, Ganis A, Bona S, Mosca G (2003). Fibrous root turnover and growth in sugar beet (*Beta vulgaris* var. *saccharifera*) as affected by nitrogen shortage. *Plant and Soil*, 255, 169 – 177.

Vogt KA (1991). Carbon budgets of temperate forests. *Tree Physiology*, 1991, 69 – 86.

von Noordwijk MV, de Jager A, Floris J (1985). A new dimension to observations in minirhizotron: a stereoscopic view on root photographs. *Plant and Soil*, 86, 447 – 453.

Waring RH, Schlesinger WH (1985). *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. Academic Press, Orlando, Florida, 340.

Wilcox CS, Ferguson JW, Fernandez GCJ, Nowak RS (2004). Fine root growth dynamics of four Mojave Desert shrubs as related to soil moisture and microsite. *Journal of Arid Environments*, 56, 129 – 148.

William LB, Mark AM (1990). Counting error in the line-intercept method of measuring root length. *Plant and Soil*, 125, 155 – 157.

Zhang LZ (张立桢), Cao WX (曹卫星), Zhang SP (张思平), Zhou ZG (周治国) (2005). Characterizing root growth and spatial distribution in cotton. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 29, 266 – 273. (in Chinese with English abstract)

Zhang JY (张继义), Zhao HL (赵哈林), Cui JY (崔建垣), Li YL (李玉霖), Yang JD (杨甲定) (2003). Biomass of *Agriophyllum squarrosum* community and its function on mobile sand dune in Horqin sandy land. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 17, 152 – 155. (in Chinese with English abstract)

Zhang ZS (张志山), Li XR (李新荣), Zhang JG (张景光), Wang XP (王新平), Zhao JL (赵金龙), Chen YW (陈应武) (2006). Root growth dynamics of *Caragana korshinskii* using minirhizotrons. *Acta Phytoecologica Sinica* (Chinese Vision) (formerly *Acta Phytoecologica Sinica*) (植物生态学报), 30, 457 – 464. (in Chinese with English abstract)

Zhao AF (赵爱芬), Huang XW (黄学文) (1993). Studying on the root growth dynamic of two spring wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 8, 188 – 200. (in Chinese with English abstract)

责任编辑 : 彭少麟 责任编辑 : 刘丽娟