

# 极端干旱地区胡杨林根系分布的非线性分析

李建林<sup>1,2</sup> 冯起<sup>1</sup> 司建华<sup>1</sup> 常宗强<sup>1</sup> 苏永红<sup>1</sup> 席海洋<sup>1</sup>

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 2 甘肃农业大学理学院)

**摘要:**依据 2006 年 5—7 月在极端干旱区额济纳旗的实测资料,对胡杨林的根系分布特征进行了分析与研究.期望对全面认识胡杨根系、根系吸水及胡杨 SPAC 系统进一步的研究提供有力的试验依据和理论支持.该文将根系分为运输根系( $d > 0.2$  cm)和吸水根系( $d \leq 0.2$  cm).运输根系的分布存在分形现象,根系土壤水分的变化对胡杨运输根系的分布有着直接影响.分析过程引入了土壤含水率期望的概念,当土壤含水率期望的平均值为  $25.03 \text{ cm} \cdot \text{g/g}$  时,运输根系分布的分维值为 2.000 7;当土壤含水率期望的平均值为  $55.95 \text{ cm} \cdot \text{g/g}$  时,运输根系分布的分维值为 1.627 5.即当土壤含水率期望值较低时,运输根系分布的分维值较大;当土壤含水率期望值较高时,运输根系分布的分维值较小.对于吸水根系,该文建立了根长密度在垂直和水平方向的一维分布函数以及二维分布函数.采用指数函数对吸水根系的根长密度分布函数进行拟合,拟合函数与实测数据的  $R^2$  分别为:0.89、0.68、0.73 和 0.69,说明胡杨吸水根系根长密度的分布基本符合指数衰减规律.

**关键词:**胡杨, 根系分布, 土壤含水率期望, 根系分维, 根长密度, 模拟函数

**中图分类号:**S718.42 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2007)06-0109-06

LI Jian-lin<sup>1,2</sup>; FENG Qi<sup>1</sup>; SI Jian-hua<sup>1</sup>; CHANG Zong-qiang<sup>1</sup>; SU Yong-hong<sup>1</sup>; XI Hai-yang<sup>1</sup>. **Nonlinear analysis of root distribution of *Populus euphratica* forests in the extremely arid region—Ejina, Inner Mongolia in northern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2007) 29(6) 109-114 [Ch, 21 ref.]

<sup>1</sup> Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, P. R. China;

<sup>2</sup> Science College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, P. R. China.

Quantification of root distribution contributes an improved understanding of chemical fluxes in the vadose zone to both ecological and hydrological studies. Based on the data observed at Ejina Banner, Inner Mongolia of northern China, from May to July of 2006, root distribution of *Populus euphratica* forests was analyzed. Root system was divided into coarse root system ( $d > 0.2$  cm) and fine root system ( $d \leq 0.2$  cm). The content and method of research were different between two root systems: 1) for coarse root system, using fractal theory, the authors researched the relations between root distribution of *P. euphratica* and soil moisture. And a new definition, expectation of soil moisture content, was introduced. When the mean value of expectation of soil moisture content was  $25.03 \text{ cm} \cdot \text{g/g}$ , the fractal dimension of coarse roots was 2.000 7, and when it was  $55.95 \text{ cm} \cdot \text{g/g}$ , then the fractal dimension was 1.627 5, ie the larger the expectation of soil moisture content was, the smaller the fractal dimension of coarse root distribution was, vice versa. 2) For fine root system, one-dimension (including the vertical and horizontal radial direction) and two-dimension function of root length density (RLD) were simulated. All the functions of RLD were simulated by exponent function, and  $R^2$  was 0.89, 0.68, 0.73 and 0.69, respectively. It shows that the RLD of fine root system of *P. euphratica* is accorded with exponent distribution on the whole.

**Key words** *Populus euphratica*, root system distribution, expectation of soil moisture, fractal dimension of root system, root length density, simulation function

收稿日期:2006-09-01

http://www.bjfujournal.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(40725001,40501012,40671010).

第一作者:李建林,博士生,副教授.主要研究方向:干旱区环境与水文水资源.电话:0931-7632306 Email:lij-1@gsau.edu.cn 地址:730070 兰州市甘肃农业大学理学院.

责任作者:冯起,研究员,博士生导师.主要研究方向:干旱区环境与水文水资源.电话:0931-4967089 Email:qifeng@lzb.ac.cn 地址:730000 甘肃省兰州市中国科学院寒区旱区环境与工程研究所水土室.

根系是植物吸收水分的主要器官,它从土壤中吸收水分以满足植物蒸腾作用的需要.根系生长与水分吸收是紧密联系在一起的两个过程,定量研究植物根系的分布特征是构建根系吸水及运移模型、计算根系吸水量等不可缺少的手段和环节.国内外学者已做了相当多的研究,但主要集中在大田作物<sup>[1-4]</sup>,对于树木、干旱荒漠区植物根系的研究起步较晚,但发展迅速.20世纪90年代以后,逐渐有学者在这方面进行了深入研究.Katiul等<sup>[5]</sup>、Green等<sup>[6]</sup>、Vrugt等<sup>[7]</sup>、Vercamber等<sup>[8]</sup>分别就橡树(*Grevillea robusta*)、苹果树(*Malus pumila*)、杏树(*Prunus armeniaca*)、李子树(*Armeniaca limesing*)的根系分布及吸水问题进行了全面研究,并且建立了根系吸水模型.在国内,郝仲勇等<sup>[9]</sup>、姚立民等<sup>[10]</sup>、Gong等<sup>[11]</sup>研究了苹果树的根系分布,建立了相应的根系吸水模型;张劲松等<sup>[12]</sup>研究了石榴树(*Punica granatum*)吸水根的根系分布特征;朱永华等<sup>[13]</sup>对干旱荒漠地区苦豆子(*Sophora alopecuroides*)和骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)根系的分布进行了研究,并建立了不同的根系吸水模型.近两年,又有一批学者对干旱荒漠地区乔木——胡杨(*Populus euphratica*)及其根系等方面进行了探讨和研究<sup>[14-17]</sup>,但与树木、干旱区其他植物根系的研究相比,还不够深入.

胡杨是干旱荒漠地区天然分布的唯一乔木树种,它耐盐碱、水湿,抗干旱、风沙,具有维护分布区内的生态平衡、保障绿洲农牧业生产和为居民生活提供用材等作用.内蒙古自治区额济纳河流域是我国典型荒漠地区天然胡杨林的主要分布区之一.但自20世纪50年代以来,胡杨林渐呈衰败之势.为此,许多学者就相关问题进行了研究,各地也有针对性地采取了诸如封育、补充灌水等恢复措施,但收效不大.因此,研究胡杨根系的分布规律对了解胡杨体内的水分状况、制订合理的灌溉指标、胡杨林培育及生态节水均有重要意义.

乔木根系中, $d \leq 0.2$  cm的根其主要作用是吸收土壤水分和营养成分,称之为吸水根系;而 $d > 0.2$  cm的根主要作用是运输水分和营养成分,称之为运输根系<sup>[9]</sup>.因此,本文在分析胡杨根系分布特征时,将其根系分为两部分来研究,且研究内容和方法有所不同:对于运输根系,本文主要研究其整体分布特征;同时利用分形理论,研究胡杨运输根系分布对土壤水分的响应.因此在自然界中,很多现象诸如流域地形地貌演变、地质灾害的形态特征、土壤土质、粒径分布等都具有非线性的开放的特征,分形理论为研究这些复杂现象提供了新的思路和方法<sup>[18-19]</sup>.本文通过对不同直径根的数量统计分析,说明胡杨运输根系具有统计自相似性,即具有分形结构.从而

利用分形理论,分析了胡杨林运输根系分布与土壤含水量之间的非线性关系;因为吸水根系的根长密度函数是研究根系吸水数学模型的重要参数,所以在研究胡杨吸水根系的分布特征时,着重拟合了吸水根系在垂直方向和水平方向的分布曲线,以及二维分布曲面,建立了相应的根长密度函数.

## 1 试验区概况

试验区位于黑河下游内蒙古额济纳地区,该地区深居内陆,气候极端干旱,是中国最干旱的地区之一.根据额济纳旗气象站1957—2002年的资料,该地区多年平均降水量为42 mm,多年平均蒸发量为3 755 mm.试验地位于额济纳旗达镇东南二道桥胡杨林自然保护区内,地理坐标为41°58'N,101°06'E.保护区内胡杨平均高约8 m,平均胸径约13 cm,基本属中幼林,分布密度为0.35 棵/m<sup>2</sup>.林下有多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、苦豆子等分布.土壤为胡杨林土,深0~1.5 m土壤质地为粘壤土至砂土.

## 2 材料与方法

### 2.1 试验对象的选取

在额济纳二道桥胡杨林自然保护区中,随机选取胡杨200棵,测其胸径,得到胡杨的平均胸径为13.1 cm,均方差为3.2 cm.由以上分析,在这200棵中,独立随机选取20棵胸径在10~16 cm之间的胡杨作为运输根系相关试验的样本(以下简称样树):样树周围(以样树为圆心,半径6 m以内)无其他胡杨,土壤基本为沙壤土;为使土壤水分含量的变化比较明显,这20棵样树分别在距河岸50和500 m的垂直距离上随机、独立地各选取10棵.

在这20棵样树中,选取1棵作为吸水根系相关试验的样本(样树14);胸径为13 cm,树高约7 m,周围(以树干为圆心,半径6 m以内)无其他胡杨.

### 2.2 研究方法

试验于2006年5月18日至7月10日进行.对20棵样树,每棵样树先挖一个以树干为圆心,径向半径为2 m,垂直深度为1.5 m的坑,以观察主根的大小和走向.然后顺着主根方向继续挖一立方体;径向距离至6 m,垂直深度为1.5 m,宽1.5 m.将根按直径分为0.5~2 cm、2~5 cm、5~8 cm、>8 cm 4种类型.观测不同直径下根的频数和走向.为使剖面的挖掘对胡杨生长的影响尽可能地降低,故挖掘及土壤含水率测定均在早晨进行.采用土样烘箱烘干法测定根系土壤重量含水率.由于胡杨根系垂向主要分布在20~100 cm之间,所以测定深度确定为120 cm,测点垂向间距为20 cm;水平方向沿大根方向各布置2个测点,分别距树干200和500 cm.

样树 14 的根系取样采用挖剖面取样的方法;以树干为中心,沿东西方向和南北方向挖十字剖面,取样深度至地表以下 120 cm,水平距离由树干起 400 cm 处止.取样尺寸为水平方向长 20 cm,宽为 10 cm,垂直方向 20 cm 为一层,取样共计 480 份,依次编号标记.然后对每一土样利用土样筛,选取  $d \leq 2$  mm 的根,用清水冲洗、晾干后,利用交叉法求得根长  $L^{[2]}$ ,当交叉点小于 50 时,采用直接测量法测定根长  $L$ .再将  $L$  除以土样体积可得该体积上的根长密度.计算公式为:

$$L = \frac{11}{14}NY, RLD = \frac{L}{V} \quad (1)$$

式中,  $L$  为根长(cm);  $N$  为交叉点个数;  $\gamma$  为与网格形状有关的常数;  $RLD$  为根长密度( $\text{cm}/\text{cm}^3$ );  $V$  为每一土样块体积( $\text{cm}^3$ ).

### 3 数据分析

#### 3.1 输运根系的数据分析

##### 3.1.1 输运根系分布的基本特征

胡杨具有庞大的根系,但粗大根( $d > 5$  cm)很少(见表 1),仅占总根数的 6.01%.侧根发达,在垂直向 20~120 cm 深的土层内向四周延伸,但粗大根系主要沿河道方向(东西方向)延伸.

表 1 样树不同直径根的分布频数

TABLE 1 Distribution frequency of different diameter roots for the sample trees

胸径/cm	样树号																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\leq 0.2$	16	16	10	13	10	11	12	13	12	12	12	11	13	13	11	16	15	13	15	13
0.2~2	74	63	10	36	33	40	86	27	9	76	42	62	9	21	37	68	40	34	82	61
2~5	16	7	4	4	2	12	8	6	3	7	2	2	2	2	4	5	9	7	9	6
5~8	5	2	1	2	1	3	2	1	2	2	1	1	1	1	2	2	5	4	3	2
$> 8$	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	2	1	1

##### 3.1.2 根部土壤含水量的总体分析

20 棵样树根部土壤水分的情况各不相同,有些差异很大(图 1).但平均之后,可以看出试验地土壤含水率总的特点.0~20 cm 的土层基本为干沙层,使表层土壤含水率最低,一般为 1%左右;土壤剖面的 30~120 cm 土层内,随着土壤深度的增加,土壤含水率逐渐增大,但变化平缓,含水率只是由 1%左右上升到 13%左右(图 2).

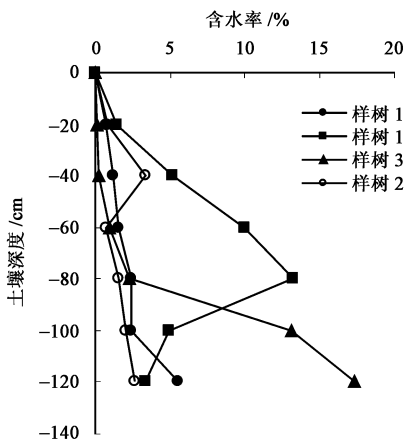


图 1 不同样树土壤含水率

FIGURE 1 Soil moisture content of different sample trees

##### 3.1.3 样树土壤含水率期望的计算

探讨胡杨根系与土壤含水量的关系,需比较每棵样树的土壤含水率.而由以上分析可知,在土壤的

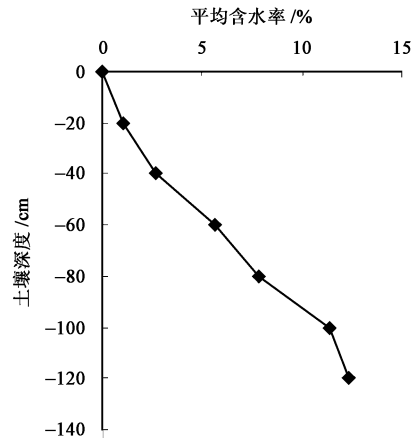


图 2 根部土壤平均含水率

FIGURE 2 Mean soil moisture content beside root system

不同深度,其含水率差异很大,如果只求不同深度含水率的平均值,就不能反映出这种差异,为此,类似概率论中数学期望  $E(x)$  的定义方法,引入土壤含水率期望( $\theta$ )的定义:

$$\theta = \sum_i h_i c_i \quad (2)$$

式中,  $i$  为土壤层数;  $h_i$  为第  $i$  层的土壤深度(cm);  $c_i$  为相应深度  $h_i$  下的土壤含水率( $\text{g}/\text{g}$ ),  $\theta$  为土壤含水率期望( $\text{cm} \cdot \text{g}/\text{g}$ ).由于在  $\theta$  的计算中,每层的深度  $h_i$  被引入,故  $\theta$  可以反映出含水率在不同深度上的差异性.由此计算每棵样树的  $\theta$  值(表 2).

表2 样树土壤含水率期望

cm · g · g<sup>-1</sup>

TABLE 2  $\theta$  of the sample trees

样树号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\theta$	61.15	11.27	55.76	60.28	34.02	49.19	26.89	49.68	52.79	34.16
样树号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\theta$	38.13	16.54	43.29	65.19	13.9	22.37	57.46	64.71	20.58	32.44

由表2数据,比较 $\theta$ 的大小,将样树分为2组(由于样树位置的不同).第1组为:样树2、5、7、10、11、12、15、16、19和20,其 $\theta$ 值都较低,其平均值( $\theta$ ) =  $\frac{1}{10} \sum \theta_i = 25.03 \text{ cm} \cdot \text{g}/\text{g}$ (10棵样树 $\theta$ 的平均值);第2组为:样树1、3、4、6、8、9、13、14、17和18,其 $\theta$ 值都较高, $\theta = 55.95 \text{ cm} \cdot \text{g}/\text{g}$ .

3.1.4 根系分布与土壤水分关系的非线性分析

对每组样树不同直径下根数目的累积频数进行统计,结果见表3.

表3 不同直径下的根数目

TABLE 3 Root numbers under different root diameters

根数目	根直径/cm			
	>0.2	>2	>5	>8
第1组	688	78	26	8
第2组	401	101	36	11

由此可做出根的直径对数 $\ln d$ 与根的累积频数对数 $\ln n$ 之间的回归方程:

$$\ln n = \begin{cases} 6.2488 - 2.0007 \ln d \\ \theta = 25.03, R_1^2 = 0.9639 \\ 5.9306 - 1.6275 \ln d \\ \theta = 55.95, R_2^2 = 0.9807 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中非常高的相关性( $R_1^2 = 0.9639, R_2^2 = 0.9807$ )说明,胡杨运输根系的分布的确具有自相似性,即根系分布存在分形现象<sup>[20]</sup>.由分维的定义<sup>[20]</sup>可知, $\ln d$ 的系数即根系分布的分形维数.当 $\theta = 25.03 \text{ cm} \cdot \text{g}/\text{g}$ 时,根系分布的分形维数为2.0007;当 $\theta = 55.95 \text{ cm} \cdot \text{g}/\text{g}$ 时,根系分布的分形维数为1.6275.这种结果是在其他影响根系分布的因素基本保持不变,而根系土壤水分发生明显变化时得到的.式(3)表明,根系土壤水分的变化对胡杨运输根系的分布有着直接影响,当土壤水分含量低时,运输根系分布的分维大;当土壤水分含量高时,运输根系分布的分维小.这说明含水量低时,运输根系为了让吸水根系吸收到更多的水分,因而产生了更多的分生根,所以分维变大.

3.2 吸水根系的数据分析

胡杨的吸水根系,其根长密度严格来说应当是呈三维分布的,但由于根系土壤以及胡杨个体发育等因素的影响,使得三维根长密度随个体不同而各不相同,而且差别很大.因此,由某一棵胡杨吸水根

系的三维根长密度应用于其他胡杨,其适用性很差;而一维和二维胡杨吸水根系的根长密度,由于进行了一定程度的空间平均,具有较好的适应性.因此,本文分析拟合了胡杨吸水根系根长密度一维和二维的分布函数.国内外学者在拟合一维函数时,多为垂直方向的一维函数<sup>[9-12]</sup>,而胡杨根系具有发达的侧根,有些胡杨根系在水平方向甚至可延伸几十米,所以本文在拟合根长密度一维函数时,不仅拟合了垂直方向的函数,也拟合了水平方向的函数.

3.2.1 垂直方向的一维根长密度分布

将每一层水平径向的根长密度平均,得到垂直方向的一维根长密度分布(表4).

表4 垂直方向的一维根长密度分布

TABLE 4 1-d RLD distribution in the vertical direction

土壤深度/cm	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
根长密度/(cm · cm <sup>-3</sup> )	0.255	0.066	0.761	0.030	0.010	0.001

采用指数拟合其根长密度分布函数(图3),得:

$$RLD(z) = 34.33 RLD_{\max} e^{-6.004z/z} \quad R^2 = 0.8884 \quad (4)$$

式中, $z$ 为土壤深度(cm); $RLD(z)$ 为垂直方向的一维根长密度( $\text{cm}/\text{cm}^3$ ), $Z$ 为根系垂直最大伸展长度(cm), $RLD_{\max}$ 为最大根长密度.本次试验 $z = 120 \text{ cm}$ , $RLD_{\max} = 0.517 \text{ cm}/\text{cm}^3$ .

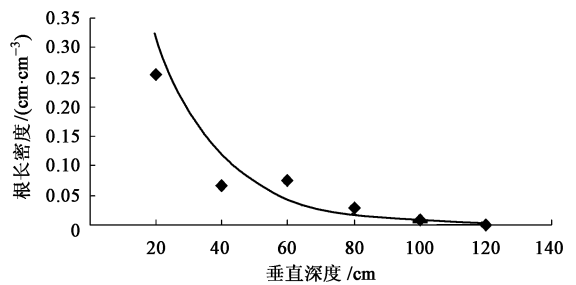


图3 垂直方向一维根长密度

FIGURE 3 1-d RLD in the vertical direction

结果表明,在垂直方向,随着土壤深度的增加,根长密度呈递减趋势,吸水根主要集中在0~80 cm的土层内,占总量的97.60%.在0~20 cm的土层内,吸水根根量最大,占吸水根总量的58.25%;而在100~120 cm的土层内,几乎已经没有吸水根存在,只占总量的0.19%.

3.2.2 水平方向的一维根长密度分布

数据处理的方法与垂直方向类似,在垂直方向,

将每一间隔上的根长密度平均, 得到水平方向的一维根长密度分布(表 5)。

表 5 水平方向的一维根长密度分布

TABLE 5 1-d RLD distribution in the horizontal radial direction

径向距离/cm	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
相对根长密度	0.006 9	0.045 2	0.072 7	0.085 2	0.085 3	0.075 1	0.090 6	0.121 7	0.094 4	0.098 2
径向距离/cm	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
相对根长密度	0.122 6	0.076 6	0.088 3	0.065 3	0.059 9	0.054 3	0.058 1	0.064 1	0.050 2	0.046 0

采用指数拟合其根长密度分布函数(图 4), 得:

$$RLD(r) = \begin{cases} 0.6029 RLD_{\max} e^{1.558r/R} & 0 \leq r/R < 0.55, R_1^2 = 0.68 \\ 1.9668 RLD_{\max} e^{-1.269r/R} & 0.55 \leq r/R < 1, R_2^2 = 0.73 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $r$  为根系水平伸展长度(cm);  $RLD(r)$  为水平方向的一维根长密度( $\text{cm}/\text{cm}^3$ );  $R$  为根系水平最大伸展长度(cm)。本次试验  $R=400$  cm。

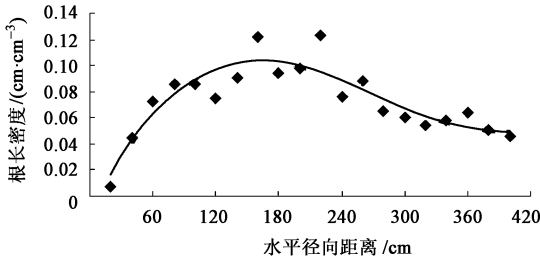


图 4 水平方向一维根长密度

FIGURE 4 1-d RLD in the horizontal radial direction

结果表明, 在水平方向上 0~220 cm 的范围内, 吸水根根长密度随径向距离的增加而逐渐增大; 而在 220~400 cm 的范围内, 吸水根根长密度随径向距离的增加而逐渐减小。在 0~20 cm 范围内, 吸水根系分布很少, 仅占总量的 0.47%; 在 160~220 cm 范围内, 吸水根系分布最为密集, 仅 60 cm 水平距离内, 吸水根根长就占了总量的 18.57%。

### 3.2.3 二维根长密度分布

假设二维根长密度函数满足二维的指数函数:

$$RLD(z, r) = aRLD_{\max} e^{-(br/R + cz/Z)} \quad (6)$$

式中,  $RLD(z, r)$  为二维根长密度( $\text{cm}/\text{cm}^3$ ),  $a, b, c$  为待定参数。

通过计算, 确定  $a, b, c$  的估计值、标准差, 以及置信度为 0.95 的置信区间(表 6), 从而得到根长密度的二维分布函数为(图 5):

表 6 待定参数  $a, b, c$  的回归分析

TABLE 6 Regression analysis of parameters  $a, b$  and  $c$

待定参数	估计值	标准差	置信度为 0.95 的置信区间
$a$	1.324	0.198	(0.932, 1.717)
$b$	5.423	0.586	(4.262, 6.583)
$c$	0.215	0.165	(-0.111, 0.541)

$$RLD(z, r) = 1.342 RLD_{\max} e^{-(5.423r/R + 0.215z/Z)} \quad R^2 = 0.685 \quad (7)$$

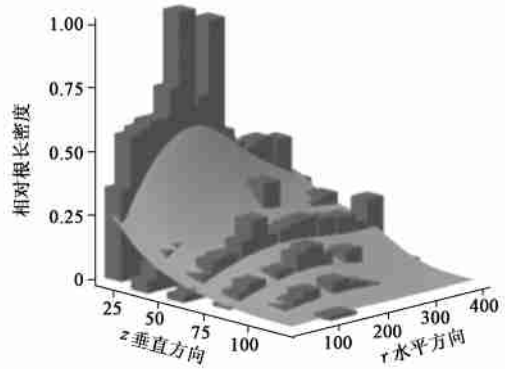


图 5 吸水根系根长密度的二维分布

FIGURE 5 2-d distribution of RLD for the fine root system

## 4 结果与讨论

本文在试验的基础上, 对我国干旱荒漠地区天然分布的唯一乔木树种——胡杨的根系分布进行了分析研究。①对于运输根系, 通过对试验数据的分析发现, 胡杨运输根系的分布存在分形现象。利用分形理论, 对胡杨运输根系的分布与土壤含水量的关系进行了研究。结果表明, 根系土壤水分的变化对胡杨运输根系的分布有着直接影响。当土壤水分含量低时, 运输根系分布的分维值大; 当土壤水分含量高时, 运输根系分布的分维值小。这说明含水量低时, 运输根系为了让吸水根系吸收到更多的水分, 因而产生了更多的分生根, 所以分维增大。②对于吸水根系, 本文拟合了吸水根系在垂直方向和水平方向的分布曲线, 以及二维分布曲面, 采用指数函数拟合, 建立了相应的根长密度函数。所得结果的  $R^2$  都在 0.68 以上, 说明胡杨吸水根系的根长密度分布也具有与果树相似的规律<sup>[9-12]</sup>, 基本符合指数分布规律。试验结果为胡杨根系吸水模型的建立, 以及胡杨 SPAC 系统进一步的研究提供了试验依据和理论支持。

在干旱地区, 植物根系的发育是受到地下水位影响的<sup>[21]</sup>, 但当根系未达到地下水位时, 地下水对根系的影响是通过土壤含水量体现的。由于胡杨根

系未达到地下水位,所以本文只讨论了土壤含水量对胡杨根系的影响。另外,基础数据的取样和统计过程的不同,以及选择研究的地域不同等对研究结果差异的影响,由于资料的限制,本文未能继续深入研究,需要在以后的工作中对以上问题进行更为深入的探讨。

### 参 考 文 献

- [1] SMITH D M, ROBERTS J M. Hydraulic conductivities of competing root systems of *Grevillea robusta* and maize in agroforestry[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251: 343-349.
- [2] KANG S Z, ZHANG F C, ZHANG J H. A simulation model of water dynamics in winter wheat field and its application in a semiarid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49: 115-129.
- [3] 白文明,左强,黄元仿,等. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 35-41.  
BAI W M, ZUO Q, HUANG Y F, et al. Effect of water supply on root growth and water uptake of *Alfalfa* in Wulanbuhe Sandy Region [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(1): 35-41.
- [4] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 冬小麦根系吸水模式研究[J]. *西北农业大学学报*, 1992, 20(2): 5-12.  
KANG S Z, LIU X M, XIONG Y Z. Research on the model of water uptake by winter wheat root system[J]. *Acta University Agricultural Boreali-Occidentalis*, 1992, 20(2): 5-12.
- [5] KATIUL G, TODD P, PATAKI D. Soil water depletion by oak trees and the influence of root water uptake on the moisture content spatial statistics[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33: 611-623.
- [6] GREEN S, CLOTHIER B. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree[J]. *Plant and Soil*, 1999, 206: 61-77.
- [7] VRUGT J A, HOPMANS J W, SIMUNEK J. Calibration of a 2-d root water uptake model[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, 65: 1 027-1 037.
- [8] VERCAMBRE G, PAGES L, DOUSSAN C, et al. Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modeling approach[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251: 1-11.
- [9] 郝仲勇,刘洪禄,杨培岭. 果树根系吸水函数的建立[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(增刊): 53-56.  
HAO Z Y, LIU H L, YANG P L. Establishment of a root water uptake function of apple tree [J]. *Transaction of CSAE*, 2000, 16 (Supp.): 53-56.
- [10] 姚立民,康绍忠,龚道枝,等. 苹果树根系吸水模型研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(6): 67-70.  
YAO L M, KANG S Z, GONG D Z, et al. The apple tree root water uptake models established through two kinds of methods and the comprise of these models[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(6): 67-70.
- [11] GONG D Z, KANG S Z, LU Z, et al. A 2-d model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and water content measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83: 119-129.
- [12] 张劲松,孟平. 石榴树吸水根系空间分布特征[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(4): 89-91.
- ZHANG J S, MENG P. Spatial distribution characteristics of fine roots of pomegranate tree [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (National Sciences Edition)*, 2004, 28(4): 89-91.
- [13] 朱永华,仵彦卿,吕海深. 荒漠植物根系吸水的数学模型[J]. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(2): 75-79.  
ZHU Y H, WU Y Q, LÜ H S. Mathematical model of water absorption of eremophyte root system [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(2): 75-79.
- [14] 王立明,张秋良,殷继艳. 额济纳胡杨林生长规律及生产力的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(2): 94-99.  
WANG L M, ZHANG Q L, YIN J Y. Study on the growth pattern and bio-productivity of the *Populus euphratica* forest stand in Ejina [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(2): 94-99.
- [15] 杨丽,张秋良,常金宝. 胡杨根系分布特性[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2006, 27(1): 15-17.  
YANG L, ZHANG Q L, CHANG J B. Spatial distribution characteristics of roots of *Populus euphratica* [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2006, 27(1): 15-17.
- [16] 萨如拉,豪树奇,张秋良,等. 额济纳胡杨林土壤含水量时空变化的研究[J]. *林业资源管理*, 2006(1): 59-62.  
SARULA, HAO S Q, ZHANG Q L, et al. A study on soil moisture variation of natural *Populus euphratica* forest stand in Ejina [J]. *Forest Resources Management*, 2006(1): 59-62.
- [17] 肖生春,肖洪浪. 极端干旱区湖岸柽柳径向生长对环境演变的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(2): 39-45.  
XIAO S C, XIAO H L. Response of radial growth of lakeshore tamarisk to changes in the water environment in extreme and arid regions [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(2): 39-45.
- [18] 张少文,王文圣,丁晶,等. 分形理论在水文水资源中的应用[J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 141-146.  
ZHANG S W, WANG W S, DING J, et al. Application of fractal theory to hydrology and water resources [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(1): 141-146.
- [19] 李建林,冯起. 西北干旱半干旱地区泥石流沟谷形态特征的非线性分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 658-662.  
LI J L, FENG Q. Nonlinear analysis of morphology of debris flow gully in arid and semiarid region in northwestern China [J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(5): 658-662.
- [20] 李水根. 分形[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 115-116.  
LI S G. *Fractal* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 115-116.
- [21] 冯起,程国栋,谭志刚. 荒漠绿洲植被生长与生态地下水位的研 究[J]. *中国沙漠*, 1998, 18(增刊1): 106-109.  
FENG Q, CHENG G D, TAN Z G. Study on the relationship between the vegetation growth and ecological groundwater level in oasis [J]. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(Supp. 1): 106-109.

(责任编辑 李 雯)