

黄土丘陵区密植枣林细根空间分布统计模型优选

刘晓丽¹, 马理辉^{2,3*}, 汪有科^{2,3}

(1 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了选取最优的黄土丘陵半干旱区密植人工枣林细根空间分布的统计模型,以4、8及11年生的密植枣林为研究对象,采用壕沟剖面法获取根系分布的数据,通过选取不同的固定效应、随机效应及协变量(树龄、土层深度、离树干的水平距离),用固定效应方差分析模型、混合效应方差分析模型及协方差分析模型对细根空间分布进行比较分析。结果表明:把树龄作为固定效应、土层深度作为协变量、离树干的水平距离作为随机效应配合的协方差分析模型,修正复相关系数最高,剩余均方差最小;枣林细根随树龄增加显著增加,随土层深度的增加显著减少,随离树干的水平距离无显著差异,符合密植枣林的实际空间分布规律,是最优统计模型。可为准确分析根系空间分布规律提供基础数据,为其他林分的根系空间分布规律的分析提供参考。

关键词:密植枣林; 根系分布; 固定效应; 随机效应; 统计模型; 黄土丘陵区

中图分类号:S718.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)06-0029-06

Statistical Model Optimization of Fine Root Spatial Distribution in Densely Planted Jujube Plantation in Loess Region

LIU Xiao-li¹, MA Li-hui^{2,3*}, WANG You-ke^{2,3}

(1. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to establish optimal statistic models to describe the spatial distribution of the fine roots of densely planted artificial jujube plantation, 4, 8, and 11-year old jujube plantations were selected in the loess hilly semiarid areas as research objects. The root distribution data were collected by the trenches profiles method. Several models were applied and compared, such as the fixed effect variance analysis model, mixed effect variance analysis model and covariance analysis model to analyze root spatial distribution on different fixed effects, random effect and covariant(tree age, soil layer depth, horizontal distance from the trunk). The results showed that the covariance analysis model was the best fitting model which assumed tree age as fixed effect, soil layer depth as covariant, and the distance from trunk as random effect. The corrected correlation coefficient value was the biggest, and the remaining mean variance value was the smallest. The number of fine root increased significantly with tree age, decreased significantly with soil layer depth, there were no significant difference with the horizontal distance from the trunk, it conformed to densely jujube plantation realistic spatial distribution pattern. This result can provide basic data for spatial root distribution characteristics, and theoretical reference for the spatial root distribution of other forest plantations.

收稿日期:2014-06-30 修回日期:2014-09-11

基金项目:国家科技支撑计划(2011BAD29B04),国家自然科学基金(31200343),中国科学院“西部之光”资助项目(2013)。

作者简介:刘晓丽,女,博士,助理研究员,研究方向:根系生态学及水土资源高效利用。E-mail:404270234@qq.com

* 通信作者:马理辉,男,博士,副研究员,研究方向:根系生态学和生态水文学。E-mail:gjzmlh@126.com

Key words: densely jujube plantation; root distribution; fixed effect; random effect; statistical model; loess hilly region

众多研究林木根系空间分布特征的统计模型常采用经典线性回归模型,或转换为线性回归模型用来描述因变量与自变量之间的依存关系。J. B. Pssisoura^[1]和H. Araki^[2]指出林木根系分布一般随着土层深度的增加而减少,符合指数衰减规律。张良德^[3]等研究了刺槐比根长随土层深度增加而衰减趋势较小,不再符合负指数衰减规律,用三次多项式进行描述。如果将由自变量构造的设计矩阵分成与固定效应及随机效应分别有关的变量来描述因变量与自变量之间依存关系的统计模型,称为一般线性混合模型。唐守正^[4]等指出线性混合模型可以通过构造固定参数向量和随机参数向量,使得模型的刻画更为精细。线性混合模型消除了层次结构数据产生的误差,既能反映总体的平均变化趋势,又可以提供数据方差、协方差等多种信息来反映个体之间的差异^[5],在很大程度上弥补了以往线性回归模型估计方面的不足。国内对林分根系空间分布的研究采用一般线性模型中的固定效应方差分析法,程瑞梅^[6]等利用一般线性模型中的多因素方差分析法调查了三峡库区马尾松根系生物量的空间分布。对混合模型的应用主要集中在单木和林分生长模型方面^[7-9]。国外有学者将混合模型应用到根系空间分布研究中^[10-12],通过选取不同的固定效应及随机效应影响因素进行根系空间分布的统计分析。

一般线性混合模型由于自变量选取不同的影响因素(固定、随机效应、协变量)有各种不同的简化模型形式,对因变量的分析结果差异很大,如果将随机因素按固定因素来分析,则可能得出错误的分析结果。合理选用统计模型的关键在于弄清资料所取自的设计类型,影响因素的性质(固定或随机效应),有无协变量等^[13]。对同一根系空间分布数据通过选取不同的自变量影响因素进行统计分析并比较其影响差异的研究尚未报道。

以获取的陕北黄土丘陵区矮化密植枣林的根系空间分布数据,采用线性混合模型,以树龄、土层深度和离树干的水平距离设置不同的影响因素,通过自变量的不同影响效应来分析其对细根空间分布的影响,筛选最优模型,从而为客观描述根系空间分布规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于典型的黄土高原丘陵沟壑区陕西

省米脂县银州镇孟岔村($119^{\circ}49' E, 37^{\circ}5' N$)密植枣林中。研究区属中温带半干旱性气候区,降雨量少且年内分布不均,年平均降雨量不足500 mm,7—9月降雨量占全年降雨量的50%以上。研究区土壤属于砂壤土,0~100 cm土壤容重平均为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量及饱和含水量平均为23.4%和39.8%(质量含水量)。土层深厚,地下水埋深50 m以下,对本试验根系吸水影响可忽略。枣树沿等高线种植,枣林的株行距为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。密植枣林于1999年栽植,2002年开始实施矮化修剪,2006年开始实施滴灌,每年分别在萌芽展叶期、开花坐果期、果实白熟期滴灌3次,每次滴灌量为 $138 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,每年的滴灌时间和滴灌量基本一致。每年4月下旬施氮肥 $41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,钾肥 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2 数据收集与整理

采用壕沟剖面法获取根系分布的数据,2010年8月,在3种不同树龄(4 a, 8 a, 11 a)的枣林中,选择长势相当的连续4株枣树,沿枣树种植行方向、在枣树的下坡位,连续开挖长6 m的壕沟(3个株距),宽0.8 m(便于照相取样),深1.1 m(留0.1 m放置弃土)。制作长1.0 m、高1 m,20 cm×20 cm的网格框架^[14],垂直方向上将土壤剖面按20 cm间隔将0~1 m深度范围分成5层,同时水平方向上按20 cm长度间隔分成5个长度单位,对每个网格拍照后统计出每个网格中细根数量,转换成单位面积的根系数量,本研究中细根定义为直径<1 mm的根系^[15]。每个取样框包括25个网格(20 cm×20 cm),重复6次,共计150个网格,从而获得不同树龄枣林细根的空间分布数据。

1.3 固定效应因素、随机效应因素及协变量

固定效应因素指该因素在样本中所有可能的水平都出现。针对该因素而言,从样本的分析结果中就可以得知所有水平的状况,无需进行外推。另外,有些人为设定的因素,如本研究中的树龄被分为4、8、11年3个值,以分析此3个树龄水平对根系的空间分布的影响,不需要外推到其他水平(如其他树龄),认为是固定效应因素。

随机效应因素指该因素所有可能的取值在样本中没有都出现,或不可能都出现。本研究中的土层深度及离树干的水平距离,它们只是所有垂直深度及水平距离的代表而已。因此,要用样本中5个土层深度(0~20 cm含上限20,以下同)、20~40、40~

60、60~80 cm 与 80~100 cm) 及 5 个水平距离(0~20、20~40、40~60、60~80 cm 与 80~100 cm) 对根系空间分布的影响情况来推论整个林分中土层深度及水平距离对根量的影响情况, 包括未出现的那些深度及距离, 这不可避免的存在误差(即随机效应), 需要估计该误差的大小, 因此, 本试验中作为随机效应因素。

协变量是指与因变量有线性相关并在探讨自变量与因变量关系时通过统计技术加以控制的变量, 对因变量的影响作用是已知的, 如本研究中土层深度对根量的影响是已知的, 通常随着土层深度的增加根量减少, 因此, 可把土层深度作为协变量进行分析。

1.4 混合线性模型的结构及模型选取

具有固定效应的一般线性模型的结构为: $Y = X\beta + \epsilon$, 式中 Y 表示反应变量的测量值向量, X 为固定效应自变量的设计矩阵, β 是与 X 对应的固定效应参数向量, ϵ 为剩余误差向量。 $X\beta$ 为在 X 条件下的 Y 的平均值向量, 即 $Y|X=X\beta$ 。

如果一个线性模型中既包括固定效应和随机效应, 该模型被称为混合效应模型。混合线性模型将一般线性模型扩展为: $Y = X\beta + Z\Gamma + \epsilon$, 式中 Z 为随机效应变量构造的设计矩阵, Γ 为随机效应参数向量, ϵ 为随机误差向量^[16]。

一般混合线性模型有各种不同的简化形式, 根据本试验统计资料的性质, 选取以下 4 种简化形式进行分析。

模型 1, 固定效应方差分析模型, 当构成自变量的设计矩阵由固定效应的定性影响因素构造而成时, 本研究设定树龄、土层深度及水平距离都为固定效应因素;

模型 2, 混合效应方差分析模型, 当构成自变量的设计矩阵由固定与随机两种效应的定性影响因素构造而成时, 本研究设定树龄为固定效应因素、土层深度及水平距离为随机效应因素;

模型 3, 协方差分析模型, 当构成自变量的设计矩阵同时由定性和定量两种影响因素构造而成时, 当定性的影响因素是固定效应时, 本研究中分两种情形(模型 3 及模型 4), 设定树龄为固定效应因素、水平距离为随机效应因素、土层深度为协变量, 主要考虑水平距离对根系空间分布的影响;

模型 4, 协方差分析模型, 设树龄为固定效应因素、土层深度为随机效应因素、水平距离为协变量, 主要考虑土层深度对根系空间分布的影响。

1.5 统计分析

采用 RSS, MSE, R_q 这 3 个拟合统计量作为评

价模型拟合效果的指标。

剩余残差平方和(RSS):

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

剩余均方差(MSE):

$$MSE = \frac{RSS}{n-q} \quad (2)$$

修正复相关系数:

$$\bar{R}_q = 1 - \frac{n-1}{n-q}(1-R_q) \quad (3)$$

$$\text{其中}, R_q = 1 - \frac{RSS}{TSS}, TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \bar{y} = \frac{1}{n}$$

$\sum_{i=1}^n y_i$, n 为根数观测值个数, q 为拟合模型中参数个数。

采用 SAS 9.2 软件对根量进行方差分析。选取 3 个林龄值, 5 个土层深度值, 5 个水平距离值, 重复 6 次, 选取固定效应、随机效应及协变量进行分析, 用方差齐性检验的显著性概率判断不同土层深度及不同水平距离根系数量的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 细根空间分布规律

枣林根系随树龄的增长根量增加。4 年生、8 年生及 11 年生枣林 1 米深度土层内根数分别为 752.33, 939.67 条·m⁻² 与 1 026.33 条·m⁻²; 随土层深度的增加根量减少。在 3 种树龄中上层根量多, 而下层根量少, 其中 0.8~1.0 m 土层深度的根量最少; 随离树干的水平距离增加根量基本呈均匀分布, 未显示明显的变化规律(表 1)。

2.2 4 种模型方差分析结果及比较

以细根的根系数量值为因变量, 采用固定效应方差分析模型、混合效应方差分析模型及协方差分析模型对林分根系空间分布特征进行统计分析(表 2)。通过对固定效应测验方差分析的 F 值, 随机效应测验方差分析的 Z 值进行显著性差异比较。

从表 2 可以看出, 模型 1 中枣林细根的数量随树龄的增长及土层深度的增加有显著差异, 树龄与土层深度的交互作用也有显著差异; 而随离树干的水平距离的增加无显著差异, 树龄与水平距离, 土层深度与水平距离, 树龄、土层深度与水平距离的交互作用无显著差异。枣林林分在株间 2 m 内根系水平分布呈均匀分布状态, 垂直分布上有差异。模型 2 中枣林细根数量随树龄增长及土层深度的增加无显著差异, 树龄与土层深度的交互作用及土层深度与水平距离的交互作用无显著差异; 而随离树干的水平距离增加有显著差异, 树龄与水平距离的交互

作用及树龄、土层深度与水平距离的交互作用有显著差异。枣林根系垂直分布上整体上呈均匀分布状态,水平分布上有差异。模型 3 与模型 4 引入协变量进行分析,模型 3 中把土层深度设为协变量,由于土层深度对根量的影响是已知的,随土层深度的增加根量减少。其他研究也表明根系一般分布在上层,随土层深度的增加,根量显著减少^[17-19]。枣林细根数量随树龄增长及土层深度的增加有显著差异,树龄与水平距离的交互作用有显著差异;而随离树干的水平距离无显著差异。模型 4 中去除水平距离对根量的影响,枣林细根数量随树龄增加及土层深度的增加无显著差异,树龄与土层深度的交互作用

无显著差异;而随离树干的水平距离的增加有显著差异。通过以上分析,模型 1 与模型 3 的结论基本一致,除了树龄与水平距离的交互作用模型 1 无显著差异,模型 3 有显著差异。显而易见,细根量随着树龄增长有显著差异,树龄与水平距离的交互作用也应有显著差异,模型 3 较模型 1 更合理;本试验中涉及分析整个土层深度及离树干的水平距离对根量的影响,故选择土层深度及水平距离作为随机效应影响因素的混合模型 2 初步作为枣林根系空间分布模型,但模型 2 的分析结果表明细根量随树龄增加无显著差异,显然不符合细根的生长发育规律,故进而选择模型 3 作为枣林根系发展的适宜模型。

表 1 3 种树龄枣林细根数量的空间分布

Table 1 Spatial distribution of fine root for three jujube plantation ages

条·m⁻²

树龄/a	土层 深度/m	水平距离/m						合计(0~1.0)
		0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0		
4	0~0.2	24.83±9.56	23.67±9.71	42.83±26.84	38.83±15.48	38.33±36.62	168.50	
	0.2~0.4	36.67±10.98	29.00±16.72	35.17±16.12	38.67±17.58	30.50±9.73	170.00	
	0.4~0.6	29.33±9.16	30.67±7.45	29.33±17.94	33.67±17.18	43.33±33.31	166.33	
	0.6~0.8	20.00±8.53	25.50±13.92	26.33±14.73	22.00±9.03	30.33±18.37	124.17	
	0.8~1.0	15.33±7.15	24.33±14.61	30.50±20.70	29.67±18.37	23.50±14.07	123.33	
	合计	126.16	133.17	164.17	162.83	166.00	752.33	
8	0~0.2	47.67±12.47	52.50±21.97	49.83±14.95	45.83±28.27	62.17±48.59	258.00	
	0.2~0.4	31.17±12.14	51.17±16.67	51.33±13.53	61.83±20.61	65.67±34.77	261.17	
	0.4~0.6	31.67±9.24	56.17±30.10	42.67±19.61	45.33±29.31	57.50±40.10	233.33	
	0.6~0.8	21.50±16.05	20.00±4.86	32.33±31.44	20.00±8.56	30.67±16.87	124.50	
	0.8~1.0	11.17±7.52	11.50±6.53	12.83±6.21	10.17±4.07	17.00±9.59	62.67	
	合计	143.18	191.33	189.00	183.17	233.00	939.67	
11	0~0.2	74.00±30.19	65.17±23.73	81.33±26.32	100.33±15.82	92.83±33.46	413.67	
	0.2~0.4	57.00±16.82	56.67±27.25	47.17±23.68	35.50±10.88	35.17±21.57	231.50	
	0.4~0.6	25.00±19.80	21.67±10.76	27.33±14.25	46.17±21.71	26.50±7.58	146.67	
	0.6~0.8	32.67±13.82	35.17±10.15	24.50±8.17	27.33±5.82	26.50±15.63	146.17	
	0.8~1.0	17.50±7.56	21.83±8.28	18.67±5.99	20.50±7.64	9.83±3.66	88.33	
	合计	206.17	200.50	199.00	229.83	190.83	1 026.33	

注:表中数值为离树干一定水平距离和一定土层深度中细根数量(均值±标准差),n=6。土层深度0~0.2含0.2,即含上限,以下同。

表 2 4 种模型细根(<1 mm)F 值及 Z 值方差分析结果比较

Table 2 Comparisons of fine root (<1 mm) F and Z value variance analysis results for four models

模型	固定效应方差 分析模型(模型 1)		混合效应方差 分析模型(模型 2)			协方差 分析模型(模型 3)			协方差 分析模型(模型 4)		
	F 值	p 值	F 值	Z 值	p 值	F 值	Z 值	p 值	F 值	Z 值	p 值
树龄	12.917	p<0.001	3.362	/	0.087	5.418	/	0.004	3.361	/	0.087
土层深度	53.997	p<0.001	/	0.926	/	12.863	/	p<0.001	/	1.058	/
水平距离	2.259	0.062	/	p<0.001	/	/	0.338	/	4.259	/	0.04
树龄×土层深度	13.815	p<0.001	/	0.833	0.203	/	/	/	0.807	/	0.21
树龄×水平距离	1.512	0.151	/	p<0.001	/	/	p<0.001	/	/	/	/
土层深度×水平距离	0.769	0.721	/	1.235	0.108	/	/	/	/	/	/
树龄×土层深度× 水平距离	1.035	0.419	/	p<0.001	/	/	/	/	/	/	/

注:p<0.05

2.3 模型拟合优度指标和模拟效果比较

通过方程的拟合优度指标对 4 种模型的拟合效果进行比较,从表 3 中可以看出:4 个模型中混合效

应方差分析模型和协方差分析模型的修正复相关系数大,而 RSS 和 MSE 值均小于固定效应方差分析模型,说明混合效应方差分析模型及协方差分析模

型提高了模拟精度,对模型的预估更加准确,充分表明土层深度和离树干的水平距离的随机作用是明显的,因此,随机效应的作用在模型拟合中是不可忽略的。唐守正^[4]提出了模型选择的若干准则,即剩余均方差越小越好,修正复相关系数越大越好。基于

此,模型3与模型4中,MSE值最小, R_q 值最大。根据上述对模型4的分析,林分细根数量随树龄增加无显著差异,随土层深度的增加也无显著差异,显然与实际状况不符,故选择模型3作为最优模型。

表3 4种模型细根模拟效果比较

Table 3 Comparative results of fine root among four models

模型	固定效应方差 分析模型(模型1)	混合效应方差 分析模型(模型2)	协方差 分析模型(模型3)	协方差 分析模型(模型4)
剩余残差平方和	136 655.3	158 316.9	158 019.3	158 019.3
剩余均方差	446.585 9	359.811 14	356.702 709	356.702 709
修正复相关系数	0.306 905	0.441 578 7	0.446 403 27	0.446 403 27

3 结论与讨论

固定效应方差分析模型由于不能考虑试验误差之间的相关性和异质性,即土层深度和离树干的水平距离对根系分布具有相关性和异质性,采用其对该类试验分析势必降低试验分析结果的准确性和可靠性^[20]。从本文对4种统计模型在该类试验应用的比较可以看出,选取不同的影响因素对试验效应差异显著测验的结果存在差异。该试验选用混合效应方差分析模型和协方差分析模型提高了模型的修正复相关系数,尤其是协方差分析模型修正复相关系数最高,提高了试验分析结果的可靠性。

M. R. Bakker^[10]等应用混合线性模型分析了4种林龄9,26,82及146年生欧洲林木山毛榉的根系分布特征,表明细根量(<2 mm)随年龄增长有显著差异;无论细根或粗根,土层深度及年龄与土层深度的交互作用有显著差异;细根量随离树干的水平距离没有显著差异。D. L. Achat^[11]等应用混合线性模型分析了4种不同立地条件下的55~56年生南欧海松的根系空间分布特征,结果表明,细根量随年龄变化有显著差异,对土层深度有显著差异。上述研究在分析时都把树龄,土层深度及树龄与土层深度的交互效应设为固定效应因素,根系取样框作为随机效应因素评价根系数量的空间分布特征。而本研究中模型3选取树龄作为固定效应因素,水平距离作为随机效应因素,土层深度作为协变量进行分析,取得的研究结果与上述研究结果基本一致。

选取不同影响效应采用不同模型对同一试验资料处理的结果大相径庭。在实际的试验资料统计分析过程中,应结合根系实际空间分布规律选取适宜的分析方法。本试验采用协方差分析模型3能较好地表达密植林分的根系分布规律,林分的根系数量随树龄增长显著增加,随土层深度加深显著减少,随离树干的水平距离无显著差异。M. Liedgens^[21]等研究指出均匀分布的水平根系的林分比水平根系分

布变异大的结构能更好地吸收上层土壤中的水分和养分,有利于林木生长和水保效益更好地发挥^[22]。根系的空间分布特征决定了植被与土壤环境之间作用面的大小,对植被地上部分的生长有重要影响^[23]。均匀分布的根系分布方式在黄土丘陵半干旱区退耕还林,水土保持,改善生态环境可发挥重大作用,在该区枣树种植中可采用密植的栽培方式。本试验提出的固定效应方差分析模型、混合效应方差分析模型及协方差分析模型可为其它林分根系空间分布规律的统计分析提供参考。

参考文献:

- [1] PSSSIOURA J B. Soil conditions and plant growth [J]. Plant, Cell Environ, 2002, 25(2): 311-318.
- [2] ARAKI H, Iijima M. Stable isotope analysis of water extraction from subsoil in upland rice (*Oryza sativa* L.) as affected by drought and soil compaction [J]. Plant and Soil, 2005, 270(1): 147-157.
- [3] 张良德,徐学选,胡伟,等. 黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征[J]. 林业科学,2011, 47(11): 31-36.
ZHANG L D, XU X X, HU W, et al. Spatial distribution of fine roots of a *Robinia pseudoacacia* plantation in Yangou watershed in the hilly region of the Loess Plateau [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 31-36. (in Chinese)
- [4] 唐守正,李勇. 生物数学模型的统计学基础 [M]. 北京:科学出版社,2002: 168-169, 297.
TANG S Z, LI Y. The statistics basis of the biological mathematical model [M]. Beijing: Science Press, 2002: 168-169, 297. (in Chinese)
- [5] 李春明. 利用非线性混合模型进行杉木林分断面积生长模拟研究[J]. 北京林业大学学报,2009, 31(1): 44-49.
LI C M. Simulating basal area growth of fir plantations using a nonlinear mixed modeling approach [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(1): 44-49. (in Chinese)
- [6] 程瑞梅,王瑞丽,肖文发,等. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布[J]. 生态学报,2012, 32(3): 823-832.
CHENG R M, WANG R L, XIAO W F, et al. Spatial distribution of root biomass of *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir area, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,

- 32(3):823-832. (in Chinese)
- [7] 李永慈, 唐守正. 用 Mixed 和 NImixed 过程建立混合生长模型[J]. 林业科学, 2004, 17(3):279-283.
- LI Y C, TANG S Z. Establishment of tree height growth model based on mixed and nlmixed of SAS [J]. Forest research, 2004, 17(3):279-283. (in Chinese)
- [8] 李春明. 混合效应模型在森林生长模型中的应用[J]. 林业科学, 2009, 45(4):131-138.
- LI C M. Application of mixed effects models in forest growth model[J]. Scientia silvae sinicae, 2009, 45(4):131-138. (in Chinese)
- [9] 雷向东, 李永慈, 向玮. 基于混合模型的单木断面积生长模型[J]. 林业科学, 2009, 45(1):74-80.
- LEI X D, LI Y C, XIANG W. Individual basal area growth model using multi-level linear mixed model with repeated measures [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(1):74-80. (in Chinese)
- [10] BAKKER M R, TURPAULT M P, HUET S, et al. Root distribution of *Fagus sylvatica* in a chronosequence in western France [J]. J. For. Res., 2008, 13(3):176-184.
- [11] ACHAT D L, BAKKER M R, TRICHET P. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods[J]. J. For. Res., 2008, 13(3):165-175.
- [12] SUDMEYER R A, SPEIJERS J, NICHOLAS B D. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines [J]. Tree Physiol., 2004, 24(12): 1333-1346.
- [13] 胡良平. 一般线性模型的几种常见形式及其合理选用[J]. 中国卫生统计, 1999, 16(5):269-272.
- HU L P. Common patterns and rational applications of the general linear model[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 1999, 16(5):269-272. (in Chinese)
- [14] SOKALSKA D I, HAMAN D Z, SZEWCZUK A, et al. Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system[J]. Agriculture Water Management, 2009, 96(6):917-924.
- [15] 马理辉, 吴普特, 汪有科. 黄土丘陵半干旱区密植枣林随树龄变化的根系空间分布特征[J]. 植物生态学报, 2012, 36(4): 292-301.
- MA L H, WU P T, WANG Y K. Spatial pattern of root systems of dense jujube plantation with jujube age in the semiarid loess hilly region of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(4):292-301. (in Chinese)
- [16] 余松林. 混合线性模型的应用[J]. 中国医院统计, 2006, 13(1):70-75.
- [17] JACKSON R B, CANADELL JE, HLERINGER J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108(3): 389-411.
- [18] PARKER M M, VAN LEAR D H. Soil heterogeneity and root distribution of mature loblolly pine stands in piedmont soils [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1996, 60(6): 1920-1925.
- [19] 杨秀云, 韩有志, 张芸香. 距树干不同距离处华北落叶松人工林细根生物量分布特征及季节变化 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(6):1277-1284.
- YANG X Y, HAN Y Z, ZHANG Y X. Effects of horizontal distance on fine root biomass and seasonal dynamics in *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1277-1284. (in Chinese)
- [20] 余松林, 向惠云. 重复测量资料分析方法与 SAS 程序[M]. 北京: 科学出版社, 2004:30-76.
- [21] LIEDGENS M, RICHNER W. Minirhizotron observations of the spatial distribution of the maize root system [J]. Agron J, 2001, 93(5):1097-1104.
- [22] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 王乃江. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展[J]. 西北林学院学报, 2002, 17(2):26-32.
- LI P, ZHAO Z, LI Z B, WANG N J. Advances on the interactional mechanism between root system and eco-environment [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(2): 26-32. (in Chinese)
- [23] 董三孝. 渭北沟壑区人工刺槐林根系生长、分布与地上生长的关系[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(3):4-6.
- DONG S X. Relationship between roots and tree height D, B, H of locust in weibei gully region. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(3):4-6. (in Chinese)