

青海云杉 (*Picea crassifolia*) 种群格局的分形特征及其影响因素

张立杰, 赵文智*, 何志斌

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站, 寒旱区流域水文及应用生态实验室, 兰州, 730000)

摘要:应用计盒维数、信息维数和关联维数对祁连山主要森林类型青海云杉(*Picea crassifolia*)种群空间格局进行的研究表明:青海云杉种群格局计盒维数在 0.992~1.938 之间,平均值为 1.716,信息维数在 0.996~1.860 之间,平均值为 1.632,关联维数在 1.418~1.759 之间,平均值为 1.568。计盒维数与样地海拔和土壤水分含量呈显著的负相关,与样地坡向呈显著的正相关,信息维数与样地海拔呈显著负相关而与坡向呈显著的正相关,关联维数与样地坡度呈显著的负相关,主成分分析表明,海拔和土壤含水量是影响青海云杉种群格局分形维数第一主成分,坡向是第二主成分,坡度是第三主成分,这 3 个主成分累计解释率为 87.6%。

关键词:青海云杉(*Picea crassifolia*);种群格局;分形特征;计盒维数;信息维数;关联维数;环境因子

文章编号:1000-0933(2008)04-1383-07 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Characteristics in *Picea crassifolia* forest fractal dimension and its influencing factors

ZHANG Li-Jie, ZHAO Wen-Zhi*, HE Zhi-Bin

Laboratory of Watershed Hydrology and Ecology, CAREERI, CAS; Linze Inland River Basin Research station, CERN, Lanzhou 723000, China
Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1383~1389.

Abstract: The objective of this study is to analyze the scale variation and the spatial patterns of *Picea crassifolia* populations in Qilian Mountains, using box-counting dimension, information dimension and correlation dimension, and to identify the relationships between the spatial pattern and some selected environmental factors. Sixteen plots (20m × 20m) with different elevation in *Picea crassifolia* forest of Qilian Mountains were investigated to calculate fractal dimensions, and some selected environmental factors (elevation, slope degree, slope direction, soil depth, soil bulk density, soil organic carbon, total nitrogen, soil water content) were measured. The results show that the values of box-counting dimension, information dimension and correlation dimension of pattern of *Picea crassifolia* populations ranged from 0.992 to 1.938, 0.996 to 1.860 and 1.418 to 1.759, and its average value is 1.716, 1.632 and 1.568, respectively. Box-counting dimension is negatively correlated with elevation and soil water content, while positively correlated with slope direction. Information dimension negatively correlated with elevation, but positively correlated with gradient. Correlation dimension negatively correlated with slope direction. The principal component analysis shows that elevation and soil water content are

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40601007);国家西部之光资助项目(No. 0628221001)。

收稿日期:2007-01-24; **修订日期:**2007-07-02

作者简介:张立杰(1971~),男,甘肃张掖人,博士生,主要从事生态水文学研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zhaowzh@lzb.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40601007); Project of Chinese Academy of Sciences to young scientist in Western China(No. 0628221001)

Received date:2007-01-24; **Accepted date:**2007-07-02

Biography: ZHANG Li-Jie, Ph. D. candidate, mainly engaged in eco-hydrology.

the first principal component affecting fractal dimension, followed by slope direction and slope degree, which accounts for 83.8% of the variance of fractal dimension.

Key Words: *Picea crassifolia* (*Picea crassifolia*); population pattern; fractal characteristic; box-counting dimension; information dimension; correlation dimension; environment factors

种群格局研究一直是生态学研究热点之一,在研究个体、种群格局方面均有成熟的研究方法^[1~6],但研究结果对取样尺度的依赖性很强,不同尺度范围上的研究结果有时会存在很大差异^[7],这种不确定性的存在,使种群格局尺度变化特征研究显得尤为必要。分形几何(fractal geometry)是目前国际上广为应用的非线性模型,它能够对个体随尺度变化的特征给予刻画^[8~10]。1983年Loehle首次将分形理论引入生态学研究^[11],分形理论开始用于解决植物生态学的问题,并在树木分枝格局、植冠格局、种群格局、群落格局和景观格局^[12~21]等方面取得了良好的效果。例如:马克明等分别采用计盒维数、信息维数和关联维数对兴安落叶松种群进行了研究^[22~24],发现该种群在空间占据、个体分布复杂性和个体空间关联方面存在不同的尺度变化和分形特征,将三者结合对该种群格局的综合分析,能够得到较单一分形维数更全面、更准确的描述。但种群格局是种群生物学特性、种内种间关系及环境条件综合作用的结果^[25],要真正解决实际问题还不能仅仅停留在空间结构研究上;把空间结构和环境特征接合起来,可以更进一步揭示其空间结构对环境特征的响应,也可更真实的解释生态现象的本质。

青海云杉(*Picea crassifolia*)是祁连山山地森林主要建群种,呈带状或斑块状分布于海拔2700~3300m的阴坡、半阴坡^[26],青海云杉林面积占祁连山水源涵养林面积的24.74%,占乔木林总面积的75.72%,研究不同环境条件下祁连山青海云杉种群格局分形维数(计盒维数、信息维数、关联维数)的变化,旨在揭示不同生境条件下青海云杉种群格局的分形特征的差异,进而从多侧面多角度阐释该种群的结构和功能。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中段西水林区排露沟流域(100°17'E, 38°24'N),流域总面积2.85km²,长4.25km,纵坡比降1:4.2,海拔2600~3800m。流域阳坡为草地,阴坡、半阴坡为斑块森林景观,年平均气温-0.6~2.0℃,年降水量363mm,蒸发量1052mm,年日照时数1893h,年平均相对湿度为60%。研究区土壤和植被随山地地形而形成明显的垂直分布带,主要土壤类型有山地森林灰褐土、山地栗钙土以及亚高山灌丛草甸土3个类型,土壤机械组成中粘粒含量(<0.002mm)约占9%,粉粒含量(0.002~0.05mm)约占80.3%,沙粒含量(>0.05mm)约占18.8%,土壤孔隙大小分布指数为5.39。成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色沙页岩等。有机质含量中等,pH值7.0~8.0。森林类型是以青海云杉(*Picea crassifolia*)林为主,呈斑块状或条状分布在阴坡、半阴坡;祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)林呈小斑块状分布于阳坡、半阳坡;灌木优势种有:金露梅(*Potentilla fruticosa*)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)和吉拉柳(*Salix gilashanica*)等,草本主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)和针茅(*Stipa* sp.)等。

1.2 取样方法

在祁连山排露沟流域海拔2700~3300m的青海云杉林主要林斑内,沿海拔梯度设置16个样方(面积为20m×20m),记录海拔、坡度、坡向、生境及样方内所有青海云杉个体的坐标、树高和胸径,测定样方内土壤层平均厚度、土壤含水量,采集0~20cm土样,每个样地3个重复,带回实验室分析测定土壤有机碳、全氮、土壤容重,土壤含水量用土钻取样,每个样点取0~40cm的土样,10cm取1次样,重复3次。土壤有机碳的测定采用重铬酸钾容量法,土壤全氮采用半微量开氏法(K₂SO₄-CuSO₄-Se蒸馏法)。

2.3 计盒维数(box-counting dimension)

将样方逐次进行栅格化,得到一系列不同网格边长(ε)的覆盖结果。计数有坐标点的(非空)格子数

(N)。本文将样方边长由 2 等分(对应的网格边长为 10m)划分到 20 等分(对应的网格边长为 1m),划分 19 次。将每次划分所得的非空格子数与对应的网格边长在双对数坐标下进行直线拟合(或分段直线拟合)。所得拟合直线斜率的绝对值为计盒维数估计。计盒维数是采用网格覆盖方法得到的分形维数,揭示了种群占据生态空间的程度和利用生态空间的能力^[22]。

$$D_b = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon}$$

表 1 样地基本情况

Table 1 The condition of different plots

样地号	个体数	海拔(m)	坡度(°)	坡向	土壤类型	群落类型	平均树龄(a)	郁闭度
Q1	88	2700	35	NE	灰褐土	苔藓云杉林	75	0.7
Q2	99	2800	30	N	灰褐土	苔藓云杉林	70	0.8
Q3	46	2900	12	N	灰褐土	草类云杉林	37	0.5
Q4	56	3028	25	NE	灰褐土	苔藓云杉林	76	0.7
Q5	42	3097	23	N	灰褐土	苔藓云杉林	78	0.7
Q6	35	3195	35	NE	灰褐土	青海云杉林	86	0.6
Q7	42	2762	30	NE	灰褐土	青海云杉林	85	0.6
Q8	78	2730	25	N	灰褐土	苔藓云杉林	84	0.7
Q9	58	2715	32	N	灰褐土	青海云杉林	77	0.7
Q10	76	2800	28	N	灰褐土	苔藓云杉林	61	0.6
Q11	130	2840	16	NE	灰褐土	苔藓云杉林	59	0.9
Q12	87	2952	33	N	灰褐土	青海云杉林	74	0.8
Q13	88	3015	22	N	灰褐土	青海云杉林	75	0.8
Q14	33	3100	20	N	棕壤土	灌丛青海云杉林	70	0.4
Q15	15	3300	34	NE	暗棕壤土	灌丛青海云杉林	84	0.4
Q16	104	2800	15	N	灰褐土	苔藓云杉林	80	0.8

2.4 信息维数(information dimension)

若样地内的总个体数量为 N , 每个非空格子中拥有的个体数目(N_i),那么每个非空格子中的个体分布概率为 $P_i = N_i/N$,信息量为 $I_i = -P_i \ln P_i$,则该网格边长为 ε 时的总信息量为 $I(\varepsilon) = \sum I_i$ 。将 $I(\varepsilon)$ 与相应的网格边长 ε 的对数值进行直线回归,得到的拟合直线斜率即为信息维数,信息维数表征了不同尺度上系统结构复杂性之间的联系和规律性,揭示了种群格局强度的尺度变化特征^[23]。

$$D_i = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{I(\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)}$$

2.5 关联维数(correlation dimension)

$$D_b = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(C(\varepsilon))}{\log \varepsilon}$$

首先将样方内每一个体与所有其它个体间的欧氏距离一一计算出来:然后给定一个距离值,查找小于该距离的欧氏距离个数(N_i):变换距离值,可以得到一系列 N_i ,通过每一距离值对应的距离个数与距离总个数(N)的比值得到 $C(\varepsilon)$,将 $C(\varepsilon)$ 与对应的距离值在双对数坐标下进行(分段)直线拟合,所得拟合直线的斜率的绝对值为其关联维数。根据(样方大小为 $20 \times 20 \text{m}^2$)研究实际,本文确定距离值为 0m 到 30m,变换步长为 0.2m。关联维数是种群个体空间关联随尺度变化规律的反映,揭示出种群个体空间相关程度^[24]。

3 结果分析

3.1 青海云杉种群格局计盒维数

在青海云杉种群格局计盒维数计算过程中(图 1),均出现了以拐点为界的两段不同的线性区域,拐点的出现表明种群格局在两个尺度区域存在不同的计盒维数,具有不同的空间占据能力(样地 Q9、Q3、Q16 的分形维数值接近其平均值,本文分别选取这 3 个样地为代表进行阐述)。拐点对应的尺度为 2.5m,与样方内的林木平均冠幅(2.8m)相近,应与该种植物的个体体积有关,根据分析小于拐点尺度的维数极有可能反映的是

单株个体的,而大于拐点尺度的尺度才是反映种群特征的尺度。因此在本文中将拐点尺度到样地尺度所对应的维数做为反映种群特征的参数。16个样地计盒维数计算结果表明,青海云杉种群格局计盒维数在0.992~1.938之间(表2),平均值为1.716,表明优势建群种青海云杉种群具有较高的生态空间占据能力。

3.2 青海云杉种群格局信息维数

在其计算过程中拐点前后同样存在两个尺度区域和两个信息维数(图2),拐点对应的尺度为2.86m,与样方内的林木平均冠幅(2.9m)相近,与计盒维数情形是基本类似的(图1)。青海云杉种群格局的信息维数在0.996~1.860之间(表2),平均值为1.632,反映了青海云杉种群格局强度尺度变化程度大。

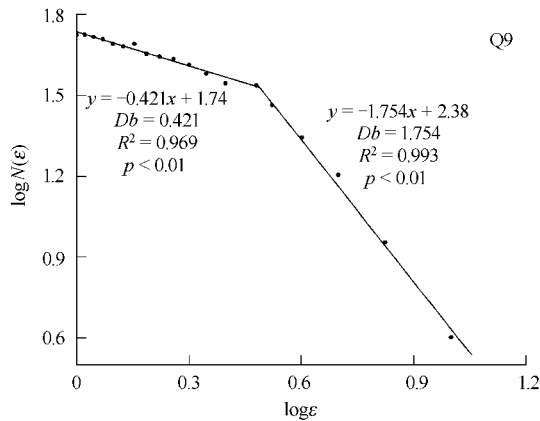


图1 青海云杉林种群格局的计盒维数

Fig. 1 Box-counting dimension of *Picea crassifolia* plantation

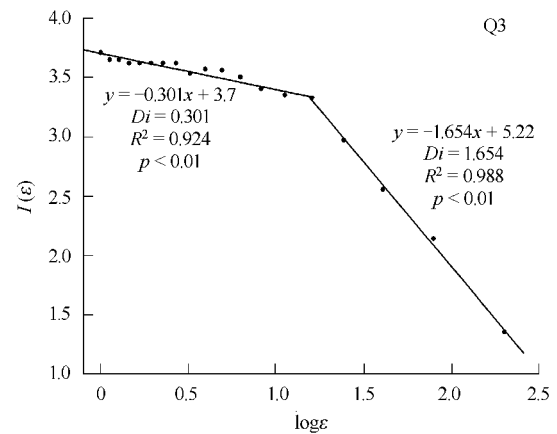


图2 青海云杉林种群格局的信息维数

Fig. 2 Information dimension of *Picea crassifolia* plantation

3.3 青海云杉种群格局关联维数

16个样地的种群格局关联维数在1.418~1.759之间(表2),平均值为1.568,表明青海云杉种群个体的

表2 青海云杉种群格局的分形维数

Table 2 Fractal dimension of *Picea crassifolia* population

样方号 Plot number	计盒维数 Box-counting dimension			信息维数 Information dimension			关联维数 Correlation dimension				平均冠幅 Mean crown width(m)
	Db	R ²	拐点尺度 (m)	Db	R ²	拐点尺度 (m)	Db	R ²	拐点尺度 (m)	尺度范围 (m)	
Q1	1.634	0.996 **	2.5	1.540	0.990 **	2.5	1.575	0.895 **	2.8	0.2~17.6	2.6
Q2	1.872	0.997 **	2.5	1.757	0.996 **	2.5	1.678	0.914 **	2.8	0.2~23.4	2.8
Q3	1.754	0.943 **	2.86	1.655	0.988 **	2.86	1.759	0.920 **	3.0	0.2~26.4	3.0
Q4	1.681	0.982 **	2.86	1.565	0.989 **	2.86	1.598	0.964 **	3.2	0.4~26.8	3.2
Q5	1.665	0.992 **	3.33	1.536	0.989 **	3.33	1.469	0.899 **	4.0	0.2~23.2	3.8
Q6	1.588	0.879 **	3.33	1.529	0.977 **	3.33	1.418	0.965 **	4.0	0.2~23.6	4.2
Q7	1.610	0.931 **	3.33	1.513	0.983 **	3.33	1.549	0.924 **	4.2	0.4~22.8	4.3
Q8	1.811	0.925 **	3.33	1.832	0.997 **	3.33	1.604	0.972 **	3.4	0.6~25.6	3.6
Q9	1.754	0.993 **	2.86	1.694	0.999 **	2.5	1.504	0.887 **	3.0	0.4~22.0	3.2
Q10	1.816	0.990 **	2.86	1.695	0.988 **	2.86	1.521	0.916 **	2.8	0.2~26.0	3
Q11	1.931	0.899 **	2.5	1.850	0.998 **	2.5	1.590	0.942 **	2.8	0.4~27.4	2.7
Q12	1.938	0.998 **	2.86	1.860	0.998 **	2.86	1.607	0.960 **	3.0	0.4~25.8	3.2
Q13	1.928	0.998 **	2.86	1.823	0.991 **	2.86	1.579	0.893 **	2.8	0.2~25.0	2.9
Q14	1.587	0.978 **	3.33	1.486	0.990 **	3.33	1.535	0.886 **	3.2	0.6~22.0	3.4
Q15	0.992	0.881 **	3.33	0.996	0.929 **	3.33	1.527	0.987 **	4.0	2.4~19.2	4.0
Q16	1.903	0.998 **	2.86	1.789	0.998 **	2.86	1.569	0.836 **	3.0	0.2~26.8	3.1
平均 Mean	1.716	-	2.96	1.632	-	2.94	1.568	-	3.25	-	3.3

** 表示在0.01水平上显著相关 Significant correlation in the 0.01 level

空间相关尺度变化程度接近,在关联维数计算过程中同样被拐点分为两个线性区域(图3)表明其小尺度个体相关较强而大尺度较弱即种群个体在小尺度聚集。拐点尺度为3.0m,与计盒维数和信息维数给出的聚块大小(2.8m)基本一致,其尺度范围在0.2~25.8m之间,且16个样地的起始相关距离均小于相应的平均冠幅,表明个体间存在着较强的竞争,并随林龄增长、冠幅加大而趋增强。

3.4 分形维数与环境因子的关系

种群格局分形特征一方面取决于种群自身的特性,另一方面与群落环境条件密切相关。研究结果表明(表3):计盒维数与样地海拔和土壤水分含量呈显著的负相关,与样地坡向呈显著的正相关,信息维数与样地海拔呈极显著负相关而与坡向(对坡向量化阴坡和半阴坡分别赋值为2和1)呈显著的正相关,关联维数与样地坡度呈显著的负相关。

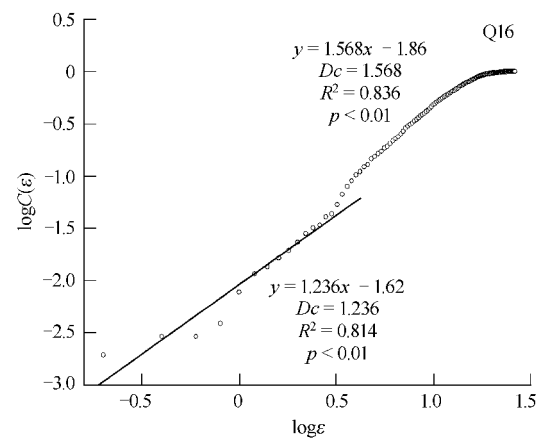


图3 青海云杉林种群格局的关联维数

Fig. 3 Correlation dimension of *Picea crassifolia* plantation

表3 分形维数与环境因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of fractal dimension and environment factors

环境因子 Environment factors	计盒维数 Box-counting dimension		信息维数 Information dimension		关联维数 Correlation dimension	
	相关系数 Correlation coefficient	<i>P</i>	相关系数 Correlation coefficient	<i>P</i>	相关系数 Correlation coefficient	<i>P</i>
海拔 Elevation (m)	-0.583 *	0.011	-0.602 **	0.009	-0.373	0.085
坡度 Slope degree	-0.348	0.102	-0.317	0.125	-0.488 *	0.033
坡向 Slope direction	0.476 *	0.037	0.475 *	0.037	0.256	0.179
土壤层厚度 Soil depth (cm)	0.045	0.436	0.052	0.426	-0.206	0.230
土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	0.081	0.387	0.166	0.277	0.286	0.151
土壤有机碳 Soil organic carbon (g/kg)	0.004	0.495	0.014	0.480	-0.107	0.352
土壤全氮 Total nitrogen (g/kg)	0.277	0.159	0.306s	0.134	0.051	0.429
土壤含水量 Soil water content (%)	-0.481 *	0.035	-0.530 *	0.021	-0.218	0.218

** 表示 0.01 水平上显著相关 Significant correlation in the 0.01 level; * 表示 0.05 水平上显著相关 Significant correlation in the 0.05 level

3.5 分形维数与环境因子的主成分分析

环境因子主成分分析结果表明(表4),第一主成分海拔和土壤水分含量与青海云杉种群格局计盒维数、

表4 环境因子的主成分分析矩阵

Table 4 Matrix of principal component of environment factors

因子 Factors	成分 Component		
	1	2	3
特征值 Total	3.43	1.54	1.13
贡献率 % of Variance	42.8	28.5	16.3
海拔 Elevation (m)	0.921	-0.122	0.048
坡度 Slope degree	-0.046	-0.158	0.976
坡向 Slope direction	-0.075	0.978	-0.157
土壤层厚度 Soil depth (cm)	-0.324	0.109	0.114
土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	-0.308	-0.074	-0.097
土壤有机 Soil organic carbon (g/kg)	0.029	0.015	0.059
土壤全氮 Total nitrogen (g/kg)	-0.416	-0.143	0.078
土壤含水量 Soil water content (%)	0.926	-0.002	-0.118

信息维数呈显著的负相关,祁连山区气温随海拔升高而递减(递减率为 $0.58^{\circ}\text{C}/100\text{m}$),降水随海拔升高而递增(递增率为 $18.6\text{mm}/100\text{m}$)^[27],在计盒维数和信息维数较大的林分,个体分布相对集中,林冠截流量大且林分对土壤水分的利用率高(即林分蒸散量大),因而土壤含水量低,反之计盒维数和信息维数较小的林分个体分布相对分散,林冠截流量小且林分对土壤水分的利用率低(即林分蒸散量小),因而土壤含水量高。第二主成分坡向与计盒维数、信息维数呈显著的正相关,反映了山地生态系统中由于坡向影响,造成各地段辐射收支很大差异,继而影响其水热状况,形成不同的小气候。第三主成分坡度与关联维数呈显著的负相关,由于坡度的差异,导致单位面积接受到的太阳辐射量不同,土壤养分与水分流失量不同。坡度大土层薄、土壤水分和养分易流失,坡度平缓处土层较厚、有利于土壤水分和养分的积聚,这3个主成分累计解释率为87.6%。

4 讨论

青海云杉是祁连山水源涵养林主要的乔木建群种,在海拔2950m的区域其计盒维数、信息维数值最高,因而其空间占据能力最强,格局强度尺度变化最为明显(图4 $Db = 1.938$, $Di = 1.86$),在此区域青海云杉个体分布集中、林分郁闭度大,形成顶级群落-藓类云杉林。在海拔3300m区域其空间占据能力最弱,格局强度尺度变化小($Db = 0.992$, $Di = 0.996$),此区域是青海云杉种群分布的森林上限,个体呈零星分布、随机性大,与箭叶锦鸡儿形成乔灌混交林,其在群落中处于或趋于劣势伴生地位,箭叶锦鸡儿为群落优势种群。对于典型山地而言,海拔越高,降水越多^[28];海拔越高,气温越低^[29],因此引起不同海拔高度的山地植被水热状况的存在明显差异。计盒维数、信息维数与坡向、土壤水分呈负相

关,与阴坡相比,半阴坡和半阳坡青海云杉种群占据空间的能力更弱、格局强度变化更小。接受的太阳辐射更多,植被蒸发散更为强烈,水分状况较差。而在青海云杉集中分布区,由于林分郁闭度大,林冠截流率高,单位面积林分水分蒸发量大,这些原因直接导致土壤水分处于较低水平。青海云杉种群分布格局的关联维数与坡度呈负相关,坡度越小越有利于养分和水分的积聚,其个体之间的关联程度越高,坡度越大养分和水分越容易流失,个体之间的关联程度越低。因此,由于地形特征引起的植物所处环境水热和养分状况的差异,是导致不同区域植物种群格局具有不同分形特征的最根本原因。

5 结论

青海云杉种群格局计盒维数在0.992~1.938之间,平均值为1.716,信息维数在0.996~1.860之间,平均值为1.632,关联维数为1.418~1.759(表1),平均值为1.568,分形维数受海拔、坡向、坡度和土壤水分含量等环境因子的影响,使其在空间分布上存在很大的差异,相关分析表明:计盒维数与样地海拔和土壤水分含量呈显著的负相关,与样地坡向呈显著的正相关,信息维数与样地海拔呈显著负相关而与坡向呈显著的正相关,关联维数与样地坡度呈显著的负相关。

References:

- [1] Grein-Smith P. The use of random and continuous quadrants in the study of the structure of plant communities. *Annual Botany*, 1952, 16: 293—316.
- [2] Lloyd M. Mean crowding. *J. Anim. Ecol.*, 1967, 36: 1—30.
- [3] Kershaw K A. The detection of pattern and association. *Journal of Ecology*, 1960, 48: 233—242.
- [4] Kershaw K A. Association and covariance analysis of plant communities. *Journal of Ecology*, 1961: 643—654.
- [5] Pielou E C. *Mathematical ecology* (2nd edition). Lu Y Y translated. Beijing: Science Press, 1991. 49: 643.

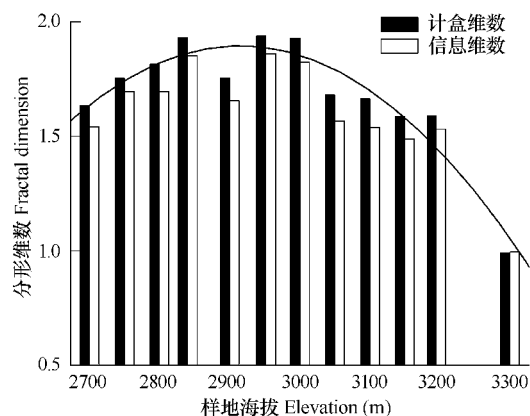


图4 分形维数随海拔梯度的变化

Fig. 4 Fractal dimension variance of *Picea crassifolia* population with altitude

- [6] Li H T. A Survey of distribution pattern of plant population, Chinese Bulletin of Botany, 1995, 12(2): 19—26.
- [7] Wu J G, Jelinski D. The problem of pattern, scale and modifiable area unit in ecology, Lecture in Modern Ecology, Science Press, 1995. 1—9.
- [8] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data, Nature, 1981, 294: 240—242.
- [9] Palmer M W. Fractal geometry: a tool for describing spatial pattern. Vegetatio, 1988, 75: 91—102.
- [10] Gauch H G. The multivariate analysis methods applying in Community Ecology Yang Ch *et al*, translated. Beijing: Science Press, 1989.
- [11] Loehle C. The fractal dimension and ecology. Spec, Sci. Tech., 1983, 6: 131—142.
- [12] Berezhovskaya F S, Karev G P, Kisliuk O S, *et al*. A fractal approach to computer analytical modeling of tree crowns. Trees, 1997, 11: 323—327.
- [13] Zeide B. Fractal geometry in forestry applications. Forest Ecology Natural Management, 1991, 46: 179—188.
- [14] Zeile B, GreSham C. A fractal dimension of tree crown in Loblolly pine plantations of coastal south Carolina, Can. J For Res., 1991, 21: 1208—1212.
- [15] Zeile B, Pfeifer P. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns. Forestry Science, 1991, 37(5): 1253—1265.
- [16] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. Nature, 1981, 294: 240—242.
- [17] Palmer M W. Fractal geometry: a tool for describing spatial pattern. Vegetatio, 1990, 75: 91—102.
- [18] Chen S G, Ceulemans R, Impens I. A fractal based Populus canopy structure model for the calculation of light interception. Forest Ecology and Manangement, 1994, 69: 97—110.
- [19] Johnson A R, Milne B T. Diffusion in fractal landscapes: simulations and experimental studies of tenebrionid beetle movements. Ecology, 1992, 73(6): 1968—1983.
- [20] Redinz J A, Guimaraes P R C C. The fractal nature of wood revealed by water absorption. Wood and Fiber Science, 1997, 29(4): 333.
- [21] Osawa A. Inverse relationship of crown fractal dimension of tree population: a hypothesis. Can. J. For. Res., 1995, 25: 1608—1617.
- [22] Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of the spatial pattern of *Larix gmelini* population: Box-counting dimension. Bulletin of Botanical Research, 2000, 20(1): 104—111.
- [23] Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of the spatial pattern of *Larix gmelini* population: Information dimension. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 187—192.
- [24] Ma K M, Zu Y G, Ni H W. Fractal properties of the spatial pattern of *Larix gmelini* population: Correlation dimension. Acta Ecologica Sinica, 1999, (3): 353—358.
- [25] Zhou J L, Zheng S H Z, Yang C. Plant Population Ecology. Beijing: Higher Education Press, 1992.
- [26] Wei K Q. *Picea crassifolia* of the water resource conservation forest in Qilian Mountains. Journal of Lanzhou University, 1990, 26: 2—8.
- [27] Wang J Y, Chang X X, *et al*. Vertical Distribution of the Vegetation and Water and Heat Conditions of Qilian Mountain (Northern Slope). Journal of Northwest Forestry University, 2001, 16(Supl): 1—3.
- [28] Diaz S, Cabido M. Plant functional types and ecosystem function in relation to global change. Journal of Vegetation Sciences, 1997, 8: 463—474.
- [29] Kotze D C, O'Connor T G. Vegetation variation within and among palustrine wetland along an altitude gradient in KwaZulu-Natal, South Africa, Plant Ecology, 2000, 146: 77—96.

参考文献:

- [5] Pielou E C. 数学生态学(第二版). 卢洋愚译. 北京: 科学出版社, 1991. 49: 643.
- [6] 李海涛. 植物种群分布格局研究概况. 植物学通报, 1995, 12(2): 19~26.
- [7] 邬建国, Jelinski D. 生态学中的格局与尺度——可塑性面积单元问题. 见: 李博主编, 现代生态学讲座, 北京: 科学出版社, 1995. 1~9.
- [10] Gauch H G. 群落生态学中的多元分析. 杨持, 等译. 北京: 科学出版社, 1989.
- [22] 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征: 计盒维数. 植物研究, 2000, 20(1): 104~111.
- [23] 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征——信息维数. 生态学报, 2000, 20(2): 187~192.
- [24] 马克明, 祖元刚, 倪红伟. 兴安落叶松种群格局的分形特征——关联维数. 生态学报, 1999, (3): 353~358.
- [25] 周纪伦, 郑师章, 杨持. 植物种群生态学. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [26] 魏克勤. 祁连山水源林区的青海云杉. 兰州大学学报, 1990, 26(专集) 2~8.
- [27] 王金叶, 常学向, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布. 西北林业大学学报, 2001, 16(增): 1~3.