

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 22 期 Vol.31 No.22 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 22 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型	林 川, 宫兆宁, 赵文吉 (6645)
中国水稻潜在分布及其气候特征	段居琦, 周广胜 (6659)
大豆异黄酮浸种对盐胁迫大豆幼苗的生理效应	武玉妹, 周 强, 於丙军 (6669)
黑河中游荒漠绿洲过渡带多枝桧柳对地下水位变化的生理生态响应与适应	张 佩, 袁国富, 庄 伟, 等 (6677)
高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应	赵成章, 高福元, 石福习, 等 (6688)
基于生态足迹思想的皂市水利枢纽工程生态补偿标准研究	肖建红, 陈绍金, 于庆东, 等 (6696)
基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征	蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等 (6708)
高分辨率影像支持的群落尺度沼泽湿地分类制图	李 娜, 周德民, 赵魁义 (6717)
土壤食细菌线虫对拟南芥根系生长的影响及机理	成艳红, 陈小云, 刘满强, 等 (6727)
基于网络 K 函数的西双版纳人工林空间格局及动态	杨珏婕, 刘世梁, 赵清贺, 等 (6734)
树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应	张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等 (6743)
冀北山地阴坡优势树种的树体分维结构	田 超, 刘 阳, 杨新兵, 等 (6753)
帽峰山常绿阔叶林辐射通量特征	陈 进, 陈步峰, 潘勇军, 等 (6766)
不同类型拌种剂对花生及其根际微生物的影响	刘登望, 周 山, 刘升锐, 等 (6777)
一种自优化 RBF 神经网络的叶绿素 a 浓度时序预测模型	仝玉华, 周洪亮, 黄浙丰, 等 (6788)
不同种源麻栎种子和苗木性状地理变异趋势面分析	刘志龙, 虞木奎, 马 跃, 等 (6796)
黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化	施 宇, 温仲明, 龚时慧 (6805)
干旱区五种木本植物枝叶水分状况与其抗旱性能	谭永芹, 柏新富, 朱建军, 等 (6815)
火灾对马尾松林地土壤特性的影响	薛 立, 陈红跃, 杨振意, 等 (6824)
江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应	王 磊, 张 磊, 段学军, 等 (6832)
高温对两种卡帕藻的酶活性、色素含量与叶绿素荧光的影响	赵素芬, 何培民 (6845)
江苏省典型干旱过程特征	包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等 (6853)
黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率	岳 平, 张 强, 杨金虎, 等 (6866)
光质对烟叶光合特性、类胡萝卜素和表面提取物含量的影响	陈 伟, 蒋 卫, 邱雪柏, 等 (6877)
铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮中的蓝藻多样性	刘 梅, 赵秀侠, 詹 婧, 等 (6886)
圈养马麝刻板行为表达频次及影响因素	孟秀祥, 贡保草, 薛达元, 等 (6896)
田湾核电站海域浮游动物生态特征	吴建新, 阎斌伦, 冯志华, 等 (6902)
马鞍列岛多种生境中鱼类群聚的昼夜变化	汪振华, 王 凯, 章守宇 (6912)
基于认知水平的非使用价值支付动机研究	钟满秀, 许丽忠, 杨 净 (6926)
综述	
植物盐胁迫应答蛋白质组学分析	张 恒, 郑宝江, 宋保华, 等 (6936)
沉积物氮形态与测定方法研究进展	刘 波, 周 锋, 王国祥, 等 (6947)
野生鸟类传染性疾病预防研究进展	刘冬平, 肖文发, 陆 军, 等 (6959)
鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法	石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等 (6967)
专论	
IPBES 的建立、前景及应对策略	吴 军, 徐海根, 丁 晖 (6973)
研究简报	
柠条人工林幼林与成林细根动态比较研究	陈建文, 王孟本, 史建伟 (6978)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-11



封面图说: 滩涂芦苇及野鸭群——中国的海岸湿地, 尤其是长江入海口以北的海岸线, 多为泥质性海滩, 地势宽阔低洼, 动植物资源丰富, 生态类型独特, 为迁徙的鸟提供了丰富的食物和休息、庇护的良好环境, 成为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站和越冬、繁殖地。一到迁徙季节, 成千上万的各种鸟类飞临这里, 尤其是雁鸭类数量庞大, 十分壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

田超, 刘阳, 杨新兵, 刘凤芹, 赵心苗, 陈波, 毕可姣. 冀北山地阴坡优势树种的树体分维结构. 生态学报, 2011, 31 (22): 6753-6765.

Tian C, Liu Y, Yang X B, Liu F Q, Zhao X M, Chen B, Bi K J. Fractal structure of dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (22): 6753-6765.

冀北山地阴坡优势树种的树体分维结构

田 超¹, 刘 阳¹, 杨新兵^{1,*}, 刘凤芹², 赵心苗¹, 陈 波¹, 毕可姣¹

(1. 河北农业大学林学院 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 保定 071000; 2. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要:以冀北山地阴坡两种混交林分中 5 种优势树种为研究对象, 采用分形几何理论, 论述了不同树种的树冠和侧枝分维结构, 结果表明: (1) 华北落叶松的树冠最宽处处于中上部(相对冠高的 60%—80%), 白桦处于中部(40%—60%), 山杨和糠椴都处于中下部(40%—50%), 落叶松桦木混交林中的黑桦处于上部(70%—80%), 而山杨桦木混交林中黑桦则处于中部(50%—60%); (2) 通过计盒维数法所得华北落叶松树冠的分形维数最大为 1.690, 山杨桦木混交林中 4 种树木分维数较接近(0.770—1.202), 而两混交林中, 前者白桦分维数(0.997)与后者(1.149)相似, 而前者黑桦分维数(1.257) > 后者(0.770); (3) 胸径 13.1 cm 的华北落叶松侧枝在各方向上符合均匀分布, 总体也符合均匀分布, 前者中的黑桦在胸径 15.8 cm 时绝大多数方向上为均匀分布, 前者中白桦及后者中 4 种树木在不同胸径时在各个方向上均为不均匀分布; (4) 华北落叶松侧枝倾角随树龄增大分布在 85—95°, 糠椴则分布在 55—85°。山杨树龄小(5.3)与树龄大(16.5)时分布在 40—55°, 中间树龄(10.5)分布在 60—80°, 黑桦分布在 30—65°, 前者中白桦倾角范围 25—90°, 后者则主要分布在 45—85°; (5) 采用网格覆盖法所得华北落叶松枝条的分维数平均值最高为 1.772, 其次为山杨桦木混交林中的 4 种树木, 而两混交林中黑桦枝条的平均分维数却相差很大, 其中前者为 1.476, 而后者为 1.674。尽管同一树种侧枝形状大小各异, 但相互间差异不显著, 相关系数均在 0.93 以上, 刻画了各枝条分枝格局的自相似共性。

关键词:冀北山地; 优势树种; 冠形结构; 分枝格局; 分形维数

Fractal structure of dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei

TIAN Chao¹, LIU Yang¹, YANG Xinbing^{1,*}, LIU Fengqin², ZHAO Xinmiao¹, CHEN Bo¹, BI Kejiao¹

1 College of Forestry, Agricultural University of Hebei Key lab of Genetic Resources of Forest and Forest Protection of Hebei Province, Baoding 071000, China

2 Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: By using the theory of fractal geometry, five dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei were chosen to investigate fractal dimension of the crown and box-counting dimensions of branches. The results indicated that: (1) The widest crown of *Larix principis-rupprechtii* were in the middle and upper part of the crown (about 60%—80% of the total height), those of the *B. platyphylla* in the middle part (40%—60%), those of the *Pobulus davidiana* and *Tilia mandschurica* both in the mid-lower parts (40%—50%). Those of the *B. davurica* of *Larix principis-rupprechtii* - *B. platyphylla* - *B. davurica* appeared in the upper part (70%—80%), while those of the *B. davurica* of *Pobulus davidiana* - *B. platyphylla* - *B. davurica* in the middle part (50%—60%); (2) Fractal dimension of *Larix principis-rupprechtii* crown structure was 1.690, which was the biggest, meanwhile fractal dimension of four kinds of trees in *Pobulus davidiana* - *B. platyphylla* - *B. davurica* were about the same from 0.770 to 1.202, while in the two mixed forest, the fractal dimension of the *B. platyphylla* in the former (0.997) was similar to that of the latter (1.149), about *B. davurica*, fractal dimension (1.257) in the former larger than those (0.770) in the latter. (3) Branching orientation of *Larix principis-*

基金项目: 林业公益性行业科研专项资助项目 (200804022F)

收稿日期: 2011-05-23; 修订日期: 2011-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbyxb2008@126.com

rupprechtii of 13.1 in DBH were homogeneous distribution both in every direction and on the whole sample, in addition, branches of *B. davurica* 15.8 in DBH of the former were homogeneous distribution in most direction. However, at different tree ages, branches of *B. platyphylla* of the former and the four kinds of trees of the latter were inhomogeneous distribution in every direction. (4) As tree age increasing, branching angle of *Larix principis-rupprechtii* varied from 85° to 95° , while those of *Tilia mandschurica* distributed from 55° to 85° . Branching angles of *Pobulus davidiana* at younger and elder tree age were from 40° to 55° , but at middle age from 60° to 80° . Also, the branching angle of *B. davurica* were from 30° to 65° . In the former, branching angle of *B. platyphylla* ranged from 25° to 90° , while in the latter from 45° to 85° . (5) The average fractal dimensions of *Larix principis-rupprechtii* branching patterns was the highest which was up to 1.772, and was followed by that of four kinds of trees of *Pobulus davidiana*-*B. platyphylla*-*B. davurica*. However, the value of *B. davurica* between the two mixed forests were different significantly, which was 1.476 in the former and was 1.674 in the latter. Although the branches of same species were different in shape and size, there were no significant difference between each other, and their correlation coefficients were all above 0.93, which indicated that the various branching pattern had the self-similar commonality.

Key Words: mountain of northern Hebei; dominant tree species; crown structure; branching pattern; fractal dimension

分形几何理论是美国著名数学家 Mandelbrot 在前人研究工作基础上,丰富和发展起来的,它用来描述非常不规则以至不适宜视为经典几何研究的对象,试图透过混乱现象和不规则构型揭示隐藏于现象背后的局部与整体的本质联系和运动规律^[1]。如今,分形理论已广泛应用于自然科学、社会科学中,成为研究无特征尺度却在组织结构上有着自相似性质体系的理论工具。分形理论已开始应用于生物学^[2-3],生态学^[4-6]领域中,解释了很多现象,并解决了一些实际问题。

树体的分枝结构和树冠的形体结构都是较为典型的分数维体,难以用经典(欧氏)几何学对其进行准确的描述和定量分析^[7]。树冠的分形维数反映了叶片对树冠空间的填充程度^[8]和树冠空间占据程度以及利用生态空间的能力,进而揭示树木的生长对策和适应机理^[9]。总体上来讲,分形理论刻画景观格局方面的研究较多,一般是将分形维数作为指示景观斑块边界复杂程度和尺度变化的参数^[10-11],但群落、种群、植冠和分枝格局的研究开展得较少^[12-13]。本文细致解析了冀北山地阴坡典型的林分类型中优势树种的树冠分维结构,进一步阐释分形维数的生态学意义,实现对树木分枝格局的定量化描述,为揭示树木生长对策和适应机理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于河北承德市围场县木兰林管局北沟林场,地处内蒙古高原和冀北山地(从华北平原向内蒙古高原过渡的由山地和山间盆地组合而成的区域)的汇接地带,位于阴山山脉、大兴安岭山脉的尾部向西南延伸和燕山山脉余脉的结合部。地理坐标为北纬 $41^{\circ}47'$ — $42^{\circ}06'$,东经 $116^{\circ}51'$ — $117^{\circ}45'$,地势东北高,西南低,海拔高度约为 800—1600 m,阳坡短且陡,土层瘠薄;阴坡缓而长,土层也较厚。年均降水量 380—560 mm,年平均气温 -1.4 — 4.7°C ,属于中温带向寒温带过渡、半干旱向半湿润过渡、大陆性季风型高原山地气候。

2 研究方法

2.1 样地调查

在北沟林场阴坡选取两个有代表性的样地,其中,落叶松桦木针阔混交林为人工引针入阔林,密度为 1394 株/hm²。林分起源为桦木阔叶林,间伐桦木引入落叶松形成针阔混交林,其优势树种为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、黑桦(*Betula dahurica*),伴生树种为蒙栎(*Tilia mongolica*),五角枫(*Acer elegantulum*),花楸(*Sorbus pohuashanensis*),山杨(*Pobulus davidiana*),黄花柳(*Salix sinica*),此外还有极少量其它树种,对整个林分的结构研究几乎没有影响。

山杨桦木混交林密度为 2060 株/hm²,林分起源为天然次生林,其优势树种为山杨、白桦、黑桦、糠栎(*Tilia*

mandschurica),其他极少量的树种对研究几乎没有影响。

样地面积均设为 100 m × 100 m,调查时设置 20 m × 20 m 样方 25 个,对每个样方内所有胸径大于 5 cm 乔木树种、株树、树高、胸径、冠幅、郁闭度等基本情况进行调查,不同森林类型的标准地概况见表 1。

表 1 不同样地基本情况表

Table 1 General situation of different research sites

样地类型 Forest type	树种组成 Species composition	起源 Origin	海拔 Elevation /m	面积 Area /m ²	郁闭度 Canopy density	总株数 Total trees	林层结构 Canopy structure
落叶松桦木混交林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> - <i>B. platyphylla</i> - <i>B. davurica</i>	5 落 2 白 1 黑 1 椴 1 五	人工林	1700	100×100	0.8	1394	单层
山杨桦木混交林 <i>Pobulus davidiana</i> - <i>B. platyphylla</i> - <i>B. davurica</i>	4 山 3 白 2 黑 1 糠-蒙	天然林	1300	100×100	0.7	2040	单层

树种组成分别为:5 华北落叶松 2 白桦 1 黑桦 1 蒙椴 1 五角枫;4 山杨 3 白桦 2 黑桦 1 糠椴-蒙古栎

2.2 研究方法

树冠结构是指树冠层中的枝条数量、分枝习性、分枝角度等因子在空间上的分布,它是否具有分形特征,关键在于它是否在各种尺度上表现出自相似性或者统计自相似性^[5],树冠的分形结构包括冠形的分形结构与分枝的分形结构。

2.2.1 树冠结构的测定

为了便于比较不同胸径大小的同一树种冠形分布,在此对树冠进行相对冠高的处理。用测高器测量每株样树树冠的高度,然后将其分成 10 等分,分别选择东-西和南-北两个方向采用皮尺测定每一等份处的宽度,最后计算出每一等份处的平均冠宽。

2.2.2 冠形分形结构的计算方法

对于冠形分形结构的判定方法是采用一种已知的具有多种空间自相似性的数学分形曲线(可以通过不同次重复来得到这些曲线)组合来拟合自然物体的形状,通过计算曲线集的残差来判断统计自相似性的最大连续尺度,这种方法需要有关维度理论的精确经验公式,模拟相对比较困难^[5]。一般树冠分维数估算方法有盒维数法、双表面积法及贝氏法等,有研究表明盒维数法应该是求算树冠分维数最理想的方法^[6]。因此,本文采用计盒维数的公式进行计算,一般地,如果设 $N(L)$ 为测度指标(如质量、重量、生物量等), L 为度量所采用的尺度指标(如长度、面积、体积等), D 为指数, C 为比例系数(常量),则存在如下关系:

$$N(L) = CL^D \tag{1}$$

一般求算分形维数所采用的方法是在双对数坐标下进行线性回归,拟合的斜率(或其转换结果)即为分形维数值,其计算公式为:

$$\ln N(L) = \ln C + D \ln L \tag{2}$$

式中, D 为分维数,它一般为分数,亦可能取整。 $\ln N(L)$ 与 $\ln L$ 存在一种线性的关系, D 为二者形成的直线的斜率,因此,可以用(2)式对所得实验数据进行最小二乘法拟合,便可求得每个事例的分维数 D 及拟合的相关系数^[14-15]。通常树冠分析资料是用东西、南北冠幅的平均值表示,本文 L 取每一冠幅级的中值, $N(L)$ 取属于该冠幅级的株数出现的频率的累加值^[16]。

2.2.3 侧枝分布规律的测定

将每株样树分为东、东南、南、西南、西、西北、北、东北 8 个方位进行侧枝分布规律的调查,分别在每个方向上目测数出该方向一级侧枝的总数量,并用量角器测量每个一级侧枝的倾斜角度。

2.2.4 分枝分形结构的计算方法

分枝的分形结构可以通过盒子计数法来统计分析。在每株样树中选取有代表性的枝条作为样本,用

0.5 m × 0.5 m 的正方形样框来进行枝条的取样,然后照相,得到枝条纵向状态的二维投影图像。将照片输入计算机内,在 Photoshop 软件下读取不同样地不同树种的分枝照片,然后选择一个能够尽可能多地覆盖分枝的最大正方形网格,之后不断地将网格的边长减小,统计出不同网格边长时对应的非空格子数,然后计算其计盒维数^[4-5],即:

$$D_b = - \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\log(N(L))}{\log(L)} \quad (3)$$

式中, L 为不同等分时的边长,而 $N(L)$ 为 L 所对应的非空格子数。在实际应用中,一般不计算当 $L \rightarrow 0$ (格子边长趋于 0) 时的极限值,而是在双对数坐标下,对上面获得的一系列成对的非空格子数 ($N(L)$) 和格子边长 (L) 值进行直线回归,所得拟合直线斜率的绝对值是分形维数的近似估计。

3 结果与分析

3.1 树冠结构的模拟

将不同年龄大小样树的树冠长度分成 10 等份,计算出每一等份处的平均冠宽,结果如图 1、图 2 所示。

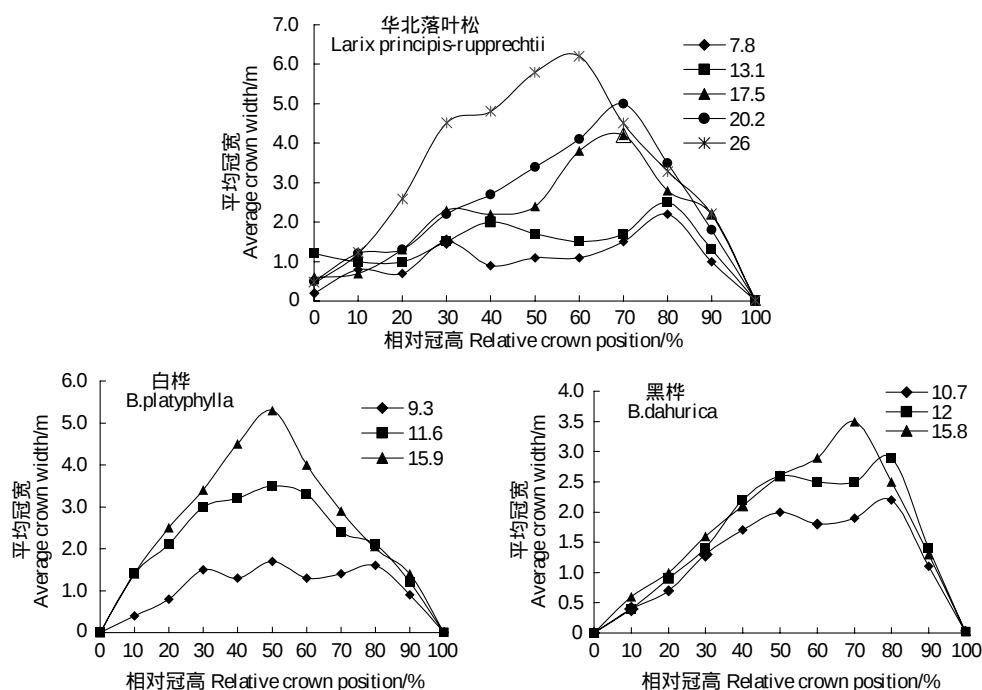


图 1 落叶松桦木混交林不同树种不同胸径的冠形分布

Fig. 1 Crown distribution of different species in different DBH in *Larix principis-rupprechtii*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

从图 1 可知,落叶松桦木混交林的优势树种为华北落叶松、白桦、黑桦,其冠形存在差异,且相同树种不同年龄个体间也存在差异,但同一树种树冠最宽处存在比较相似的分布。由图 1 可知,华北落叶松的树冠最宽处处于中上部(相对冠高的 60%—80%),白桦的树冠最宽处处于中部(相对冠高的 50%),黑桦则基本处于上部(相对冠高的 70%—80%)。此外,不同树种在树龄小时均表现为冠宽变化缓慢,随着树龄的增大,冠宽变化明显。主要原因是:树龄小时,树木还未达到郁闭,树木外光照均匀;而到达一定树龄后,树木达到郁闭状态,最宽处以下的枝条受光减弱,从而发生自然整枝现象,这也导致随着树龄的增大,树冠最宽处处于相对较低的高度。

从图 2 可知,山杨桦木混交林中的山杨、白桦、黑桦、糠椴的冠形存在差异,且相同树种不同年龄个体间也存在差异,但同一树种树冠最宽处存在比较相似的分布。其中,山杨和糠椴基本都处于中部偏下(相对冠高的 40%—50%),白桦的树冠最宽处处于中部左右(相对冠高的 40%—60%),黑桦的树冠最宽处处于中部偏上(相对冠高的 50%—60%),产生的原因主要与树木本身的遗传和生理因素密切相关。

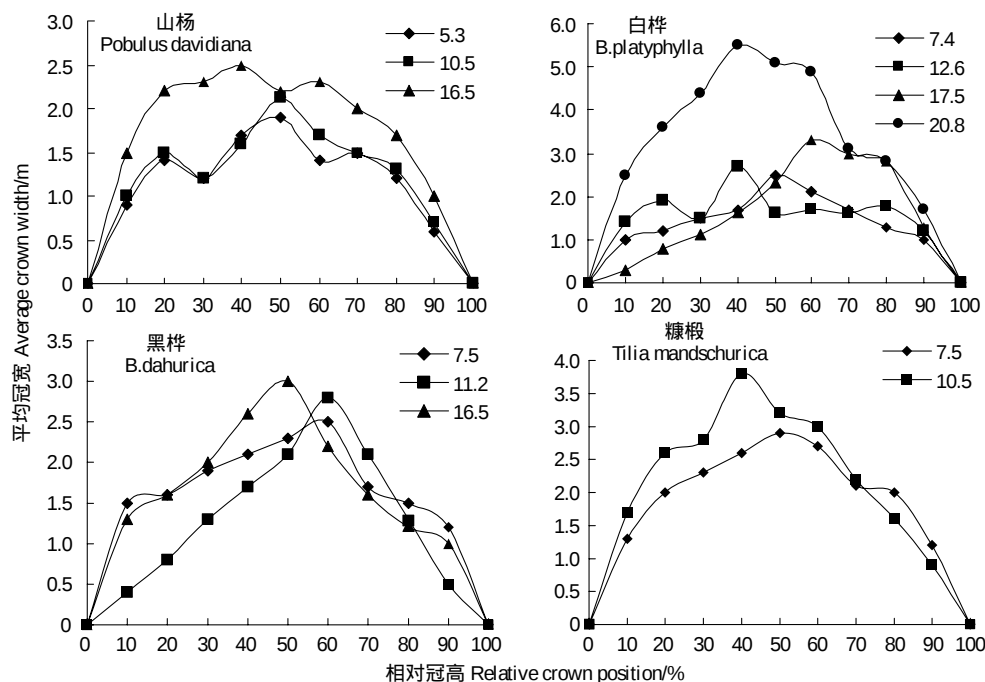


图2 山杨桦木混交林不同树种不同胸径的冠形分布

Fig. 2 Crown distribution of different species in different DBH in *Populus davidiana*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

此外,由图1、图2可知,两种不同混交林中的白桦、黑桦的树冠最宽处有所差异,即落叶松桦木混交林中白桦的树冠最宽处处于中部(相对冠高的50%处),山杨桦木林中的白桦则处于中部左右(相对冠高的40%—60%);前者中的黑桦树冠最宽处处于上部(相对冠高的70%—80%),而后者则处于中部偏上(相对冠高的50%—60%)。产生的原因主要与混交林的树种组成有关,导致树种间的竞争不同,从而使得同一树种在不同混交林中表现出的树冠最宽处位置有所差异。

3.2 树冠分形分布

3.2.1 不同树种的树冠分形特征

利用最小二乘法计算得到两块样地不同树种的树冠分形维数(表2)。冠幅的分形维数反映了树冠的空间占据状态,就林木个体而言,不同树种的正常树冠结构不同,针、阔叶树的冠形存在明显差异,其形成机制与植物的遗传和生理因素密切相关;而对于一个植物群落而言,将受到自身、种间、种内关系及来自环境的多种因素的综合作用,其分形现象有一定的趋同性^[16]。理论上说,树木分形维数越高,表明该树木向不同方向伸展得越充分,利用空间能力越强,占据空间的能力就越大。由表2可知,在落叶松桦木混交林中,华北落叶松的分形维数(1.690)>黑桦(1.257)>白桦(0.997),即该混交林中的针叶树冠幅分形维数大于阔叶树的分维数,这充分反映了针叶树的树冠生长状态,即针叶树树冠的填充程度相对较高,而阔叶树相对较低。此外,在山杨桦木混交林中,山杨与黑桦、白桦与糠椴的分形维数有接近的趋势,这表明,在相同的环境条件下,排除了激烈的竞争外,不同树种的种群可能具有相近的空间占据能力,这可能是树木对所处环境的一种生理生态适应性。

3.2.2 不同混交林分白桦、黑桦种群冠幅分形维数比较

对于一个树木群落而言,由于受到自身、种间、种内关系及来自环境的多种因素的综合作用,其分形现象也存在一定的差异性(表2)。落叶松桦木混交林中白桦分形维数(0.997)与山杨桦木混交林(1.149)相差不多(表2),说明两混交林分中白桦的生长环境基本相似,种间竞争也较良好。而两混交林中黑桦冠幅的分形维数却相差很大,其中前者为1.257,而后者为0.770,这与其所处的具体的物理、生物环境有关。其中,落叶松桦木混交林中黑桦种群冠幅多在1.5—5.5 m之间,山杨桦木混交林中黑桦种群冠幅多在1.5—4.0 m之

间,相对而言,后者中黑桦的冠幅长度较小。调查表明,落叶松桦木混交林中黑桦种群树龄较小,正处于生长旺盛期,枝条伸展充分,能有效的利用阳光、空气等资源,较高的分形维数可定量的表明落叶松桦木混交林中黑桦种群生长情况明显优于山杨桦木混交林。由此可见,模拟冠幅的分形分析方法能很好地揭示树木种群在水平方向上的空间分布格局规律^[16]。

表 2 不同树种冠幅分形维数
Table 2 Fractal dimension of crown of different species

样地类型 Forest type	树种 Species	方程 Equation	分形维数 Fractal dimension	相关系数 R^2	显著性 Significant
落叶松桦木混交林	华北落叶松	$N=0.044L^{1.690}$	1.690	0.8783	0.0017
	白桦	$N=0.146L^{0.997}$	0.997	0.8908	0.0036
	黑桦	$N=0.105L^{1.257}$	1.257	0.8507	0.0011
山杨桦木混交林	山杨	$N=0.251L^{0.782}$	0.782	0.8119	0.0010
	白桦	$N=0.157L^{1.149}$	1.149	0.8546	0.0154
	黑桦	$N=0.313L^{0.770}$	0.770	0.9240	0.0197
	糠椴	$N=0.191L^{1.202}$	1.202	0.8726	0.0395

3.3 侧枝及倾角分布规律

3.3.1 侧枝分布规律

通过统计各个方位的侧枝数量,得到不同树种不同胸径的侧枝方位分布状态(表3、表4)。表中所列的 χ^2 值为利用假定: $\chi^2 = (\text{实测值}-\text{理论值})^2/\text{理论值}$ 。假定各侧枝在每个方位上均匀分布,在各方位出现枝数的概率即为理论频数(其值为12.5)。在每个方位上如果 $\chi^2 > \chi^2_{0.05} = 3.84$ 时,则认为差异显著;而总体 $\chi^2(7) > 14.067$ 时,则认为侧枝在各方位上的分布是不均匀的^[17]。由表3可知,不同胸径年龄的华北落叶松侧枝在各个方向的分布状态不同,其中,胸径13.1 cm的落叶松在各方向上符合均匀分布,总体也符合均匀分布;胸径17.5 cm及胸径26 cm的树木在大多数方向上符合均匀分布,总体则不符合均匀分布;而其他胸径的侧枝在各个方向上则不符合均匀分布。这可能是由于树龄小时,林木未达到郁闭,各方向均生长旺盛,枝条呈现出均匀生长的状态。而随着树龄增长,林木达到郁闭,树木间为争夺营养、阳光等,导致有的方向侧枝折损或见光不好而脱落,使得侧枝呈不均匀分布。此外,不同胸径的白桦在各方位上均为不均匀分布;大多数树龄的黑桦在各方位上均为不均匀分布,而胸径15.8 cm的黑桦在绝大多数方位上为均匀分布,这与树木本身遗传有很大关系。

表 3 落叶松桦木混交林不同树种侧枝在各方位上分布的 χ^2 检验

Table 3 χ^2 test of distribution of branching orientation of different species in *Larix principis-rupprechtii*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

树种 Species	胸径 DBH/cm	指标 Index	方位 Orientation								总计 Total
			E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	
华北落叶松	7.8	侧枝数量	3	5	16	10	1	10	11	11	67
		相对数量	4.48	7.46	23.88	14.93	1.49	14.93	16.42	16.42	100
		χ^2	5.15 *	2.03	10.36 *	0.47	9.69 *	0.47	1.23	1.23	30.63 *
	13.1	侧枝数量	14	11	5	10	16	14	9	18	97
		相对数量	14.43	11.34	5.15	10.31	16.49	14.43	9.28	18.56	100
		χ^2	0.30	0.11	4.32 *	0.38	1.28	0.30	0.83	2.93	10.45
	17.5	侧枝数量	11	18	9	26	6	11	2	10	93
		相对数量	11.83	19.35	9.68	27.96	6.45	11.83	2.15	10.75	100
		χ^2	0.04	3.76	0.64	19.11 *	2.93	0.04	8.57 *	0.24	35.32 *
		侧枝数量	9	40	7	26	5	23	6	35	151

续表

树种 Species	胸径 DBH/cm	指标 Index	方位 Orientation								总计 Total
			E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	
白桦	20.2	相对数量	5.96	26.49	4.64	17.22	3.31	15.23	3.97	23.18	100
		χ^2	3.42	15.66 *	4.95 *	1.78	6.75 *	0.60	5.82 *	9.12 *	48.10 *
		侧枝数量	10	24	18	20	4	13	13	18	120
	26.0	相对数量	8.33	20.00	15.00	16.67	3.33	10.83	10.83	15.00	100
		χ^2	1.39	4.50 *	0.50	1.39	6.72 *	0.22	0.22	0.50	15.44 *
		侧枝数量	1	0	2	0	5	2	0	1	11
	9.3	相对数量	9.09	0.00	18.18	0.00	45.45	18.18	0.00	9.09	100
		χ^2	0.93	12.50 *	2.58	12.50 *	86.88 *	2.58	12.50 *	0.93	131.40 *
		侧枝数量	1	16	2	10	0	7	1	7	44
	11.6	相对数量	2.27	36.36	4.55	22.73	0.00	15.91	2.27	15.91	100
		χ^2	8.37 *	45.56 *	5.06 *	8.37 *	12.50 *	0.93	8.37 *	0.93	90.08 *
		侧枝数量	0	13	1	2	0	3	3	11	33
黑桦	15.9	相对数量	0.00	39.39	3.03	6.06	0.00	9.09	9.09	33.33	100
		χ^2	12.50 *	57.86 *	7.17 *	3.32	12.50 *	0.93	0.93	34.72 *	129.94 *
		侧枝数量	1	6	2	4	3	1	2	3	22
	10.7	相对数量	4.55	27.27	9.09	18.18	13.64	4.55	9.09	13.64	100
		χ^2	5.06 *	17.46 *	0.93	2.58	0.10	5.06 *	0.93	0.10	32.23 *
		侧枝数量	2	9	1	7	2	3	0	7	31
	12.0	相对数量	6.45	29.03	3.23	22.58	6.45	9.68	0.00	22.58	100
		χ^2	2.93	21.87 *	6.88 *	8.13 *	2.93	0.64	12.50 *	8.13 *	64.00 *
		侧枝数量	3	1	0	1	3	3	3	3	17
	15.8	相对数量	17.65	5.88	0.00	5.88	17.65	17.65	17.65	17.65	100
		χ^2	2.12	3.50	12.50 *	3.50	2.12	2.12	2.12	2.12	30.10 *

由表 4 可知,山杨桦木混交林由山杨、白桦、黑桦、糠椴 4 种阔叶树种组成,这 4 种树木在不同胸径时侧枝在大多数方位上均为 $\chi^2 > \chi^2_{0.05} = 3.84$,说明在不同方位上差异显著,即在各个方位上侧枝数量呈不均匀分布。此外,4 种树木在不同胸径时总体均有 $\chi^2(7) > 14.067$,则认为侧枝在各方位上的分布是不均匀的。产生的原因:与树种本身的遗传性状有关,此外,与光照方位也有很大关系,由表 4 亦可看出,4 种树木在东、西方位上的枝条数量相对较少,这是否与光照方位有关有待深入研究。

表 4 山杨桦木混交林不同树种侧枝在各方位上分布的 χ^2 检验Table 4 χ^2 test of distribution of branching orientation of different species in *Pobulus davidiana*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

树种 Species	胸径 DBH/cm	指标 Index	方位 Orientation							总计 Total	
			E	SE	S	SW	W	NW	N		NE
山杨	5.3	侧枝数量	1	2	0	0	1	1	2	5	12
		相对数量	8.33	16.67	0	0	8.33	8.33	16.67	41.67	100
		χ^2	1.39	1.39	12.50 *	12.50 *	1.39	1.39	1.39	68.06 *	100.0 *
	10.5	侧枝数量	0	2	1	3	0	8	0	8	22
		相对数量	0	9.09	4.55	13.64	0	36.36	0	36.36	100
		χ^2	12.50 *	0.93	5.06 *	0.1	12.50 *	45.56 *	12.50 *	45.56 *	134.7 *
	16.5	侧枝数量	2	2	5	1	2	2	5	4	23
		相对数量	8.7	8.7	21.74	4.35	8.7	8.7	21.74	17.39	100
		χ^2	1.16	1.16	6.83 *	5.32 *	1.16	1.16	6.83 *	1.91	25.52 *
白桦	7.4	侧枝数量	0	10	1	6	0	6	3	9	35
		相对数量	0	28.57	2.86	17.14	0	17.14	8.57	25.71	100

续表

树种 Species	胸径 DBH/cm	指标 Index	方位 Orientation								总计 Total
			E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	
黑桦	12.6	χ^2	12.50 *	20.66 *	7.44 *	1.72	12.50 *	1.72	1.23	13.97 *	71.76 *
		侧枝数量	1	11	2	10	1	13	1	9	48
		相对数量	2.08	22.92	4.17	20.83	2.08	27.08	2.08	18.75	100
		χ^2	8.68 *	8.68 *	5.56 *	5.56 *	8.68 *	17.01 *	8.68 *	3.13	65.97 *
		侧枝数量	7	1	7	7	0	4	7	3	36
		相对数量	19.44	2.78	19.44	19.44	0	11.11	19.44	8.33	100
	17.5	χ^2	3.86 *	7.56 *	3.86 *	3.86 *	12.50 *	0.15	3.86 *	1.39	37.04 *
		侧枝数量	1	11	4	12	3	10	4	10	55
		相对数量	1.82	20	7.27	21.82	5.45	18.18	7.27	18.18	100
	20.8	χ^2	9.13 *	4.50 *	2.19	6.95 *	3.97 *	2.58	2.19	2.58	34.08 *
		侧枝数量	4	4	6	2	1	0	4	2	23
		相对数量	17.39	17.39	26.09	8.7	4.35	0	17.39	8.7	100
	7.5	χ^2	1.91	1.91	14.77 *	1.16	5.32 *	12.50 *	1.91	1.16	40.64 *
		侧枝数量	0	0	0	4	1	6	3	3	17
		相对数量	0	0	0	23.53	5.88	35.29	17.65	17.65	100
	11.2	χ^2	12.50 *	12.50 *	12.50 *	9.73 *	3.5	41.57 *	2.12	2.12	96.54 *
		侧枝数量	0	2	0	6	0	9	0	6	23
		相对数量	0	8.7	0	26.09	0	39.13	0	26.09	100
	16.5	χ^2	12.50 *	1.16	12.50 *	14.77 *	12.50 *	56.73 *	12.50 *	14.77 *	137.4 *
		侧枝数量	1	0	1	4	3	2	1	2	14
		相对数量	7.14	0	7.14	28.57	21.43	14.29	7.14	14.29	100
	7.5	χ^2	2.3	12.50 *	2.3	20.66 *	6.38 *	0.26	2.3	0.26	46.94 *
		侧枝数量	3	7	3	2	1	5	1	7	29
		相对数量	10.34	24.14	10.34	6.9	3.45	17.24	3.45	24.14	100
	10.5	χ^2	0.37	10.84 *	0.37	2.51	6.55 *	1.8	6.55 *	10.84 *	39.83 *
		侧枝数量									
		相对数量									

3.3.2 侧枝倾角分布规律

为了便于将不同树种不同胸径样树的侧枝倾角进行比较,将倾角以相差 5° 为一区间进行统计,结果如图 3、图 4 所示。

由图 3 可知,不同树种及同一树种不同胸径的倾角分布都有所差异。其中,不同胸径的华北落叶松侧枝倾角范围 $40^\circ\text{—}135^\circ$,主要分布在 $70^\circ\text{—}110^\circ$ 之间,随树龄增大,倾角主要集中在 $85^\circ\text{—}95^\circ$ 之间,这说明华北落叶松随树龄增大侧枝基本呈水平状态分布。不同胸径的白桦侧枝倾角范围 $25^\circ\text{—}90^\circ$,且随着树龄增大,倾角也随之增大,这说明随着树龄增大,侧枝向上生长的趋势减弱,而黑桦倾角则主要分布在 $35^\circ\text{—}65^\circ$ 之间。

由图 4 可知,山杨桦木混交林中白桦的侧枝倾角主要分布在 $45^\circ\text{—}85^\circ$;黑桦主要分布在 $30^\circ\text{—}65^\circ$;山杨树龄小与树龄大时主要分布在 $40^\circ\text{—}55^\circ$,中间状态的分布在 $60^\circ\text{—}80^\circ$;糠椴也有很明显的分布情况,树龄小时分布在 $40^\circ\text{—}55^\circ$,随后分布在 $55^\circ\text{—}85^\circ$,这充分说明随着树龄增大,枝条向上生长的趋势减弱,且树木枝条重量也相应增大,在重量作用下倾角逐渐加大。

此外,由图 3、图 4 可知,两混交林分的白桦倾角分布规律也不尽相同,可能的原因是与样地本身的树种组成不同,导致种间竞争不同,山杨桦木混交林树种均为阔叶树,为了获得更多的阳光、空气等资源,白桦向上生长的趋势增加,倾角相对较小,这也是对环境的一种适应性表现。

3.4 侧枝分形格局

3.4.1 不同树种的侧枝分形特征

采用网格覆盖法,通过计盒维数公式计算得到两块样地不同树种分枝格局的分形维数,如表 5 所示。通

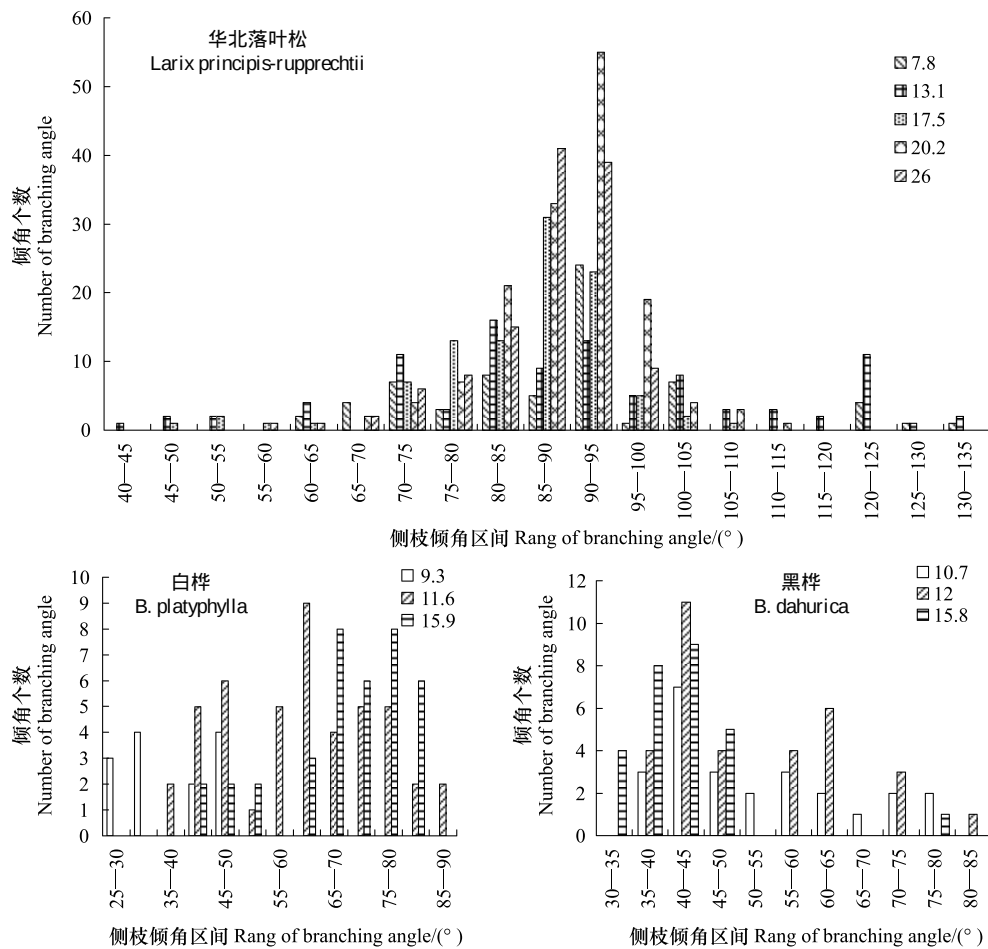


图3 落叶松桦木混交林不同树种不同胸径的侧枝倾角分布

Fig. 3 Branching angle distribution of different species in different DBH in *Larix principis-rupprechtii*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

过该表可以看出,不同树种的侧枝分维数不同,且同一树种在不同样地所得分维数也都有所差异。但对于同一样地中的同一树种而言,虽然胸径大小不同,但相互间差异不显著,相关系数均在 0.93 以上,由此可见尽管同一树种各枝条分枝结构形状不一,大小不等,但是也都存在着自相似性特性,分形维数独立于尺度,正好刻画了各枝条分枝格局的自相似共性(图 5,图 6)。由表 5 可知,华北落叶松枝条的分维数最高为 1.757—1.788,其次为山杨桦木混交林中的黑桦>白桦>糠椴>山杨,但四种分维数相差不大,最小的为落叶松桦木混交林中的黑桦(1.430—1.519)。这充分说明华北落叶松分枝结构较复杂,落叶松桦木混交林中的黑桦分枝结构则较简单。由此可见,通过计盒维数法分析树木分枝格局能很好地揭示树木枝条的自相似性及其结构的复杂程度。

表 5 不同树种分枝格局的计盒维数

Table 5 Box-counting dimension of branching patterns of different species

样地类型 Forest type	树种 Species	指标 Index						平均值 Average
落叶松桦木	华北落叶松	胸径/cm	7.8	13.1	17.5	20.2	26.0	
		计盒维数(D_b)	1.769	1.757	1.772	1.788	1.774	1.772
		相关系数(R)	0.969	0.954	0.959	0.968	0.956	0.961
	白桦	胸径/cm	9.3	11.6	15.9			
		计盒维数(D_b)	1.565	1.500	1.620			1.562

续表

样地类型 Forest type	树种 Species	指标 Index				平均值 Average
山杨桦木	黑桦	相关系数(R)	0.957	0.940	0.979	0.959
		胸径/cm	10.7	12.0	15.8	
		计盒维数(D_b)	1.430	1.479	1.519	1.476
	山杨	相关系数(R)	0.952	0.960	0.953	0.955
		胸径/cm	5.3	10.5	16.5	
		计盒维数(D_b)	1.559	1.579	1.584	1.574
	白桦	相关系数(R)	0.966	0.954	0.953	0.958
		胸径/cm	7.4	12.6	17.5	20.8
		计盒维数(D_b)	1.620	1.691	1.684	1.647
	黑桦	相关系数(R)	0.947	0.950	0.972	0.930
		胸径/cm	7.5	11.2	16.5	
		计盒维数(D_b)	1.689	1.698	1.635	1.674
	糠椴	相关系数(R)	0.947	0.955	0.948	0.950
		胸径/cm	7.5	10.5		
		计盒维数(D_b)	1.622	1.642		1.632
		相关系数(R)	0.947	0.959		0.953

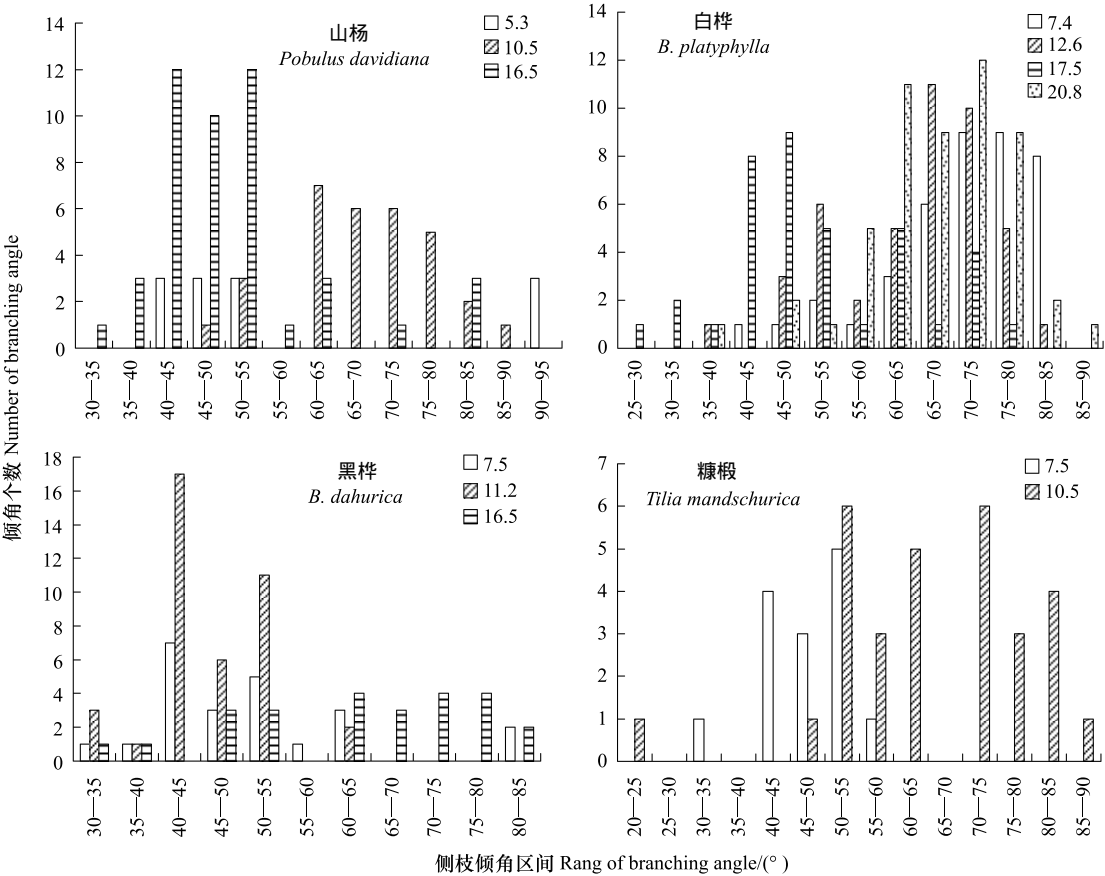


图4 山杨桦木混交林不同树种不同胸径的侧枝倾角分布

Fig. 4 Branching angle distribution of different species in different DBH in *Populus davidiana*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

3.4.2 不同混交林分白桦、黑桦种群侧枝分形维数比较

树木分枝结构不仅与自身遗传密切相关,而且还与所处的生长环境、种内、种间竞争有很大关系。由表5

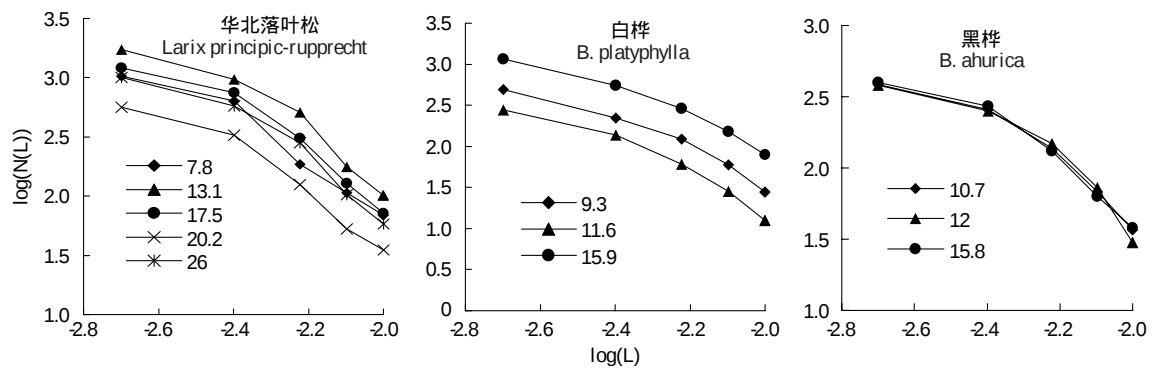


图5 落叶松桦木混交林不同树种不同侧枝分枝格局的自相似性

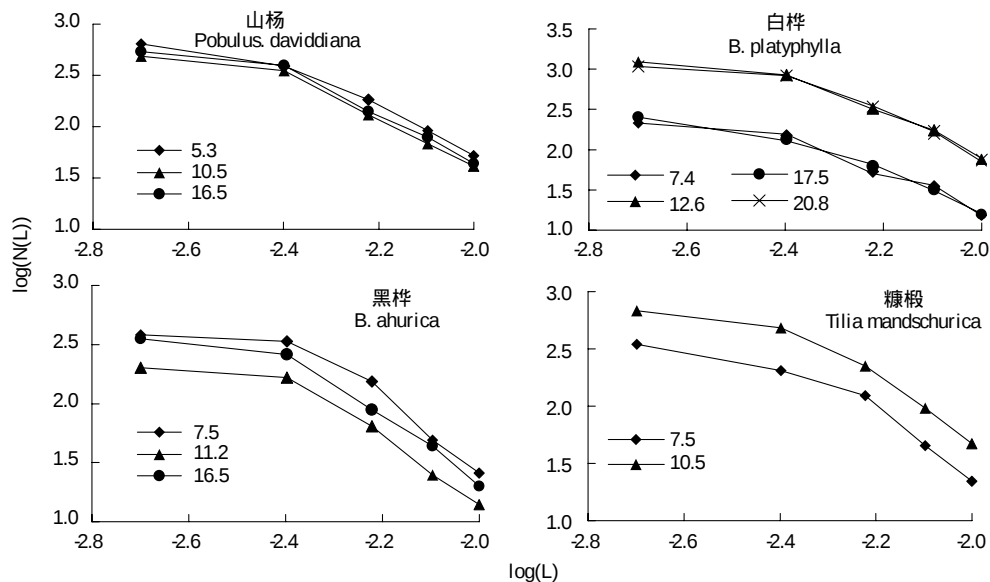
Fig. 5 Self-similarity of different branching pattern of different species in *Larix principis-rupprechtii*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

图6 山杨桦木混交林不同树种不同侧枝分枝格局的自相似性

Fig. 6 Self-similarity of different branching pattern of different species in *Populus davidiana*-*B. platyphylla*-*B. davurica*

可知,落叶松桦木混交林中白桦枝条平均分维数(1.772)与山杨桦木混交林(1.661)相差不多,说明两混交林分中白桦的生长环境基本相似,表现出较相似的分枝结构。而两混交林中黑桦枝条的分形维数却相差很大,其中前者为1.430—1.519,而后者为1.635—1.698,这与其所处的具体的物理、生物环境有关。调查表明,落叶松桦木混交林中黑桦种群树龄较小,正处于生长旺盛期,相对而言,分枝格局没有山杨桦木混交林中的枝条复杂。

4 结论与讨论

(1) 两种混交林分中不同树种的冠形存在差异,且相同树种不同年龄个体间也存在差异,但同一树种树冠最宽处存在比较相似的分布。华北落叶松的树冠最宽处处于中上部(相对冠高的60%—80%),山杨和糠椴则基本都处于中部偏下(相对冠高的40%—50%),落叶松桦木混交林中白桦的树冠最宽处处于中部(相对冠高的50%),黑桦则基本处于上部(相对冠高的70%—80%),但是山杨桦木混交林中白桦的树冠最宽处处于中部左右(相对冠高的40%—60%),黑桦的树冠最宽处处于中部偏上(相对冠高的50%—60%)。可见,两混交林分中的白桦、黑桦的树冠最宽处存在一定的差异,产生的原因主要与样地的树种组成不同,导致树种间的竞争不同,从而使得同一树种在不同林分表现出的树冠最宽处位置有所差异。

(2) 分形维数是表征植物空间占据能力的有力工具,能够真实反映树木生长的实际情况、空间占据能力。

分形维数高,则表明物种占据空间的能力强,物种能更好的利用资源,在与其它物种的竞争中处于优势地位^[1]。其中,华北落叶松的冠幅分形维数(1.690)大于该混交林中其他树种,即针叶树树冠的填充程度相对较高,而阔叶树相对较低。此外,山杨桦木混交林中山杨与黑桦、白桦与糠椴的分形维数有接近的趋势,这表明,不同物种的种群可能具有相近的空间占据能力,这可能是植物对所处环境的一种生理生态适应性。另外,两混交林中白桦分维数相差不多,说明白桦的生长环境基本相似,种间竞争也较良好。而黑桦冠幅的分维数却相差很大,前者分维数(1.257)>后者(0.770),调查表明,落叶松桦木混交林中黑桦种群冠幅长度相对较大,且种群树龄较小,正处于生长旺盛期,枝条伸展充分,能有效的利用阳光、空气等资源。此外,两种混交林分所海拔不同,前者海拔 1700 m,后者 1300 m,有研究表明,青海云杉种群格局的计盒维数与样地海拔和土壤水分含量呈显著的负相关^[18],本研究中黑桦冠幅计盒维数存在很大差异,这与海拔是否有直接联系,还有待以后进一步的研究探讨。

(3)两种混交林分中不同树种的侧枝在各方向上分布规律不同,其中,胸径 13.1 cm 的华北落叶松在各方向上符合均匀分布,总体也符合均匀分布;胸径 17.5 cm 及胸径 26 cm 时在大多数方向上符合均匀分布,而其他胸径的侧枝在各个方向上则不符合均匀分布。陈军^[17]等研究发现,不同年龄的林带小钻杨侧枝数量在各个方向符合均匀分布,整体也为均匀分布,调查表明,该研究地内所有的小钻杨均经过修枝,这使得各个方向的枝条生长良好而不存在恶性竞争。本研究中落叶松未经过整枝,侧枝数量出现不均匀分布,可能是树种间竞争使得部分方向的枝条折断或脱落所致。

落叶松桦木混交林中的黑桦在胸径 15.8 cm 时绝大多数方向上为均匀分布,而其他胸径的黑桦在各方向上均为不均匀分布;落叶松桦木混交林中的白桦及山杨桦木混交林中的四种树木在不同胸径时侧枝在各个方向上均为不均匀分布,这些均为阔叶树种,侧枝数量相对而言较少,造成不均匀分布的情况可能与树种遗传性状有很大关系。

(4)两种混交林中不同树种的侧枝倾角分布规律有所差异,这是树种本身的遗传性质及外界环境共同作用的结果。其中,不同胸径的华北落叶松侧枝倾角主要分布在 70—110°之间,随树龄增大,倾角主要集中在 85—95°之间,即随树龄增大,侧枝基本呈水平状态分布。黑桦倾角主要分布在 30—65°,山杨树龄小与树龄大时主要分布在 40—55°,中间树龄的分布在 60—80°;糠椴也有很明显的分布情况,树龄小时分布在 40—55°,随后分布在 55—85°,即随树龄增大,枝条向上生长的趋势减弱,且树木枝条重量也相应增大,在重量作用下倾角逐渐加大。落叶松桦木混交林中的白桦侧枝倾角范围 25—90°,且随树龄增大,倾角也随之增大,即侧枝向上生长的趋势减弱;而山杨桦木混交林中白桦则主要分布在 45—85°,产生差异的原因可能与样地本身的树种组成有关,山杨桦木混交林由阔叶树种组成,为了获得更多的阳光、空气等资源,白桦向上生长的趋势增加,倾角相对较小,这也是对环境的一种适应性表现。

(5)分枝格局的计盒维数反映了分枝结构的复杂程度以及占据生态空间和利用生态空间的能力^[19]。两种混交林中不同树种侧枝分维数不同,其中华北落叶松侧枝的分维数平均值最高为 1.772,其次为山杨桦木混交林中的四种树木,最小的为落叶松桦木混交林中的黑桦(1.476),说明华北落叶松分枝结构较复杂,落叶松桦木混交林中的黑桦分枝结构较简单。尽管同一样地同一树种侧枝形状大小各异,但相互间差异不显著,相关系数均在 0.93 以上,分形维数独立于尺度,正好刻画了各枝条分枝格局的自相似共性。

另外,落叶松桦木混交林中白桦侧枝平均分维数(1.772)与山杨桦木混交林(1.661)相差不多,表现出较相似的分枝结构;而两混交林中黑桦侧枝的平均分维数却相差很大,其中前者为 1.476,而后者为 1.674,这与其所处的具体的物理、生物环境有关。调查表明,落叶松桦木混交林中黑桦种群树龄较小,正处于生长旺盛期,相对而言,利用生态空间的能力没有山杨桦木混交林中的树木强。

References:

- [1] Feng L, Hong W, Wu C Z, Wang X G, Cheng Y, Liao C Z, Fang H L. Fractal features of crown breath of different trees in different managements of Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(5): 455-459.

- [2] Fielding A. Applications of fractal geometry to biology. *Computer Application in the Biosciences*, 1992, 8(4): 359-366.
- [3] Gunnarsson B. Fractal dimension of plants and body size distribution in spiders. *Functional Ecology*, 1992, 6(6): 636-641.
- [4] 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.
- [5] Xie C H, Wei J, Guan W B, Wu J A, Li C P, Luo J, Li T Y. Fractal structure of *Abies fabri*, dominant tree species in dark coniferous forest at the upper reach of Yangtze River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 769-772.
- [6] Li H G, Huang M R, Wang M X. A comparison of methods for estimating fractal dimension of poplar crown. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2005, 29(6): 11-14.
- [7] Ye W H. Application of fractal geometry to forest science and ecology. *World Forestry Research*, 1993, (1): 1-24.
- [8] Zeide B. Fractal geometry in forestry applications. *Forest Ecology and Management*, 1991, 46(3/4): 179-188.
- [9] Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of the branching pattern of *Larix gmelini*. *Bulletin of Botanical Research*, 2000, 20(2): 235-241.
- [10] Richard G, Lathrop J, David L P. Identifying structural self-similarity in mountainous landscapes. *Landscape Ecology*, 1991, 6(4): 233-238.
- [11] With K A. Using fractal analysis to assess how species perceive landscape structure. *Landscape Ecology*, 1994, 9(1): 25-34.
- [12] Gao J, Zhang J S, Meng P. Fractal theory and its applications in forestry. *World Forestry Research*, 2004, 17(6): 11-16.
- [13] Peng H, Liu S M. Application of fractal methods in plant simulation. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(6): 190-192.
- [14] Hong W, Wu C Z, Ling C L, Zhang Y G. Study on growth law of dominance of *Pinus taiwanensis* population in Longxi Mountains. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1997, 17(2): 97-101.
- [15] Chen H, Liu Y B, Chen F P. A study on optimized cutting medium Ingredient for *Taxus chinensis* var. *Mairei*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1999, 19(4): 292-295.
- [16] Bi X L, Hong W, Wu C Z, Yan S J, Lan B. Study on fractals of crown breath of different tree in *Pinus taiwanensis* forests. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2001, 21(4): 347-350.
- [17] Chen J, Li C P, Guan W B, Zhang N N, Wang X L. Fractal characteristics of tree crown of *Populus xiao zhuanica* in shelterbelts. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(12): 6-12.
- [18] Zhang L J, Zhao W Z, He Z B. Characteristics in *Picea crassifolia* forest fractal dimension and its influencing factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [19] Liang S C, Wang B X. Fractal characteristics of population canopy structure of the mangrove species, *Bruguiera gymnorhiza*, *Marine Science Bulletin*, 2002, 21(5): 26-31.

参考文献:

- [1] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 王新功, 程煜, 廖成章, 范海兰. 杉木人工林不同经营模式树冠的分形特征. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(5): 455-459.
- [4] 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征: 计盒维数. *木本植物研究*, 2000, 20(1): 104-111.
- [5] 谢春华, 魏杰, 关文彬, 吴建安, 李春平, 罗辑, 李同阳. 长江上游暗针叶林优势树种峨眉冷杉的树体分维结构研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 769-772.
- [6] 李火根, 黄敏仁, 王明麻. 3种冠型分维数求算法在杨树无性系中的应用. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(6): 11-14.
- [7] 叶万辉. 分数几何在林学和生态学上的应用. *世界林业研究*, 1993, (1): 1-24.
- [9] 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松分枝格局的分形特征. *植物研究*, 2000, 20(2): 235-241.
- [12] 高峻, 张劲松, 孟平. 分形理论及其在林业科学中的应用. *世界林业研究*, 2004, 17(6): 11-16.
- [13] 彭辉, 刘善梅. 分形理论在植物形态模拟中的应用. *农机化研究*, 2010, 32(6): 190-192.
- [14] 洪伟, 吴承祯, 林成来, 张运根. 龙栖山黄山松种群优势度增长规律研究. *福建林学院学报*, 1997, 17(2): 97-101.
- [15] 陈辉, 刘玉宝, 陈福甫. 南方红豆杉扦插基质配方优化的研究. *福建林学院学报*, 1999, 19(4): 292-295.
- [16] 毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 闫淑君, 蓝斌. 黄山松林不同树种树冠分形特征研究. *福建林学院学报*, 2001, 21(4): 347-350.
- [17] 陈军, 李春平, 关文彬, 张楠楠, 汪西林. 林带小钻杨树冠的分维结构. *林业科学*, 2006, 42(12): 6-12.
- [18] 张立杰, 赵文智, 何志斌. 青海云杉(*Picea crassifolia*)种群格局的分形特征及其影响因素. *生态学报*, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [19] 梁士楚, 王伯荪. 红树植物木榄种群冠层结构的分形特征. *海洋通报*, 2002, 21(5): 26-31.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 22 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland	6645
Potential distribution of rice in china and its climate characteristics	6659
Effects of seed soaking with soybean isoflavones on soybean seedlings under salt stress	6669
Ecophysiological responses and adaptation of <i>Tamarix ramosissima</i> to changes in groundwater depth in the Heihe river basin	6677
<i>Melica przewalskyi</i> population spatial pattern and response to soil moisture in degraded alpine grassland	6688
A study on ecological compensation standard for Zaoshi Water Conservancy Project based on the idea of ecological footprint	6696
Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data	6708
Marshclassification mapping at a community scale using high-resolution imagery	6717
The impact of bacterial-feeding nematodes on root growth of <i>Arabidopsis thaliana</i> L. and the possible mechanisms	6727
Spatial and dynamic analysis of plantations in Xishuangbanna using network <i>K</i> -function	6734
Contrastive analysis and climatic response of tree-ring gray values and tree-ring densities	6743
Fractal structure of dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei	6753
Characteristics of radiation fluxes of an evergreen broad-leaved forest in Maofeng Mountain, Guangzhou, China	6766
Effects of seed-dressing agents on groundnut and rhizosphere microbes	6777
Time series prediction of the concentration of chlorophyll-a based on RBF neural network with parameters self-optimizing	6788
A trend surface analysis of geographic variation in the traits of seeds and seedlings from different <i>Quercus acutissima</i> provenances	6796
Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River basin, Shaanxi Province, China	6805
An analysis on the water status in twigs and its relations to the drought resistance in Five woody plants living in arid zone	6815
The effect of fire on soil properties in a <i>Pinus massoniana</i> stand	6824
Water-environment effects of industry structure in Taihu Lake Basin in Jiangsu Province	6832
Effect of high temperature on enzymic activity, pigment content and chlorophyll fluorescence of two <i>Kappaphycus</i> species	6845
Analysis on characteristics of a typical drought event in Jiangsu Province	6853
Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau	6866
Effects of light quality on photosynthetic characteristics and on the carotenoid and cuticular extract content in tobacco leaves	6877
Cyanobacterial diversity in biological soil crusts on wastelands of copper mine tailings	6886
Stereotypic behavior frequency and the influencing factors in captive Alpine musk deer (<i>Moschus sifanicus</i>)	6896
Zooplankton ecology near the Tianwan Nuclear Power Station	6902
Diel variations of fish assemblages in multiple habitats of Ma'an archipelago, Shengsi, China	6912
A novel cognitive-based approach to motivation for non-use value	6926
Review	
Salt-responsive proteomics in plants	6936
Research progress on forms of nitrogen and determination in the sediments	6947
Review of research progress of infectious diseases in wild birds	6959
Review on the methods to quantify fish's ability to cross velocity barriers in fish passage	6967
Monograph	
Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: foundation, prospect and response strategy	6973
Scientific Note	
A comparative study of the spatial-temporal patterns of fine roots between young and mature <i>Caragana korshinskii</i> plantations	6978

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 22 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 22 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元