

, DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.10039

梁林峰, 要元媛, 华润成, 闫明. 山西毛榛植物构型特征分析[J]. 植物科学学报, 2017, 35(1): 39~47

Liang LF, Yao YY, Bi RC, Yan M. Plant architecture characteristics of *Corylus mandshurica* in Shanxi[J]. Plant Science Journal, 2017, 35(1): 39~47

山西毛榛植物构型特征分析

梁林峰¹, 要元媛², 华润成², 闫明^{2*}

(1. 山西省林业调查规划院, 山西太原 030012; 2. 山西师范大学生命科学学院, 山西临汾 041004)

摘要: 以山西省中条山大河林场、太岳山绵山林场、兴唐寺林场和七里峪林场、五台山金岗库林场、恒山王庄堡林场的毛榛 (*Corylus mandshurica* Maxim.) 为研究对象, 采用样方调查方法, 系统研究了毛榛在不同生境中的构型和分形维数特征。结果显示, 大河林场毛榛的总体分枝率和枝径比 ($RBD_{2:1}$ 、 $RBD_{3:2}$) 均大于其它地区, 逐步分枝率 ($SBR_{1:2}$ 、 $SBR_{2:3}$) 与总体分枝率呈现出相反的趋势, 五台山金岗库林场毛榛的逐步分枝率最大; 山西省各研究地毛榛的分枝角度差异显著, 北部地区从 1 级到 3 级有减小的趋势, 金岗库林场的毛榛 1 级分枝角度最大; 分枝长度也呈现出从 1 级到 3 级逐渐减小的趋势, 其各级分枝长度排序为: 金岗库林场 > 王庄堡林场 > 七里峪林场 > 兴唐寺林场 > 绵山林场 > 大河林场; 从分形维数来看, 金岗库林场毛榛的树冠分维数和分枝分维数均为最大; 各研究地毛榛的叶面积和地上生物量从北到南均表现为逐渐减小; 金岗库林场毛榛叶面积的平均值、叶生物量和枝生物量均最大。研究结果表明 6 个研究区中金岗库林场的毛榛长势最好, 该地的气候条件最适宜毛榛生长。

关键词: 毛榛; 植物构型; 分形维数; 地上生物量; 山西

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)01-0039-09

Plant architecture characteristics of *Corylus mandshurica* in Shanxi

Liang Lin-Feng¹, Yao Yuan-Yuan², Bi Run-Cheng², Yan Ming^{2*}(1. *Shanxi Forest Inventory and Planning Institute*, *Taiyuan 030012, China*; 2. *College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China*)

Abstract: *Corylus mandshurica* was selected for study in the Dahe forest area in the Zhongtiao mountains, Mianshan, Xingtangsi, and Qiliyu forest areas in the Taiyue mountains, Jingangku forest area in the Wutai mountains, and Wangzhuangbao forest area in Hengshan of the Shanxi Province. Using six quadrats, the configuration and fractal dimension characteristics of *C. mandshurica* in different habitats were studied. Results showed that the overall bifurcation ratio and the ratio of branch diameter ($RBD_{2:1}$, $RBD_{3:2}$) in the Dahe forest area were higher than those in other areas. The stepwise bifurcation ratio exhibited the opposite trend as the overall bifurcation ratio, and the stepwise bifurcation ratio of *C. mandshurica* in the Wutai mountains was the highest. However, the branch angle of *C. mandshurica* showed significant differences in each studied area. The branch angle gradually decreased from the first-class to the third-class in the northern territories. The first-class branch angle of *C. mandshurica* in the Jingangku forest area was the highest. The order of *C. mandshurica*

收稿日期: 2016-04-19, 退修日期: 2016-05-18。

基金项目: 国家自然科学基金(31270461); 山西师范大学校基金(ZR1211)。

This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (31270461) and Shanxi Normal University Fundation (ZR1211)。

作者简介: 梁林峰(1966-), 男, 高级工程师, 研究方向为林业调查规划设计及植物资源保护管理(E-mail: 15803513989@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: mycorrhiza@sina.com)。

branch length was Jingangku > Wangzhuangbao > Qiliyu > Xingtangsi > Mianshan > Dahe, which exhibited a weakening trend from the first-class to the third-class. Fractal dimension was an important indicator, and clarified the complexity of plants. The greater the fractal dimension value, the stronger the plant occupied the space and the greater the potential use of space resources. The crown fractal dimension and bifurcation dimension of *C. mandshurica* were the highest in Jingangku. The crown structure was closely related to biomass. Leaf area, leaf biomass, and branch biomass from the side reflected the architectural characteristics of the plants. We analyzed the relationship among plant architecture, leaf area, and aboveground biomass. Leaf area and aboveground biomass of *C. mandshurica* gradually decreased from north to south of Shanxi Province. The average leaf area, leaf biomass, and branch biomass of *C. mandshurica* were the greatest in Jingangku. Results showed that the growth of *C. mandshurica* was the best in Jingangku compared with the other study areas, thus reflecting the area in which climate conditions were optimum for *C. mandshurica*.

Key words: *Corylus mandshurica*; Plant architecture; Fractal dimension; Aboveground biomass; Shanxi Province

构型分析的实质就是研究植物体不同构件(包括树形、冠形、分枝结构以及芽、枝、叶等)在空间的排列方式,以及内在生物量构造组成、配比结构和组成单位的数量动态变化等方面的内容^[1],是植物内部遗传信息在一定时间内的外部形态表现^[2,3]。植物构型是植物与环境相互作用、相互适应的最终产物,其与功能的相互作用及互馈关系决定了植被的发展与演替^[4]。分枝格局(枝系构型)是植物构型特征分析的主要内容,其空间位置基本上是由生长过程中的3个形态学性状决定的,即枝长、分枝角度和分枝率。同时,由于植物体是一个复杂的大系统,非线性、非平衡性、多尺度性、自组织性、自相似性和随机性是这一系统最本质的属性,而这些属性在线性分析中往往被忽略或被近似看待^[5]。所以,从植物的复杂性本质来看,仅以分枝格局来研究植物的构型特征是不充分的^[6,7],必须与非线性科学(分形理论)相结合,才可能得到令人满意的结果^[5]。分形(fractal)理论是法国数学家B. B. Mandelbrot于20世纪70年代中期提出的数学概念,之后广泛利用分形理论来模拟植物形态和森林外廓等^[8]。同时,冠型对植株的生长和生产力具有重要影响,是植株生长的主要决定因子之一。所以,利用树冠分形维数研究植株的构型特征也被广泛采用^[9]。此外,还有许多研究发现,植株冠型结构与其生物量密切相关^[10,11]。

毛榛(*Corylus mandshurica* Maxim.)为桦木科

(Betulaceae)榛属(*Corylus*)落叶灌木。分布于北方地区山坡灌丛中或林下,是维持植物群落结构和群落演替过程的重要组成部分,同时,其种子可食用,种仁含有人体必须的氨基酸及紫杉醇,具有防癌作用;嫩叶可做饲料;是一种蜜源植物;木材质地较好,具有一定的商业用途^[12]。因此,毛榛具有重要的经济价值和生态价值。近年来,对毛榛体内活性物质及其药用价值、栽培和开发利用等开展了许多研究^[12-16],而在毛榛的生态特性方面,仅见程永生等^[12]于2012年对山西霍山毛榛群落区系特征及分布格局进行了初步研究。笔者基于毛榛植株各构件的空间分布格局、构型特征,以及其个体在构件水平上是如何适应环境等问题,以山西省内分布的毛榛为研究对象,采用分枝格局、分形维数的方法,从植物功能结构方面进行了深入研究,以期进一步认识山西省毛榛的种群动态和生态适应性,为毛榛资源的保护和开发提供科学依据。

1 研究区域自然概况

山西省地处 $34^{\circ}35' \sim 40^{\circ}43'N$ 、 $110^{\circ}15' \sim 114^{\circ}33'E$ 之间,为黄土覆盖的山地型高原,海拔高差2816 m,境内气候条件差异显著^[17]。山西属温带大陆性季风气候区,处于从湿润地区向干旱地区的过渡地带,全境属半湿润、半干旱气候。海拔高的地方较湿润,特别是阴坡;海拔低的地方较干旱,特别是阳坡。山西境内地带性土壤主要是恒山

以北的栗钙土和恒山以南的褐土^[18]。本研究选取山西省中条山的大河林场,太岳山的绵山林场、七里峪林场和兴唐寺林场,五台山的金岗库林场,恒山的王庄堡林场作为研究样地,各样地的地形和气候因子概况详见表1和表2。

2 研究方法

2.1 样地及样株选择

在山西省毛榛分布的6个林场(大河林场、绵山林场、兴唐寺林场、七里峪林场、金岗库林场、王庄堡林场)各设置1个样地(选取植株密度、胸径、高度相差不大的毛榛群落),于样地中设置5 m×5 m的样方5个,共30个样方。于每个样方中选择1个样株(共30个样株),测定样株的高度、枝长、枝径、枝间距、枝条倾角等参数。样株的选取标准为:(1)生长旺盛,没有病虫危害,没有动物啃食迹象,没有人为破坏;(2)生长良好;(3)样株与其它同种或不同种植物保持一定的距离,采用实地测量的方法进行选择。

2.2 构型指标及其计测方法

本研究直接测定的构型指标主要有:毛榛的枝长、枝径、分枝角度、一级分枝数、二级分枝数等。具体测量方法:用钢卷尺测定每株毛榛的高度、枝长、枝径、枝间距等参数;用量角器测定枝

条倾角。然后确定枝序,并计算分枝率和枝径比。

(1) 枝序 本研究采用的枝序确定方法为:由内到外,由下到上,下层的第1枝为第1级,两个第1级相遇为第2级,两个第2级相遇则为第3级,依此类推。如有不同枝级相遇,相遇后则取较高的作为枝级^[19]。

(2) 分枝率 分枝率是指某一枝级与其相邻枝级枝数的比率^[20],它是对树冠分枝强度的一种度量,也反映了枝群体各枝级间的数量配置状况^[21]。分枝率分为总体分枝率和逐步分枝率,总体分枝率是从整体上表征植物的分枝能力,是一个综合不同枝级枝条数量的平均值;逐步分枝率表示不同枝级枝条的分枝能力。计算公式如下:

① 总体分枝率 (overall bifurcation ratio, *OB*_{*R*})

$$OB\text{R} = (N_T - N_S) / (N_T - N_1)$$

式中, $N_T = \sum N_i$ 。 N_T 表示所有枝级中枝条总数, N_S 为最高级枝条数, N_1 为第1级的枝条数。

② 逐步分枝率 (stepwise bifurcation ratio, *SBR*_{*i*:(*i*+1)})

$$SBR_{i:(i+1)} = N_i / N_{i+1}$$

式中, N_i 和 N_{i+1} 分别表示第*i*和第*i*+1级的枝条总数。

(3) 枝径比 (ratio of branch diameter, *RBD*_{*(i*+1):*i*})

$$RBD_{(i+1):i} = D_{i+1} / D_i$$

表1 调查样地的地形因子概况

Table 1 Topographical factors of different plots

| 样地 Plot | 海拔(m) Elevation | 纬度(°) Latitude | 经度(°) Longitude | 坡度(°) Slope | 坡向(°) Aspect |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|-----------------|
| 大河林场 Dahe forest area | 1601 | 35.593 | 112.054 | 26 | 180 |
| 绵山林场 Mianshan forest area | 1658 | 37.038 | 112.073 | 24 | 13 |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | 1660 | 36.416 | 112.423 | 15 | 121 |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | 1674 | 36.765 | 112.055 | 28 | 2 |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | 1646 | 39.056 | 113.569 | 25 | 357 |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | 1680 | 39.682 | 113.728 | 18 | 218 |

表2 各样地的气候因子

Table 2 Climatic factors of different plots

| 样地 Plot | 年降水量 Annual precipitation (mm) | ≥10°C年积温 ≥10°C annual accumulated temperature (°C) | 年均温 Annual mean temperature (°C) | 1月均温 January mean temperature (°C) | 7月均温 July mean temperature (°C) | 无霜期 Frost-free period (d) |
|---------------------------------|---|--|---|---|--|------------------------------------|
| 大河林场 Dahe forest area | 700 | 4250.9 | 12.3 | 1.9 | 28.5 | 165 |
| 绵山林场 Mianshan forest area | 600 | 3580.0 | 10.7 | -5.1 | 23.9 | 176 |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | 662 | 3600.0 | 10.0 | -10.4 | 21.6 | 170 |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | 600 | 3500.0 | 9.3 | -4.0 | 25.6 | 120 |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | 450 | 2000.0 | 7.0 | -18.9 | 9.6 | 75 |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | 425 | 2600.0 | 6.2 | -12.7 | 17.4 | 143 |

式中, D_{i+1} 和 D_i 分别是第 $i+1$ 和第 i 级枝条的直径。

2.3 分形维数指标及其计测方法

分形维数指标包括树冠分维数和分枝分维数。

(1) 树冠分维数

本研究采用贝氏法, 该方法由 Berezovskava 于 1997 年提出, 是一种测定树冠分维数较简单的方法^[22,23], 其原理为: 树木枝条可区分为一级分枝、二级分枝、三级分枝, ……, 假定 k 为连续分枝级别枝长之比的平均值($k < 1$), r 为每一级分枝数目, 根据 Mandelbrot 的分维数理论^[23], 可推导出树冠分维数, 即:

$$FD = -\ln r / \ln k$$

(2) 分枝分维数

毛榛各级分枝的分枝数(SB)、枝长(BL)、分枝分维数(D)之间的关系计算公式为:

$$SB = C \times BL^D$$

式中, C 为比例系数(常数)。将上式变型得:

$$\ln SB = \ln C + D \ln BL$$

可见, SB 与 BL 在双对数坐标下存在一种线性关系, D 为该直线的斜率。因此, 分枝分维数的计算方法是在双对数坐标下对 SB 与 BL 的一系列值进行线性回归, 所得拟合直线的斜率(或其转换)即为分枝分维数的值^[5]。

2.4 叶面积和地上生物量测定

将每个样地选出的标准株伐下, 迅速摘下全部叶片, 分别测定叶片和枝干的鲜重。将以上样品放入硅胶中带回实验室, 从中随机选取 50 片叶子, 采用 LI-3000C 便携式叶面积仪测定叶面积。将叶片和枝干放入 80℃ 烘箱中烘干至恒重后各自称量, 测定地上生物量。

2.5 数据统计分析

运用 Excel 2003 软件对原始测定数据进行整理。运用 SPSS 19.0 软件采用单因素方差分析法对总体分枝率、逐步分枝率、分枝角度、分枝长度、枝径比等数据进行差异性检验, 采用 Pearson 相关分析法对上述各分枝格局指标与气候因子进行相关性分析, 采用直线回归分析方法计算分枝分维数。采用 Origin 8.5 软件制图。

3 结果与分析

3.1 毛榛分枝率

3.1.1 毛榛总体分枝率(OBR)

从各样地毛榛的总体分枝率来看(表 3), 大河林场、绵山林场、兴唐寺林场、七里峪林场、金岗库林场和王庄堡林场的毛榛总体分枝率均不高, 但不同生境下的毛榛总体分枝率差异显著, 说明不同生境下的毛榛对空间资源的利用率不同。总体分枝率越小, 说明当年新生的枝条越多。五台山金岗库林场的毛榛总体分枝率在 6 个林场中最小, 中条山大河林场的毛榛分枝率最大, 说明金岗库林场毛榛的同化枝数量要大于其它地区。

从各样地气候因子与毛榛分枝格局指标(除总体分枝率外, 均采用相关表中第一列数据计算)的相关性来看(表 4), 除无霜期外, 各样地的气候因子与毛榛分枝角度(BA)、分枝长度(BL)、枝径比(RBD)均显著相关; 年积温对毛榛分枝角度(BA)、分枝长度(BL)、枝径比(RBD)的影响大于其它气候因子; 7 月均温对逐步分枝率(SBR)的影响大于其它气候因子; 毛榛总体分枝率(OBR)只与 1 月均温的影响显著。说明影响毛榛分枝格局的气候因子总体上主要是温度与降水。

表 3 各样地毛榛的总体分枝率

Table 3 Overall bifurcation ratios of *Corylus mandshurica* in different plots

| 样地 Plot | N_T | N_S | N_1 | OBR |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 大河林场 Dahe forest area | $67.20 \pm 4.16a$ | $36.00 \pm 1.41a$ | $9.40 \pm 1.50a$ | $0.54 \pm 0.02a$ |
| 绵山林场 Mianshan forest area | $25.60 \pm 4.88d$ | $18.60 \pm 3.60d$ | $2.60 \pm 0.80c$ | $0.32 \pm 0.04bc$ |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | $31.18 \pm 5.38c$ | $21.30 \pm 4.34c$ | $3.10 \pm 1.22bc$ | $0.35 \pm 0.03c$ |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | $35.20 \pm 9.72b$ | $22.00 \pm 5.06c$ | $4.00 \pm 1.41b$ | $0.42 \pm 0.05b$ |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | $34.20 \pm 2.93bc$ | $24.80 \pm 3.76b$ | $2.20 \pm 0.40c$ | $0.29 \pm 0.07c$ |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | $32.45 \pm 4.37c$ | $22.40 \pm 4.65bc$ | $2.50 \pm 0.46c$ | $0.31 \pm 0.05bc$ |

注: $N_T = \sum N_i$, 表示所有枝级中枝条总数; N_S 表示最高级枝条数; N_1 表示第 1 级的枝条数; OBR 表示总体分枝率。同列数据后不同小写字母表示差异显著($n = 5$, $P < 0.05$), 同下。

Notes: $N_T = \sum N_i$ is the total number of branches of all branch levels; N_S is the highest-level number of branches; N_1 is the first level number of branches; OBR is the overall bifurcation ratio. Lowercase letters after the same column indicate significant differences ($n = 5$, $P < 0.05$), same below.

表 4 各样地气候因子与毛榛分枝格局指标的 Pearson 相关性分析
 Table 4 Pearson correlation analysis between climate factors and branching pattern indexes of *Corylus mandshurica* in different plots

| 气候因子 Climatic factor | 总体分枝率 <i>OBR</i> | 逐步分枝率 <i>SBR</i> | 分枝角度 <i>BA</i> | 分枝长度 <i>BL</i> | 枝径比 <i>RBD</i> |
|---|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 年降水量 Annual precipitation | 0.732 | -0.831 * | -0.893 * | -0.918 ** | 0.935 ** |
| ≥10°C年积温 ≥10°C annual accumulated temperature | 0.782 | -0.860 * | -0.935 ** | -0.988 ** | 0.985 ** |
| 年均温 Annual mean temperature | 0.738 | -0.681 | -0.823 * | -0.908 * | 0.920 ** |
| 1月均温 January mean temperature | 0.853 * | -0.736 | -0.906 * | -0.905 * | 0.897 * |
| 7月均温 July mean temperature | 0.777 | -0.869 * | -0.934 ** | -0.957 ** | 0.918 ** |
| 无霜期 Frost-free period | 0.322 | -0.570 | -0.552 | -0.826 * | 0.779 |

Notes: *OBR*, Overall bifurcation ratio; *SBR*, Stepwise bifurcation ratio; *BA*, Branch angle; *BL*, Branch length; *RBD*, Ratio of branch diameter. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$. Same below.

3.1.2 毛榛逐步分枝率(*SBR*)

从各样地毛榛的逐步分枝率来看(表5), $SBR_{2:3}$ 呈现出: 金岗库林场 > 王庄堡林场 > 绵山林场 > 兴唐寺林场 > 七里峪林场 > 大河林场, 金岗库林场的 $SBR_{1:2}$ 和 $SBR_{2:3}$ 分别为 4.23 和 2.81, 为各林场的最大值, 说明金岗库林场的毛榛不同枝级枝条的分枝能力高于其它林场, 这与总体分枝率的趋势(表3)恰恰相反。从表4的 Pearson 相关性分析可以看出, 7月均温对逐步分枝率的影响大于其它气候因子。

表 5 各样地毛榛的逐步分枝率

Table 5 Stepwise bifurcation ratios of *Corylus mandshurica* in different plots

| 样地 Plot | 逐步分枝率 <i>SBR</i> _{1:2} | 逐步分枝率 <i>SBR</i> _{2:3} |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 大河林场 Dahe forest area | 2.56 ± 1.07c | 1.69 ± 0.89c |
| 绵山林场 Mianshan forest area | 3.27 ± 1.32b | 1.83 ± 1.27c |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | 2.47 ± 1.12c | 1.72 ± 0.74c |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | 2.32 ± 0.94c | 1.65 ± 0.67c |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | 4.23 ± 1.74a | 2.81 ± 2.11a |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | 3.56 ± 1.34b | 2.22 ± 1.89b |

3.2 毛榛分枝角度(*BA*)

从山西毛榛的分枝角度来看(表6), 各样地毛榛的分枝角度差异显著, 从1级分枝角度来看, 金岗库林场的最大, 说明其空间分布最多, 能吸收环境中更多的养分, 对当地空间资源的利用率最高; 而大河林场的毛榛分枝角度较小, 说明其对空间资

源利用率最低。总体上来看, 各研究地的毛榛分枝角度从1级~3级有先增大再减小(或持续减小)的趋势。从表4的 Pearson 相关性分析可以看出, 年积温对分枝角度的影响较大。

3.3 毛榛分枝长度(*BL*)

从山西毛榛的分枝长度来看(表7), 各样地毛榛的分枝长度差异较大, 金岗库林场的毛榛各级分枝长度均大于其它地区, 说明金岗库林场的毛榛伸展能力最强, 对空间环境资源的利用率最高, 枝条长势较好, 生活能力较强; 分枝长度最小的是大河林场。整体来看, 各林场毛榛的分枝长度从1级~3级均呈现逐渐减小的趋势, 说明枝条的空间伸展能力逐渐减小, 受环境条件的抑制增强, 也说明植株对环境资源的利用有一定的限度。

3.4 毛榛枝径比(*RBD*)

从各样地毛榛枝径比来看(表8), 太岳山系的七里峪林场、绵山林场和兴唐寺林场毛榛的枝径比相差不大, 其原因可能是这3个林场同处于太岳山, 气候特征基本相同, 所以枝径比相差不大; 金岗库林场的毛榛枝径比显著小于太岳山系3个林场; 而大河林场的 $RBD_{2:1}$ 却显著大于其它林场。由于大河林场炎热多雨, 毛榛上级枝径和下级枝径的变化缓慢, 所以该地的枝径比值显著大于其它研究地。从表3和表5可看出, 在6个林场中, 金岗库林场的毛榛总体分枝率最小、逐步分枝率最大, 这可能是它们对环境的一种适应策略。

3.5 毛榛枝系的分形特征

3.5.1 树冠分维数

从各样地毛榛树冠分维数可见(图1), 五台山(金岗库林场)毛榛树冠分维数最大, 说明该地毛榛

表 6 各样地毛榛的分枝角度
Table 6 Branch angles of *Corylus mandshurica* in different plots

| 样地 Plot | 1 级分枝角度(°) First class branch angle | 2 级分枝角度(°) Second class branch angle | 3 级分枝角度(°) Third class branch angle |
|---------------------------------|--|---|--|
| 大河林场 Dahe forest area | 12.00 ± 5.02d | 32.20 ± 8.28c | 31.60 ± 8.52b |
| 绵山林场 Mianshan forest area | 28.80 ± 8.90c | 37.20 ± 11.02b | 30.00 ± 8.67b |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | 22.30 ± 4.32c | 41.60 ± 7.56b | 34.20 ± 6.76a |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | 16.80 ± 3.06d | 43.80 ± 6.24a | 35.20 ± 5.91a |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | 43.00 ± 2.45a | 32.60 ± 2.15b | 28.60 ± 1.85b |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | 36.20 ± 3.05b | 31.30 ± 1.78b | 29.33 ± 1.94b |

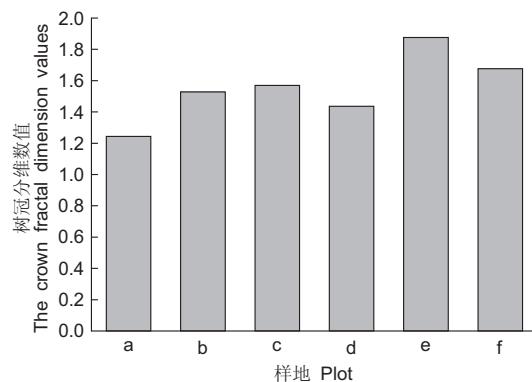
表 7 各样地毛榛的分枝长度
Table 7 Branch lengths of *Corylus mandshurica* in different plots

| 样地 Plot | 1 级分枝长度(m) First class branch length | 2 级分枝长度(m) Second class branch length | 3 级分枝长度(m) Third class branch length |
|---------------------------------|---|--|---|
| 大河林场 Dahe forest area | 0.35 ± 0.04d | 0.17 ± 0.05c | 0.15 ± 0.06c |
| 绵山林场 Mianshan forest area | 0.43 ± 0.07c | 0.27 ± 0.07c | 0.23 ± 0.07c |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | 0.46 ± 0.17c | 0.29 ± 0.08c | 0.29 ± 0.07b |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | 0.50 ± 0.02c | 0.31 ± 0.03c | 0.26 ± 0.01c |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | 0.92 ± 0.21a | 0.70 ± 0.18a | 0.59 ± 0.16a |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | 0.74 ± 0.13b | 0.54 ± 0.11b | 0.43 ± 0.12b |

表 8 各样地毛榛枝径比
Table 8 Ratios of branch diameter of *Corylus mandshurica* in different plots

| 样地 Plot | 枝径比 $RBD_{2:1}$ | 枝径比 $RBD_{3:2}$ |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 大河林场 Dahe forest area | 0.80 ± 0.08a | 0.73 ± 0.23a |
| 绵山林场 Mianshan forest area | 0.65 ± 0.13b | 0.69 ± 0.06b |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | 0.69 ± 0.12b | 0.72 ± 0.26b |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | 0.63 ± 0.16b | 0.68 ± 0.10b |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | 0.44 ± 0.23c | 0.50 ± 0.29c |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | 0.53 ± 0.54c | 0.55 ± 0.36c |

枝系的空间格局较复杂, 枝系向不同方向的伸展越充分, 利用和占据空间的能力越强, 对空间资源的利用潜能就越大。毛榛喜阴耐寒, 在气温较低的地区长势更好, 五台山和恒山(王庄堡林场)地处山西的北端, 温度比太岳山系(七里峪林场、绵山林场和兴唐寺林场)和中条山(大河林场)低, 所以金岗库林场和王庄堡林场的毛榛树冠分维数较其它林场高。



a: 大河林场(Dahe forest area); b: 兴唐寺林场(Xingtangsi forest area); c: 七里峪林场(Qiliyu forest area); d: 绵山林场(Mianshan forest area); e: 金岗库林场(Jingangku forest area); f: 王庄堡林场(Wangzhuangbao forest area)。

图 1 各样地毛榛的树冠分维数
Fig. 1 Crown fractal dimensions of *Corylus mandshurica* in different plots

3.5.2 分枝分维数

从各样地毛榛分枝分维数来看(表9)五台山金岗库林场毛榛分枝分维数最大, 这一结果与树冠分维数的结果相同。分枝分维数值越大, 表明植物对空间资源的利用能力越强。五台山地区环境条件适合毛榛生长, 因此毛榛对资源的利用效率也最高。

表 9 各样地毛榛的分枝分维数
Table 9 Bifurcation dimensions of *Corylus mandshurica* in different plots

| 样地 Plot | 线性回归方程 Linear regression equation | 决定系数 Coefficient of determination |
|------------------------------------|---|---|
| 大河林场 Dahe forest area | $y = 1.3801x + 3.6619$ | 0.9375 |
| 绵山林场 Mianshan forest area | $y = 1.4174x + 4.4796$ | 0.9786 ** |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | $y = 1.4262x + 4.3537$ | 0.9782 * |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | $y = 1.5857x + 4.9356$ | 0.9774 * |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | $y = 1.7356x + 4.9622$ | 0.9871 ** |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | $y = 1.6537x + 4.379$ | 0.9844 ** |

3.6 毛榛叶面积和生物量

从山西毛榛叶面积和地上生物量来看(表 10), 各样地毛榛叶面积的差异显著, 从北到南叶面积表现出逐渐减小; 而枝生物量的表现趋势与叶面积相同。金岗库林场的毛榛叶面积大于其它几个林场, 说明其光合能力较强, 物质积累较快。可见, 在山西毛榛几个分布区中, 毛榛对五台山地区的环境适应性最强, 说明该地区最适合毛榛的生长和繁衍。

表 10 各样地毛榛叶面积和地上生物量
Table 10 Leaf area and aboveground biomasses of *Corylus mandshurica* in different plots

| 样地 Plot | 叶面积 平均值 (cm^2) Average leaf area | 叶生物量 平均值(g) Average leaf biomass | 枝生物量 平均值(g) Average branch biomass |
|------------------------------------|---|--|--|
| 大河林场 Dahe forest area | 32.35 | 65 | 236 |
| 绵山林场 Mianshan forest area | 35.32 | 75 | 253 |
| 兴唐寺林场 Xingtangsi forest area | 42.24 | 87 | 289 |
| 七里峪林场 Qiliyu forest area | 47.31 | 123 | 321 |
| 金岗库林场 Jingangku forest area | 48.96 | 150 | 347 |
| 王庄堡林场 Wangzhuangbao forest area | 46.38 | 135 | 336 |

4 讨论

4.1 分枝率、分枝长度及分枝角度

构型是植物外貌对环境适应的具体表现, 它随

环境胁迫压力的改变出现调整, 以获取最大的资源量^[24]。即使在同一生长阶段, 由于环境、资源的异质性, 同一物种间的构型也不同^[25]。几乎在所有植物构型分析中, 分枝率都被作为一个重要指标, 用它来表示枝条的分枝能力和各枝级间的数量配置状况^[26]。

五台山的金岗库林场位于山西东北部, 与其它地区相比, 纬度和海拔较高, 气温偏低, 年均温只有7℃, 毛榛为了适应这种环境, 会萌发出很多新枝, 竞争环境中的光照、CO₂、水分等资源, 保证其更好地生长和繁衍。研究发现, 6个林场毛榛的总体分枝率和逐步分枝率呈现出相反的发展趋势, 这与王丽娟等^[4]对准噶尔盆地梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)、白梭梭(*Haloxylon persicum* Bunge ex Boiss. Et Buhse)植物构型的研究结果相同。

植株的分枝角度是衡量其空间分布能力的重要指标, 植株的分枝角度与光照有关, 在一定程度上反映了光照对枝条生长的影响。分枝长度, 特别是当年生枝条的长度, 可以间接反映植株的年生长量, 同样还可以反映生长活力的强弱^[27]。山西省五台山金岗库林场毛榛植株的1级分枝角度和分枝长度均大于其它样地, 说明该地的毛榛对空间资源的利用率最大, 能较好地适应当地气候条件。研究发现, 各级分枝角度和分枝长度从1级到3级均有减小的趋势, 说明五台山金岗库的毛榛通过伸长、扩展、增大倾角等方式使自身更加适应环境。本研究认为, 不同样地分枝角度和分枝长度的差异是受不同地理位置的温度和降水影响的。何明珠^[8]对荒漠植物的研究认为, 光照是决定植株形态的限制因素, 这与本研究结果不同。可能是因为不同研究对象的生境差异巨大所引起的。本研究中毛榛的生境是林下或林缘, 与荒漠中强烈的光照条件相比, 植株地上部分接受光照明显不足。此外, 植株形态差异也可能导致其对光照条件的潜在适应性不同^[27], 与生长在沙漠环境里的梭梭等植物相比, 毛榛对强光照的适应性显然不足。

4.2 分形维数

植物不同的枝级有不同的分枝数目和分枝长度, 可采用分形几何方法来研究分枝格局。分形维数能较好反映植物的空间占有能力。一般来说, 分形维数值越大, 植物的空间占有能力越强, 利用空

间资源的潜能越大。我们对山西省毛榛树冠分维数和分枝分维数的研究结果表明,五台山金岗库林场毛榛的分形维数最大,使叶片填充能力提高,光合同化能力增强,促进了毛榛对外部资源的获取;同时该地毛榛的分形维数较大,也与其形态学特征相吻合。以上分形维数表明该地毛榛对空间资源的利用潜能最大。

4.3 生物量

过去对植物表型可塑性的研究多集中在叶片如何适应变化的环境,而忽视了植物整体可塑性方面的研究(如植株生长和生物量分配的可塑性)^[28],而正是这种整体的可塑性决定了植物能否在不同环境中存活和生长。植株叶片的大小和生物量能从侧面反映其与环境的适应程度。本研究发现,中条山大河林场的毛榛叶面积、叶生物量、枝生物量的平均值均小于太岳山七里峪林场、绵山林场和五台山金岗库林场,表明不同地区毛榛对空间资源的利用率不同。这与胡晓静等^[29]对秦岭南坡栓皮栎实生苗构型研究结果相同,说明叶面积的变化和生物量的变化可以反映在构型变化上,通过构型变化形成不同的适应策略。

5 结论

在植物生长过程中,对植物构型的分析能更好地了解植株如何竞争空间资源,枝系如何配比等问题。综合植物分枝格局的研究结果,能更好地反映植物生长对环境的响应机制,对于植物群落结构的维持和种群动态具有指导意义。本文通过对山西省大河林场、绵山林场、兴唐寺林场、七里峪林场、金岗库林场和王庄堡林场毛榛的构型特征和分维数的研究,得出山西省毛榛的总体分枝率和逐步分枝率($SBR_{1:2}$ 、 $SBR_{2:3}$)呈相反的发展趋势;金岗库林场的毛榛1级分枝角度和分枝长度最大,且从1级到3级均有减小的趋势;树冠分维数、分枝分维数、叶面积和地上生物量大致表现为从北到南均逐渐减小。毛榛植物多生长在寒冷阴湿的林下或山坡灌丛,为了适应寒冷的气候,会长出更多的枝条,同时尽量向空间延伸,提高对空间资源的利用率,上一年的枝条同化率降低,枝径比值较小,这可能是毛榛对环境的一种适应策略。

参考文献:

- [1] 孙书存,陈灵芝.辽东栎植冠的构型分析[J].植物生态学报,1999,23(5):433-440.
- [2] Sun SC, Chen LZ. Architectural analysis of crown geometry in *Quercus liaotungensis*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1999, 23(5): 433-440.
- [3] Harper JL. *Population Biology of Plants* [M]. London: Academic Press, 1977.
- [4] Wheat DW. Sylleptic branching in *Myrsine floridana*(Myrsinaceae)[J]. *Am J Bot*, 1980, 67: 490-499.
- [5] 王丽娟,孙栋元,赵成义,李菊艳,盛钰.准噶尔盆地梭梭、白梭梭植物构型特征[J].生态学报,2011,31(17):4952-4960.
- [6] Wang LJ, Sun DY, Zhao CY, Li JY, Sheng Y. Plant architecture characteristics of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* in Zhungar Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4952-4960.
- [7] 李火根,黄敏仁.分形理论及其在植物研究中的应用[J].植物学通报,2001,18(6):684-690.
- [8] Li HG, Huang MR. Fractal theory and its application to plants researches[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(6): 684-690.
- [9] Sprugel DG, Hinckley TM, Schaap W. The theory and practice of branch autonomy[J]. *Ann Rev Ecosyst*, 1991, 22: 309-334.
- [10] 陈波,宋永昌,达良俊.木本植物的构型及其在植物生态学研究的进展[J].生态学杂志,2002,21(3):52-56.
- [11] Chen B, Song YC, Da LJ. Woody plant architecture and its research in plant ecology [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(3): 52-56.
- [12] 何明珠.荒漠植物枝系构件及其持水力研究[D].兰州:甘肃农业大学,2004:10.
- [13] He MZ. Branching module and water-retaining capability of desert plants[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2004: 10.
- [14] 赵茂成,高素萍,潘一凡,郑加强.分形理论及其在林业中的应用与研究进展[J].世界林业研究,2002,15(2):28-34.
- [15] Zhao MC, Gao SP, Pan Y F, Zheng JQ. Fractal theory and its applications and progress in forestry [J]. *World Forestry Research*, 2002, 15(2): 28-34.
- [16] John A. Crown structure in western hemlock, douglas-fir and grand fir in western Washington: horizontal distribution of foliage within branches[J]. *Can J For Res*, 1996, 26(1): 128-142.
- [17] Ninecents U, Kull O. Effects of light availability and tree size on the architecture of assimilative surface in the canopy of *Picea abies*: variation in needle morphology [J]. *Tree Physiol*, 1995, 15: 307-315.
- [18] 程永生,苗艳明,毕润成.山西霍山毛榛群落区系特征及分布格局的研究[J].山西师范大学学报:自然科学版,2012(1):71-74.

- Cheng YS, Miao YM, Bi RC. Study on community floristic characteristics and distribution pattern of *Corylus mandshurica* community in Huoshan Mountain of Shanxi Province [J]. *Journal of Shanxi Teacher University: Natural Science Edition*, 2012(1): 71–74.
- [13] 徐秀芳, 张海洋, 张丽敏. 不同榛树叶中过氧化物酶同工酶的研究 [J]. *林业科技*, 2005, 30(2): 1–3.
- Xu XF, Zhang HY, Zhang LM. Peroxidase isozyme in different hazel leaves [J]. *The Forestry Science and Technology*, 2005, 30(2): 1–3.
- [14] 王立. 黑龙江省山刺玫、毛榛鞣质成分及体外抗肿瘤活性研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- Wang L. The tanned composition and the antitumor study *in vitro* of *Rosa davurica* Pall. and *Corylus mandshurica* were evaluated in Heilongjiang province mountain [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2006.
- [15] 刘丽, 李海山. 经济植物毛榛人工丰产栽培技术 [J]. *中国林副特产*, 2011(2): 54–55.
- Liu L, Li HS. Economic plant *mandshurica* artificial cultivation technology [J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2011(2): 54–55.
- [16] 罗凡, 费学谦, 汤富彬, 李辛雷. 高效液相色谱-质谱联用技术测定毛榛中的紫杉醇含量 [J]. *林业科学研究*, 2011, 24(6): 779–783.
- Luo F, Fei XQ, Tang FB, Li XL. Simultaneous determination of paclitaxel in hazelnut by HPLC-MS /MS [J]. *Forest Research*, 2011, 24(6): 779–783.
- [17] 米湘成, 张金屯, 张峰, 上官铁梁, 李爱华, 郑凤英. 山西高原植被与土壤分布格局关系的研究 [J]. *植物生态学报*, 1999, 23(4): 336–344.
- Mi XC, Zhang JT, Zhang F, Shangguan TL, Li AH, Zheng FY. Analysis of relationships between patterns of vegetation and soil in Shanxi plateau [J]. *Acta Phytogeographica Sinica*, 1999, 23(4): 336–344.
- [18] 姚启明, 张纪仲. 山西省地理 [M]. 太原: 山西教育出版社, 1994.
- Yao QM, Zhang JZ. *Shanxi Geographical* [M]. Taiyuan: Shanxi Education Publishing House, 1994.
- [19] 郭泉水, 丛者福, 王春玲. 榛梭与肉苁蓉生态学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 50–77.
- Guo QS, Cong ZF, Wang CL. Ecological Studies of *Haloxylon* and *Cistanche Desericala* [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009: 50–77.
- [20] Steingraeber DA, Waller DM. Non-stationarity of tree branching patterns and bifurcation ratios [J]. *Proc R Soc Lond*, 1986, B228: 187–194.
- [21] 黎云祥, 陈利, 杜道林, 刘玉成. 四川大头茶的分枝率和顶芽动态 [J]. *生态学报*, 1998, 18(3): 309–314.
- Li YX, Chen L, Du DL, Liu YC. The bifurcation ratios and leader-bud dynamics of *Gordonia acuminata* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3): 309–314.
- [22] Berezovskava FS, Karev GP, Kisliuk OS. A fractal approach to computer-analytical modelling of tree crowns [J]. *Trees*, 1997, 11: 323–327.
- [23] Mandelbrot BB. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1982.
- [24] 许强, 杨自辉, 郭树江, 王强强. 榛梭不同生长阶段的枝系构型特征 [J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(4): 50–54.
- Xu Q, Yang ZH, Wang QQ. Branch system configuration features of *Haloxylon ammodendron* in different growth stages [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(4): 50–54.
- [25] 李钰, 赵成章, 侯兆疆, 马小丽, 张茜. 高寒退化草地狼毒种群个体大小与茎、叶的异速生长 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 241–246.
- Li Y, Zhao CZ, Hou ZJ, Ma XL, Zhang Q. Body size and stem- and leaf allometry of *Stellera chamaejasme* in degraded alpine grassland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 241–246.
- [26] Borchert R, Slade NA. Bifurcation ratios and the adaptive geometry of trees [J]. *Bot Gaz*, 1981, 142(3): 394–401.
- [27] 宋于洋. 榛梭构件格局的环境变异 [J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(6): 60–65.
- Song YY. The environmental variations of component pattern of *Haloxylon ammodendron* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(6): 60–65.
- [28] Valladares F, Wright SJ, Lasso E, Kitajima K, Pearcy RW. Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a Panamanian rainforest [J]. *Ecology*, 2000, 81(7): 1925–1936.
- [29] 胡晓静, 张文辉, 何景峰. 秦岭南坡栓皮栎实生苗的构型分析 [J]. *林业科学*, 2015, 51(9): 158–164.
- Hu XJ, Zhang WH, He JF. Architectural analysis of *Quercus variabilis* seedlings in the south slopes of Qinling mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(9): 158–164.

(责任编辑: 张平)