

# 石羊河下游 7 种沙生灌木的构型比较

郭春秀,袁宏波,徐先英,刘虎俊,王多泽,李学敏,刘开琳

(甘肃省治沙研究所 & 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,兰州 730070)

**摘要:**为了明确比较相同环境下不同灌木的构型特征,揭示其防风固沙机理,也为仿真模拟研究提供基础数据,该研究对石羊河下游的相同环境下,高度相似的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙蒿(*A. arenaria*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、红砂(*Reaumuria kaschgarica*)7种灌木的分枝角度、枝长和分枝数等构型指标进行测量分析。结果表明:(1)7种灌木中有6种的平均分枝角度自冠层内部向外逐渐变大,枝序级可分为四级,除油蒿外,其余灌木的冠层外枝均较长。(2)分枝分维数以红砂最大,其次为梭梭和白刺,沙拐枣和花棒最小;除梭梭外,其余灌木的总体分枝率都小于1。(3)除沙拐枣外,其余灌木的侧影面积随高度增加而增加,达到最大值后又逐渐减少。研究认为,生长在相似环境的灌木形成了不同构型,红砂、白刺、油蒿和花棒可归为密生枝型灌木,梭梭、沙拐枣和沙蒿则可定为疏生枝型灌木。

**关键词:**沙生灌木;植物构型;枝系结构;侧影面积

中图分类号:Q944.3

文献标志码:A

## A Comparison on Architecture of 7 Psammophyte Shrubs at Lower Reaches of Shiyang River Basin

GUO Chunxiu, YUAN Hongbo, XU Xianying, LIU Hujun, WANG Duoze, LI Xuemin, LIU Kailin  
(Gansu Desert Control Research Institute & State Key Laboratory of Desertification and Aeolian Sand Disaster Gansu Lanzhou, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The objective is to compare the different shrub architecture and uncover mechanism of controlled moving sand, also to provide the basic data for simulation research of simulated fixed-sand shrub. The crotch angles, branch length, branch number and architecture of *Haloxylon ammodendron*, *Artemisia ordosica*, *A. arenaria*, *Hedysarum scoparium*, *Calligonum mongolicum*, *Nitraria tangutorum*, *Reaumuria kaschgarica* were measured and analyzed at the lower reaches of Shiyang River Basin. The results showed that: (1) the mean of crotch angle measured seven shrubs increased gradually from inside to outer position of canopy with four branching ranks. It was only *A. ordosica* that the length of outer twigs was longer than that of inside twigs of canopy. (2) The number of branching fractal dimension of *R. kaschgarica* was bigger than that of the other 6 shrubs. Second one of branching fractal dimension was *H. ammodendron* and *N. tangutorum*, the least one was *C. mongolicum* and *H. scoparium*. The branch-stem ratio was less than one except *H. ammodendron*. (3) Except *C. mongolicum*, the number of upwind projected area increased with height of canopy, and gradually decreased at the maximizing point of upwind projected area. *R. kaschgarica*, *N. tangutorum*, *A. ordosica* and *H. scoparium* were as dense branch shrubs, as sparse branch shrubs of *H. ammodendron*, *C. mongolicum* and *A. arenaria*.

**Key words:** psammophyte shrubs; shrub architecture; ordination of branch; upwind projected area

收稿日期:2014-10-02;修改稿收到日期:2015-03-16

基金项目:国家自然科学基金(31260201);国家重点基础研究(973)发展计划前期项目(2012CB723203);甘肃省基础研究创新群体项目(145RJIA335)

作者简介:郭春秀(1979—),女,助理研究员,硕士,主要从事荒漠生态研究。E-mail:guochunxiu0414@163.com

植物构型用来表述其不同构件在空间的排列方式,是植物体不同组分的空间位置及组合,植物构型狭义上就是枝系结构和分枝格局,最终决定了枝系的复杂化程度<sup>[1]</sup>。目前,植物构型研究主要集中于农作物和热带乔灌木,分析其构型与生物量或产量关系,揭示了不同构件之间的相互作用和空间生物量分配<sup>[1-4]</sup>。植物构型与其生态环境适应性研究较多,认为植物在适应不同生态环境条件下会产生趋同或趋异适应特征,特别是表现在外部形态特征<sup>[1]</sup>。在荒漠植物的构型研究中,进行了构型分类<sup>[5-6]</sup>,提出了灌木空间结构是植物发育生长和适应的结果,认为灌木构型对其防风固沙能力有非常重要的影响<sup>[7-8]</sup>。研究沙生灌木构型对其个体构型与其防风固沙机理及效益,特别是应用其配置与建设防风固沙林具有重要意义。但是干旱区沙生灌木构型与其防风固少效能研究相对较少,仅观测分析了梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和沙蒿(*A. arenaria*)的枝条空间分布及其防风功能<sup>[9-12]</sup>。为了比较相同环境下不同灌木的构型特征,揭示其防风固沙机理,也为研究仿真固沙灌木以及仿真模拟研究提供基础数据。在石羊河下游的民勤选择了7种常见灌木,观测分析其构型,为说明其生物学特征和仿制固沙灌木提供参考。

## 1 研究区概况

试验地选在巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠交界处的石羊河下游的民勤(38°38'N, 103°05'E),海拔1 378 m,属温带干旱气候,具典型大陆性荒漠气候特征,日照强烈,昼夜温差大,干旱少雨,强烈辐射,蒸发量大,风大沙多,干燥度4.5以上,地下水位18 m左右。年日照时数2 420 h,初霜期10月上旬,终霜期4月下旬,无霜期171 d,年平均降水量116.2 mm,年平均蒸发量2 643.9 mm,年平均有风的记录占99.23%,≥5.0 m/s起沙风占全年有风日数的13.08%,4月份和5月份为大风和沙尘暴多发月。

## 2 材料和方法

在沙旱生灌木有叶期(5月),调查测定民勤的7种沙旱生灌木构型参数,被观测的7种灌木为:梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙蒿(*A. arenaria*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、红砂(*Reaumuria kashgarica*)。因这7种灌木只有白刺的叶相对较大,

其余6种的叶特化或完全退化,所以主要观测和分析指标包括高度、分枝角度、枝长、分枝率、分枝分维数、侧影面积和迎风面枝条密度。观测植株数5~7株,被观测植株均为散点分布或单株,95%植株高度为50~60 cm,生长良好,株型相对整齐,受周围树木影响较小。植株的枝序按Strahler法<sup>[3-4]</sup>确定,即由外及内确定枝序,外层的第1小枝为第1级,2个第1级相遇为第2级,2个第2级相遇后则为第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,计算各级枝数的相互比率。以10 cm为分层高度,对所观测灌木的梯级高度宽度进行测量,并计算累积面积,计算侧影面积和迎风面枝条密度<sup>[6-8,13]</sup>。冠幅计算用椭圆面积公式,其余相关因子的计算公式如下:

①分枝率:分为总体分枝率(*OBR*)和逐步分枝率(*SBR*)

$$OBR = \frac{N_t - N_s}{N_t - N_1} \quad (1)$$

$$SBR = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (2)$$

式中,  $N_t = \sum N_i$ , 为所有枝的总数;  $N_s$  为最高级枝条数;  $N_1$  为第一级的枝条数;  $N_i$  和  $N_{i+1}$  是第  $i$  和第  $i+1$  级枝条总数。

②分枝分维数(*SB*)

$$SB = C \times LB^D \quad (3)$$

式中,  $C$  为比例数(常数),  $LB$  为枝长,  $D$  分形维数,  $SB$  与  $LB$  在双对数坐标下存在一种线性关系,  $D$  为该直线的斜率,  $\ln SB = \ln C + D \ln LB$ , 通过回归方程分析就可以求出分形维数  $D$  值。

③平均侧影面积( $A$ , cm<sup>2</sup>)

$$A = \sum H_i \times W_i \quad (4)$$

式中,  $H_i$  为植株第  $i$  段高度,  $W_i$  为第  $i$  段迎风面宽度。

④迎风面枝条密度( $L_c$ , 枝/cm<sup>2</sup>)

$$L_c = \frac{P_s}{S} \quad (5)$$

式中,  $P_s$  为面积  $S$  内的枝条数目,  $S$  为迎风面面积。

⑤变异系数(%) $CV = \frac{S}{X}$  (6)

式中,  $CV(%)$  变异系数是标准差与其平均数的比,比较两组数据离散程度大小,是反映数据离散程度的绝对值。  $S$  为统计数据的标准差,为统计数据的平均数。

文中所有数据统计、指标具体数值计算均在Excel 2007下完成,用SPSS 13.0进行数据差异性比较。

### 3 结果与分析

#### 3.1 7种灌木的枝条分枝角度

所观测的7种灌木分枝角度有10.2%的小于40°,有21.4%的分枝角为60°~70°。花棒和白刺二级枝角度的平均值最小,其余6种灌木的分枝角度约呈自冠层内向外的分枝角度逐渐变小趋势(表1)。油蒿各级枝的分枝角变异最大,其各级枝的分枝角变异系数达2.4%,其余灌木的均小于2%。梭梭的一级枝分枝角度平均较四级枝大7.8°。红砂和油蒿一级枝分枝角度平均较四级枝相差分别为15.6°和24.2°,差异显著。沙蒿的一级枝分枝角度与四级枝的相差11.5°。沙拐枣三级枝分枝角度最大,一级枝和四级枝分枝角度平均值相等。白刺的分枝角度除一级枝分枝和二级分枝的小于油蒿外,三级分枝角度和四级分枝角度均大于其他灌木,是分枝角度较大的灌木。花棒的各级分枝角相对较小,是分枝角度较小的灌木。

#### 3.2 7种灌木枝条的长度特征

所观测的7种灌木中只有油蒿的冠层外枝长较大,其余则均表现为越向冠层外,枝长度越短的趋势(表2)。其中沙拐枣的四级枝长与一级枝长相差3

倍,红砂的四级枝长与第一级相差最小,为4.3 cm,平均枝长也最短,只有6.9 cm。沙蒿和梭梭各级枝长间的差异最小,沙拐枣的各级枝长变化较大,枝长变化是7种灌木的枝长中最大的。

从各级分枝长度变化以及所占比率分析,有叶的白刺有86.9%枝条长度为5~30 cm,而花棒的枝条比较长,也比较分散,主要分布区间为30~50 cm枝占37.8%。无叶的沙拐枣和梭梭的枝条长度中5~30 cm者达77.6%,棒状叶的红砂的枝长5~15 cm有63.6%,沙蒿的枝长在15~30 cm范围之间所占比例较大,约为52.3%(图1)。

#### 3.3 7种灌木枝条的分枝率

油蒿和沙蒿的总体分枝率相差近3倍,梭梭和沙拐枣的总体分枝率相差2.4倍,红砂的整体分枝率约是白刺的1/3。7种灌木的分枝率由树冠层外围向内呈逐步增加趋势。除梭梭外,其他6种灌木的总体分枝率都小于1,说明6种灌木的总体分枝是灌木树冠中心的分枝密度小于最外层。7种灌木中,差异性最大表现在三级和四级枝的数量,变异系数最大(0.93%),其次为二级和三级枝的数量,一级和二级枝的变异最小(表3)。

油蒿的逐步分枝率要比沙蒿小。沙蒿和白刺的

表1 7种灌木的不同分级枝条的平均分枝角度比较表

Table 1 The average crotch angles of 7 shrubs on different grade branches

物种 Species	平均高度 Average height /cm	平均冠幅 Average canopy /cm <sup>2</sup>	一级枝角度 First rank crotch angles /°	二级枝角度 Second rank crotch angles /°	三级枝角度 Third rank crotch angles /°	四级枝角度 Fourth rank crotch angles /°	积沙体积 Sand volume /m <sup>3</sup>	分枝角度 变异系数 CV/%
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	61.8a	2 461.73a	48.8b	40.4b	40.4b	41.0b	0.03a	0.5
沙蒿 <i>A. arenaria</i>	84.8b	7 835.49b	53.2a	47.3a	51.8a	41.7a	0.05a	0.6
红砂 <i>R. kaschgarica</i>	55.3a	7 101.74b	51.3b	51.7a	40.7b	35.7a	0.08a	1.4
油蒿 <i>A. ordosica</i>	57.0a	13 281.81b	63.1ab	63.6ab	58.0ab	38.9ab	0.09ab	2.4
沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>	65.7a	5 045.56b	46.9c	55.8c	67.3c	46.9c	0.19b	1.7
白刺 <i>N. tangutorum</i>	44.5a	9 506.71b	60.0c	59.5c	72.1c	60.0c	0.62b	0.6
花棒 <i>H. scoparium</i>	141.7c	31 293.31c	43.3b	37.8b	41.7b	43.3b	2.15c	0.2

注:不同小写字母表示t检验的差异显著水平( $P<0.05$ )。下同。

Note: The normal letters in table shown a significance level of difference ( $P<0.05$ ) by the analysis of t-test statistics. It is the same as following tables.

表2 7种沙旱生灌木不同分级枝的平均长度

Table 2 The average branch length of 7 shrubs on different grade branching

物种 Species	平均高度 Average height /cm	平均冠幅 Average canopy /cm <sup>2</sup>	一级枝长 First rank branch length /cm	二级枝长 Second rank branch length /cm	三级枝长 Third rank branch length /cm	四级枝长 Fourth rank branch length /cm	平均枝长 Average branch length/cm
油蒿 <i>A. ordosica</i>	57.0a	13 281.81b	22.3a	41.1b	35.9a	61.0b	40.1c
沙蒿 <i>A. arenaria</i>	84.8b	7 835.45b	26.3a	26.6a	31.8a	22.1a	26.7a
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	61.8a	2 461.73a	20.6a	15.1c	12.7b	17.6c	16.5b
沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>	65.7a	5 045.56b	44.1b	23.4a	4.2c	14.7c	21.6a
白刺 <i>N. tangutorum</i>	44.5a	9 506.71b	28.4a	20.9a	6.8b	10.2c	16.6b
花棒 <i>H. scoparium</i>	141.7c	31 293.31c	65.6b	51.1b	22.1a	38.3a	44.3c
红砂 <i>R. kaschgarica</i>	55.3a	7 101.74b	9.6c	7.7c	5.0c	5.3c	6.9b

二级分枝数量相对其他各级枝数最少,形成树冠层内疏,外层较紧密的树冠。梭梭的各级分枝数比较均匀,是7种灌木中各级分枝数变化最小的灌木(变异系数为0.12)。梭梭的分枝数是由树冠内向外增加,是一种较均匀的树冠。沙拐枣的二级枝数量相对来说较多,各级枝的分枝数量变异较大。白刺的一级和二级枝数量几乎相等,而三级枝的数量约为二级枝数量的2倍多,三级枝数量又是四级枝数量的72%,白刺是一种内密外疏型构型。花棒与白刺为有叶灌木,但花棒的分枝率为白刺的62%。红砂

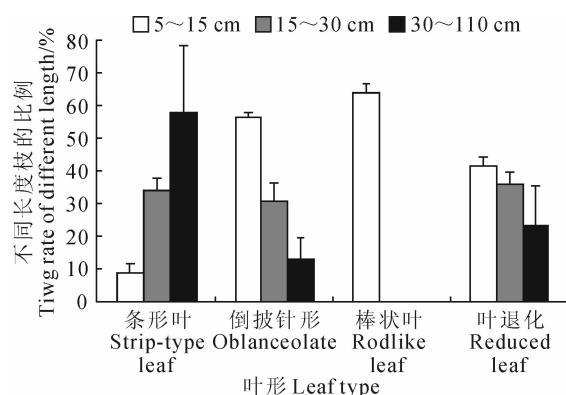


图1 叶形与不同长度枝条所占百分比关系图

Fig. 1 The relation between branch length ratio and shape of leaf

的总体分枝率是7种被观测灌木中最小的,是外密内疏的冠层结构。红砂总体分枝率约是白刺的1/3,红砂的枝数是白刺和花棒25%左右。

### 3.4 6种灌木枝条的分枝分维数

沙拐枣的枝长和枝数之间的相关性极显著( $P < 0.01$ ),其拟合方程灵敏度也较高,说明被调查沙拐枣的枝数与其枝长间相互影响较强烈。红砂的分枝分维数最大,其枝系结构最复杂,其次为梭梭和白刺,沙拐枣的分枝分维数只是大于花棒的0.34(表4)。花棒的枝系结构相对较简单。梭梭和沙拐枣的叶都退化,但沙拐枣的分枝分维数只有梭梭的1/2,梭梭枝系结构相对来说较沙拐枣复杂。白刺、花棒和沙蒿三者中,花棒的分枝分维数最小,白刺的枝系结构相对较为复杂。红砂的枝数与枝长的分形维数相关性不显著,其余灌木的枝数与枝长的分形维数的相关性均显著,而沙拐枣的差异性极显著,沙蒿和白刺次之。

### 3.5 灌木的侧影面积与迎风面几何形状

白刺和红砂的侧影面积在高度10 cm内最大,白刺和红砂树冠近似成坛状形态。花棒、梭梭和沙蒿的侧影面积最宽处则为高度20~40 cm范围,略成梭形(图2)。花棒侧影面积随高度的变化幅度最小,在40 cm范围侧影面积均是10、20和30 cm范

表3 7种灌木的平均总体分枝率和逐步分枝率

Table 3 The branch-stem ratio and the stepwise bifurcation ratio of seven shrubs

物种 Species	平均高度 Average height/cm	总体分枝率 Branch-stem ratio	逐步分枝率 Stepwise bifurcation ratio(SBR)			逐步分枝率 变异系数 CV/%
			1:2	2:3	3:4	
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	61.8a	1.13c	1.06a	1.08a	1.31a	0.12
沙蒿 <i>A. arenaria</i>	84.8b	0.96b	1.27b	0.44b	1.56a	0.53
红砂 <i>R. kaschgarica</i>	55.3a	0.31a	1.00a	0.75a	0.16c	0.68
油蒿 <i>A. ordosica</i>	57.0a	0.38a	0.21c	0.13c	0.08c	0.47
沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>	65.7a	0.47a	0.74a	1.01a	0.26c	0.57
白刺 <i>N. tangutorum</i>	44.5a	0.64b	0.89a	0.42b	0.73b	0.35
花棒 <i>H. scoparium</i>	141.7c	0.40a	1.16b	0.85a	0.19c	0.68
变异系数 CV/%	0.40	0.52	0.45	0.52	0.93	

表4 6种灌木的枝长和枝数的对数线性关系

Table 4 Logarithm relation between length and number of branches of six shrubs

物种 Species	枝数(Y)与枝长(X)间回归关系 Regression relation between branch number and length	分形维数 Branching fractal dimension	R	F-Fa	t	P	植株高度 Average height/m
梭梭 <i>A. ammodendron</i>	$\ln Y = 3.95 - 0.64 \ln X$	0.64	0.35	1.16	-1.19	0.26	61.8
沙蒿 <i>A. arenaria</i>	$\ln Y = -0.13 + 0.50 \ln X$	0.50	0.51	3.44	1.87	0.08	84.8
红砂 <i>R. kaschgarica</i>	$\ln Y = -0.41 + 0.82 \ln X$	0.82	0.24	-0.19	0.61	0.56	55.3
沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>	$\ln Y = 1.19 + 0.39 \ln X$	0.39	0.70	8.82	2.97	0.01	65.7
白刺 <i>N. tangutorum</i>	$\ln Y = 0.73 + 0.57 \ln X$	0.57	0.49	3.21	1.81	0.09	44.5
花棒 <i>H. scoparium</i>	$\ln Y = 1.12 + 0.34 \ln X$	0.34	0.23	0.15	0.77	0.45	141.7

围侧影面积的1.1倍,达到高度50~70 cm则侧影面积逐渐缩小,70~90 cm的侧影面积约为20~40 cm的1/2。梭梭侧影面积变化趋势与花棒相似,20~40 cm高度范围的侧影面积约为10 cm范围侧影面积的1.2倍,50~70 cm高度范围的侧影面积约是10 cm范围侧影面积的1/3。梭梭和沙蒿侧影面积最宽处在30 cm,花棒在高约10 cm处。沙蒿侧影面积相对变化较小,最大值在80 cm<sup>2</sup>左右。沙拐枣的侧影面积则随高度变化幅度与其他几种灌木相反,在中间30 cm处较20 cm和40 cm处反而宽度较大,几乎成扫帚形态。

### 3.6 迎风面枝条密度

在所有观测的树高相近的梭梭和沙拐枣,平均枝条密度相差5倍多,红砂枝条总数是白刺的2倍左右。除红砂之外,所观测灌木的枝条最密集的高度都在树高0.5倍处左右。红砂、沙蒿、白刺、梭梭、沙拐枣、花棒的枝条密度最大值依次出现在树高的0.54~0.72、0.47~0.59、0.44~0.89、0.32~0.49、0.31~0.45、0.28~0.42倍处(图3)。只有花棒枝

条密度最小的高度在0~20 cm高度,其余均在0~10 cm范围内。沙蒿的40~50 cm高度范围内的枝条数占总数的45.6%,红砂的30~40 cm高度范围内的枝条数占总数的67.9%,沙拐枣的20~30 cm高度范围内的枝条数占总数的57.1%,白刺的20~30 cm高度范围内的枝条数占总数的55.1%,花棒的20~30 cm高度范围内的枝条数占总数的31.6%,梭梭的20~30 cm高度范围内的枝条数占总数的46.2%。从不同高度枝条密度的变异系数分析均匀度,沙拐枣(0.70)>梭梭(0.66)>花棒(0.47)>红砂(0.47)>沙蒿(0.30)>白刺(0.20),白刺的均匀度最好。

## 4 讨 论

在不同环境生长的同种植物构型有所差异<sup>[1,3]</sup>。张德魁等<sup>[9]</sup>、詹科杰等<sup>[10]</sup>和李建刚等<sup>[11]</sup>研究了油蒿、沙蒿、梭梭、柠条、花棒和沙拐枣构件组成特征,并对其固沙机制和抗风蚀能力进行了分析。他们所描述的上述灌木分枝角度与本研究观测结果略有不同。这可能与其生长区域相关,张德魁等和詹科杰所观测沙蒿和油蒿都分布半干旱区,生长茂盛。李建刚所测梭梭和花棒具有较强的分枝能力,其分枝角度一般都在70°~85°,这主要是李建刚所选择的梭梭、花棒和沙拐枣均为120~160 cm,观测植株较高。本研究所观测梭梭、花棒的高度没有超过100 cm,树龄较小,枝序较少,枝长也较短。这也进一步说明,不同生命期,植物构型略有不同。从枝系格局分析,叶特化灌木的各级枝分枝角变化较小,有叶灌木的冠层外一级枝条的分枝角度大于叶特化灌木。油蒿的逐步分枝率比沙蒿的低,这是由于油蒿与沙蒿这两种半灌木一般具有3~4级分枝,进行光合作用的大部分叶片着生在新枝(一级和二级枝)

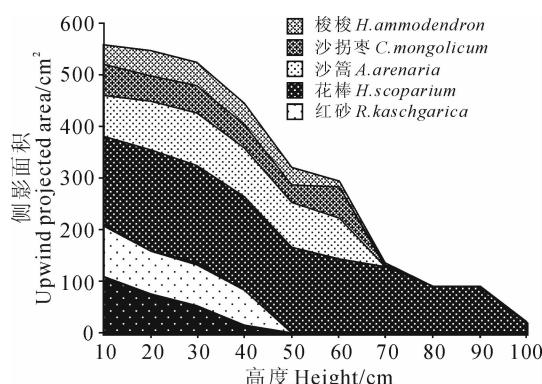


图2 灌木侧影面积随高度变化关系图

Fig. 2 The change of upwind projected area with the height

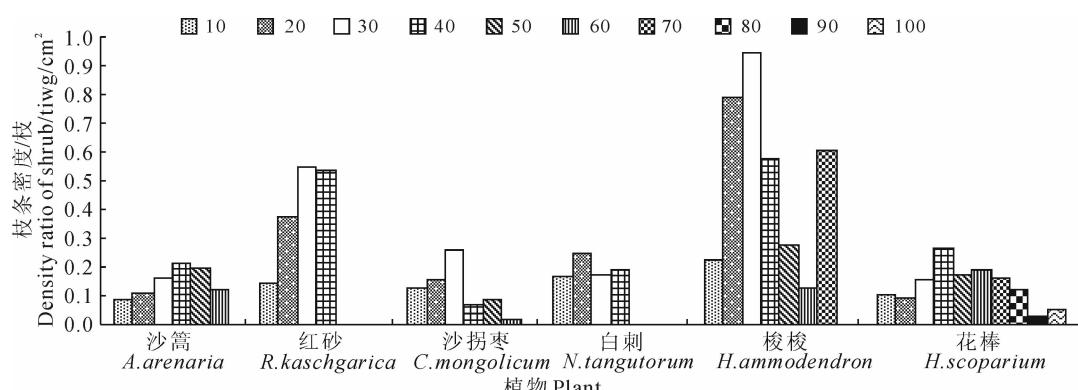


图3 灌木枝密度随高度变化关系图

Fig. 3 The change of density ratio of shrub with the height

上,二级枝上着生极少数的叶片。白刺沙埋后生长更加旺盛,三级和四级枝数量较多有利于植物生长和生存。最高级(四级)的枝数量约为其余各级枝数量的总和。花棒外层(一级和二级)枝数量相对较少,是一种内密外疏型构型,这可能与其枝上生长叶进行光合作用相关。红砂是一类过渡类型,这正好与其叶型相一致。由于红砂的当年生枝端冬季枯死,且有二次发枝现象,所以最外层枝相对还是比较多。灌木的构型主要决定于其生物学特性<sup>[4-5]</sup>,当然也受其树龄和生境变化影响。为了说明观测灌木防风固沙效能,本项研究没有根据植物年龄,而是以植株的高度为标准,所观测灌木不同植株尽可能选择高度相近,以缩小系统误差。这也是本观测分析结论与其他研究结果存在差异的主要原因。本研究分析的7种灌木种生活在相似的环境下,其构型是植物发育生长和适应沙漠环境结果。生长在风沙环境灌木形成了适应环境的构型,防风固沙效能各异,为仿真固沙灌木选择提供了参考。

## 参考文献:

- [1] CHEN B(陈波), SONG Y CH(宋永昌). Woody plant architecture and its research in plant ecology[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2002, **21**(3): 52—56(in Chinese).
- [2] CHANG J(常杰), CHEN G(陈刚), GE Y(葛瑾). A new method of quantitative study on plant structure and morphology-fractal simulation[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报), 1996, **13**(2): 57—62(in Chinese).
- [3] 常杰. 植物结构的分形特征及模拟[M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1995: 10—55.
- [4] SPRUGEL D G, HINCKLEY T M, SCHAAP W. The theory and practice of branch autonomy practice of branch autonomy[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1991, **22**: 309—334.
- [5] 何明珠. 荒漠植物枝系构型分类研究[C]//中国科学院寒区旱区生态与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站. 中国沙漠研究与治理 50 年. 北京: 海洋出版社, 2005: 285—292.
- [6] HE M ZH(何明珠), WANG Y H(王振辉), ZHANG J G(张景光). Classification of the branching architectures of the desert plants in Minqin County[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2005, **25**(9): 1 827—1 832(in Chinese).
- [7] TANG Y(唐艳), LIU L Y(刘连友), QU ZH Q(屈志强), et al. Research review of capacity of plant for trapping blown sand[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠), 2011, **31**(1): 44—48(in Chinese).
- [8] SHU J M(苏金梅), LI G T(李钢铁), QIN F C(秦富仓), et al. A prediction study on aboveground biomass of artificial *Haloxylon ammodendron* forest[J]. *Inner Mongolia Forestry Science and Technology*(内蒙古林业科技), 1997, (3): 9—11(in Chinese).
- [9] ZHANG D K(张德魁), WANG J H(王继和), MA Q L(马全林), et al. Study on branch module characteristics of *Artemisia ordosica* and *A. arenaria*[J]. *Grassland and Turf*(草原与草坪), 2009, (1): 43—46(in Chinese).
- [10] ZHAN K J(詹科杰), WANG J H(王继和), MA Q L(马全林), et al. The space construction of *Artemisia arenaria* and *A. ordosica* and the research of dune-fixating[J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*(甘肃林业科技), 2005, **30**(5): 1—4(in Chinese).
- [11] LI J G(李健刚), WANG J H(王继和), JIANG ZH R(蒋志荣), et al. Study on the tree spatial structure and the wind break function on psammophyte in Minqin County[J]. *Research of Soil and Water*(水土保持研究), 2008, **15**(3): 121—124(in Chinese).
- [12] LANCASTER N, BASS A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, **11**: 505—514(in Chinese).
- [13] HUANG F X(黄富祥), WANG M X(王明星), WANG Y S(王跃思), et al. Recent progress on the research of vegetation protection in soil erosion by wind[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2002, **26**(5): 627—633(in Chinese).
- [14] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 272—287.
- [15] 董治宝. 中国风沙物理 50 年[C]//中国科学院寒区旱区生态与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站. 中国沙漠研究与治理 50 年. 北京: 海洋出版社, 2005: 87—105.
- [16] WU L(乌拉), ZHANG G Q(张国庆), XIN ZH M(辛智鸣). Mechanism and effect of wind break and sand blocking for single natural shrub[J]. *Inner Mongolia Forestry Science and Technology*(内蒙古林业科技), 2008, **34**(2): 36—39(in Chinese).

灌木防风固沙效能与其树冠构型与枝系格局关系密切,为了说明两者关系,Lancaster 等<sup>[12]</sup>提出了侧影面积和粗糙元密集度等概念。研究表明,植物防风效应主要来自于迎风方向的侧影面积,树冠形态决定其侧影面积,从而影响其防风阻沙能力<sup>[7,14]</sup>。本研究分析结论最大枝条密度高度最低是白刺,这与其容易形成沙堆相一致<sup>[15]</sup>。不同形态的植物防风阻沙强弱不同,半球体树冠的植物比锥体和梭形树冠的植物阻沙能力更大,可截留更多的沙物质<sup>[15-16]</sup>,这也为仿真固沙灌木制作提供了参考。

7 种灌木的分枝角度是自冠层内向外逐渐变大,枝序级都为四级,只有油蒿的冠层外枝较短。除梭梭外,6 种灌木的枝分布都是外密内疏。红砂、白刺、油蒿和花棒为密生型灌木,梭梭、沙拐枣和沙蒿为疏生型灌木。侧影面积随高度变化为:白刺>梭梭>红砂>沙拐枣>沙蒿>花棒。白刺和红砂的树冠近似坛状形态,花棒、梭梭和沙蒿略成梭形,沙拐枣成扫帚形态。