

梭梭不同生长阶段的枝系构型特征

许 强¹, 杨自辉^{1,2*}, 郭树江², 王强强²

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省民勤荒漠草地生态系统国家野外观测研究站, 甘肃 民勤 733300)

摘要:通过对民勤荒漠植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)不同生长发育阶段(3~11 a 龄)枝系构型进行了统计分析。结果表明:1)梭梭不同生长阶段的分枝格局参数,总体分枝率和分枝角度差异不显著,且总体分枝率均较低。2)梭梭生长初期逐步分枝率(SBR)_{1:2}大于生长后期,而梭梭生长初期(SBR)_{2:3}小于生长后期。3)梭梭的分枝角度随级数的增加而呈现减小的趋势,梭梭在越靠近植株顶端,年幼的枝和干之间的分枝角度越接近于30°,而在越靠近植株基部的老枝和干之间的分枝角度多接近于60°。4)梭梭的各级分枝长度存在显著差异($p<0.05$),梭梭枝条的伸展能力从低级到高级呈现相对减弱的趋势。5)随着梭梭个体生长发育,其植株的枝径比差异显著($p<0.05$),随分枝级数的增加,其枝径比呈现出逐渐增大的趋势,说明其枝条间的承载力越大。梭梭在不同生长发育阶段,枝系构型表现出一定的可塑性,反映了对荒漠环境的适应。

关键词:梭梭; 分枝格局; 枝系构型

中图分类号:S793.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2013)04-0050-05

Branch System Configuration Features of *Haloxylon ammodendron* in Different Growth Stages

XU Qiang¹, YANG Zi-hui^{1,2*}, GUO Shu-jiang², WANG Qiang-qiang²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. National Field Observation and Research Station of Ecological System, Minqin, Gansu 733300, China)

Abstract: A statistical analysis was conducted on the configurations of branch system of *Haloxylon ammodendron* in different growth stages (3 to 11-year-old) occurring in Minqin desert. 1) No significant differences were found among different stages in the coefficients of branching patterns, overall bifurcation ratios, and the branch angles, and the overall bifurcation ratio was lower. 2) In the early stages of the growth, the values of stepwise branching rate SBR_{1:2} were higher than those in late stages, while the values of SBR_{2:3} in early stages were lower than those in late stages. 3) The branch angles decreased with the increase of the branch classes, young branches that were close to the top of a plant were in an angle about 30° to the stem, while the old branches that were close the ground were in an angle about 60° to the stem. 4) Significant differences were found in branching lengths at all branch classes ($p<0.05$). The stretch abilities of the branches tended to become weak along with the increase of branch classes. 5) Along with the development of individual growth, differences in diameter ratio were significant ($p<0.05$). As the increase of branch classes, diameter ratio tended to increase, indicating the increase of bearing capacity. The branch system configuration of *H. ammodendron* in different growth stages demonstrated its adaptability to the desert environment.

Key words: *Haloxylon ammodendron*; branching pattern; branch system configuration

收稿日期:2012-11-28 修回日期:2013-03-06

基金项目:国家自然科学基金(31260200); 甘肃省技术研究与开发专项计划(2010GS04685)。

作者简介:许强,男,硕士研究生,研究方向:荒漠化防治。E-mail:xxxx12125@126.com

*通信作者:杨自辉,男,研究员,硕士生导师,研究方向:荒漠生态。E-mail:zihyang@126.com

F. Halle^[1]等自1977年引入构件一词来表述植物体的不同组分,并在此基础上将其进一步发展为种群构件理论,认为植物体是一个构件集合体^[2-3]。从此,以构件理论研究植物种群构件特征得到了快速的发展。自然界绝大多数植物都是构件植物,每种植物的个体都有一个精确的并受遗传因素决定的“生长方案”,植物在任何一个发育阶段,其内部生长方案的表达形式都可用构型来表示,因此,构型是植物内在遗传信息在一定时间表现的外部形态特征^[4]。植物构型就是植物各个构件,即根、茎、枝、叶、芽等在空间排列的一种表现形式。研究结果已证实植物枝系构型的空间位置基本上是由生长过程中的3个形态学形状决定的,即分枝率、分枝角度和枝长,一般所指的分枝格局就是由这3个参数来描述^[5-7]。不同的分枝格局会形成不同的骨架结构,将影响到植物体能量捕获、水分丧失、机械支持、甚至竞争能力^[8]。由于植物体是固着生长的,其空间位置和形态决定了植物个体的空间占有能力^[9],对植物构件结构的认识和深入研究,可促进对植物与环境相互作用机制的认识,了解植物体对空间、光、温度等环境要素的适应机理。荒漠植物是一类在特殊生境条件下生长的植物,在其生长与发育过程中,植物各构件的组成和排列是有别于其他植物形态的,具有适应荒漠高温、干旱及风沙条件的特殊机制。荒漠植物作为我国干旱、半干旱草原区乃至荒漠生态系统中的重要组成部分,在生态恢复与重建中扮演着重要角色。因此,研究荒漠植物构型特征,深入了解荒漠植物对风沙灾害的防护效能、建立防风固沙防护体系、改善荒漠生态环境具有重要意义。

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是优良的固沙小乔木,叶片退化成鳞片状,以同化枝进行光合作用,且其根系十分发达,分布广而深,具有较强的耐贫瘠、耐干旱、耐盐碱、抗风沙等特性,是我国西北干旱、半干旱荒漠地区防风固沙、保护草场、改善沙区气候的优良植物种,具有较高的经济和生态价值,对维护脆弱荒漠生态系统的稳定性具有重要意义^[10-13]。前人关于梭梭的研究主要集中在抗旱生理、种子萌发特性、群落结构与分布、梭梭幼苗、梭梭生理生态特性与环境关系等方面^[14-26],而对梭梭植物构型的研究较少,尤其是对梭梭在不同生长阶段的枝系构型的研究还尚未见报道。通过分析梭梭在不同生长发育阶段的分枝特征,以期探讨梭梭在形态建成上是否有不同的适应策略,其分枝格局是否相同及其特点,从而更进一步认识荒漠植物的生态适应性,为植物防风固沙效能研究及植物资源保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于巴丹吉林沙漠东南缘的民勤西沙窝,海拔1 180~1 500 m,日照强烈,干旱少雨,气温变幅大,风大沙多,属于典型的大陆干旱荒漠气候。年平均气温7.6℃,最热7月的平均气温22.4℃,最冷1月的平均气温-10.3℃,平均年较差达32.7℃,年平均极端最高气温39.4℃,极端最低气温-30.8℃,年平均日较差15.9℃,最剧烈可达28.3℃,≥10℃积温3 036.4℃。年平均降水量113.8 mm,日降水量≥0.1 mm的日数平均为36 d,连续降水的日数不超过2 d,而且全年降水量不均匀,多集中在7—9月,占年均降水量的73%。年均蒸发量2 604.3 mm,是降水量的24倍,5—6月蒸发最剧烈,占全年的16%。干燥度5.15,年均日照时数2 799.4 h,无霜期175 d,年平均风速2.45 m·s⁻¹,多年平均瞬时最大风速22.35 m·s⁻¹,主导风向为NW,年平均8级以上大风日数37.7 d,沙尘暴日数26.8 d,年均扬沙日数32.9 d,浮尘日数18.9 d,多集中在2—5月。境内地表水资源缺乏,水资源利用以开采地下水为主,地下水位持续下降。以潜水及微承压水形式赋存的地下水含水层为上新世及第四系堆积物,岩性为砂砾石及砂,其厚度50~100 m。区域内自然植被和人工植被并存。原生植被主要以旱生、盐生和沙生的灌木、半灌木及多年生草本为主,建群种为柽柳(*Tamarix chinensis*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、红砂(*Reaumuria sougari*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等;次生及人工植被主要有二白杨(*Populus gansuensis*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、梭梭、农作物等。20世纪80年代以来,由于地下水位下降,人工固沙林和天然灌木林开始大面积衰败死亡,植被退化严重。

1.2 材料

在研究区内选择3、5、7、9、11 a龄的梭梭,植株高分别为40、80、120、160、200 cm的标准木各10株,标准木的选择参考标准: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)生长环境较好;3)标准木与其他植物及同种梭梭保持一定的距离,以减少种间或种内对空间资源竞争而产生的影响。

1.3 方法

1.3.1 构型指标的观测方法 用钢卷尺(精度0.1

cm) 测定每个植株的高度、冠幅、各级枝长等参数; 用量角器测定各级分枝角度(与垂直方向上); 用游标卡尺测定地径和各级分枝的基部直径; 测定分枝数等指标。

1.3.2 植物构型指标的统计计算方法 枝序的确定方法有多种, 本研究选取的是按植株分枝发育顺序的离心法, 即把直接着生于主干上的枝定为一级枝, 着生于一级枝上的侧枝定为二级枝, 依此类推。分枝率主要依据各枝级分枝数量来计算总体分枝率和逐级分枝率^[27-28]。

1) 总体分枝率(OBR):

$$OBR = (N_T - N_S) / (N_T - N_1) \quad (1)$$

式中: N_T = $\sum N_i$, 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(SBR):

$$SBR_{i:i+1} = N_i / N_{i+1} \quad (2)$$

式中: N_i 和 N_{i+1} 分别是第 i 和第 $i + 1$ 级的枝条总数。

3) 枝径比(RBD):

$$RBD = D_{i+1} / D_i \quad (3)$$

表 1 梭梭在不同发育阶段的构型分析

Table 1 Configuration analysis in different developmental stages of *H. ammodendron*

指标	植株高度				
	40 cm	80 cm	120 cm	160 cm	200 cm
总体分枝率(OBR)	0.30±0.18a	0.28±0.04a	0.34±0.68a	0.33±0.44a	0.32±0.45a
逐步分枝率 SBR _{1:2}	0.37±0.46a	0.30±0.56a	0.18±0.37b	0.16±0.23b	0.14±0.20b
逐步分枝率 SBR _{2:3}	0.28±0.29a	0.27±0.53a	0.41±0.45b	0.40±0.62b	0.40±0.74b
一级分枝角度/(°)	34.81±3.20a	35.59±11.78a	36.78±12.48a	35.99±9.02a	36.28±11.75a
二级分枝角度/(°)	21.63±4.25a	27.25±6.32a	25.84±4.40a	27.89±4.48a	28.28±3.97a
三级分枝角度/(°)	22.34±7.65a	23.23±7.37a	25.96±3.94a	23.76±3.33a	25.15±4.13a
一级分枝枝长/cm	18.01±5.65a	29.99±4.65a	46.89±11.90b	77.72±15.26b	107.20±4.87c
二级分枝枝长/cm	14.72±1.76a	23.05±2.99a	30.38±3.77b	40.35±5.66b	57.43±9.62c
三级分枝枝长/cm	9.20±1.60a	15.62±3.00a	20.60±1.85b	21.29±4.52b	30.15±6.98c
枝径比 RBD _{2:1}	0.61±0.46a	0.51±0.28b	0.46±0.25b	0.38±0.31c	0.35±0.36c
枝径比 RBD _{3:2}	0.60±0.33a	0.61±0.40a	0.59±0.29a	0.51±0.36b	0.54±0.33b

注: 同列不同字母代表差异性显著($n=10, p<0.05$)。

结果表明, 梭梭在不同生长发育阶段的总体分枝率并未有明显的变化, 随着梭梭高度(年龄)的增加, 其总体分枝率相差不大, 这表明随个体生长发育, 梭梭植株的总体分枝率改变不显著。从表 1 可以看出, 梭梭高度 <100 cm 的逐步分枝率与高度 >100 cm 间表现出显著差异($p<0.05$), 梭梭高度 <100 cm 的逐步分枝率 $SBR_{1:2}$ 大于与高度 >100 cm 的逐步分枝率, 而梭梭高度 <100 cm 的逐步分枝率 $SBR_{2:3}$ 小于与高度大于 100 cm 的逐步分枝率。这与梭梭的萌枝特点有很大关系, 严酷的生存环境迫使梭梭在生长发育初期, 尽可能的萌发出多的枝条, 以便进行光合作用促进植株生长, 但由于水分、养分的稀少, 从而限制了上一枝级的数量, 于是在梭梭生长

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

1.3.3 数据分析 试验数据用 Excel 进行整理, 采用 SPSS13.0 对试验数据进行统计分析, 同时对所获得的数据进行差异性检验。

2 结果与分析

在植物构型的研究中, 分枝率被作为一个重要指标, 表示枝条的分枝能力以及各枝级间的数量配置状况, 但仅凭分枝率尚不能准确描述和理解植物分枝格局的特征, 应对枝系结构的其他相关性状特征(枝径比、枝倾角、枝长等)进行更细致的研究和模拟。如分枝角度是衡量植物空间分布能力的一个重要指标, 其向空间扩展能力影响着枝叶对光照、温度、CO₂ 等的利用; 枝条的长度是衡量枝系向空间伸展能力的一个主要指标, 其伸展能力影响着空间资源等范围的利用; 枝径比是一个表征不同级别枝条之间承载力的指标。

根据调查与测量数据, 计算出各研究指标的数值(表 1), 进行统计分析。

初期表现出较高的逐步分枝率 $SBR_{1:2}$; 梭梭的生长后期, 其枝条以拓展空间能力为主, 而萌发的枝条较少, 于是在梭梭生长后期表现出较高的逐步分枝率 $SBR_{2:3}$ 。

梭梭在不同生长发育阶段的各级分枝角度并未有明显的变化, 随着梭梭高度(年龄)的增加, 其各级分枝角度相差不大(表 1), 这表明随个体生长发育, 梭梭植株的各级分枝角度差异不显著, 而随分枝级数的增加, 其分枝角度呈现出逐渐减小的趋势。比较发现, 梭梭一般在越靠近植株顶端, 年幼的枝和干之间的分枝角度越接近于 30°, 而在越靠近植株基部的老枝和干之间的分枝角度多接近于 60°, 说明两物种树冠结构的动态变化特征。随着枝条逐渐生

长,体积和生物量也相应增加,受重力影响也增大,枝条逐渐下垂,从而分枝角度由 30° 左右向 60° 左右逐渐转变,即越靠近基部枝干间分枝角度越大,越靠顶端枝干间分枝角度越小,更进一步说明了梭梭的分枝表现型,既是遗传作用,又是对环境适应的结果。

梭梭在不同生长发育阶段的各级分枝枝长有明显的变化(表1),这表明随个体生长发育,梭梭植株的各级分枝枝长差异显著($p<0.05$)。从整体上看,梭梭枝条伸展能力随分枝级数的增加呈现出相对减弱的趋势,这说明对于特定荒漠植物,其向空间扩展的能力存在一个“阈值”,即随着每一级枝条向外伸展,其伸展能力呈现下降趋势,而这由每一级枝条的承载力决定。

梭梭在不同生长发育阶段的枝径比有明显的变化,随着梭梭高度(年龄)的增加,其枝径比呈现出逐渐减小的趋势(表1),这表明随个体生长发育,梭梭植株的枝径比差异显著($p<0.05$),而随分枝级数的增加,其枝径比呈现出逐渐增大的趋势。这说明,随着梭梭的生长,其枝条间的承载力越大。

3 结论与讨论

植物体在生长发育过程中的构型变化同功能作用是紧密联系的,通过分析构型变化特征,有助于了解植物的生长对策已经对风沙危害的响应。在不同生长发育阶段,梭梭个体的分枝率、枝长、枝倾角、枝径比等都发生了不同程度的改变,但在整个发育过程中改变不显著的只有枝倾角和总体分枝率,且总体分枝率均较低。梭梭生长初期逐步分枝率SBR_{1:2}大于生长后期,而梭梭生长初期逐步分枝率SBR_{2:3}小于生长后期。梭梭的分枝角度随级数的增加而呈现减小的趋势,梭梭在越靠近植株顶端,年幼的枝和干之间的分枝角度越接近于 30° ,而在越靠近植株基部的老枝和干之间的分枝角度多接近于 60° 。梭梭的各级分枝长度存在显著差异,梭梭枝条的伸展能力从低级到高级呈现相对减弱的趋势。随着梭梭个体生长发育,其植株的枝径比差异显著,随分枝级数的增加,其枝径比呈现出逐渐增大的趋势,说明其枝条间的承载力越大。

荒漠植物构型是植物与环境相互作用、相互适应的最终产物,受多方面因素的影响。由于在梭梭不同生长发育阶段,只是从分枝角度、分枝长度、分枝率、枝径比、逐步分枝率等指标对梭梭构型进行了初步探讨,未涉及梭梭不同发育阶段的解剖学特征及遗传学特征,因此在今后的研究中还需进行形态学与解剖学、遗传学的整合研究,以进一步了解梭梭

在整个生活史中呈现对微生境变化的适应机制。此外,对于荒漠植物枝系构件的研究,主要从二维平面的角度进行研究,缺少从三维空间角度去研究枝系的空间分布和格局,在今后的研究中尚需进一步从三维空间去认识植物对资源的利用和分配,同时,进一步研究梭梭构型对风沙灾害的响应,确定最佳的梭梭林建造密度。综上所述,在今后对梭梭的研究中,应综合生理、生态、形态等多门学科,完善梭梭与环境的相互作用机理。

参考文献:

- [1] HALLE F, OLDEMAN R A, TOMLINSON P B. Tropic trees and forestry, an architecture analysis [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- [2] HARPER J L. Plant demography and ecological theory [J]. Oikos, 1980, 35: 244-253.
- [3] HARPER J L. Population biology of plant [M]. London: Academic Press, 1977.
- [4] 陈波, 达良俊. 梭梭不同生长发育阶段的枝系特征分析 [J]. 武汉植物学研究, 2003, 21(3): 226-231.
CHEN B, DA L J. Branching patterns of *Castanopsis fargesii* as affected by growth and developmental phases [J]. Wuhan Bot Res, 2003, 21(3): 226-231. (in Chinese)
- [5] 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.
CHEN B, SONG Y C, DA L J. Woody plant architecture and its research in plant ecology [J]. Chinese Journal Ecology, 2002, 21(3): 52-56. (in Chinese)
- [6] 何丙辉. 银杏构件生物学理论与应用 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [7] 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.
SUN S C, CHEN L Z. Architectural analysis of crown geometry in *Quercus liaotungensis* [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(5): 433-440. (in Chinese)
- [8] FISHER J B, GIVNIDH J T. Branching pattern and angles in trees. On the economy of plant form and function [M]. London: Cambridge University Press, 1986: 493-518.
- [9] FORD E D, SORRENSEN K A. Leaf mass per area, nitrogen content and photosynthetic carbon gain in *Acer saccharum* seedlings in contrasting forest light environments [J]. Funct Ecol, 1992, 6: 423-435.
- [10] 郭泉水, 谭德远, 刘玉军, 等. 梭梭对干旱的适应及抗旱机理研究进展 [J]. 林业科学研究, 2004, 17(6): 796-803.
GUO Q S, TAN D Y, LIU Y J, et al. Advance in studies of *Haloxylon Bungei*'s mechanism of adaptation and resistance to drought [J]. Forest Research, 2004, 17(6): 796-803. (in Chinese)
- [11] 王继和, 张锦春, 袁宏波, 等. 库姆塔格沙漠梭梭群落特征研究 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 809-813.
WANG J H, ZHANG J C, YUAN H B, et al. Study on characteristics of *Haloxylon ammoderion* community in Kumtag

- Desert[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 809-813. (in Chinese)
- [12] 宋于洋,李园园,张文辉.梭梭种群不同发育阶段的空间格局与关联性分析[J].生态学报,2010,30(16):431743-27.
- SONG Y Y, LI Y Y, ZHANG W H. Analysis of spatial pattern and spatial association of *Haloxylon ammodendron* population in different developmental stages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4317-4327. (in Chinese)
- [13] 田媛,李建贵,赵岩.梭梭幼苗死亡与土壤和大气干旱的关系研究[J].中国沙漠,2010,30(4):878-884.
- TIAN Y, LI J G, ZHAO Y. Relationship between *Haloxylon ammodendron* seedling mortality and water content in soil and atmosphere[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 878-884. (in Chinese)
- [14] 张锦春,赵明,张应昌,等.灌溉植被梭梭、白刺光合蒸腾特性及影响因素研究[J].西北植物学报,2005,25(1):70-76.
- ZHANG J C, ZHAO M, ZHANG Y C, et al. A research between photosynthetic, transpiration characteristics and impact of irrigated vegetation of *Haloxylon ammodendron* and *Nitraria tangutorum*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(1): 70-76. (in Chinese)
- [15] 苏培玺,安黎哲,马瑞君,等.荒漠植物梭梭和沙拐枣的花环结构及C4光合特征[J].植物生态学报,2005,29(1):1-7.
- SU P X, AN L Z, MA R J, et al. Kranz anatomy and C4 photosynthetic characteristics of two desert plants, *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum*[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(1): 1-7. (in Chinese)
- [16] 常学向,赵文智,张智慧.荒漠区固沙植物梭梭耗水特征[J].生态学报,2007,27(5):1826-1837.
- CHANG X X, ZHAO W Z, ZHANG Z H. Water consumption characteristic of *Haloxylon ammodendron* for sand binding in desert area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (5): 1826-1837. (in Chinese)
- [17] 解婷婷,张希明,梁少民,等.不同灌溉量对塔克拉玛干沙漠腹地梭梭水分生理特性的影响[J].应用生态学报,2008,19(4): 711-716.
- XIE T T, ZHANG X M, LIANG S M, et al. Effects of different irrigations on the water physiological characteristics of *Haloxylon ammodendron* in Taklimakan Desert hinterland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (4): 711-716. (in Chinese)
- [18] 张锦春,王继和,安富博,等.民勤天然梭梭种群特征初步研究[J].中国沙漠,2009,29(6):1124-1128.
- ZHANG J C, WANG J H, AN F B, et al. Population characteristics of natural *Haloxylon ammodendron* in Minqin, Gansu of China[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29 (6): 1124-1128. (in Chinese)
- [19] 田媛,李建贵,潘丽萍,等.梭梭萌生与初期存活的关键影响因素[J].生态学报,2010,30(18):4898-4904.
- TIAN Y, LI J G, PAN L P, et al. The key factors affecting *Haloxylon ammodendron* germination and survival at very early stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (18): 4898-4904. (in Chinese)
- [20] 张锦春,纪永福,王芳林,等.民勤退化人工梭梭种群雨养恢复试验研究[J].西北林学院学报,2010,25(1):77-81.
- ZHANG J C, JI Y F, WANG F L, et al. Rain-fed recovery of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* population in Minqin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 77-81. (in Chinese)
- [21] 刘国军,张希明,李建贵,等.供水量及沙埋厚度对两种梭梭出苗的影响[J].中国沙漠,2010,30(5):1085-1091.
- LIU G J, ZHANG X M, LI J G, et al. Effects of water supply and sand burial on seed germination and seedling emergence of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5): 1085-1091. (in Chinese)
- [22] 贾志清,卢琦.梭梭[M].北京:中国环境科学出版社,2005:1-14.
- [23] 刘晓云,刘速.梭梭荒漠生态系统 I 初级生产力及其群落结构的动态变化[J].中国沙漠,1996,16(3):287-291.
- LIU X Y, LIU S. Study on ecosystem of *Haloxylon ammodendron*[J]. Journal of Desert Research, 1996, 16 (3): 287-291. (in Chinese)
- [24] 刘发民,张应华,仵彦卿,等.黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2002,19(1):27-31.
- LIU F M, ZHANG Y H, WU Y Q, et al. Soil water regime under the shrubberies of *Haloxylon ammodendron* in the desert regions of the Heihe River watershed[J]. Arid Zone Research, 2002, 19(1): 27-31. (in Chinese)
- [25] 郭泉水,王春玲,郭志华,等.我国现存梭梭荒漠植被地理分布及其斑块特征[J].林业科学,2005,41(5):2-7.
- GUO Q S, WANG C L, GUO Z H, et al. Geographic distribution of existing *Haloxylon desert* vegetation and its patch character in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(5): 2-7. (in Chinese)
- [26] 宋于阳.梭梭构件格局的环境变异[J].西北林学院学报,2008,23(6):60-65.
- SONG Y Y. The environmental variations of component pattern of *Haloxylon ammodendron* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 60-65. (in Chinese)
- [27] 马克明,祖元刚.兴安落叶松分枝格局的分形特征[J].植物研究,2000,20(2):235-241.
- MA K M, ZU Y G. Xing'an Larch fractal branching pattern of characteristic[J]. Bulletin of Botanical Research, 2000, 20(2): 235-241. (in Chinese)
- [28] 郭泉水,丛者福,王春玲.梭梭与肉苁蓉生态学研究[M].北京:科学出版社,2009:50-77.