

荒漠植物构型研究进展

孙栋元^{1,2}, 赵成义¹, 王丽娟¹, 盛钰¹, 李菊艳¹

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000)

摘要:基于植物构型的内涵,评述了植物构件研究现状、荒漠植物构型研究现状和荒漠植物构型模型及可视化方面的研究,并指出和归纳了荒漠植物构型研究存在的问题,展望了荒漠植物构型的研究趋势。指出在未来荒漠植物构型研究中应加强与土壤学、气象学、生态学等多学科交叉研究。探讨荒漠植物构型与环境因子的相互作用规律,揭示植物结构—功能特征及其对环境的响应与适应机理。构建荒漠植物生长的构型模型,从而为荒漠地区种群、群落、甚至生态系统的结构、功能的研究提供理论基础。

关键词:荒漠植物; 构型; 构件; 构型模型; 可视化

中图分类号:S718

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0281-07

Progress in the Study on Architecture of Desert Plants

SUN Dong-yuan^{1,2}, ZHAO Cheng-yi¹, WANG Li-juan¹, SHENG Yu¹, LI Ju-yan¹

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on connotations of plant architecture, modular theory of plants, the present situation on desert plants architecture, visualized and architectural modeling of desert plants were reviewed. Some problems of desert plants architecture were pointed out and summarized. The research trends of desert plants architecture were prospected. It is proposed that cross discipline collaboration, such as agrology, meteorology, ecology, should be paid more attention in desert plants architecture in the future. The interaction rule of environment factors and desert plants architecture were discussed, and the adaptive mechanism and response to environment of characteristics of plants function and structure were revealed. The architecture modeling of desert plants growth were established that provided theory base for research structure and function of population, community and ecosystem in desert area.

Key words: desert plants; architecture; modular; architectural modeling; visualized

构型是树木的总体外貌特征,包括树形、冠形、分枝结构及树体组成部分(芽、枝、叶等)的空间分布格局、内在生物量构造组成及其配比结构和树体组成单位的数量动态变化等方面的内容,是植物内部遗传信息在一定时间内外部的形态表现^[1-2]。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。植物构型不仅是植物发育生长和适应的结果,而且一定生长阶段的植株构型也是影响其进一步发育、生长的一个限制条件。植物在长期的生长发育过程中,因遗传特性不同,不同植物的构型有明显区别,它们在适应不同的外部环境条件下会表现出

不同的生态对策,特别是在外部形态特征上,受环境因素的影响明显^[3]。

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,具有适应荒漠高温和干旱条件的特殊机制。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。荒漠植物多为旱生和强旱生植物,生态幅广,适应性强,是良好的防风固沙、改善生态环境的物种资源,从形态解剖、生理生态等角度已进行了大量的工作^[4-8]。而从植物构型方面的

收稿日期:2011-07-07

修回日期:2011-07-21

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目(30900180);国家自然科学基金重点基金项目(40830640);国家973项目(2009CB421302);甘肃省水资源高效利用创新团队项目(098TTC A006)

作者简介:孙栋元(1978—),男,甘肃民乐人,博士,工程师,从事荒漠化防治和干旱区生态水文方面的工作。E-mail:gsausundy@126.com

研究相对较少,通过荒漠植物构型的研究,从植物个体生理、生态上认识其对环境空间的适应和伸展能力,以及对光、水分、养分等的竞争能力,更进一步认识荒漠植物枝、叶、花等构件生长发育上对不同环境条件的反应,从而探讨荒漠植物种群的生态适应策略和进化机制,可望为荒漠群落发展与演替研究提供理论依据。本文将对植物构件研究现状、荒漠植物构型研究现状、荒漠植物构型模型及可视化进行评述,并指出荒漠植物构型研究存在的问题,同时对荒漠植物构型的研究趋势进行了展望,旨在促进荒漠植物构型的研究。

1 荒漠植物构型研究现状

1.1 植物构件研究

植物构件理论(modular theory)是研究植物形态学和植物生态学的基础^[9]。由于植物体各构件单元之间的关系和等级结构,人们认识到木本植物地上部分存在着两种尺度的整合,即各构件单元在枝条水平上的整合以及各枝条构成的冠幅复合体。20 世纪 60,70 年代植物学家对构件的概念引起了重视^[10]。Harper 将植物构件的思想应用于植物种群统计学的研究中,极大地推动了植物种群生态学的发展^[11-13]。构件生物地面的枝、叶等系统和地下的根系统,因为其排列的方式决定了对光、水和养分的摄取能力。绝大多数植物的生长发育具有高度的可塑性,因微环境的差异,种群内各个体及其枝、花、果实、种子等的数量在异龄及同龄植株间存在很大差异。环境对植物种群生活史中个体和构件数量动态的影响是不同的,两个水平的动态相互影响,相互依赖。同时构件理论已被广泛接收并应用于植物种群生态学研究的许多方面^[14-15]。

植物构件结构的生态学意义研究开始于 Bazzaz 和 Harper 对栽培条件下亚麻叶种群动态与光环境相互关系的统计分析^[16]。此后,各国学者纷纷以一年生植物^[17-18]、多年生草本^[14,19-20]、乔木^[17,21-22]等的某些构件单位为材料,分别从构件种群的结构和动态,构件植物的繁殖对策,构件生长习性与植物形态可塑性,固着生长的形态适应,两个水平的种群密度效应,构件生长对捕食等引起损害的反应和适应,构件生物中自然选择单位的确定及构件单位在进化上的意义等方面展开了广泛的研究,其中尤以对无性系植物的研究最为深入^[23]。为了能较完善地解释构件植物种群动态,必须同时重视个体和构件数量两个水平对环境的反应,这也已为众多植物生态学者所认识并对多种环境条件下多种构件种群作了统计分析。

如乔木叶^[16,24]、芽^[25]、枝^[26-27]等。根系的构型特征可以通过根系几何形态特征参数和拓扑结构来描述,几何形态特征参数包括根长、根重和角度等,根系拓扑结构则反映根系的分枝状况、连接数量以及根系在土层中的空间分布等^[28],同时根系是植物直接与土壤接触的器官,直接影响着地上部分的生长以及整个植株的生存和发育,而且根系的分枝状况和构型对营养物质的吸收起着关键作用^[29]。通过对荒漠植物根系构型特征的研究,表明在水分为主要限制因子的干旱生境中,根系构型特征在很大程度上决定了灌木的叶性策略,其叶性因子在一定程度上影响了植物功能性性状,而植物的功能性性状反过来又作用于灌木根系的构型特征^[30]。同时荒漠植物根系构型既有相似性又有差异性,在相似的沙漠环境中具有不同的根系适应策略^[31]。

尽管国内外学者从构件角度方面对植物构型进行了不同程度的研究,也取得了长足的进展,但对荒漠植物构件的研究相对欠缺,缺少从个体和种群角度去研究荒漠植物构型特征,认识荒漠植物根、茎、枝、叶、芽等构件对环境的适应机制,缺乏从构件水平深入研究荒漠植物与环境的相互作用。

1.2 植物构型研究

植物体可以被视为构件的集合体^[32]。植物体不同的枝系特征以及枝上各构件单元(叶种群、芽种群)的配置及其动态变化特征反映了植物种对空间、光等资源的利用,以此来反映不同植物在不同的生长发育阶段的适应策略。植物体特定的几何形态是其各个层次构件单元按一定方式组合的呈现,这种特殊的几何形态表达了该个体在生理、生态上对其环境空间的适应和伸展能力,以及对光、水分、养分等的竞争能力^[33]。植物体构件的空间位置由生长过程中的 3 个形态学性状决定,即枝长、分枝角度和分枝率。而分枝格局就是由这 3 个参数描述^[34],同时还将叶方位角、倾角、叶面积作为辅助参数^[35]。

20 世纪 70 年代,Halle 等通过对热带地区植物形态外貌特征与分枝格局长期系统研究,提出了树木构型概念并总结出热带树木的 23 种构型模型,同时编制了分析热带树木构型检索表^[35]。研究认为每种植物个体都有一个精确的并受遗传因素决定的“生长方案”,即构型模式;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,因此构型是树木内在遗传信息在一定时间表现出的外部形态特征。树木的生长方案则是其构型的抽象表达,并且与植物个体大小无关。构型不同于传统生活型的概念,因为后者仅是一个静态概念,并且描述的是植物

生长的“最终成果”形式。植物体构型和分枝格局的可塑性明确反映了植物适应对策^[34,36]。经过几十年的研究,人们对不同植物构型特征的认识和研究逐渐深入,在温带地区对乔木树种的研究则更关注树木分生组织(芽库)动态关系定量研究。深入研究需要从枝系构型尺度上进行,包括枝系如何竞争有限资源,以及如何合理分配资源和能量等生理生态问题,这已成为枝系尺度研究的一个重点。

国际上对乔木和灌木植物构型研究较早,从构型特征与环境相互作用到植物的生长模拟都作了深入研究,并且将很多研究成果已经应用到农林业生产中。相比之下,国内相关研究比较薄弱^[37-40],而对于荒漠植物构型方面的研究更少。国内相关学者对荒漠区克隆植物生长构型进行了研究,并对克隆植物的研究前景进行了展望;同时对荒漠区自然种群构件结构与环境因子的关系进行了研究^[41-42]。何明珠对腾格里沙漠边缘民勤地区的50余种典型荒漠植物的枝系构型特征进行了较为深入的研究,建立了描述枝系构型的17个指标,采用聚类分析法将所研究的荒漠植物分为四个类型;通过主成分分析法确定了影响荒漠枝系构型的主要因子;对不同枝系水平枝条的持水力生物量和持水力特征进行了系统深入研究。此外,该研究将分形理论引入到枝系构型的分析中,用分形维数描述枝条的空间分布格局^[43-44]。尽管不同学者对荒漠植物构型有了初步研究,但缺少从构型方面对植物结构和功能方面进行系统性、综合性分析研究。

1.2.1 植物分枝结构研究 分枝结构是植物构型研究的重点。其中侧枝分枝级数(数量)及其空间配置状态,不仅直接决定了树冠大小和形状,还影响着芽和叶的空间分布。通过树木分枝结构的研究,可以反映树木生长过程和树体形态结构,同时作为最重要的树体形态生成和生长因子,对促进植物模型建造具有重要意义,其内容不仅涉及到侧枝数量、空间配置等静态指标,尤其重要的是要充分考虑到这些指标的时空动态过程^[45]。

分枝结构具有种内、个体内、枝内三个层次的稳定性,但同一生境中的植物结构模型并不相同,而同一物种在不同的演替阶段或不同立地条件下,其结构也不相同。植物体不同的发育阶段具有不同的分枝格局,甚至一个植株内部的不同部分也存在着不同的分枝结构,这就证明了分枝结构的变异性^[46]。对于植物体而言,枝条的分枝方式一般是不变的,因此,这被作为是物种生物学、分类学的一个重要特征。动态结构模型的改变也不常见,Halle等所描述的23种结构中,一个物种一般也只适合其中的一个,而且一

定的结构模型还同特定的生境、演替地位相吻合,Halle还认为结构是一个较为稳定的性状,并致力于遗传学途径的研究。总体上看,描述结构的不同参数,其稳定性是不同的,愈能反映物种属性的就愈稳定,如分枝方式和结构模型要较分枝结构稳定^[24]。

随着数学模型和计算机模拟技术在植物科学中的应用与渗透,针对某些树木的分枝结构开展了模拟技术的研究,使树木结构的研究逐渐向定量化和科学化发展。树木的分枝结构在很大程度上决定了植物构型及营养空间,因而对植物的生长、发育有着重大影响,对其深入研究不仅在理论上具有重要意义,而且对于了解植物各部位的生物产量,制定合理的丰产措施等都有指导作用。

1.2.2 植物分枝格局研究 植物因遗传特性不同,枝和叶等在空间的排列方式不同,其构成的树冠空间构型也不同,不同物种结构特征差异明显。树冠作为树木自身遗传特性和环境作用的综合体现,既是树木生长发育的结构基础,又影响种群的分布格局,进而与群落及景观格局相联系,因此有必要深入研究。而枝条和叶片形成的空间排布格局作为树冠的构成单位,对它的清楚认识是了解树木生长发育的前提^[47]。

分枝格局是植冠构型分析中的一个主要内容,它最终决定了植株冠幅的复杂化程度。从植物内部的遗传因素看,可将植物地上部分的枝系划分为两种基本形式,即连续性分枝和重复性分枝^[48]。前者直接由树木内在的基因控制并严格遵从某一构型模式。植物体在生长过程中往往受外部环境条件波动的影响或由于伤害、啃食等使其内部基因控制的构型模式的表达受阻,在这种情况下其分枝格局主要受环境条件的影响,即重复性分枝。重复性分枝不是植物内在生长方案的表现形式,即枝系的重复性特征并没有参与到构型模式中,但这种枝系却在一定程度上决定了植株的实际构型。事实上,由于缺乏对植物内部受遗传机制决定的生长模式的了解,这两种分枝格局很难区别,因此,一定植物构型模式必须同特定的生境条件及植株发育阶段相联系;在特定的生境条件下,植物体的构型和分枝格局应是最合理的,并且反映了植物的可塑性特征^[49]。植物构型的可塑性可能更明确反映植物的适应对策,因此枝条的重复性特征具有重要的生态学意义^[50]。此外,分枝格局还涉及到与分生组织的关系以及枝条的发育、枝条的生长动态和分枝率等过程。

以往研究主要探讨草本植物、灌木及幼树的树冠结构,很少涉及植物树冠结构与外部环境条件(林分条件和经营措施)关系的研究,尤其对荒漠植物结构

生物量的构成和分布结构以及空间分枝格局的研究更少。

1.3 荒漠植物构型模型及可视化研究

植物构型模型(Architectural modeling)主要用于描述植物形态建成的过程。建立植物构型模型需要观察植物的 4 种基本形态学特征:生长特征、分枝特征、轴的形态分化特征和开花特征。分析植物构型可以为植物生长模型的建立提供植物性基础^[33]。在该领域研究较多的是法国以 de Reffye 为首开发的“AMAP”植物生长软件系统;加拿大以 Prusinkieics 为领导的虚拟实验室“Plant—Studio”;德国哥廷根大学 Kurth 领导的研究小组“LIGNUM”。国内以中法联合的“GreenLab”课题组为代表,主要研究植物生长模拟及其可视化方面的新理论、新模型。Green Lab 模型方法主要以农林学为应用背景,这是一个基于植物个体的“功能—结构”动态离散模型的方法。但是,目前植物构型建模主要集中于农林业、育种和土地利用方面。而对于植物与环境相互作用的生理生态机制的模拟方面,郭焱等建议跨越目前虚拟模型与生理生态模型之间的界限,构建将植物形态结构与功能一体考虑的新型虚拟模型,即根据形态模型模拟植物对资源的获取,计算植物的光合产量;利用生长模型进行光合产物分配,模拟植物发育进程和器官生长^[51]。

植物构型生长模拟及可视化的研究分为 3 个层次:植物构型中拓扑结构的表述,描述植物几何结构的算法和如何使模拟的植物更形象更逼真。拓扑结构的描述方面,赵星等发展了植物构型的双尺度自动机随机模型,一个尺度对应植物学上的“叶元”,即由一个节、一片叶及叶腋的芽构成的基本单元;另一尺度对应“生长单元”,即由一系列相似的“叶元”组成的结构^[52]。为加速模拟过程,康孟珍等利用亚结构生成植物构型的各级结构,模拟植物构型在各个生长周期的结构,包括每个子结构的具体形态,且能模拟产生重复生长的结构^[53]。不同学者对我国小麦、水稻、玉米、棉花等作物生长和构型从作物阶段发育、形态发生、光合与呼吸作用、干物质积累与分配、作物与水分的关系、作物的养分效应、作物气象环境的模拟等几部分内容进行了概括,并建立了相关的生长模拟模型^[54-55],而对荒漠植物构件生长模拟和构型模型方面的研究几乎为空白。因此,通过建立植物构型模型,模拟植物个体构件的生长过程,来探索荒漠植物的功能—结构对生态环境的响应与适应机制,从植物个体生理生态、群体结构与功能两个尺度水平深入认识荒漠生态系统的多样性和稳定性。

2 荒漠植物构型研究中存在的问题

尽管有不少国内外学者从不同角度对植物构型进行了研究,并给出了一些现象解释,对植物构型模型的研究也取得了许多有价值的成果,但对荒漠植物构型的研究相对比较薄弱,在研究中还存在如下不足,有待于进一步研究和完善:

(1)缺乏系统性的荒漠植物构型研究,即从植物构型分类学的角度对荒漠植物进行综合性的评价与分类。缺少不同植物在荒漠环境中呈现不同的构型特征和分布差异研究以及同一种植物在不同的地理分布范围内的构型差异的研究,不能全面反映荒漠植物在不同生境中的构型特性。

(2)缺乏荒漠植物构型的动态发育观测研究。荒漠植物的发展有周期性变化规律,植物的生长是一个连续和长期的过程,以前对植物构型的研究几乎都是基于某一时间段的采样分析,这意味着缺少对植物构型在一个完整生长周期内的时间序列分析和动态监测,因此,也就不能更全面、深入、客观地探讨荒漠植物构型形成发育过程中的作用因素。

(3)缺乏构型和植物生理、生化等学科的结合研究。植物的生长与植物生理、生化过程息息相关,在植物构型不断发生变化的同时,植物的生理特性也不断地适应构型的变化策略,荒漠植物为了适应严酷的自然环境,它的构型表现出极大的形态可塑性和生态适应性。

(4)缺少荒漠植物根系构型的研究。对于植物构型的研究,应该包括地上和地下部分,即加强根系构件的研究。荒漠植物由于长期适应干旱环境,所以根系一般很发达,从构件的角度对其进行研究,对于揭示其地下分布格局将很有意义。

(5)缺少对荒漠植物构型指标体系的研究。植物是不同构件体的有机组成,植物构型是植物各个构件,即根、茎、枝、叶、芽等在空间排列的一种外在表现形式。在荒漠植物枝、芽、叶、花等构件的构型分析基础上,对枝系生长、芽库动态、花叶生长在生长季节进行动态监测。分析其植株高度、冠幅大小、生活型等形态特征,建立较为完善的描述植物构型的植标体系,对研究荒漠植物构件在生理、生态上对环境空间的适应和伸展能力以及对光、水分、养分等的竞争能力具有重要意义。

(6)缺少荒漠植物构型模型的研究。通过模型的构建和植物生长的可视化模拟,集成荒漠植物形态发生模型与生理生态模型的综合研究,促进环境条件对植物构型生长发育的定量关系研究,从模型角度认识

荒漠植物的构型生长发育过程。

(7)对于荒漠植物(个体或种群水平)的结构与功能之间的相互作用及其对气候变化的响应与适应机理研究还不深入。由于植物生长过程的复杂性与某些不可预测性,生长环境的高度空间异质性以及研究手段的不足,在很大程度上限制了植物生长过程中形态结构变化、生理生态过程以及这两者之间的互反馈和植物构型过程与环境相互作用过程的定量描述与适应机理研究。

3 荒漠植物构型研究展望

3.1 注重多学科交叉研究

由于植物体的固着生长,对环境变化的反应主要表现在形态的可塑性表达上,因此植物个体发育过程中的构型变化就显得非常重要。构型特征是植物在特定环境条件下的形态学反应,它和内部生理、生化性质具有一定的相关性。荒漠植物作为一类在特殊生境条件下生长的植物类型,在生态适应性方面具有其特有的特性,研究范围已经涉及到植物学、生态学、植物生理生态学、形态学、分类学、土壤学、气象学、计算机图形学等学科的交叉与融合,从多学科角度研究荒漠植物构型特征,以期能更有效地探讨植物种群的生存、适应对策和进化机制,从而为荒漠化治理中植物种的最优选择提供构型方面的理论依据。因此从构型的角度加强研究,综合生理、生态、分类等多门学科,必将为荒漠植物的研究开拓出新的研究领域。

3.2 荒漠植物构型与环境的相互作用研究

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,其与功能的相互作用与互馈关系决定了荒漠植被的发展与演替。植物的形态结构是由生物遗传因素控制的内在生长过程与生境共同作用的结果,并通过植物构型表达出来。因此,研究植物构型来阐明植物结构和功能之间的作用与反馈作用关系,探讨植物结构—功能特征及其对环境的响应与适应机理已经成为植物群落结构与功能研究的热点与难点。

荒漠植物体从种子、幼苗,到成熟、衰老的整个生活史过程中,无论从自身的形态、生理特征,还是外界环境都处在不断变化之中。植物在长期的生长发育过程中,由于遗传结构的不同以及生境条件的差异,它们在适应不同的生态环境条件下会产生趋同或趋异适应的特征,特别是表现在外部形态特征上。通过对荒漠植物构件形态结构特征的研究,描述植物个体空间结构的分布特征,研究荒漠植物不同构件(包括枝、叶、花和果实等)的生物量分配、理化特征等随自

身的生长发育阶段、外部时间空间差异、气候特征、土壤地理差异等的变化规律,将荒漠的各种环境因子(温度、降水、土壤理化性质等)与植物构型的几何特征的相依关系进行深入研究,有助于理解荒漠植物的生物量、水分以及营养元素在不同构件中的分配规律,从而从物质、能量分配的角度研究植物空间构型生长特征的生态适应特征,从植物构件动态生长的角度阐明荒漠植物空间构型形成的规律性,解释环境因子和荒漠植物构型生长之间的作用规律,揭示荒漠植物对环境的反映,阐述荒漠植物构型与环境之间的作用机理。通过对这种规律的研究,不仅可以使我们获得对植物形态结构及其系统发生多样性的认识,而且还可以获得对遗传进化规律的进一步了解。构型研究已成为研究荒漠植物生长发育规律的又一突破口,具有重要的理论意义。同时,通过对荒漠植物构型模式及其动态变化规律的认识,可以使我们利用其来进行植物优良类型的筛选和合理构型的培育,具有很大的应用潜力。

3.3 荒漠植物构型模型研究

基于荒漠植物构件的分枝角度、分枝长度、分枝率、枝径比、逐步分枝率、叶的形状和大小、果实状况等指标,描述荒漠植物构型的特征,建立荒漠植物构型指标体系,同时根据荒漠植物形态学和发育特征,编制荒漠植物构型检索表,以便更全面系统地对荒漠植物进行研究。通过对荒漠植物构型指标体系的建立和不同构件生长状况的动态监测与定量分析,判断荒漠植物构件的生长方式、分枝角度等形态特征,依据观测所得的荒漠植物构件生长动态资料,建立荒漠植物构件的几何结构和拓扑结构模型,在此基础上构建荒漠植物生长的植物构型模型。

开展荒漠植物构型模型的可视化研究,通过植物模型领域中植物模拟模型的可视化技术,使得模型的研究人员更好地观察模型的内在结构和运行状况,使模拟的荒漠植物构型更形象、更逼真。在生长模型基础上,进一步构建基于过程的形态发生模拟模型,从而实现形态发生模型与生理生态模型的综合集成研究,并与可视化技术和虚拟植物生长技术相结合,构成一个感知的预测和显示荒漠植物生长动态过程、群体景观和结构形成等的计算机可视化环境,对于探索环境条件对荒漠植物生长发育定量作用关系研究将会有新进展。通过对荒漠植物构型生长的可视化、虚拟荒漠植物构件生长等的研究,进一步认识荒漠植物个体空间结构与功能特征,揭示荒漠植物的生态适应性规律,从而为荒漠地区种群、群落,甚至生态系统的结构、功能的研究提供基础数据。

参考文献:

- [1] Godin C. Representing and encoding plant architecture: A review[J]. *Annales of Forest Sciences*, 2000, 57: 413-438.
- [2] Sussex L M, Kerk N M. The evolution of plant architecture[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2001, 4: 33-37.
- [3] 杨曙辉, 丛者福, 魏岩, 等. 梭梭植冠的构筑型分析[J]. *新疆农业科学*, 2006, 43(1): 6-10.
- [4] 何玉惠, 赵哈林, 赵学勇, 等. 沙埋对小叶锦鸡儿幼苗生长和生物量分配的影响[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(5): 701-706.
- [5] 周智彬, 李培军. 我国旱生植物的形态解剖学研究[J]. *干旱区研究*, 2002, 19(1): 35-40.
- [6] 张道远, 杨维康, 潘伯荣, 等. 刚毛怪柳群落特征及其生态、生理适应性[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 446-451.
- [7] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵, 等. 民勤沙区主要植物群落退化特征及其演替趋势分析[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(3): 382-388.
- [8] 陶冶, 刘彤, 贾亚敏, 等. 古尔班通古特沙漠南缘心叶驼绒藜和梭梭种群空间格局的分形特征[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(3): 365-372.
- [9] 常杰, 陈刚, 葛滢. 植物结构的分形特征及模拟[M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1995.
- [10] Harper J L. Plant demography and evolutionary theory [J]. *Oikos*, 1980, 35: 244-253.
- [11] Harper J L. The concept of population in modular organisms[M]// May R. *Theoretical Ecology: Principles and Applications*. 2nd Ed. Oxford: Blackwell, 1981: 53-77.
- [12] Harper J L, Bell A D. The population dynamics of growth form in organisms with modular growth[M]// Anderson R M, Turner B D, Taylor L R. *Population Dynamics*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1979: 29-52.
- [13] 钟章成. 我国植物种群生态研究的成就与展望[J]. *生态学杂志*, 1992, 11(1): 4-8.
- [14] Maillette L. Plasticity of modular reiteration in *Potentilla anserina*[J]. *J. Ecol.*, 1992, 80: 231-239.
- [15] 黎云祥, 刘玉成, 钟章成. 植物种群生态学中的构件理论[J]. *生态学杂志*, 1995, 14(6): 35-41.
- [16] Bazzaz F A, Harper J L. Demographic analysis of the growth of *Linum usitatissimum*[J]. *New Phytol.*, 1977, 78: 193-208.
- [17] Maillette L. Modular demography and growth patterns of two annual weeds (*Chenopodium album* L. and *Spergula arvensis* L.) in relation to flowering[M]// Harper J L, White J. *Studies on plant demography*. London: Academic Press, 1985: 239-255.
- [18] McGraw J B, Garbott K. Demographic growth analysis[J]. *Ecology*, 1990, 71: 1190-2004.
- [19] 朱志红, 王刚. 不同放牧强度下矮蒿草(*Kobresia humilis*)无性系分株种群的动态与调节[J]. *生态学报*, 1994, 14(1): 40-45.
- [20] Lovett D L, Loveet D J. Leaf demography and clonal growth in female and male *Rumex acetosella*[J]. *Ecology*, 1987, 68: 2056-2058.
- [21] Maillette L. Effects of bud demography and elongation patterns on *Betula cordifolia* near the tree line[J]. *Ecology*, 1987, 68(5): 1251-1261.
- [22] Tomlinson P B. Architecture of tropical plants[J]. *Annual Review of Ecology and Systematic*, 1987, 18: 1-21.
- [23] Schmid B. Some ecological and evolutionary consequences of modular organization and clonal growth in plants[J]. *Ecological Trends in Plants*, 1990, 4(1): 25-34.
- [24] 孙书存, 陈灵芝. 不同生境中辽东栎的构型差异[J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 359-364.
- [25] Nitta I, Ohsawa M. Bud structure and shoot architecture of canopy and understory evergreen trees at their northern limit in East Asia[J]. *Ann. Bot.*, 1998, 81: 115-129.
- [26] Sprugel D G, Hinckley T M, Schaap W. The theory and practice of branch autonomy[J]. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1991, 22: 309-334.
- [27] 黎云祥, 陈利, 杜道林, 等. 四川大头茶的分枝率和顶芽动态[J]. *生态学报*, 1998, 18(3): 309-314.
- [28] Glimskar A. Estimates of root system topology of five plant species grown at steady-state nutrition[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227: 249-256.
- [29] Dannowski M, Block A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities [J]. *Plant and Soil*, 2005, 272: 61-76.
- [30] 蒋礼学, 李彦. 三种荒漠灌木根系的构形特征与叶性因子对干旱生境的适应性比较[J]. *中国沙漠*, 2008, 26(6): 1118-1124.
- [31] 杨小林, 张希明, 李义玲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地3种植物根系构型及其生境适应策略[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1268-127.
- [32] Ohsawa M, Nitta I. Patterning of subtropical temperate evergreen broad-leaved forest in Asian mountains with special reference to shoot ecology[J]. *Tropical*, 1997, 6(4): 317-334.
- [33] 胡包钢. *Plant growth modeling and applications*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [34] 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.
- [35] Halle F, Oldeman R A, Tomlinson P B. Tropic Trees and Forestry, an Architecture Analysis [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- [36] 钟章成, 曾波. 植物种群生态研究进展[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2001, 26(2): 230-236.
- [37] 王本楠, 谢海生, 顾连宏. 植物生长模型与形态的数理研究方法[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1990.
- [38] 孙书存, 陈灵芝. 辽东栎枝冠的构型分析[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 433-440.
- [39] 徐程扬. 不同光环境下紫葛幼树植冠结构的可塑性响应[J]. 应用生态学报, 2001, 13(3): 339-343.
- [40] 李俊清, 臧润国, 蒋有绪. 欧洲水青冈 (*Fagus sylvatica* L.) 构型与形态多样性研究[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 151-155.
- [41] 张道远, 王红玲. 荒漠区几种克隆植物生长构型的初步研究[J]. 干旱区研究, 2005, 22(2): 219-224.
- [42] 徐莉, 王丽, 岳明, 等. 新疆阜康荒漠红砂种群构件结构与环境因子的灰色关联度分析[J]. 植物生态学报, 2003, 27(6): 742-748.
- [43] 何明珠, 王辉, 张景光. 民勤荒漠植物枝系构型的分类研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(9): 1827-1832.
- [44] 何明珠, 张景光, 王辉. 荒漠植物枝系构型影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 625-630.
- [45] Suzuki T. A representation method for todo-fir shapes using computer graphics[J]. J. Jpn. For. Soc., 1992, 74(6): 504-508.
- [46] 刘艳艳. 樟子松人工林树冠结构的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [47] 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): 236-240.
- [48] Cornelissen J H C. Aboveground morphology of shade-tolerant *Castanopsis fargesii* saplings in response to light environment [J]. Int. J. Plant Sci., 1993, 154(4): 481-495.
- [49] Koppers, M. Ecological significance of aboveground architectural patterns in woody plants: a question of cost-benefit relationships [J]. Trends. Ecol. Evol., 1989, 4(12): 375-379.
- [50] Maillette L. Structure dynamics of silver birch: I. the fate of buds[J]. J. Appl. Ecol., 1982, 19: 203-218.
- [51] 郭焱, 李保国. 虚拟植物的研究进展[J]. 科学通报, 2001, 46(4): 273-280.
- [52] 赵星, Philippe de Reffye, 熊范纶, 等. 虚拟植物生长的双尺度自动机模型[J]. 计算机学报, 2001, 24(6): 608-615.
- [53] 康孟珍, Philippe de Reffye, 胡包钢. 快速构造植物几何结构的子结构算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(1): 79-86.
- [54] 姚桃峰, 王润元, 王燕, 等. 中国小麦生长模拟模型研究概述[J]. 干旱气象, 2009, 27(1): 66-72.
- [55] 徐寿军, 顾小莉, 王志刚, 等. 我国主要作物生长模拟模型研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2005, 20(4): 414-420.

欢迎订阅 2012 年《水土保持通报》

《水土保持通报》创刊于 1981 年, 双月刊, 中文版, 主管单位为中国科学院, 由中国科学院水利部水土保持研究所与水利部水土保持监测中心联合主办。《水土保持通报》连续 5 届被认定为我国中文核心期刊, 为《中国科技论文统计源期刊》, 《中国科学引文数据库统计源期刊》, 《中文核心期刊要目总览》等收编。开本为大 16K, 248 页/期, 全铜版纸印刷。刊号为: ISSN1000-288X, CN61-1094/X。国内邮发代号: 52-167, 国外发行代号: 4721BM, 定价: 25.0 元/册。

办刊宗旨: 紧密跟踪水土保持学科的发展动向, 及时报道本学科前沿领域科学理论、技术创新及其实际应用研究最新成果, 积极引导和推动水土保持学科和水土保持实践的发展与繁荣。报道内容: 土壤侵蚀、旱涝、滑坡、泥石流、风蚀及盐碱等水土流失灾害的现状与发展动态; 水土流失规律研究、监测预报技术研发成就与监测预报结果; 水土流失治理措施与效益分析; 水土流失地区生态环境建设与社会经济可持续发展研究; 计算机、遥感工程、生物工程等边缘学科新技术、新理论、新方法在水土保持科研及其实践中的应用; 国外水土流失现状及水土保持研究新动态等。读者对象: 从事水土保持科技研究、教学与推广的科教工作者及有关行政管理人员; 国内外环境科学、地学、农业、林业、水利等相关学科科教人员及高等院校师生。

地址: 陕西省 杨凌区 西农路 26 号 水土保持研究所《水土保持通报》编辑部

邮编: 712100

电话: (029) 87018442

E-mail: bulletin@ms.iswc.ac.cn

http://www.iswc.ac.cn