

农田防护林生态系统结构研究进展*

李春平¹ 关文彬^{1*} 范志平² 苏繁星¹ 汪西林¹

(¹ 北京林业大学水土保持部级重点实验室, 北京 100083; ² 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

【摘要】 农田防护林生态系统结构决定着生态功能, 其时空结构是该领域研究的核心, 旨在探讨形成结构的完整性、稳定性、持久性的组件间的相互关系。将其分为树体结构、林带结构、林网结构、景观结构4个层次, 针对各层次中结构研究的原理、方法及成果进行了综述。通过树木个体的形态、质态结构研究, 应用分形图形学的手段可实现动态结构的可视化, 以研究林带树体结构的生成机理; 精确界定林带结构的分维疏透度, 探讨农田防护林带最佳结构理论, 以构建防护林带最佳结构计算机生成模型; 确立多物种、多层次的窄林带小网格的林网优化模式; 评价农田防护林景观的合理性、稳定性、持续性, 是今后的重要研究方向。

关键词 农田防护林 树体结构 林带结构 林网结构 景观结构

文章编号 1001-9332(2003)11-2037-07 **中图分类号** S727.2 **文献标识码** A

Advances in studies on the structure of farmland shelterbelt ecosystem. LI Chunping¹, GUAN Wenbin¹, FAN Zhiping², SU Fanxin, WANG Xilin¹ (¹ *Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*; ² *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(11): 2037~2043.

The ecological function of farmland shelterbelt system is determined by its structure. The spatio-temporal structure is a key aspect in related researches, which is very necessary to study the integrity, stability and durability of shelterbelt modules. In this article, the researches on the structure of farmland shelterbelt ecosystem were reviewed from the four scales of tree structure, shelterbelt structure, shelterbelts network and landscape structure. The principles, methods and productions of each scale were summarized, and the prospects were also discussed. Dynamic simulation of tree growth process in shelterbelts could be conducted by the theory of form and quality structure of tree and by fractal graphics, which were helpful to study the mechanism of individual trees and belts based on photosynthetic and transpiration mechanism of individual trees. The mechanism model of shelterbelt porosity should be conducted, so that, the sustainable yield model of shelterbelt management could be established, and the optimized model of shelterbelt networks with multi-special and multi-hierarchical structure could also be formed. Evaluating the reasonability, stability and durability of shelterbelt landscape based on the theories and methods of landscape ecology was an important task in the future studies.

Key words Farmland shelterbelt, Tree structure, Shelterbelt structure, Shelterbelts network, Landscape structure.

1 引言

农田防护林是为了调整与改善脆弱、多灾的农田生态系统的结构与功能而建立的人工森林生态系统, 其最高目标是建立或恢复持续而稳定的高生产力水平、高生态效益的农田生态系统^[45]。依据现代生态学观点, 防护林带是异质性(Heterogeneity)的生态交错带(Ecotone), 是一个生态应力带(Tension zone)、边缘效应(Edge effect)带、生物多样性(Biodiversity)的交汇带、引入农田草原基质的廊道(Corridor)、生态场(物理的、化学的)的发生带。对其结构的研究旨在探讨其形成结构的完整性、稳定性、持久性组件之间的相互关系^[67], 这是经营管理、使其充分发挥多元效益的依据。因而, 农田防护林结构的问题一直颇受重视。纵观国内外的研究趋势, 防护林的研究不仅仅局限于生态效益和经济效益的研究, 已扩展到诸如林带对野生动物的保护^[7]、林网-农田复合生态系统的生理生态特性、对大区域气候影响等更广泛的研

究领域^[11]。佛罗里达曾尝试建立农林决策支持系统(FADSS), 对农林系统的规划和树种选择进行数据库管理, 但因缺乏关于农林系统中树木的信息和缺乏对树及其性质的分类研究而使此工作受到限制^[19]。树木个体结构上的差异使得林带呈现不同的结构状态。因此, 林带中单木树体结构研究也是防护林经营走向精准化的根本。单株树木间的相互作用及其与环境的适应过程就构成了林带结构整体的变化机制; 单个林网结构规划是以单条林带结构研究为基础的, 针对不同的林带结构类型, 林网的布局规划也不同^[38], 与单条林带相比, 单个林网作用为群体综合效果。以往的研究大多是将林带与被防护对象分开进行研究, 随着研究的不断深入, 系统的观点和方法逐步引入到防护林的建设 and 研究中, 北美农田防护林 1996 年会上, 专家们一致认同这一观

* 国家自然科学基金资助项目(39870639)。

* * 通讯联系人。

2002-11-05 收稿, 2003-01-13 接受。

点^[60]。因此,本文将农田防护林生态结构分为单木树体结构、单条林带结构、林网结构、景观结构4个尺度,对50年来关于农田防护林结构的研究进行综合评述,进而对其研究作一展望。

2 树体结构

2.1 树体形态结构

树体形态结构研究是伴随着植物个体形体结构研究而不断发展的。植物形体结构与产量及其环境关系问题,在作物栽培方面早就引人注目,但关于植物形体结构理论的深入研究,是20世纪60年代末期,随着对植物构件^[34]结构思想的认识而兴起的^[70,71,83]。对于树木形体结构(tree architecture)的研究,先后经历了野外实验统计、理论分析和计算机模拟几个阶段^[6,65]。对于林带内树体结构研究目前集中在树冠部分,主要利用其与某些环境因子的相互作用、借助于有关数学模型来分析结构特征^[15]。对树冠形状的研究方法有冠形曲线法、叶量分析法、回归法;从静态形体表述、分枝模拟和几何形体分析等角度,先后建立了许多模型,如H-model等分枝几何模型^[23-25,36]、具有三维意义的P-model^[37]、形体结构生成模型^[69]、“K氏”树冠形体模拟模型^[49]、三维空间形状模型^[55]、采用非参数回归分析模拟火炬松树冠形状^[17]、特别是树冠形状的可缩性与其对种群动态的影响^[72]、树冠三维结构与自然稀疏过程^[57,58]、树冠结构和叶密度对光合作用的影响^[28]等理论与方法均为树木生理生态模型、生长模型的深入研究奠定了新的理论基础。利用三维数字化仪与射线示踪软件相结合来描述胡桃树的三维结构,并重建植株图像获得了较好的效果^[64];用摄影技术对树木的几何形状进行测定而建立树冠的几何模型^[80];用格德斯内角计算机动态模型将树冠生长过程可视化^[6]。我国20世纪80年代,逐步重视对树木形体结构的研究,开始主要对树的分枝等一般特点和树的冠层特点进行研究,尝试建立树冠形状及动态发育模型^[83,84]。关于树体形态结构、质态结构、动态结构即“三态”结构划分学说的提出^[82],为树木形体结构及其生成模型的深入研究奠定了理论框架。

在对植物形体结构的认识上,总结出生物体结构三定律^[93],评述了植物体在结构上的自相似性,使用了“生物全息现象”和“全息元”等概念。随着分形几何学的发展,认识到树体不是一个简单的几何形体^[12,54],树体结构是面与体之间的复杂的空间结构,是典型的统计分数维体^[26,85,88],引入分形几何学的概念与方法可有效地表述植物形体结构上的自相似性。因此,依据构件结构思想^[34],将树体理解为是由叶、芽、枝等构件的填充形成的,树冠是由枝填充而形成的类似于海绵分形结构^[62]的单元。毋庸置疑,分形几何理论与方法是树体结构分析最有效的研究手段之一。

分形几何学在生态学中的应用主要体现在分维数的分析方法上,即通过分维数来研究自然界中的物体和空间格局特征,多应用统计性分形模型^[11]。在分析方法上,分数维度的标准分析方法—盒子计数法已被“双表面积法”^[87]和“双

数量法即 $N-N^m$ 法^[86]所取代。不少研究者利用树木分枝几何方法模拟叶片三维空间分布,并建立林冠结构的计算机模拟模型^[6];借助计盒维数和信息维数及平均均匀系数和均匀度变化系数分析了枝的复杂性,认为枝结构的分数维度可用来分析植物体的结构组织,特别是适用于研究树冠内分数维度和芽的分布规律,是植物生长与环境相适应情况的反应指标^[11]。有学者将分数维度与叶密度结合起来估测水洼松冠内叶的分维特征,获得较好的效果^[85];以分数维度为基础,对三大硬阔树冠最佳结构理论进行了初步探讨^[83];在立体图像傅里叶快速变换的基础上,对分数维度的计算方法进行了改进^[14]。近年来,分形重构问题已成为分形几何学研究中的一个热点,所谓“分形重构”,就是用分形的方法生成特定的图形。主要方法有迭代函数系统(Iterated Function System)^[3,40]、L-系统(L-System)^[52]。通过分形重构可模拟植物形态结构的各种变化,探讨不同植物形态及群落结构与环境因子分布的数量关系及其对生理功能的影响,寻找出植物最佳的结构——功能状态。

2.2 树体质态结构

树体生物量的配比结构特点是对树体的生物量组成和结构状态的反映。概括为生物量结构状态的研究,简称为树体质态结构^[82]。对其深入分析研究,不仅有助于从功能的角度对树的生长特点进行分析,掌握树木的形体结构及建成上的特点,还可以为结合树木生理特性的树体结构模拟研究提供有益的参数。

以往对生物量配比分析只是单纯配比关系的确定和树体结构特点的说明。到目前为止,已试图进一步阐明树木的生态适应对策及说明它们在林业经营和林木育种上的重要意义。管道模型理论为此提供了有效的思路。管道模型学说的创立与发展^[56,63,73],进一步深化了对树体特性的研究,它不仅从个体或群体角度反映特定树种冠层内同化组织与非同化组织的数量关系以及两种组织在空间配置的一般规律^[13],而且进一步揭示树木形态及冠层结构与树种的生物学特性、生长特点、生产力及其与生态环境条件的内在联系^[53]。其研究方法主要应用主轴切割法和分层切割法^[13]。目前,管道模型理论已被广泛应用。应用此理论对山毛榉(*Fagus sylvatica*)的干物质不同状态下的分布规律进行研究,建立可以模拟有资源竞争林分中干物质分配模型^[4]。但研究表明,用边材横断面面积估计叶量只适用于树冠内,对于边材的横断面在树冠以下测量时,应考虑边材面积的削度^[77]。近期,有学者应用管道理论研究了西部铁杉(*Western hemlock*)和香脂冷杉(*Balsam fir*)的干横断面面积的增加与分布对叶的垂直结构的影响,证实随着干横断面面积的增加,叶面积也增大,且呈线性;在活冠层以下,干横断面面积的增量是一个常数^[48,74]。

3 林带结构

3.1 疏透度

林带结构是林带系统中数量关系、空间关系、时间关系、

相互制约关系的有机组合,因此,应多学科综合运用。以往的研究可概括为林带、结构指标及其变化规律、林带结构指标的测定方法、结构分类、对林带结构最佳理论与实践的探索等几个方面。在1995年分析了不同季节农田防护林模型,并分析了系统各组件在资源上的竞争关系,提出在讨论农田防护林系统的潜在利益时应重新形成经济型的方法来分析农田防护林技术,以助于全面理解防护林各组件相互作用的动态关系^[2]。冠层轮廓线在森林研究中被用来描述林冠的结构,建立冠宽和冠形方程,为量化某给定高度平面上冠层面积、分层描述林冠结构奠定了基础^[18]。利用空间模拟来研究森林冠层结构特征及其与环境因子之间的相互关系,已经成为林冠结构研究的新手段^[5,33,35]。

林带结构包括林带疏透度、透风系数、配置方式、林带行数、株行距、保存率、林木平均胸径、冠下干径、树高、枝下高,其中林带疏透度和透风系数是林带结构其他各项因子的综合表征^[21]。因此,在生产及理论研究中,常用透光疏透度(简称疏透度)和透风系数作为区别林带结构优劣的最主要的量化指标。长期以来,国内外学者从林带的空气动力学效应角度出发,对林带最适疏透度进行了较多研究^[92]。疏透度的量化测定,多采用目测法、方格景框法、概率估测法以及许多间接的模型测定方法^[10],生产上常采用透明模片查算照片的方法测定疏透度^[31],这些方法都因太粗糙或操作不便,不能在实际中获得科学合理的应用;20世纪90年代以后,国外有学者采用数字化扫描方法测定单株树的疏透度^[47],为更精确测定林带的疏透度,利用光学相机获得林带影像,采用“数字图像处理”法^[41,95,97],实现了林带透光疏透度的较精确的量化测定。但用光学相机获取相片对于需要大量照片的科研和生产工作来说,成本太高,而且将照片扫描入计算机时也会降低分辨率。因此,借助数码相机和鱼镜头对不同疏伐强度下的海岸松树林的垂直透光规律进行了分层测定,来研究随高度变化林分内光环境的变化情况^[100];在实验过程中,发现利用数码相机拍摄的相片在区分枝叶与林带的孔隙时比普通相机要好^[20,89]。因此,用数码相机摄取林带相片,借助于计算机图像分析处理技术对“数字图像处理法”进行了改进,实现了更为精确、方便、经济的测定^[30]。

90年代以后,运用数量化理论I,研究了林带防护特征与疏透度的关系^[79];应用定性分析和回归分析相结合的方法,建立了林带疏透度与林带防护特征因子的最优回归方程^[92];以林带主导因子胸径、密度(株/100m)和枝下高与疏透度变化规律为依据建立了主导因子模型,以林带配置、行数、株距、保存率、胸径、冠下干径和枝下高等易测因子对林带疏透度影响为依据,建立了林带疏透度的机理模型^[42,43,96];据此可确定林带任何一时间的疏透度值,进而确定林带结构(疏透度)的优化系数,为农田防护林永续经营模型的构建奠定直接理论基础。

透光疏透度只是从单纯几何学的角度来表征林带结构,未考虑林带对风的作用机理。因此,在考虑风通过林带的动能变化后,提出了立木疏透度的概念^[10],是一项三维指标。

应用随机概率法推导立木疏透度与疏透度之间的近似数值关系,进一步证实了立木疏透度的实用价值^[75]。借助于林带高、林带宽、断面形状等林带外部特征因子和树冠内植物生长表面积、体积的数量与分布、组成树体的各部分即树组件的几何形状等内部特征因子,从三维角度对林带空气动力学结构给予了定义,认为植物表面积密度和立体密度可作为描述林带三维空气动力学结构的结构指标^[9],并建立了两项指标的计算式^[98],为探索三维角度的疏透度内涵提供了思路。分形学的发展使人们开始认识到林带也是具有分形特征的实体,研究分数维度的涵义具有很重要的科学探索意义。

3.2 风系数与疏透度

关于二者的关系,国内外学者都做了大量的研究^[10,44]。近年来,依模型树做风洞实验,结果表明,透风系数与疏透度之间符合幂函数关系 $\alpha = \beta^{0.6[29]}$,但这只是模型树的观测结果,对于实际树体尚需进一步分析;利用野外实测小网格农田林网主林带35组有代表性的透风系数和疏透度数值,经统计分析将其关系表达为 $\alpha_0 = 0.5025 - 1.694\beta + 8.4139\beta^2 - 8.0708\beta^3$,其精度为99%^[46],与上述模型相比,精度有很大提高,但由于其结论是对2~5行阔叶树组成的窄林带观测结果分析得到的,疏透度在0.2以下和0.6以上的林带极少,因此外推应用于宽林带或疏透度0.2以下及0.6以上的林带时,误差会很大。以往研究结果表明,虽然二者之间关系的具体表达形式不统一,但二者之间存在着密切的相关关系是不争的事实。疏透度是林带结构的内在指标,较易测定;透风系数能反映林带防风作用的动力学特征,但测定比较难。因此,在防护林的研究中,常二者结合使用。

3.3 密度与宽度

造林密度和林带宽度反映林带的空间结构关系,与林带的疏透度密切相关。风障试验观察表明,单行疏透度相同时,林带的总疏透度随行数增加而减少,其变化趋势呈对数曲线形式。在一定宽度范围内,要维持一定的疏透度,林带密度与行数是互补的关系^[10]。近年来在北美的研究结果表明,在被保护区内,树高和密度之间的相互作用决定了风速减小的距离,最终影响防护面积的大小。对于被给定的高度,通常情况下,随着密度的增加,防护面积增大。但是,密度低于0.2,防护林将不能有效地减少风速。密度大于0.8,过大的背风面湍流,也会减少在8H之外的防风效果^[8]。

3.4 树种选择与配置

以往对树种的选择多只考虑其生态适应性,但不同防护对象对风的敏感程度不同,要求不同的防护程度。因此,提出了保护效率^[90]这一概念。不同树种,其冠长、冠宽、树冠的体积、冠形和枝叶茂密程度等差别很大,季节变化也不同。不同树种构成的林带,即使配置相同,疏透度也会有很大差别,特别是落叶树种由于季相变化影响其疏透度的变化,从而影响林带的防护效能。即使株距相同时,不同树种单行林带或多行林带中一行林木形成的疏透度,彼此间的差异也是很大的;常绿树种和落叶树种在季节上结构变化也不同^[21];单株树木的排列方式对于疏透度的影响很大,品字形配置和互不

遮挡的斜线形配置与矩形配置相比,树木枝叶的空间分布较均匀,尤其在林带郁闭前能形成相对较小的疏透度,空间利用率较高.树种选择国内外均已认可混交方式.选用不同的造林树种,或不同树种的搭配可以形成不同疏透度的林带,因此,应将树种混交、针阔混交、乔灌草相结合,以保证结构上动态最佳^[22];树冠的密度和位置的变化与地上高度和邻树高度有关,林带胸径大小比数^[39]可以作为选择和确定密度的依据,但还有待于实践检验.

3.5 长度与连续性

尽管林带高决定了下风向防护范围,但长度决定了收到防护效果的大小.对于最大的防护效果而言,防护林的不间断长度应是树高的10倍多,这一比例可最大限度地减少保护区中湍流的影响^[8].防护林的连续性也影响它的防风效果,如果有洞就相当于开了一个风口,在这一洞后的背风向风速会越过旷野风速,降低防风效果.

3.6 断面形状

林带纵断面的层情况对疏透度有一定的影响,主要体现在枝下高对疏透度的影响^[10].应用改进的数字图像处理法对东北地区小钻杨有叶期和无叶期相对枝下高与疏透度的关系进行了模拟^[30];以北京杨为例,通过逐步回归分析表明,杨树林带有叶期和无叶期的疏透度与单位长度(100 m)林带胸高断面面积值和林带相对枝下高之间存在着很强的相关关系^[27].因此,林带的修枝对于疏透度有很大的影响,正确应用枝下高与疏透度之间的关系,对于应用修枝策略来合理调节林带结构达到较好的防护效果有非常重要的意义.通过实际观测认为在背风向10H树高内,断面形状对风速的影响不大,但在10H之外,影响较大^[8].

3.7 林带结构的类型

运用野外原型林带、野外模型林带和室内风洞等手段,国内外许多学者在此方面作了大量的观察和研究.普遍接受以疏透度作为标准来划分,认为疏透型或通风型的窄林带防护效果较好.对林带最适疏透度的研究很多,因研究方法和实验条件的不同,结果不尽相同,主要集中在0.25~0.50,普遍接受林带疏透度在0.25~0.35为最适结构状态^[45].但林带结构类型最佳是相对的,针对不同的防护对象,需求的防护效率不同,也即需求不同的防护类型.在风沙区应为0.25~0.30的窄林带防护效能最佳^[81].通过风洞模型实验研究认为,风沙区林带最适宽为7~11m,农区则为3~5m^[10].最适农防林单位面积林地冠幅为2~4 m²·m⁻²,冠体4~6 m³·m⁻²,密度0.1~0.2株·m⁻²,林木高度8~20m^[76].在固定范围内,为了聚积雪而设计的防护林,通常密度在0.6~0.8,农场建筑物和牲畜舍在冬天一般需要保护,就要求有高密度的多行林带^[8].

4 林网结构

4.1 林带高度

林带高度对防护效应的影响是指在其它特征均相同的条件下,由于林带高的不同而引起的防护效应的差异.一般

来说,林带防护距离的绝对值随高度的增加成正比增大^[10].把受林带影响的范围分为3个区域:迎风向风速减小区、林带上方风速加强区、背风向风速减小区^[32].防护林的高度是决定下风向防护面积(区域)的最重要因素之一.它的值在不同的林带间不同,随着防护林成熟的程度也发生变化.在多行防护林中,最高行树的高度决定整个防风林的高度^[7].

4.2 林带间距

林带间距决定网格形状和面积.主带间距一般应等于有效防护距离.副带间距的确定主要根据次要害风的危害程度、风沙干旱等危害程度、农业耕作要求而定.农田林网的规划设计要从发挥最佳防护效益出发,确定合理的网格大小,根据实际情况和效益分析确定林带密度.单条林带的疏透度和林带高度决定背风向的防护面积^[7,78].根据最小周长最大面积的图形是圆的原理得出 $S_{\max} = 1.88H^2$, $H = \frac{\sum_{i=1}^n L_i H_i}{\sum_{i=1}^n L_i}$, 其中 S_{\max} 为林网最大合理控制面积, L_i 为平均树高在 H_i 时的林带长度^[99],这是理论推断的公式,实践中林网的控制面积是否适应这一模型,还需要更多的实证.实际上,有效防护距离是不全面的表述,只反映了一维特征,而林网的防护具有场的效应.研究表明,林带的不同区分段上,有效防护距离是不同的,在迎风区和背风区均呈现出三角形的防护区域.传统意义上的有效防护距离只是一个平均特征,这与实际特征有很大的误差.因此,用有效防护面积来表征林带的防护区域特征才更能准确地定义和描述林带的功能大小.

4.3 与风向交角

防护林带与风向交角的研究,以往均认为主林带与主害风向成90°角或偏角不能小于30°为好^[10].但长期的实践证明,这一结论是基于较宽林带与大网格情况而提出的,不适于窄林带、小网格的护田林网.研究表明,小网格当主林带是长方形网格的长边时,风偏角在0~45°时,防风效能高于同面积的正方形网格;45~90°时,防风效能则低于同面积的正方形网格^[66].主害风方向单一的地区,以长方形林网为好^[50].

随着防护场理论的发展,认为林网的防护区域是单条林带防护区域综合作用的有效区域.依此理论建立的林网,在主害风向不明显的区域,林带走向可依据农田、河渠、路等的走向随意布局,只要使其成为完整的网格;对于主害风向明显的区域,应依据防护对象与目的来确定.如当庄稼需要被保护远离干热的夏季风、要防止磨蚀和风蚀土壤时,应该垂直于关键生长季节的主风向;为了控制土壤侵蚀,蓄积积雪以补充土壤水分,应垂直冬春季主风向^[9].北美对农田林网的规划多顺应土地所有权分布,在一户所有者内部加以规划.

4.4 带间树种搭配

不仅林带内部存在着树种搭配问题,组成林网的各带之间也存在着树种搭配问题.主栽树种和辅助树种复合结构或立体配置的林网,与相同主栽树种的单一林网相比,防风效果无差异,但不同主栽树种的林网之间,防风效果具有明显

差异^[91].用不同季相变化的树种搭配策略可实现对林网结构的动态调节;相邻林带采用不同的树种组成对于防治病虫害的蔓延有屏障作用.

5 景观结构

5.1 评价原理与方法

景观生态学在研究各景观单元之间的相互作用上表现突出的优势^[51].目前已广泛用来评价与规划大范围内的对象.但应用景观生态学的基本原理,将大面积林网与所防护的对象视为一个结构整体,对农田防护林生态系统的空间结构、时空变化、内部功能等问题进行深入的研究,以指导建立更加稳定的农田防护机制,即在景观尺度上加以研究还处于起步阶段^[94].

对欲设林网在景观中的布局做出评价,林网布局的理想状态是在最小的重合度下,以较小占地面积,使景观中农田需要被保护斑块的各部位全部且恰好处于林带有效防护范围内,从而能最大限度地提高农田生态系统的稳定性和生产力.随着研究的深入,认识到防护林的作用已不只是保护农田,还肩负着保持农田生态系统生物多样性的使命^[8].因此,调整现有林网布局,首先需要对其布局现状进行宏观度量与评价,然后与合理的设计方案做比较而作出评价,并据评价结论提出调整的经营方向^[94].一般运用多种统计分析方法来进行精确描述;遥感影像已被用于分析空间格局与生态过程之间的关系^[59],GIS也被用于评价农田景观的格局变化^[61].

但国内目前常用的周新华等^[95,97]的从景观尺度上来评价林网格局的方法,得出正确结论的前提是防护林的原始设计是合理的,而现实存在的林网其建设具有很大的随意性,甚至于没有原始设计,有原始设计的也不一定合理,这些都给这一方法的应用增添了困难.

5.2 评价指标及涵义

将景观生态学中描述网格特征的连接度、环度、带丰度、带斑比、优势度等指标引入到农田防护林研究中,从林网成型状况、数量以及分布均匀程度等几个方面综合地描述和度量林网在较大尺度上的布局状态,但景观中的典型网络是由三角形构成的,而现实中典型的林网是四边形的,所以,引入后赋予了新的定义^[94].但这些指标只是从二维尺度对林网的水平景观布局做出评价,并未考虑垂直结构;于是通过对复层林网的分析,引入了多样性指数 H 和均匀性指数 E 及优势度指数 D ^[16].

用林网合理带斑比来表征林网在景观中的数量,即林带的条数和所占的面积;用连接度 Q_0 和环度 R_0 来度量林网的成型状况,林网连接和网络化状态最好时连接度和环度均为 1;用林网合理优势度 D_0 来度量林网在景观中的数量及其分布的均匀程度,确定林网在景观中的地位及对景观基质的影响.所有这些指标都有现实的对应指标,成为评价和度量林网结构和布局的依据.从理论来讲,合理指标值与实际指标值相等说明林网布局处于合理状态.然而,在实际中这

种状态是不可能存在的,因此从生态学原理出发,计算现实林网的实际指标值与合理指标值的距离系数,并将距离系数分为不同的数量界限,来界定林网布局的合理性^[94].多样性指数 H 、均匀性指数 E 和优势度指数 D 弥补了上述指标只从水平面上反映林网布局特征的不足^[16].

应用景观生态学的基本原理,利用上述指标从水平和垂直两个角度对复层林网与单层林网的特征进行研究的实践表明,在水平方向上,林网连接度和环度对林网的防护效益有很大影响,当缺行、断带或设计不合理时,林的连接度和环度会降低,削弱防护效能;垂直格局中复层林网有较高的多样性指数,但均匀性指数下降,优势度提高.复层林网使得景观生态类型丰富,从而为需要不同生态环境的一些物种的生存、繁衍、迁移提供了条件^[16].借助于地理信息系统和遥感等技术,通过比较和分析设计林网与现有林网的景观指标值,评价和研究了农田防护林网和景观中的宏观布局^[68].

6 研究展望

从树木的光合、蒸腾作用出发,研究林带树体结构的生成机理;利用计算机图形学模拟树体结构的生成,并与林带中的环境因子相结合,在对林带树体结构的调控过程中,实现最佳林带结构的调控,将成为今后林带树体结构研究的重点.

应用分形几何学的理论与方法来研究表征并精确刻画林带结构的分维疏透度,探讨其与立木疏透度、透光疏透度、透风系数的变化规律,依此探讨农田防护林带最佳结构理论,并以该理论为基础,构建防护林带最佳结构计算机生成模型的研究,是林带结构研究的热点.

针阔混交、乔灌木物种搭配,提高林网组成物种的多样性和结构多样性,实现林网在时间和空间上持续最佳的立体结构是近年来关注的问题;对于林网间各相邻林带类型的组合,尚待深入探讨.

随着 3S 技术和景观生态学的发展,为从景观及区域尺度上来研究农田防护林提供了有效手段,研究防护林在景观上的持续结构具有重要的科学意义;随着精准农业技术的发展,将农田防护林树体结构、林带结构、林网结构、景观结构统一到“精准结构”思想下进行动态研究将是今后的重要方向.

参考文献

- 1 Alados CL, Escos J, Emlen JM, *et al.* 1999. Characterization of branch complexity by fractal analyses. Development, function and evolution of symmetry in plants. *Inter J Plant Sci*, 160(6): 147 ~ S155
- 2 Babu SC, Hallam A, Rajasekaran B. 1995. Dynamic modelling of agroforestry and soil fertility interactions: Implications for multi-disciplinary research policy. *Agric Econom*, 13(2): 125 ~ 135
- 3 Barnsley MF, Demko S. 1985. Iterated Function Systems and the Global Construction of Fractals. London: Proc Royal Soc. 243 ~ 275
- 4 Bertelink HH. 1998. A model of dry matter partitioning in trees. *Tree Physiol*, 18: 91 ~ 101
- 5 Batista JLF, Maguire DA. 1998. Modeling the spatial structure of tropical forests. *For Ecol Manag*, 110(1~3): 293 ~ 314
- 6 Berezavskaya FS, Karev GP, Kisliuk OS, *et al.* 1997. A fractal

- approach to computer analytical modeling of tree crowns. *Tree Structure Function*, 11(6):323~327
- 7 Brandle JR, Hodges L. 2000. Windbreak practices. In: Garrett HE, Rietveld WJ and Fisher RF eds. North American Agroforestry: an integrated science and practice. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agromony Inc. 79~115
 - 8 Brandle JR. 2002. How windbreaks work. University of Nebraska, Lincoln and Sherman Finch, Soil Conservation Service, University of Nebraska Extension EC 91-1763-B. <http://www.unl.edu/nac/brochures/ec1763/ec1763.pdf>
 - 9 Brandle JR, Zhou XH, Take ES. 2002. The influence of three-dimensional structure of a tree shelterbelt on aerodynamic effectiveness. In: Land-use Management for the Future. Proceedings of the Sixth Conference on Agroforestry in North America. Hot Springs AR. USA, June 12~16, 1999
 - 10 Cao X-S(曹新孙). 1983. Windbreaks and Shelterbelts. Beijing: China Forestry Press. 104(in Chinese)
 - 11 Chang J(常杰). 1996. Physioecology and production of crop in shelterbelt network eco-field. Hangzhou: Zhejiang University Press. 6(in Chinese)
 - 12 Chen H-H(陈华豪). 1992. Fractal geometry and its application. *J Northeast For Univ*(东北林业大学学报), 20(1):77~82(in Chinese)
 - 13 Chiba Y. 1991. Plant form based on the pipe model theory II. Quantitative analysis of ramification in morphology. *Ecol Res*, (6): 21~28
 - 14 Critten DL. 1997. Fractal dimension relationships and values associated with certain plant canopies. *J Agric Eng Res*, 67(1):61~72
 - 15 Dai T(戴挺). 1992. Theory and new methods of measuring plant canopy structure. In: Liu J-G(刘建国) eds. Advance in Modern Ecology. Beijing: China Science & Technology Press. 342~352(in Chinese)
 - 16 Ding Y-X(丁应祥), Jiang S-R(江生荣), Luan Y-L(栾以玲). Landscape ecological analyses on the special structure of shelterbelts. *J Nanjing For Univ*(南京林业大学学报), 17(2):7~12(in Chinese)
 - 17 Doruska PF, Mays JE. 1998. Crown profile modeling of loblolly pine by nonparametric regression analysis. *For Sci*, 44(3):445~453
 - 18 Dubrasich ME, Hann DD, Tappeiner II JC. 1997. Methods for evaluating crown area profiles of forest stands. *Can J For Res*, 7: 385~392
 - 19 Ellis EA, Nair PKR, Linehan PE, et al. 2000. A GIS-based database management application for agroforestry planning and tree selection. *Comput Electr Agric*, 27(1~3): 41~55
 - 20 Englund SR, O'Brien JJ, Clark DB. 2000. Evaluation of digital and film hemispherical photograph and spherical densitometry for measuring forest light environment. *Can J For Res*, 30: 1999~2005
 - 21 Fan Z-P(范志平), Guan W-B(关文彬), Zeng D-H(曾德慧), et al. 2001. Indices and criteria of highly effective and multi-functional management of windbreaks/shelterbelts in northeast China. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 12(5):701~705(in Chinese)
 - 22 Fan Z-P(范志平), Guan W-B(关文彬), Zeng D-H(曾德慧), et al. 2000. Construction history and actuality of windbreaks/shelterbelts artificial eco-engineering. *Soil Water Conserv*(水土保持学报), 14(5):49~54(in Chinese)
 - 23 Fisher JB, Honda H. 1977. Computer simulation of branching pattern in Terminalia(Combretaceae), a tropical tree. *Bot Gaz*, 138: 377~384
 - 24 Fisher JB, Honda H. 1979a. Branch geometry and effective leaf area: a study of terminalia-tranching pattern I. Theoretical trees. *Am J Bot*, 66:633~644
 - 25 Fisher JB, Honda H. 1979b. Branch geometry and effective leaf area: a study of terminalia-tranching pattern II. Survey of real trees. *Am J Bot*, 66:645~655
 - 26 Frontier S. 1987. Applications of fractal theory to ecology. In: Legendre P & Legendre L. eds. Developments in Numerical Ecology. New York: Springer-Verlag. 335~380
 - 27 Fu M-H(傅梦华), Jiang F-Q(姜凤岐), Yang R-Y(杨瑞英). 1992. Study on porosity of poplar shelterbelts and its application in belts tending felling. In: Jiang F-Q(姜凤岐) eds. Theory Foundation and Management Technologies of Shelterbelts. Beijing: China Forestry Press. 102~108(in Chinese)
 - 28 Genard M, Baret F, Simon BD. 2000. A 3D peach canopy model used to evaluate the effect of tree architecture and density on photosynthesis at a range of scales. *Ecol Model*, 128(2~3):197~209
 - 29 Guan D-X(关德新), Zhu T-Y(朱廷曜). 2000. Wind tunnel experiment on canopy structural parameters of isolated of tree and wind velocity field characters nearby. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 11(2):202~204(in Chinese)
 - 30 Guan W-B(关文彬), Li C-P(李春平), Li S-F(李世峰), et al. 2002. Improvement and application of digitized measure on shelterbelt porosity. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 13(6):651~657(in Chinese)
 - 31 Guo Q(郭群), et al. 1987. Method of calculating optical porosity by clear diaphragm and photograph. *Jiangsu For Sci Technol*(江苏林业科技), 30(2):22~34(in Chinese)
 - 32 Hao W, Takle ES. 1995. A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts. *Boundary-Layer-Meteorol*, 75(1-2):141~173
 - 33 Hao W, Takle ES. 1996. On three-dimensionality of shelterbelt structure and its influences on shelter effects. *Boundary-Layer-Meteorol*, 79(1-2):83~105
 - 34 Harper JL, White J. 1974. The demography of plant. *Ann Rev Ecol Syst*, 5:419~463
 - 35 Hilbert DW, Messier C. 1996. Physical simulation of trees to study the effects of forest light environment, branch type and branch spacing on light interception and transmission. *Func Ecol*. 106:777~783
 - 36 Honda H. 1971. Description of the form of tree by the parameters of the tree-like body: effect of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body. *J Theore Biol*, 31:331~338
 - 37 Honda H, et al. 1982. Tow geometrical models of branching of botanical real trees. *Ann Bot*, 40:1~11
 - 38 Hong CD, Shen XZ, Ye GF, et al. 1999. Studies on protective effectiveness of forest network in shoal farmland. *J Zhejiang For Sci Technol*(浙江林业科技), 19(6):21~24(in Chinese)
 - 39 Hui G-Y(惠刚盈), von Gadow K, Albert M. 1999. A new parameter for stand spatial structure—Neighbourhood comparison. *For Res*(林业研究), 12(1):1~6(in Chinese)
 - 40 Hutchinson JE. 1981. Fractals and self-similarity. *Indi Univ Math J*, 30:713~747
 - 41 Jiang F-Q(姜凤岐), Fu M-H(傅梦华), Xu J-Y(徐吉炎), et al. 1989. Taking measure of permeability of shelterbelt using "Digital Image Processing". In: Xiang K-F(向开馥) eds. Protective Plantation in West Part of Northeast and East Part of Inno-Mongolia China. Haerbin: Northeast Forestry University Press. 399~401(in Chinese)
 - 42 Jiang F-Q(姜凤岐), Zhu J-J(朱教君). 1996. Study on sustainable yield model of shelterbelt management. In: Jiang F-Q(姜凤岐), eds. Study on the Reasonable Management and Alteration Technologies of Shelterbelts in Existence. Beijing: China Forestry Press. 3~9(in Chinese)
 - 43 Jiang F-Q(姜凤岐), Zhu J-J(朱教君), Zhou X-H(周新华). 1999. Studies on the model and its application for continuative economic benefits of windbreak management. *Sci Silvae Sin*(林业科学), 35(1):9~14(in Chinese)
 - 44 Jiang F-Q(姜凤岐), Zhou X-H(周新华), Fu M-H(傅梦华). 1994. Shelterbelt porosity model and its application. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 5(3):251~255(in Chinese)
 - 45 Jiang F-Q(姜凤岐). 1992. Study on sustained yield and regeneration patterns of shelterbelts in "Three North". In: Jiang F-Q(姜凤岐), eds. Theory Foundation and Management Technologies of Shelterbelts. Beijing: China Forestry Press. 1~25(in Chinese)
 - 46 Kang L-X(康立新), Ji Y-H(季永华), Zhang R-L(张日连), et al. 1992. A preliminary study on the relationship between ventilation coefficient and porosity in principal shelter belt of farmland. *J Jiangsu For Sci Tech*(江苏林业科技), (1):12~16(in Chinese)
 - 47 Kenny WA. 1987. A method for estimating windbreak porosity using digitized photographic silhouettes. *Agric For Meteorol*, 3939:91~94
 - 48 Kershaw Jr JA, Maguire DA. 2000. Influence of vertical foliage structure on the distribution of stem cross-sectional area increment in western hemlock and balsam fir. *For Sci*, 46(1):86~94
 - 49 Kobayashi S, Kitamura M. 1990. Allometry and tree form. In: Burkhart HE, eds. Mensuration, Growth and Yield. IUFRO, Conference Montreal.
 - 50 Li Y-G(李一功). 1990. Reunderstand on farmland shelterbelt orientation. *Chin For*(中国林业), (9):42(in Chinese)
 - 51 Wu Y-G(伍业钢), Li H-B(李哈滨). 1992. Theoretical developments of landscape ecology. In: Liu J-G(刘建国), eds. Advance in Modern Ecology. Beijing: China Science & Technology Press. 30

- ~39(in Chinese)
- 52 Lindenmayer A. 1968. Mathematical models for cellular interaction in development, Parts I and II. *J Theoret Biol*, 18:280~315
 - 53 Ma Q-Y(马钦彦), Liu S(刘胜), Liu Z-G(刘志刚). 1991. Principle of pipe model of individual trees form. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 13(3):84~91(in Chinese)
 - 54 Mandelbrot BB. 1982. The fractal geometry of nature. San Francisco:Freeman. 2
 - 55 Noda Iwao. 1992. Three-dimensional modeling of a crown shape developed by measuring the crowns of standing trees. *J Jpn For Soc*, 74(3):194~202
 - 56 Olhata S, Shinozaki K. 1979. A static model of plant form further analysis of the pipe model theory. *Jpn J Ecol*, 29:23~35
 - 57 Osawa A. 1995. Inverse relationship of crown fractal dimension to self-thinning exponent of tree populations: a hypothesis. *Can J For Res*, 25(10):1608~1617
 - 58 Osawa A. 1996. Three-dimensional structure of tree crowns and plant self-thinning. *Jpn J Ecol*, 46:97~102
 - 59 Otto RD. 1996. An evaluation of forest landscape spatial pattern and wildlife community structure. *For Ecol Man*, 89(1-3):139~147
 - 60 Rietveld WJ, Francis CA. 2000. The future of agroforestry in USA. In: Garrett HE, Rietveld WJ, and Fisher RF eds. North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy Inc. 388
 - 61 Ruuska R, Helenius J. 1996. GIS analysis of change in an agricultural landscape in Central Finland. *Agric Food Sci Finland*, 5(6):567~576
 - 62 Shen B-M(沈步明), Chang Z-W(常子文). 1994. Fractal Dimension. Beijing: Earthquake Press. 27(in Chinese)
 - 63 Shinozaki K. et al. 1964. A quantitative analysis of plant form-the pipe model theory I, II. *Jpn J Ecol*, 14:123~139
 - 64 Sinoquet H, Rivet P. 1997. Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitizing device. *Trees*, 11(5):265~270
 - 65 Song T-Y(宋铁英). 1998. A visible stand model based on image of tree. *J Beijing For Univ* (北京林业大学), 20(4):93~97(in Chinese)
 - 66 Song Z-M(宋兆民). 1998. Study and Development of protective forest system in China. *Prot For Technol* (防护林科技), (4):14~17(in Chinese)
 - 67 Stadnik AP. 1989. The role of the structure of field shelterbelts in the forming of the agricultural landscape. *Lesnoe-Khozyaistvo*, 8:54~56(in Russian)
 - 68 Sun B-P(孙保平), Yue D-P(岳德鹏), Zhao T-N(赵廷宁), et al. 1997. The evaluation of special landscape pattern of farmland shelterbelt networks in Beizang town, Daxing county, Beijing. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 19(1):45~50(in Chinese)
 - 69 Suzuki T, et al. 1992. A representation method for todo-fir shapes using computer graphics. *J Jpn For Soc*, 74(6):504~508
 - 70 Tomlinson PB, Fisher JB. 1971. Morphological studies in cordyline I. Introduction and general morphology. *J Arnold Arbor*, 52:459~478
 - 71 Tomlinson PB. 1970. Dichotomous branching in flagellaria indica (New Research in Plant Anatomy, supp. I). *J Linn Soc Bot*, 63:1~14
 - 72 Umeki K. 1996. The effects of plasticity in crown shape on size-structure dynamics of population. *Jpn J Ecol*, 46:87~92
 - 73 Valentine HT. 1985. Tree-growth models: derivations employing the pipe-model theory. *J Theoret Biol*, (117):579~585
 - 74 Valentine HT. 2001. Influence of vertical foliage structure on the distribution of stem cross-sectional area increment in western hemlock and balsam fir. *For Sci*, 47(1):115~116
 - 75 Wang Z-G(王志刚), Yang D-H(杨东慧). 1998. Studies on standing tree transmissivity and structure design method of shelterbelt with winter facies. *J Desert Res* (中国沙漠), 18(1):87~90(in Chinese)
 - 76 Wang Z-L(王忠林). 1991. Relation between structural characteristics of farmland shelterbelt and crop yield. *J Shangxi For Sci Technol* (陕西林业科技), (1):49~52(in Chinese)
 - 77 Waring RH, Schroeder PE, Oren R. 1982. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can J For Res*, (12):556~560
 - 78 Wei L(卫林), Jiang A-L(江爱良), Zhang Y(张翼). 1985. Study on effective protective distance. *Sci Bull* (科学通报), (19):1567~1570(in Chinese)
 - 79 Wen K-J(文科军), Chen Z-H(陈志弘), Shao X-M(邵学明), et al. 1990. Relation between protective characteristics and porosity. *J Soil Water Conv* (水土保持学报), 4(3):87~91(in Chinese)
 - 80 Wilkinson DM. 1995. Study on geometric shapes of tree crowns. *Arboricult J*, 19(4):387~393
 - 81 Xiang K-F(向开馥) ed. 1991. Windbreaks and Shelterbelts. Beijing: Northeast Forestry University Press. (in Chinese)
 - 82 Ye W-H(叶万辉), Guan W-B(关文彬). 1995a. A review and prospect of the studies on tree architecture—a brief comment on 3 statuses of tree architecture. *World For Res* (世界林业研究), 8(4):22~27(in Chinese)
 - 83 Ye W-H(叶万辉). 1995b. Structural dynamic of *Juglans mandshurica*, *Fraxinus mandshurica* and *Phellodendron Amurense*. Harbin: Heilongjiang Science & Technology Press.
 - 84 Ye W-H(叶万辉). 1999. Structural dynamic of *Juglans mandshurica*, *Fraxinus mandshurica* and *Phellodendron amurense* II. Process of leaf birth and death. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 10(4):392~394(in Chinese)
 - 85 Zeide B. 1998. Fractal analysis of foliage distribution in loblolly pine crowns. *Can J For Res*, 28(1):106~114
 - 86 Zeide B, Gresham CA. 1992. Fractal dimensions of tree crowns of in three loblolly pine plantations of coastal south Carolina. *Can J For Res*, 21:1208~1212
 - 87 Zeide B, Pfeifer P. 1991. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns. *For Sci*, 37(5):1253~1265
 - 88 Zeide B. 1991. Fractal geometry in forestry applications. *For Ecol Manag*, 46:179~188
 - 89 Zeide B. 1990. Fractal analysis of crown structure. In: Burkhardt HE, eds. Proc. IUFRO Mensuratum, Growth and Yield. Virginia State University Press. 232~241
 - 90 Zhang H, Brandle JR, Meyer GE, Hodges L. 1995a. A model to evaluate the windbreak protection efficiency. Opportunities for agroforestry in the temperate zone. Selected papers from the Third North American Agroforestry Conference. *Agrofor-Systems*, 29(3):191~200.
 - 91 Zhang H, Brandle JR, Meyer GE, Hodges L. 1995b. The relationship between open windspeed and windspeed reduction in shelter. *Agroforestry Systems*, 32(3):297~311
 - 92 Zhang J-L(张纪林), Kang L-X(康立新), Ji Y-H(季永华). 1997. An evaluation of regional wind-proof effect of 10 models of coastal farmland windbreak networks. *J Nanjing Univ* (南京林业大学学报), 33(1):151~155(in Chinese)
 - 93 Zhang J-L(张纪林), Lü X-S(吕祥生). 1993. Porosity model of poplar farmland shelterbelt and its application. *Chin J Ecol* (生态学报), 12(5):56~60(in Chinese)
 - 94 Zhang Y-Q(张颖清). 1982. Three principles of creature structure. Huhehaote: Mongolian People Press. 32(in Chinese)
 - 95 Zhou X-H(周新华), Sun Z-W(孙中伟). 1994. On measuring and evaluating the spatial pattern of shelterbelt networks in landscape. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 14(1):24~31(in Chinese)
 - 96 Zhou X-H(周新华), Jiang F-Q(姜凤岐), Yang R-Y(杨瑞英), et al. 1992. Founding model of shelterbelt porosity law and applying them for quantitative regulating the porosity. In: Jiang F-Q(姜凤岐), eds. Study on the Reasonable Management and Alteration Technologies of Shelterbelts in Existence. Beijing: China Forestry Press. 82~101(in Chinese)
 - 97 Zhou X-H(周新华), Jiang F-Q(姜凤岐), Zhu J-J(朱教君). 1990. Study on random error of shelterbelt porosity estimated by measuring photo with the help of digitized photographic silhouettes. *Chin J App Ecol* (应用生态学报), 2(3):193~200(in Chinese)
 - 98 Zhou XH, Brandle JR, Take ES, et al. 2002. Estimation of the three-dimensional aerodynamic structure of a green ash shelterbelt. *Agric For Meteorol*, 111:93~108
 - 99 Zhu G-S(朱桂寿), Feng J-S(冯建生). 1998. Studies on forest network in plain farmland in Zhejiang province. *J Zhejiang For Sci Technol* (浙江林业科技), 18(3):64~68(in Chinese)
 - 100 Zhu JJ, Matsuzaki T, Gonda Y, Yamamoto M. 2000. Estimation of optical stratification porosity(OSP) in a pine coastal forest with different thinning intensities using hemispherical photographic silhouettes. *Bull Faculty Agric Niigata Univ*, 53:55~70

作者简介 李春平,女,1976年生,硕士,主要从事荒漠化防治、林业生态工程等方面的研究,发表论文3篇。E-mail: xln-0451@sohu.com 或 xln-0451bj@163.com