

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

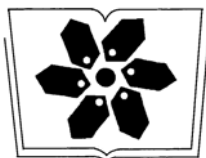
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 12 期 Vol.33 No.12 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 12 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 森林低温霜冻灾害干扰研究综述 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等 (3563)
- 碱蓬属植物耐盐机理研究进展 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

- 中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 徐琳, 陈效速, 杜星 (3584)
- 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等 (3594)
- 油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 李明, 王树香, 高宝嘉 (3602)
- 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响 张蕊, 王艺, 金国庆, 等 (3611)
- 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 等 (3622)
- 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应 段爱国, 张建国, 何彩云, 等 (3630)
- 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响 黄杰勋, 莫建民, 李非里, 等 (3639)
- 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等 (3648)
- 冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 张永平, 张英华, 黄琴, 等 (3657)
- 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 彭斌, 李潘林, 周楠, 等 (3668)
- 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响 陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 等 (3676)
- 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响 王文林, 王国祥, 万寅婧, 等 (3688)
- 植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 徐亚军, 赵龙飞, 陈普, 等 (3697)
- 不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 肖云丽, 印象初, 刘同先 (3706)
- 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响 曾宾宾, 邵明勤, 赖宏清, 等 (3712)

种群、群落和生态系统

- 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 袁菲, 张星耀, 梁军 (3722)
- 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价 李建军, 刘帅, 张会儒, 等 (3732)

景观、区域和全球生态

- 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应 徐宁, 王晓春, 张远东, 等 (3742)
- 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等 (3752)
- 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等 (3765)
- 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 等 (3774)
- 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应..... 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)

秦岭南北近地面水汽时空变化特征..... 蒋 冲,王 飞,喻小勇,等 (3805)

露天矿区景观生态风险空间分异..... 吴健生,乔 娜,彭 建,等 (3816)

基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 孔 艳,江 洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 潘 丹,应瑞瑶 (3837)

舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估..... 宋 科,赵 晟,蔡慧文,等 (3846)

不同基因型玉米间混作优势带型配置..... 赵亚丽,康 杰,刘天学,等 (3855)

气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响..... 陈 伟,熊 晶,陈 懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201211161608

李建军, 刘帅, 张会儒, 邝祝芳, 王传立, 张江, 曹旭鹏. 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价. 生态学报, 2013, 33(12): 3732-3741.

Li J J, Liu S, Zhang H R, Kuang Z F, Wang C L, Zhang J, Cao X P. Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3732-3741.

洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价

李建军^{1,2,*}, 刘 帅¹, 张会儒², 邝祝芳¹, 王传立¹, 张 江¹, 曹旭鹏¹

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要:以东、南、西洞庭湖区域君山岛、龙山、赤山岛龙虎山林场、明朗山、常德林场、和沅林场和桃源县天然次生林为对象, 借鉴生态学有关生态系统内部均衡和均质原理, 在森林生态系统(斑块)尺度, 从空间结构的混交、竞争、空间分布格局 3 个方面分析提出空间优化的均质性目标、均质性指数及均质性评价方法和评价标准。结果表明: 15 个洞庭湖湿地调查林分平均均质性评价指数为 0.2517。均质性评价的 5 个等级中处于 1 级和 2 级的林分为 12 个, 占 80%, 处于 3 级的林分只有 3 个, 仅占 20%。说明洞庭湖各林分整体在空间结构、生长环境和树种优势度等方面不具有明显优势, 离理想空间结构差距太大; 按照高程不同, 洞庭湖湿地从湖沼到丘陵岗地, 林分空间结构均质性特征逐渐增强。森林生态系统空间优化均质性目标及均质性指数的提出是森林可持续经营空间途径的拓展, 为森林经营的理想空间结构及其表达探索一条新途径。

关键词:洞庭湖湿地; 林分空间结构; 空间优化; 均质性目标; 均质性评价

Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake

LI Jianjun^{1,2,*}, LIU Shuai¹, ZHANG Huiru², KUANG Zhufang¹, WANG Chuanli¹, ZHANG Jiang¹, CAO Xupeng¹

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: The spatial structure rationality evaluation and ideal spatial structure of forest ecosystem is an important and difficult problem in forest management at home and abroad. In order to reveal the reasons why the community structure is simple and the stability of ecosystem is poor, and to take the regulation mechanism of structure in Dongting Lake forest, the research is targeted at East, South, West Dongting Lake area including Junshan Island, Longshan, Longhu forest farm on Chishan Island, Minglang mountain, Changde forest farm, Hefu Forest farm and natural secondary forest of Taoyuan County. Utilizing the ecosystem internal balance and homogenizing principle of the ecology, in the forest ecological system (plaque) scale, it analyses the spatial structure of mixed, competed and spatial distribution pattern. And then the heterogeneity goal of optimized stand spatial structure is proposed, which has multiple sub-goals in mixed, competed and spatial distribution pattern. Meanwhile the heterogeneity index of single tree and stand spatial structure is also defined, and the evaluation index, evaluation method and evaluation standard of stand spatial structure heterogeneity is determined. By applying the proposed evaluation method to the Dongting Lake area secondary forest heterogeneity evaluation, the results show that: in the fifteen Dongting Lake wetlands under investigation, the forest stand average homogeneity evaluation index is 0.2517. There are 12 stands in the grade 1 and grade 2 which is accounted for 80%, and only 3 stands in the 3 grade accounted for only 20% in the five grades of homogeneity index. However, it lacks of the grade 4 and grade 5 ideal stand

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31070568); 湖南省自然科学基金资助项目(10JJ2022); 湖南省教育厅重点科研项目(11A128)

收稿日期:2012-11-16; **修订日期:**2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijianjun_21@163.com

spatial structure in Dongting Lake survey. The evaluation results show that only part of stand spatial structure factors in Dongting Lake Forest meet the standard values. Although there is a certain degree of mixed size between dominant tree species and pioneer species, and there are more obvious differentiation between even-aged and uneven-aged forest stands, it yet shows that: the whole stand appears monolayer, and tree species has little isolation; trees' distribution pattern appears randomized into uniform distribution status; competition is more obvious between individual trees, and it has low diversity and weak illumination. It illustrates that the Dongting Lake stands as a whole have unobvious advantage on spatial structure, growth environment and species dominance and other aspects. Many irrational factors exist in forest structural characteristics including space information, and there is far from ideal spatial structure. According to the different altitudes, forest spatial structure homogeneity characteristics gradually grow from the lake to the hilly land in Dongting Lake wetland. This conclusion reflects the real situation of forest resources in Dongting Lake area, and it has a close relationship with the long-term natural and man-made interference, protection and restoration of fatigue.

The proposed forest ecological system space optimization objectives and heterogeneity index prolongate the sustainable forest management. The heterogeneity evaluation method breaks through the traditional analysis method of forest spatial structure. The heterogeneity index comprehensively and realistically describes the characteristics of spatial structure, and also quantifies the goal structure of forest spatial neighborhood relation and optimized spatial structure. The method has both forestry and ecological significance on optimizing and adjusting the existing forest spatial structure of Dongting Lake, on transforming large single plantation which mainly consists poplar and willow, and on restoring the functions of Dongting Lake ecological system, such as nourishing and cherishing water, conserving soil and water, reinforcing dam and so on. At the same time, the proposed method in this paper has provided a new way to establish and express ideal spatial structure for other regional forest management.

Key Words: water resource conservation forest in Dongting Lake; stand spatial structure; multi-objective optimization; particle swarm optimization; forest health management

洞庭湖是全球 200 个重要生态区之一,从丘陵岗地到湖沼,其森林生态系统包括常绿阔叶林群落,常绿落叶阔叶林群落以及湖洲耐水湿防护林和洪水淹没的乔灌木群落,具有维护湿地生态系统平衡、保持水土、滋养水源、护堤固岸的重要作用^[1-2]。而近年来,由于长期受到自然和人为干扰,湿地森林面积逐渐缩小,不少天然乔木和灌木树种几近绝迹,以乡土树种为优势种群的次生林群落逐渐消退,大面积人工林(杨树、柳树等)改变了原有森林群落物种结构,群落结构越来越简单,森林破碎化程度急剧增加,森林生态系统稳定性、抗干扰能力不断降低^[1-4]。

森林空间结构反映了森林群落内物种的空间关系^[5-6]。近年来,森林生态系统空间结构分析与优化经营决策问题已成为森林可持续经营的重要研究课题^[5-13]。然而,目前对森林空间结构的研究还存在一些不足^[10,12-13]:一是在描述森林空间结构特性方面的量化指标选取上仍不够准确和客观,且与非空间结构指标有不同程度的重叠;二是缺乏一套较为完整的包含空间细节的指标体系表达林分及其单株林木的结构特性,且各指标反映的林学和生态学意义没有十分科学的描述;三是缺少优化经营的理想(优化目标)森林空间结构,多仿照相同立地条件的天然原始林的森林空间结构进行调整;四是对各种空间结构指数的优选、评价等问题尚未开展深入研究。本文根据景观生态学理论、系统论和结构功能关系原理,针对洞庭湖区森林生态系统提出空间结构优化的均质性目标,构建科学和全面的森林空间结构均质性评价指标,实施以调整和优化森林生态系统空间结构为目的合理性评价研究,对制定科学合理的经营措施优化洞庭湖森林空间结构、恢复其生态功能具有十分重要的理论和现实意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区基本概况

研究区位于我国湖南省北部,长江荆江河段以南,是国内第二大淡水湖,由东、西、南洞庭湖和大通湖 4 个

较大的湖泊组成,湖面海拔平均 33.5m,湖滨平原地势平坦,土地肥沃,气候温和,雨水充沛。东洞庭湖是“国际湿地公约”收录的 21 个国际重要湿地自然保护区之一,位于长江中游荆江江段南侧,介于北纬 28°59′至 29°38′,东经 112°43′至 113°15′之间,濒靠湖南岳阳市,地处亚热带湿润气候区,日照充足,雨量充沛,年均气温 17℃,降水量 1200 至 1300mm。南洞庭湖在洞庭湖西南,益阳市东北部,地理位置东经 112°18′45″—112°45′15″,北纬 28°45′—28°57′30″之间,地貌以平原为主,兼有岗地,地域差异不明显。西洞庭湖位于长江中游荆江段南侧,湖南省北部的常德市内,属于中亚热带湿润季风气候向北亚热带湿润气候过渡地带,气候温和、四季分明、热量丰富、雨量充沛^[2-3]。洞庭湖湿地区域没有明显的山地,一般的丘陵岗地海拔多在 150m 以下。由于地形的特点,以及多种不同生态系统的差异性大,森林生态系统类型多种多样,其分布主要表现为带状分布规律、嵌套分布规律、同心圆分布规律。从湖沼到丘陵岗地,主要分布有川三蕊柳灌丛,南荻群落,洲滩木本落叶阔叶林,常绿阔叶林,常绿落叶阔叶林、竹林等^[1-3]。

1.2 数据来源与调查方法

笔者从 2010 年 8 月开始至 2012 年 11 月历时 2 年多,以洞庭湖湿地区域森林资源分布图为依据,结合地形图、土壤类型图,通过外业踏查,在了解森林类型及其成分、生态系统受干扰和退化以及人工林植被恢复的总体状况等基础上,对东洞庭湖君山岛、龙山、注滋河口,南洞庭湖赤山岛、明朗山岛,西洞庭湖常德河汊国家森林公园、桃源牯牛山、黄石、龙潭和余家坪区域的次生林进行了森林资源和样地调查。研究样地的设置根据洞庭湖区域次生林群落分布特征,采用典型样地与梯度格局法相结合的调查方法^[1-4],从湖沼到丘陵岗地,海拔在 40—130m,选择典型样地 15 块,面积为 20 m×20 m,分别编号为样地 D1、D2、D3、…、D15,主要林分类型为常绿阔叶林群落(主要组成树种有香樟(*Cinnamomum camphora*)、青桐(*Quercus myrsinaefolia*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、楠木(*Phoebe nanmu*)、马褂木(*Liriodendron chinense*)、木荷(*Schima superba*)等),落叶阔叶林群落(白栎(*Quercus fabri* Hance)、桦木(*Betula platyphylla*)、杨柳(*Populus simonii*)、榆树(*Ulmus pumila*)等)、杉木、马尾松纯林和混交林等。

调查样地的坡度、坡向、海拔、土壤类型、地貌、郁闭度、树种组成、林下更新等。对标准样地内胸径大于 5cm 的活立木进行定位、编号及每木检尺,调查内容为树种信息、林木空间位置、胸径、树高、枝下高、东西南北冠幅、相邻树与参照树的距离,并计算每株林木的角尺度、混交度、大小比数、空间密度指数和开敞度等结构指标因子^[5-16]。

根据调查数据和当地资料显示,东洞庭湖君山岛、龙山,南洞庭湖赤山岛龙虎山林场,西洞庭湖河汊国家森林公园、西洞庭湖余家坪的研究林分为经过轻微干扰并有所恢复的阔叶混交林(样地 D1、D2、D3、D4、D5、D6、D9、D13、D15),林内已有部分地带性树种苗木入侵,林下灌木层和草本层较丰富。D11 为次生性针叶混交林,D7、D12、D14 次生性落叶阔叶林。根据树种重要值确定优势树种,重要值计算公式为^[17-19]:

$$\text{重要值} = (\text{相对频度} + \text{相对频度} + \text{相对显著度}) / 3。$$

各调查研究样地的林分因子基本特征见表 1。

2 研究方法

2.1 森林生态系统空间结构优化的均质性目标

在景观生态学有关斑块的理论中,斑块内部通常为均质且与基质有明显区别^[20-21],单元同质性也是森林经营和规划等级方法单元划分的依据^[20-23]。林分作为森林景观中的一个斑块,具有空间可分辨的内部均质性,能从整体上反映出林分空间结构特征以及经营的措施及效果^[18-19,21-23]。依据景观斑块均质性原理,本文以林分(斑块)及其所包含的林木为研究对象,通过分析每株林木与其四周近邻木构成的最佳空间结构单元的空间关系,从水平和垂直三维空间定义单株林木与其空间单元的量化指标—林木空间结构均质性指数和林分空间结构均质性指数,以客观、准确地描述每株林木在其森林生态系统(群落)内的物种间的空间结构特性,从而提出包括混交、竞争和分布格局多个子目标的林分空间结构优化均质性目标^[11-15,18,19]。林木空间结构均质性指数所选混交、竞争和林木空间分布格局多个子目标及其定义如下:

表 1 调查林分因子基本特征
Table 1 Survey of research plots

样地编号 Plot code	位置 Position	林分类型 Forest types	坡度 Slope/(°) / 坡向 Slope Direction	海拔 Elevation /m	土壤 Soil type	地貌 Landform	株数 Number of trees	郁闭度 Canopy density	优势种 Dominant tree species	株数比例 Number ratio/%	林层数 Forest layers
D1	洞庭湖赤山 岛龙虎山林场	常绿阔叶次 生林	12/东北	90	红壤	低山	101	0.85	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> , 青桐 <i>Quercus myrsinaefolia</i>	51	3
D2	洞庭湖赤山 岛龙虎山林场	常绿阔叶次 生林	13/西北	92	红壤	丘陵	47	0.70	青桐 <i>Quercus myrsinaefolia</i> , 楠木 <i>Phoebe nanmu</i>	47	3
D3	洞庭湖赤山 岛龙虎山林场	常绿阔叶次 生林	15/北	89	红壤	丘陵	49	0.70	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> , 苦槠 <i>Melia aiedarch</i>	32	3
D4	洞庭湖明 朗山	常绿阔叶次 生林	0/无	49	红壤	平原	39	0.80	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> , 楠木 <i>Phoebe nanmu</i>	89	2
D5	洞庭湖君 山岛	常绿阔叶次 生林	10/西南	55	砂质红壤	丘陵	81	0.85	青桐 <i>Quercus myrsinaefolia</i> , 女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	95	4
D6	洞庭湖君 山岛	常绿阔叶次 生林	11/西	55	砂质红壤	平原	73	0.60	香樟 <i>Toona sinensis</i> , 榕叶冬青 <i>Ilex ficoidea</i> Hemsl	63	3
D7	洞庭湖龙 山镇乡	落叶阔叶次 生林	10/西	53	红壤	丘陵	36	0.60	白栎 <i>Quercus fabri</i> Hance, 栎树 <i>Quercus mongolica</i>	70	3
D8	洞庭湖注 河口	川三蕊柳次 生林	0/无	47	红壤	平原	51	0.65	川三蕊柳 <i>Salix triandroides</i>	97	2
D9	洞庭湖河 国家森林公园	常绿阔叶天 然次生林	10/南	87	红壤	丘陵	91	0.80	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> , 木荷 <i>Schinus superba</i>	31	3
D10	洞庭湖河 国家森林公园	常绿阔叶次 生林	13/西南	67	红壤	丘陵	82	0.75	榆树 <i>Ulmus pumila</i> L., 苦槠 <i>Melia aiedarch</i> , 枫杨 <i>Pterocarya tonkinensis</i>	28.5	3
D11	洞庭湖桃 源牯牛山	针阔混交次 生林	16/东南	63	红壤	丘陵	96	0.80	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> , 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb	91.5	3
D12	洞庭湖桃 源牯牛山	落叶阔叶次 生林	23/北	76	红壤	低山	102	0.80	栎树 <i>Quercus mongolica</i> , 黄柏 <i>Cortex phellodendri chinensis</i> ,	47	4
D13	洞庭湖黄 石镇	常绿阔叶次 生林	29.5/西南	111	红壤	低山	69	0.80	香椿 <i>Toona sinensis</i> , 桑树 <i>Morus alba</i> , 构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	63	3
D14	洞庭湖龙 潭	落叶阔叶次 生林	24/东北	121	红壤	丘陵	73	0.80	栎树 <i>Quercus mongolica</i> , 枫杨 <i>Pterocarya tonkinensis</i> , 榆树 <i>Ulmus pumila</i>	57	3
D15	洞庭湖 余家坪	常绿阔叶次 生林	17/北	119	红壤	丘陵	88	0.75	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> , 木荷 <i>Schinus superba</i>	79	3

(1) 混交

林分内林木的混交,包括树种隔离和大小分化,本文应用修正的林分混交度可同时反映林分内树种的隔离程度和树种多样性^[12-13,24]、应用大小比数^[12,25]表达林木大小分化状况。

混交度公式为^[13,24]:

$$M = \frac{1}{5N} \sum M_i n_i' \quad (1)$$

式中, N 表示所调查的林木株数; M_i 表示第 i 株树的混交度; n_i' 表示第 i 株树所处的结构单元中树种个数。

大小比数公式为^[25]:

$$u_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (2)$$

式中, u_i 为大小比数; n 为相邻木的株数; i 为参照木; j 为相邻木号; k_{ij} 为离散变量,其值定义为若参照树 i 比邻近树 j 小, $k_{ij} = 1$, 若参照树 i 比邻近树 j 大, $k_{ij} = 0$ 。

(2) 林木竞争

林木竞争参数选择与距离有关的竞争指标,采用改进的 Hegyi 竞争指数模型^[26-27]:

$$CI_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{d_j L_D}{d_i \cdot L_{ij}} \quad (3)$$

式中, CI_i 为林木 i 的点竞争指数; L_D 林分内空间结构单元 4 株竞争木与调查木距离的平均值; L_{ij} 对象木 i 与竞争木 j 之间的距离; d_i 对象木 i 的胸径; d_j 为竞争木 j 的胸径; n 竞争木株数。

(3) 林分在空间分布格局包括水平和垂直结构,在水平面上,林木空间分布格局的均质性是林木的均匀分布。已有研究^[5-8,11-15]表明,初期的树木与其近邻者竞争,通过自稀疏使林木之间的距离增加,其分布格局从聚集演变为均匀,其结果是相对大树要趋于均匀分布,而年幼的林木呈聚集分布。大树和林分整体均匀分布可减少林木之间冠层重叠,有效阻止病虫害蔓延和传播,还可以使地表连续覆盖,符合近自然林业要求。均质性评价水平结构选择角尺度 W_i 及空间密度指数 D_i ^[12-13,28-29]。

角尺度 (W_i) 是反映树木分布状况的一种空间指标,它用来描述相邻树木围绕参照树 i 的均匀性。用下式来表示^[13,28]:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (4)$$

式中, W_i 为角尺度; n 为相邻木株数; z_{ij} 为角尺度取值变量,它是离散型的, $z_{ij} = 1$, 空间密度指数 D_i 反映林木空间分布密度的指标。其公式为^[12]:

$$D_i = 1 - \frac{r_i}{r_{\max}} \quad (5)$$

式中, D_i 为空间密度指数; r_i 为参照树 i 包含相邻 n 株树木时的最小半径; $r_{\max}$ 在林分中相邻两株林木的最大距离。

垂直结构用林层指数来表达。林层指数不仅可反映复层林垂直分布格局,同时能反映出空间结构单元中林层结构的多样性^[30-32]。林层指数计算公式为^[30-31]:

$$S_i = \frac{Z_i}{3} \cdot \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 S_{ij} \quad (6)$$

式中, S_i 为空间结构单元中参照树 i 的林层指数; Z_i 为参照树 i 的空间结构单元中林层数; S_{ij} 为参照树 i 与第 j 株相邻木所处层次关系,定义为:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{参照数 } i \text{ 与第 } j \text{ 株相邻木不在同一层时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

林分整体林层指数取林木平均林层指数的均值,即:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (7)$$

式中, S 为林分林层指数; N 为林分内林木的株数。

开阔比数(简称 OP)是描述林分空间结构中高大乔木的光环境而建立的空间结构参数,定义为空间结构单元中参照树不受相邻木遮蔽的程度^[12-13]。公式表示为:

$$OP_i = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad (8)$$

$$\text{其中: } t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } l_{ij} \geq h_j - h_i \text{ 时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

式中, h_i 为参照树 i 的树高; h_j 为相邻木 j 的树高; l_{ij} 为参照树 i 与相邻木 j 的距离。

2.2 林分空间结构均质性评价方法

2.2.1 林分空间结构均质性评价指标

林分空间结构均质性评价指标包括混交、竞争、空间分布格局 3 个方面的空间结构因子,由混交度、大小比数、林层指数、竞争指数、空间密度指数、角尺度、开阔比数 7 个指标组成。林木空间结构均质性指数 L_i 计算公式如下^[12]:

$$L_i = \frac{\frac{1 + M_i}{\sigma_{M_i}} \cdot \frac{1 + OP_i}{\sigma_{OP_i}} \cdot \frac{1 + S_i}{\sigma_{S_i}}}{(1 + u_i) \cdot \sigma_{u_i} \cdot (1 + CI_i) \cdot \sigma_{CI_i} \cdot (1 + D_i) \cdot \sigma_{D_i} \cdot (1 + W_i) \cdot \sigma_{W_i}} \quad (9)$$

式中, σ_{M_i} 为混交度标准差; σ_{OP_i} 为开阔比数标准差; σ_{S_i} 为林层指数标准差; σ_{u_i} 为大小比数标准差; σ_{CI_i} 为竞争指数标准差; σ_{D_i} 为空间密度指数标准差; σ_{W_i} 为角尺度标准差。

根据 7 个空间结构指标的林学和生态学意义,遵循其一般规律,林分空间均质性评价模型取林分内所有林木的均质性评价指数的平均值,以反映林分整体的均质性特征。

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i \quad (10)$$

森林生态系统空间结构均质性评价模型结构如图 1 所示。

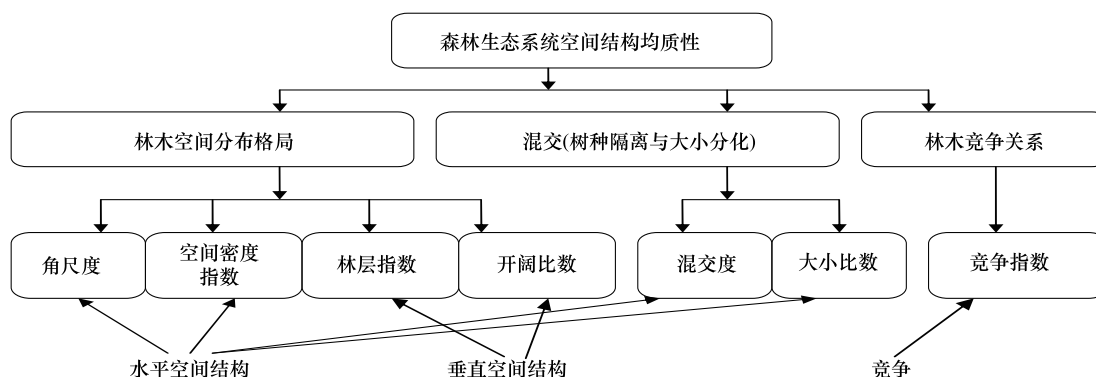


图1 森林生态系统空间结构均质性评价指标结构

Fig.1 The evaluation index of stand spatial structure heterogeneity of forest ecological

2.2.2 评价标准

根据林分空间结构均质性目标的定义,所选 7 个指标的林学和生态学意义可确定了林分空间结构均质性评价标准。由于林分均质性指数取值在 $[0.0628, 8]$ 之间,为便于比较,将公式(12)和公式(13)进行适当转换,得到如下公式:

$$\hat{L}_i = \frac{1}{8} (L_i - 1/16) \quad (14)$$

$$\hat{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n L_i$$

(15)

式中, N 为林分内林木株树。 $\hat{L}_i$ 为林木空间结构均质性评价指数, $\hat{L}$ 为林分空间结构均质性评价指数。显然, $\hat{L}(g)$ 和 $\hat{L}$ 的值在均在 $[0,1]$ 的区域内。

根据林分均质性指数反映的林分空间优化均质性目标的含义, 及林分均质性评价指数的定义, 参考森林健康评价和近自然森林经营自然度等级划分方法^[15-19], 以定性和定量相结合划分为如表 2 所示的 5 个林分空间结构均质性指数评价等级。

表 2 林分空间结构均质性指数评价等级划分

均质性评价指数 Heterogeneity evaluation index	林分(生态系统)均质性状态特征描述 The description of Stand (ecosystem) heterogeneity of state feature	均质性评价等级值 The grade value of Heterogeneity evaluation
≤ 0.20	绝大部分林分空间结构因子不满足其取值标准, 植被遭破坏形成的林分, 乔木树种组成简单且郁闭度较小, 优势树种种类少而且相当明显, 大小分化不明显, 低于中度混交, 林木分布格局分布不均匀, 林木间竞争强度大, 多样性较低, 光照环境差。	1
0.20—0.40	个别林分空间结构因子满足其取值标准, 植被遭破坏有所恢复, 优势树种与先锋树种混交林, 大小分化比较明显, 同龄或异龄林, 多为单层林, 树种隔离程度小, 中度混交, 林木分布格局随机向均匀分布, 林木间竞争较明显。	2
0.40—0.60	一半左右林分空间结构因子满足其取值标准, 郁闭度较高, 树种组成以优势树种和伴生树种为主, 中度混交且优势度明显, 林层多为复层结构, 同龄或异龄林, 中度混交, 林木分布格局由团状向均匀分布, 竞争强度较小, 多样性不高, 林下更新较好, 光照环境尚可。	3
0.60—0.80	演替过渡状态, 80% 左右的林分空间结构因子满足其取值标准(树种组成以顶级树种为主, 有少量先锋树种, 郁闭度在 0.8 以上, 异龄林, 林层为复层结构, 林木分布格局呈轻微团状分布向随机分布转化趋势, 大树均匀分布, 小树聚集分布, 强度混交, 多样性较高, 有枯立(倒) 木, 林下更新良好, 光照环境较好。	4
>0.80	理想林分空间结构状态(顶级群落森林), 林分空间结构因子基本满足其取值标准, 树种相对丰富, 树种组成以稳定的地带性顶级树种和主要伴生树种为主, 郁闭度在 0.85 以上, 异龄林, 林层多为 3 层以上复层结构, 顶级树种占据林木上层, 林木分布格局整体随机分布, 大树均匀, 小树聚集分布, 树种隔离程度较高, 多样性较高, 林下更新良好, 林木间竞争强度较弱, 光照环境好。	5

3 结果分析

15 个样地林分空间结构因子及均质性评价分级如表 3 所示。

从表 3 的结果来看, 洞庭湖地区次生林 15 个调查林分空间结构均质性评价分属 1、2、3 级, 其中 D4、D6、D7、D8、D10、D11 为 1 级, 占调查林分总数的 40%; D2、D3、D12、D13、D14、D15 属于 2 级, 占 40%; 其余的为 3 级, 没有林分结构较理想的 4 级和 5 级。林分均质性评价等级为 1 级的林分大多树种组成简单且郁闭度较低, 地带性优势树种少, 多杂木, 大小分化不明显, 弱度混交, 林木空间格局分布特征不明显, 林木间竞争强度大, 多样性较低, 光照环境差。这其中, D4、D8 为洲滩地纯林, 结构单一, 林相简单, 受湖区生态环境影响较大; D6、D6、D10、D11 等则因遭受人为或自然破坏而未完全恢复。均质性评价为 2 级的林分有个别空间结构因子较好, 但整体欠佳, 植被遭破坏有所恢复, 多为优势树种与先锋树种混交林, 大小分化比较明显, 同龄或异龄林, 多维单层林, 树种隔离程度小, 中度混交, 林木分布格局随机向均匀分布, 林木间竞争较明显。只有位于南洞庭湖赤山岛龙虎山林场、西洞庭湖河汊国家森林公园的调查林分 D1、D5、D9 的空间结构均质性评价分级为 3 级, 其结构特征表现为“一半左右林分空间结构因子满足其取值标准, 郁闭度较高, 处于正向演替阶段, 且先锋树种已退出群落, 树种多为优势树种及其伴生树种, 中度混交, 优势度明显, 林层为多维复层结构, 同龄或异龄林, 中度混交, 林木分布格局由团状向均匀分布, 竞争强度较小, 多样性不高, 林下更新较好, 光照环境尚可。

表 3 样地林分空间结构因子及均质性评价分级

Table 3 Homogeneous indexes and influencing factors distribution of different trees in stand D1

样地编号 No.	开阔比数 Open comparison index	大小比数 Objective tree characteristics index	角尺度 Uniform angle index	林层指数 Stand layer index	空间密 度指数 Spatial density index	混交度 Mingling degree	竞争指数 Competition index	均质性指数 Heterogeneity index	评价指数 Heterogeneity index	均质性 评价等级 Heterogeneity index
D1	0.7446	0.6982	0.6393	0.4786	0.6739	0.5339	0.1697	3.2751	0.5250	3
D2	0.5361	0.4792	0.7462	0.5124	0.6955	0.4154	0.2214	2.1013	0.3294	2
D3	0.8322	0.4874	0.5232	0.2533	0.7193	0.5985	0.1361	1.9447	0.3033	2
D4	0.6752	0.4748	0.5683	0.1988	0.7488	0.2465	0.1930	0.8436	0.1198	1
D5	0.9541	0.4413	0.7634	0.7122	0.6663	0.1976	0.6293	0.6239	0.4956	3
D6	0.3932	0.4824	0.5011	0.5351	0.7747	0.3273	0.1540	0.9284	0.1339	1
D7	0.4215	0.5114	0.6565	0.6231	0.5974	0.2963	0.4410	0.6264	0.0836	1
D8	0.5846	0.6215	0.8797	0.5117	0.8124	0.2435	0.1743	3.0987	0.0832	1
D9	0.8335	0.7853	0.4232	0.2978	0.3696	0.3697	0.0291	2.9686	0.4739	3
D10	0.9126	0.3719	0.4012	0.4631	0.7416	0.4225	0.2052	0.9985	0.1456	1
D11	0.8264	0.2967	0.4763	0.6341	0.4165	0.5862	0.1964	0.9777	0.1421	1
D12	0.4715	0.5936	0.4961	0.1297	0.3397	0.3631	0.0871	1.3886	0.2106	2
D13	0.1362	0.3468	0.4731	0.3566	0.7194	0.5871	0.0770	1.6501	0.2542	2
D14	0.4193	0.4454	0.3397	0.7394	0.5311	0.3066	0.1391	1.6975	0.2621	2
D15	0.413693	0.5732	0.3815	0.3916	0.5466	0.2903	0.1301	1.7892	0.2129	2

表 4 的结果显示,目前各类林分均与理想空间结构林分差距较大。均质性评价为 1 级和 2 级的林分占到调查林分总数的 80%。这部分林分长期以来受到人类及环境演变的干扰,森林恢复及演替过程曲折,整体均质性水平不高,是实际营林过程中需要重点关注的对象。评价结果还说明,按照高程不同,洞庭湖湿地区域森林从湖沼到丘陵岗地,其林分空间结构均质性特征呈逐渐增强趋势,这种趋势反映在郁闭度、树种丰富度、混交强度上尤为明显,使得各林分具有较清晰的层次结构。林分呈现的这一特点也与受干扰程度有关,丘陵山冈林分(如 D1、D5、D9)由于远离人类活动区域,相比湖沼和平原地区(如 D4、D6、D8)其林分整体情况要好一些。同时,常绿阔叶次生林(如 D1、D2、D3、D5、D9、D13、D15)的整体均质性高于落叶阔叶林(如 D7、D12、D14)及纯林和简单混交林(如 D8、D10)。

4 结论与讨论

森林生态系统空间结构优化的目标结构及其量化标准一直以来是国内外森林经营研究热点和难点^[8,9,11-13,32]。本文借鉴景观生态学斑块(林分)内部均衡和均质原理,以揭示洞庭湖森林群落结构简单,生态系统稳定性差等原因以及相应的调控机制为目的,提出了包含混交、竞争和林木空间分布格局多个子目标的林分空间结构优化的均质性目标。同时定义了单株林木和林分整体空间结构均质性指数,确定了林分空间结构均质性评价指数及评价方法和评价标准,以发现包含有空间信息的森林特征中存在的合理性,为明确森林经营可量化的目标结构及确定合适的经营措施提供理论依据。实例应用表明:研究选择的具有代表性的 15 个洞庭湖区调查次生林林分空间结构均质性评价分别属于 1、2、3 级,其中 1、2 级占调查林分总数的 80%,处于 3 级的林分仅占 20%,缺少林分空间结构较理想的 4 级和 5 级。林分平均空间结构均质性评价指数仅为 0.2517。评价结果表明洞庭湖区次生林只有部分林分空间结构因子满足其取值标准,虽然优势树种与先锋树种存在一定程度树种混交,有较为明显的大小分化,介于同龄和异龄林之间,但林分总体呈现单层林,树种隔离程度小,林木分布格局呈随机向均匀分布状况,林木个体之间竞争较为明显,多样性较低,光照环境较差。随着高程的增加,洞庭湖湿地从湖沼到丘陵岗地,林分空间结构均质性特征逐渐增强。说明洞庭湖区包含有空间信息的森林结构特征中存在的合理性因素较多,离理想空间结构差距十分明显。这一结论较真实地反映了洞庭湖区次生林资源现状,与长期以来的自然和人为干扰、保护与恢复乏力有着密切的关系。

林分空间结构均质性评价突破了传统的森林空间结构分析方法,全面和客观地描述了林分空间结构特性,量化了林木的空间邻近关系和林分空间结构优化的目标结构,对优化和调整洞庭湖现有次生林空间结构,改造以杨树、柳树为主的大面积单一人工林,恢复洞庭湖森林生态系统涵养水源、保持水土、护堤固岸等功能具有明确的林学及生态学意义,为森林经营的理想空间结构及其表达探索了一条新途径。

森林生态系统空间结构优化涉及森林经营的各个方面,研究林分空间结构评价的最终目的是采取合理的经营措施调控不合理的林分空间结构,是一个渐近的动态过程,需要在优化调整过程中不断分析其空间因子变化趋势以及各指标的相互影响^[10,12-13,16-17]。本文提出的评价方法只是根据调查的森林群落空间结构特性从多目标优化角度进行评价,仍缺少自然竞争演替及通过经营措施影响森林空间结构均质性指数及其各组成因子变化的动态监测过程及其发展趋势预测,这将是下一步研究的重点。同时,森林生态系统空间结构因子与所选样地大小有关,由于洞庭湖森林资源分布特征及现实调查的难度,本研究所选 20m×20m 样地面积较小(小于惠刚盈等研究认为的样地面积大于等于 0.25 hm²),对研究结果的影响大小以及边缘校正方法也将是今后研究的方向。

此外,还可深入挖掘森林的空间结构信息,建立更为完善的空间结构评价指标体系及评价模型,例如,对垂直结构可考虑林木对光能的利用,引入树高因子,对林分三维空间进行剖分,结合 GIS 等技术,建立更大研究尺度、多层次的森林空间结构评价模型。对于洞庭湖以外其它立地环境、不同功能的森林类型,可在此基础上根据其主导功能增加相关因子建立评价模型,例如可增加林分立地环境、群落演替、林分年龄分布、材积、生物量等非空间结构影响因子进行综合分析,使其评价模型具有普适性和更广泛的应用前景。

References:

- [1] Yuan Z K, Kuang J J. Analysis of degradation and its genesis of natural wetland in the Dongting Lake area. *Yangtze River*, 2009, 40(14): 32-34.
- [2] Wang L Y. Study on Characters of Beach Vegetation and Its Succession in Dongting Lake Area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009: 13-43.
- [3] Li X M, Chen W J. Analysis on benefit evaluation and the construction of ecological forestry in plain areas China: Taking Dongting lake region as an example. *Economic Geography*, 2010, 30(10): 1729-1734.
- [4] Li J J, Chen D L, Tan J S, Zang H, Cao X P. The stand spatial structure research of the secondary forest in Longhu Mountain in southern Dongting Lake Wetland. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(13): 132-138.
- [5] von Gadow K, Hui G Y. Analysis of Forest Structure and Diversity-based on neighbourhood relations // IUFRO International Conference. Lisbon Portugal, 2002: 103-107.
- [6] Hui G Y, von Gadow K, Hu Y B, Xu H. Structure-based Forest Management. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 26-42.
- [7] Hof J, Bevers M. Optimizing forest stand management with natural regeneration and single-tree choice variables. *Forest Science*, 2000, 46(2): 168-175.
- [8] Tang M P. Study on Forest Spatial Structure Analysis and Optimal Management Model [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003.
- [9] Aguirre O, Hui G Y, von Gadow K, Jiménez J. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183(1/3): 137-145.
- [10] Tang M P. Advances in study of forest spatial structure. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(1): 117-122.
- [11] Hui G Y, Li L, Zhao Z H, Dang P X. The comparison of methods in analysis of the tree spatial distribution pattern. *Acta ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4717-4728.
- [12] Li J J. Research on the Spatial Structure Optimization of Mangrove Ecosystem in Zhangjiang, Guangdong [D]. Beijing: Central South University of Forestry and Technology, 2010.
- [13] Hu Y B. Structure-based Spatial Optimization Management Model for Natural Uneven-aged Forest [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [14] Li M H, He F H, Liu Y, Pan C D. Analysis methods of stand spatial distribution pattern. *Ecologic Science*, 2003, 22(1): 77-81.
- [15] Kong L, Yang H, Hang X G, Gao Y, Feng Q X. Review on the methods of spatial distribution pattern in forest. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2011, 39(5): 119-125.
- [16] Baskett E Z, Keles S. Spatial forest planning: a review. *Ecological Modelling*, 2005, 188(2/4): 145-173.
- [17] Király G, Brolly G. Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve. *IAPRS Volume*, 2007, 36: 211-215.
- [18] Zhang W. The Evaluation Indicator System and Appraisalment Methods of Forest Vegetation Restoration in Forest-Type Scale [D]. Lanzhou: Gansu

- Agricultural University, 2007; 21-28.
- [19] Liu G, Lu Y C, Sturm K, Ning J K, Lei X D. Application of Near-nature estimation method for forest management in Beijing. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(5): 114-118.
- [20] Zhao Y T, Yu X T, Guan W B. Review on landscape heterogeneity. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(4): 495-500.
- [21] Guo J P, Zhang Y X. Studies on the Dynamics and Distribution Pattern of Landscape Elements in the Forest Landscape Restoration Process in Guandi-shan Forest Region. Acta ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2021-2029.
- [22] Holmes M J, Reed D D. Competition indices for mixed species northern hardwoods. Forest Science, 1991, 37(5): 1338-1349.
- [23] Spathelf P. Reconstruction of crown length of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Silver fir (*Abies alba* Mil. 1)-technique, establishment of sample methods and application in forest growth analysis. Annals of Forest Science, 2003, 60(8): 833-842.
- [24] Hui G Y, Hu Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests. Forest Research, 2001, 14(1): 23-27.
- [25] Hui G Y, von Gadow K, Albert M. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison. Forest Research, 1999, 12(1): 1-6.
- [26] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands // Fries J, ed. Growth Models for Tree and Stand Simulation. Sweden: Royal College of Forestry, 1974; 74-90.
- [27] Li J J, Li J P, Liu S Q, Zhao C Y, Zhang H W, Feng X L. The Mangrove spatial structure competitive analysis based on Hegyi improved model. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(12): 23-27.
- [28] Hui G Y, von Gadow K, Hu Y B, Chen B W. Characterizing forest spatial distribution pattern with the mean value of uniform angle index. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1225-1229.
- [29] Weintraub A, Barahona F, Epstein R. A column generation algorithm for solving general forest planning problems with adjacency constraints. Forest Science, 1994, 40(1): 142-161.
- [30] Lv Y, Zang H, Wan X J, Deng Z A, Li J J. Storey structure study of cyclobalanopsis myrsinaefolia mixed stand based on storey index. Forest Resources Management, 2012, (3): 81-84.
- [31] Lin Y L, Chang W D, Hsieh J G. A particle swarm optimization approach to nonlinear rational filter modeling. Expert Systems with Applications, 2008, 34(2): 1194-1199.
- [32] Tang P M, Chen Y G, Shi Y J, Zhou G M, Zhao M S. Intraspecific and Interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4707-4716.

参考文献:

- [1] 袁正科, 旷建军. 洞庭湖天然湿地退化及成因分析. 人民长江, 2009, 40(14): 32-34.
- [2] 王灵艳. 洞庭湖区滩地植被特征及其演替规律研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [3] 李晓敏, 陈文俊. 我国平原地区生态林业效益评价及发展路径浅析——以洞庭湖区为例. 经济地理, 2010, 30(10): 1729-1734.
- [4] 李建军, 陈端吕, 谭骏珊, 臧颖, 曹旭鹏. 南洞庭湖湿地龙虎山次生林分空间结构研究. 中国农学通报, 2012, 28(13): 132-138.
- [6] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多, 胡艳波, 徐海. 结构化森林经营. 北京: 中国林业出版社, 2007: 26-42.
- [8] 汤孟平. 森林空间结构分析与优化经营模型研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [10] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势. 林业科学, 2010, 46(1): 117-122.
- [11] 惠刚盈, 李丽, 赵中华, 党普兴. 林木空间分布格局分析方法. 生态学报, 2007, 11(11): 4717-4728.
- [12] 李建军. 广东湛江红树林生态系统空间结构优化研究 [D]. 北京: 中南林业科技大学, 2010.
- [13] 胡艳波. 基于结构化森林经营的天然异龄林空间优化经营模型研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [14] 李明辉, 何风华, 刘云, 潘存德. 林分空间格局的研究方法. 生态科学, 2003, 22(1): 77-81.
- [15] 孔雷, 杨华, 亢新刚, 高延, 冯启祥. 林木空间分布格局研究方法综述. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 119-125.
- [18] 张伟. 林型尺度森林植被恢复测度指标体系与评价方法研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007: 21-28.
- [19] 刘刚, 陆元昌, Sturm K, 宁金魁, 雷相东. 北京林区森林经营近自然度评价方法的研究与应用. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 114-118.
- [20] 赵玉涛, 余新晓, 关文彬. 景观异质性研究评述. 应用生态学报, 2002, 13(4): 495-500.
- [21] 郭晋平, 张芸香. 森林景观恢复过程中景观要素空间分布格局及其动态研究. 生态学报, 2002, 22(12): 2021-2029.
- [24] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23-27.
- [25] 惠刚盈, von Gadow K, Albert M. 一个新的林分空间结构参数——大小比数. 林业科学研究, 1999, 12(1): 1-6.
- [27] 李建军, 李际平, 刘素青, 赵春燕, 张宏伟, 冯湘兰. 基于 Hegyi 改进模型的红树林空间结构竞争分析. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(12): 23-27.
- [28] 惠刚盈, von Gadow K, 胡艳波, 陈伯望. 林木分布格局类型的角尺度均值分析方法. 生态学报, 2004, 24(6): 1225-1229.
- [30] 吕勇, 臧颖, 万献军, 邓志昂, 李建军. 基于林层指数的青桐混交林林层结构研究. 林业资源管理, 2012, (3): 81-84.
- [32] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 周国模, 赵明水. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争. 生态学报, 2007, 27(11): 4707-4716.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
- Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
- Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
- Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
- Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
- Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
- Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
- Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
- Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
- The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
- Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
- Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
- The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
- Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
- Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
- The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
- Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng
..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land
..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.
..... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city
..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis
..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan
..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes
..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves
..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of
Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吴文良

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 12 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元