

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **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 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚婧,李颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟希,张淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳林,王信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

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/stxb201207281072

李建军, 张会儒, 刘帅, 邝祝芳, 王传立, 臧颢, 曹旭鹏. 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型. 生态学报, 2013, 33(13): 4031-4040.

Li J J, Zhang H R, Liu S, Kuang Z F, Wang C L, Zang H, Cao X P. A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4031-4040.

基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型

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

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

摘要:以结构化森林经营思想为理论基础, 从与水源林涵养水源、保持水土功能密切相关的林分物种组成(树种混交)、种内及种间竞争、空间分布格局、垂直结构 4 个方面选择混交度、竞争指数、角尺度、林层指数、空间密度指数、开阔比数作为水源林健康经营和林分空间结构优化的目标函数, 建立洞庭湖水源林分多目标空间优化模型, 应用改进的群智能粒子群算法求解林分空间结构优化模型, 并针对模型输出的目标树空间结构单元制定周密的经营策略。研究表明, 优化模型能准确定位林分空间关系的薄弱环节, 调控措施能显著改善林分空间结构, 有利于促进森林生态系统的正向演替, 为恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供理论依据和技术支撑。应用优化模型进行水源涵养林健康经营突破了传统森林经营模式, 为智能信息技术在森林空间经营中的应用提供了新的思路。

关键词:洞庭湖水源涵养林; 林分空间结构; 多目标优化; 粒子群优化; 森林健康经营

A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO

LI Jianjun^{1,2}, ZHANG Huiru^{1,*}, LIU Shuai², KUANG Zhufang², WANG Chuanli², ZANG Hao², CAO Xupeng²

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

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

Abstract: Forest spatial structure plays an important role in the health and stability of forests, so studying the spatial structure and analyzing the adjustment strategy of Dongting Lake water conservation forest has very important theoretical and practical significance for the restoration of the Dongting Lake forest ecosystem. This research was based on the theoretical principles that underlie structure-based forest management. We established a forest spatial structure optimization model to study the regulation structure and control strategy of the Dongting Lake water conservation forest using the search features of a particle swarm algorithm, and we combined the multi-objective optimization of water conservation forest spatial structure with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. Four important aspects of forest stand spatial structure are species composition, intraspecific and interspecific competition, spatial distribution pattern and vertical structure. A number of measures related to these aspects including the degree of mingling, competition index, uniform angle index, stand layer index, spatial density index and open comparison index were selected as the objective functions for water conservation forest health management and optimization of forest spatial structure. In this paper, the entire stand was mapped to the goals solution space of the particle groups and each individual tree was used as a solution in the PSO space. This was done to translate the stand space optimization problem into an optimization process. A PSO optimization algorithm was used that iteratively improved a fitness function, based on the multi-objective function, to identify the optimum solution to the stand

基金项目:林业公益性行业科研专项经费项目(201004002); 国家自然科学基金(31070568); 湖南省自然科学基金重点项目(10JJ2022); 湖南省教育厅重点科研项目(11A128); 长沙市科技计划资助项目(k1106201-11)

收稿日期: 2012-07-28; 修订日期: 2013-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huiru@caf.ac.cn

spatial structure model. Based on the output of this model, we developed a business strategy for the target tree space structure unit. Based on an analysis of 10 block fixed sample case studies from Changde Hefu national forest park, Taoyuan Guniu mountain, Huangshi, Longtang and the Shejiaping area to the west of Dongting Lake, the research results show that the space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake is used for forest spatial structure adjustment. The model output with regards to the target tree and its spatial structure unit as the control object was adjusted in terms of tree species composition, competition regulation, horizontal pattern and layering, using single selective cutting, replanting and other management measures. Comparison of the forest stands before and after optimization adjustment showed that the forest spatial structure indexes were very different. The non-spatial structure, tree diameter, species order and age class distribution index remained unchanged. The degree of health increased significantly while the forest layer index remained unchanged. The other three aspects that contribute to the space structure index improved to different degrees. The optimized structure tended to be healthier and more stable while reducing the top target tree competition pressure. From the overall optimization of the stand structure, the optimization model and algorithm can accurately locate weaknesses in stand spatial relationships. Management measures can significantly improve forest spatial structure, which can promote the positive succession of forest ecological systems, become the theoretical basis, and provide technical support for the restoration of Dongting Lake water forest ecological function and health. The optimization model and algorithm proposed in this paper are superior to traditional forest management for water conservation forest health management, and provide a new application of intelligent information technology to forest spatial 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。近年来,湿地湖泊迅速萎缩,湿地森林面积逐年缩小,生物资源急剧减少,外来入侵树种增多,森林群落类型正快速从原生群落向人工群落演变,使洞庭湖湿地森林生态系统的服务功能遭受了严重破坏,甚至影响到洞庭湖区乃至长江流域经济社会的可持续发展^[1]。因此,研究保护洞庭湖湿地森林,调整森林结构,恢复其生态系统功能具有十分重要的理论和现实意义。水源涵养林,是具有特殊意义的水土防护林种之一,其主导功能是涵养水源、净化水质、防止土壤侵蚀和湖泊淤塞及调节气候^[1]。根据系统论和结构化森林经营理论,水源涵养林的健康和稳定取决于森林结构,合理的森林结构能更好地发挥森林各项功能^[2]。相同立地的混交、异龄林其稳定性均高于纯林、同龄林^[2-3],复层、异龄、混交林结构是水源涵养林在林分尺度上的理想结构,同时应有较丰富的灌草层和较高的生物多样性和生物生产力^[3-5]。

包含林木空间信息的森林结构称之为森林空间结构,森林空间结构是实现森林经营目标所必须测定和调控的内容^[6-7]。通过优化森林空间结构实现对森林生态系统的结构调整,正成为现代森林经理学和可持续经营的研究热点。目前,国内外已有众多学者对此展开了前期研究,取得了较丰硕的研究成果^[2-4,6-13]。然而,现有研究成果还存在一些不足:(1)研究内容多集中在森林空间结构的分析、描述和模拟上,缺少森林优化经营实例的支撑;(2)经营措施多以近自然经营和森林可持续发展理论为基础,但缺少明确的指标体系及量化经营目标,且难以寻找同类型的近自然模式林;(3)直接以森林空间结构调优为经营目标的相关研究较为少见,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;(4)多数研究将多目标问题转化为单目标问题,求解过程复杂,算法执行效率较低,缺少更为科学的多目标优化方法。

本文以西洞庭湖区域常德林场、和沅林场和桃源县天然水源林为研究对象,依据森林健康经营和结构化森林经营思想,以林分空间结构包括混交、竞争、空间分布格局为优化目标,建立林分层面的洞庭湖水源地林分空间结构多目标优化模型,利用 PSO 优化算法的空间搜索和群智能特性求解模型,确定林木空间调控单元及目标树,采取合理的经营措施调节林木空间关系,使林分结构趋于合理状态,充分发挥湿地森林的多种功能。

1 研究区概况

洞庭湖由南、东、西洞庭湖 3 个国际重要湿地组成,西洞庭湖区位于湖南省北部,长江中游荆江段南侧,东经 110°50′—111°36′,北纬 28°24′—29°24′,总面积为 14234 km²。西北部属中低山区,中部为红岩丘陵区,东部为沅水、澧水下游与洞庭湖平原区,西南部为雪峰山余脉。构成南、北高,中间低,两山夹一凹地貌轮廓。丘陵岗地成土母质有红土、板页岩、石灰岩、紫色砂页岩等。平原包括湖积平原和河流冲积平原,湖积平原主要分布澧县东部、安乡、汉寿湖区和鼎城东北部。河流冲积平原包括常桃平原和澧阳平原。地形开阔,地势平坦,形成园田新格局。气候属湿润季风气候区,有滨湖气候和山地森林气候特征,年平均气温 16.7 ℃,年平均降水量为 1348.3 mm。土壤共有 9 个土类、21 个亚类,红壤为本区主要地带性土类,包括红壤、红壤、黄红壤 3 个亚类,面积占总面积的一半。植被区划属中亚热带北部常绿阔叶林地带,主要树种类型有杉木类、松类、阔叶类、经济林、灌木类、柏木类、竹类。西洞庭湖区水源涵养林面积达 43595.6hm²,约占森林总面积的 11%。

笔者从 2010 年 8 月开始在常德河洑国家森林公园、桃源牯牛山、黄石、龙潭和余家坪区域选择有代表性的水源涵养林分设置固定研究样地 10 块,面积为 20 m×20 m,分别编号为样地 D1、D2、D3、…、D10,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*)、楠木(*Phoebe nanmu*)、马褂木(*Liriodendron chinense*)、木荷(*Schima superba*)等),落叶阔叶林群落(青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、栎树(*Quercus mongolica*)、桦木(*Betula platyphylla*)、杨柳(*Populus simonii*Carr)、榆树(*Ulmus pumila*)等)。根据调查数据和当地资料显示,所调查的森林群落均是受过轻微干扰,经过较漫长的进展演替后形成的天然次生林,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。固定标准样地基本情况如表 1 所示。采用全站仪等测量设备对标准样地内胸径大于 5 cm 的活立木进行定位、编号及每木检尺,检测内容为树种信息、林木空间位置、空间结构指数(包括开阔比数、目的树种指数、角尺度、林层指数、空间密度指数、混交度、竞争指数、均质性指数等)^[6-15]。样地林分空间结构调查指标如表 2 所示(以样地 D1 调查结果为例)。

表 1 研究样地概况
Table 1 Survey of research plots

样地编号 Plot code	树种组成 Tree species composition	调查株数 Number of Survey trees	土壤 Soil type	地貌 Land form	郁闭度 Canopy density
D1	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> 、青桐 <i>Quercus myrsinaefolia</i> 、木荷 <i>Schima superba</i> 、马褂木 <i>Liriodendron chinense</i> 、构树 <i>broussonetia papyrifera</i> 、白栎 <i>Quercus fabri</i>	101	红壤	低山	0.855
D2	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> 、栎树 <i>Quercus mongolica</i> 、杨柳 <i>Kandelia candel</i>	47	红壤	丘陵	0.70
D3	青桐 <i>Quercus myrsinaefolia</i> 、楠木 <i>Phoebe nanmu</i> 、栎树 <i>Quercus mongolica</i>	49	红壤	平原	0.70
D4	构树 <i>broussonetia papyrifera</i> 、苦楝 <i>Melia aiedarch</i> 、枫杨 <i>Pterocarya tonkinesis</i> 、香椿 <i>Toona sinensis</i> 、桑树 <i>Morus alba</i>	91	红壤	丘陵	0.80
D5	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> 、栎树 <i>Quercus mongolica</i> 、黄柏 <i>Cortex Phellodendri Chinensis</i> 、楠木 <i>Phoebe nanmu</i>	82	红壤	丘陵	0.75
D6	青桐 <i>Quercus myrsinaefolia</i> 、马褂木 <i>Liriodendron chinense</i> 、白栎 <i>Quercus fabri</i> 、桦木 <i>BetulaBetula platyphylla</i>	96	红壤	丘陵	0.80
D7	榆树 <i>Ulmus pumila</i> L、苦楝 <i>Melia aiedarch</i> 枫杨 <i>Pterocarya tonkinesis</i> 、香椿 <i>Toona sinensis</i> 、桑树 <i>Morus alba</i>	102	红壤	丘陵	0.85
D8	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> 、木荷 <i>Schima superba</i> 、马褂木 <i>Liriodendron chinense</i> 、构树 <i>broussonetia papyrifera</i>	69	红壤	丘陵	0.70
D9	香椿 <i>Toona sinensis</i> 、桑树 <i>Morus alba</i> 、构树 <i>broussonetia papyrifera</i> 、苦楝 <i>Melia aiedarch</i>	73	红壤	丘陵	0.75
D10	青桐 <i>Quercus myrsinaefolia</i> 、楠木 <i>Phoebe nanmu</i> 、栎树 <i>Quercus mongolica</i> 、桑树 <i>Morus alba</i>	88	红壤	丘陵	0.80

表2 林分样地 D1 林木均质性指数及影响因子分布

Table 2 Homogeneous indexes and influencing factors distribution of different trees in stand D1

序号 No.	树种 Species	水平空间位置 Horizontal position	开阔比数 Open comparison index	目的树 种指数 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
1	青桐	(0.28,0.94)	0.75	0.75	0.50	0.75	0.69	0.50	0.055	1.9577
2	香樟	(0.82,0.33)	0.75	0.75	0.75	0.50	0.97	0.75	0.221	0.6230
3	青桐	(0.43,0.99)	0.75	0.75	1.00	0.25	0.56	0.75	0.136	1.1557
4	香樟	(0.28,0.47)	1.00	1.00	0.50	0.75	0.99	0.50	0.193	0.8430
5	马褂木	(0.82,0.14)	0.50	0.75	0.50	1.00	0.99	1.00	0.629	0.9408
6	香樟	(0.63,0.13)	0.75	0.75	0.50	0.50	0.40	0.50	0.154	0.9284
7	木荷	(0.54,0.53)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.90	0.75	0.441	0.6260
8	青桐	(0.24,0.78)	1.00	0.75	1.00	0.50	0.90	0.75	0.174	1.0987
9	构树	(0.96,0.66)	0.70	0.50	0.50	0.25	0.64	1.00	0.029	2.7686
10	香樟	(0.26,0.35)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.71	0.50	0.205	0.9980
11	香樟	(0.27,0.75)	0.75	0.75	0.75	0.25	0.71	0.75	0.196	0.9770
12	青桐	(0.64,0.87)	0.50	0.50	0.50	0.00	0.47	0.25	0.087	1.3886
13	青桐	(0.21,0.62)	0.50	1.00	0.50	0.25	0.50	0.00	0.077	1.6501
14	青桐	(0.62,0.24)	1.00	0.75	0.50	1.00	0.78	0.25	0.139	1.0975
15	马褂木	(0.61,0.98)	0.50	1.00	0.75	0.50	0.78	0.25	0.154	0.9288
100	构树	(0.71,0.18)	1.00	0.50	0.75	0.50	0.78	0.25	0.256	0.7311
101	白栎	(0.53,0.77)	0.50	0.50	0.50	0.75	0.94	0.00	0.341	0.6817

2 湿地林分空间结构多目标粒子群优化模型(MO-PSO)

2.1 粒子群原理

粒子群(PSO)优化算法由于实现容易,执行效率高,具有较强的全局优化能力,无需进行复杂的编码操作,相比遗传算法等更为有效,已在许多优化问题中得到了成功应用^[16-18]。PSO 算法将待求解问题的每个解都抽象为解空间中的“微粒”,求解过程实为由 m 颗粒子所组成的粒子群体在解空间中迭代寻优过程。每个粒子在解空间中的位置可由位置向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{iN})$ ($i = 1, 2, \cdots, m, N$ 为解空间的维数)来表示;另有一速度向量 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{iN})$ 用来描述粒子在解空间中的“飞行”状态。粒子通过更新位置和飞行速度不断搜索新的位置(即问题的解),以适应度函数作为评判该位置优劣的依据。粒子将搜索到的最优位置用 p_{ib} 记录下来,整个粒子群经历的最优位置则用 p_g 表示。每个粒子都通过跟踪其上一迭代时刻的 x_{id} 、 v_{id} 、 p_{ib} 及 p_g 来调整当前状态。设粒子第 d 维($1 \leq d \leq N$)速度和位置分别为 v_{id} 和 x_{id} ,则粒子的迭代更新公式如下:

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 [p_{ib} - x_{id}(t)] + c_2 r_2 [p_g - x_{id}(t)] \tag{1}$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \tag{2}$$

式中, t 为当前迭代代数; $i = 1, \cdots, m$; $d = 1, \cdots, N$; ω 称为惯性因子,用于调节 PSO 算法的全局与局部寻优能力; c_1 和 c_2 称为加速因子,它使粒子向个体最优位置 p_{ib} 和群体最优位置 p_g 加速运动; r_1 和 r_2 是 $[0,1]$ 区间内服从均匀分布的随机数; $v_{id} \in (-v_{\max}, v_{\max})$, $v_{\max}$ 是粒子最大飞行速度。迭代终止条件一般选为最大迭代代数溢出或粒子群搜索到设定的最优位置。

2.2 林分空间结构的多目标粒子群优化

2.2.1 多目标优化问题

多目标优化问题(MOP)可用下式描述:

$$\begin{aligned} \min f &= f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \cdots, f_n(x)\} \\ s. t. \quad g &= g(x) = \{g_1(x) \leq 0, g_2(x) \leq 0, \cdots, g_m(x) \leq 0\} \end{aligned} \tag{3}$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_l)$ 为决策矢量; f 为目标矢量, $f_n(x)$ 为子目标; g 为约束矢量, $g_m(x)$ 为约束条件。

一般情况下, MOP 的各个目标相互制约, 要使各个目标同时达到最优是不可能的, 而只能寻求折衷处理使各个子目标都尽可能最优化, 因而 MOP 的解并非唯一解。由于 MOP 问题直接求解较为困难, 常根据各子目标之间的关系将其组合成一个复合目标函数, 然后按单目标问题处理。然而, 各子目标权重的确定一直缺乏行之有效的方法, 且实际问题中更希望多个目标能相互协调。

2.2.2 林分空间优化整体思路

林分空间结构优化是一个多目标问题, 不管是林分的整体最优还是局部最优, 最终都是通过对单株林木的多目标空间调整来实现, 因而根据优化目标在林分空间中搜寻目标树是该类问题的关键。本文利用 PSO 算法良好的空间搜索特性, 将多目标问题与 PSO 优化算法结合, 构建基于多目标粒子群的林分空间优化模型。其核心思想是将林分内的每一棵树木都视为 PSO 解空间中的一个解, 即将整个林分空间映射为粒子群体的目标求解空间, 将林木在林分内的空间坐标映射为“粒子”在解空间中的位置, 通过林分空间的多目标函数设置粒子群体的适应度函数, 将林分空间规划问题转化为粒子群体在解空间中迭代寻优过程。MO-PSO 算法实现多维决策空间的并行计算, 所有的粒子并行地在林分空间内搜寻满足优化目标的林木, 算法最终输出结果为林分内需要调控的目标树及其空间结构单元, 即影响林木空间结构指标的关键位置。

2.2.3 粒子位置更新机制

粒子在林分空间中“飞行”, 每一次迭代都会更新粒子的飞行速度及位置。如果采用传统的位置更新方法, 由式(1)和(2)可知, 粒子更新后的速度及位置是随机值, 而林木在样地内的空间分布是确定的, 如此则更新后的粒子位置不能代表林木的空间坐标。为了能使粒子每一次迭代更新后都能代表林分空间中的某棵林木, 需要对 PSO 算法中位置更新机制作出如下改进: 仍以随机方式更新粒子的位置及飞行速度, 但需对该随机位置加以修正, 为了能使粒子恰好“降落”在距离该粒子最近的林木位置上, 修正量应等于该粒子随机位置与最邻近林木的欧氏距离。这样, 粒子每一次迭代更新的结果都能代表林分空间内林木的位置。改进后的粒子空间位置迭代公式如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) + d_{\min}(x'_i, y_j) \quad (4)$$

式中, $d_{\min}(x'_i, y_j)$ 为第 i 个粒子更新后的随机位置与最近林木的欧氏距离, $j = 1, 2, \dots, N$, N 为林分内林木总数。

倘若多个粒子同时选择落在某棵林木上, 则应随机选择某个粒子代表该点, 其它粒子在当前位置再加上一个随机量以跳出该区域, 此举避免了不同的粒子搜索到相同解, 增大了搜索空间的范围。粒子迭代过程中若位置和飞行速度超出了林分或样地的边界则取边界林木的位置。

2.2.4 惯性因子设置

惯性因子 $\omega(t)$ 是用来调节粒子飞行速度惯性的参数, 迭代前期由于需要粒子在较大的空间范围中搜索, 因而惯性因子取值较大, 而迭代后期则主要加强粒子的局部搜索能力, 因而此时的惯性因子较小。由此可见, 惯性因子应选用线性递减公式进行迭代更新^[12]:

$$\omega(t) = \omega_{\max} - t(\omega_{\max} - \omega_{\min})/T \quad (5)$$

式中, $\omega_{\max}$ 为惯性因子最大取值, $\omega_{\min}$ 为惯性因子最小取值, T 为最大迭代次数。

假设林分内林隙较宽的区域, 显然位于该区域的林木属于需要调控(补植或更新)的目标树, 若惯性因子较大, 则有可能使粒子跳出该区域, 导致最终结果无法锁定此处的最优值。因此, 合理调节惯性因子的取值对于本研究具有重要意义。

2.2.5 适应度函数

本研究通过适应度函数对单个粒子位置的适宜性作出评价, 并将适应度函数作为整个粒子群体在解空间中迭代寻优的重要依据, 因此合理构造粒子的适应度函数非常关键。根据林分空间结构的表征要求, 本研究从树种混交、种内及种间竞争、林木水平分布、垂直结构等方面选用混交度、竞争指数、角尺度、林层指数、空间

密度指数、开阔比数作为林木调整的目标函数。每个粒子的适应度函数可以根据如下多目标规划模型来描述:

$$\text{minimize } M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (6)$$

$$\text{maximize } CI_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i \cdot L_{ij}} \quad (7)$$

$$\text{maximize } W_i = \left| \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} - 0.5 \right| \quad (8)$$

$$\text{minimize } S_i = \frac{c_i}{3} \times \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij} \quad (9)$$

$$\text{maximize } D_i = 1 - \frac{r_i}{r_{\max}} \quad (10)$$

$$\text{minimize } OP_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (11)$$

$$F = (M_i, CI_i, W_i, S_i, D_i, OP_i) \quad (12)$$

$$\text{subject to } A_i \geq 0.75 \quad (13)$$

式中, M_i 是空间结构单元中参照树 i 的点混交度, v_{ij} 是混交度的取值变量, 其值定义为: 当参照树 i 与第 j 株相邻木非同种时 $v_{ij} = 1$, 反之, $v_{ij} = 0$; CI_i 是参照木 i 的竞争指数, L_{ij} 是参照木 i 与相邻木 j 之间的距离, d_i 是参照木 i 的胸径, d_j 为相邻木 j 的胸径; W_i 为参照木的相对角尺度, z_{ij} 为角尺度取值变量; S_i 是林层指数, C_i 参照树 i 的林层数, s_{ij} 是林层取值变量, 其取值定义为: 当参照树 i 与第 j 株相邻木不属同一层时 $s_{ij} = 1$, 反之, $s_{ij} = 0$; D_i 是参照树 i 的空间密度指数, 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; OP_i 是参照树 i 的开阔比数, t_{ij} 是开阔数取值, 其取值定义为: 当参照树 i 与相邻木 j 的水平距离大于参照树 i 与相邻木 j 的树高之差时, $t_{ij} = 1$, 反之, $t_{ij} = 0$; F 为多目标评价的适应值函数。对林分内所有林木进行经营显然是不现实的, 依据近自然森林经营思想, 本文以目的树种特性指数作为林分空间调控的树种约束。目的树种特性指数反映林分空间结构单元中每株树木与当地气候顶极群落景观树种关系。当地顶极群落景观是长期演替形成的一种系统结构稳定、生产高的森林生态系统, 是森林生态系统经营的目标群落景观。根据群落演替形成过程的树种组成特点, 目的树种特性指数 A_i 取值定义: (1) 顶极群组成树种, $A_i = 1$; (2) 过度性群落树种, $A_i = 0.75$; (3) 先锋群群树种, $A_i = 0.5$; (4) 非乡土树种, $A_i = 0.25$; (5) 入侵树种, $A_i = 0$ 。围绕有发展潜力的顶级树种进行空间调控, 将约束条件设置为目的树种特性指数 A_i 大于等于 0.75^[6-15, 19-20]。因此, 本研究的量化要求为: 在林分内搜索使适应度函数 F 取值最小的林木空间坐标 $P_i(x_i, y_i)$ 。

林分中任一株参照木和 4 株最近的相邻木之间构成基本的空间关系, 各空间指数的计算都是建立在这种基本结构单元的基础上^[20], 本文中 n 的取值皆为 4。同时, 为避免边缘效应, 将样地内距离边线 5 m 范围作为缓冲区, 缓冲区内的林木仅作为相邻木。目标函数(6)—(11)的林学意义是: 使林木空间格局趋向随机分布, 维持树种多样性, 减少林木间的相互竞争, 优化林木成层性, 保持林分健康稳定, 导向理想的林分空间结构。近自然经营中, 由于采伐量通常不超过林分内树木总数的 15%, 因此, 本研究中粒子群体的规模设为林木总数的 10%。初始粒子群体的位置随机落在 $(N \times 0.1)$ 株不同的林木上, N 为林分内林木总数。林分空间优化过程的伪代码如下:

Algorithm MO-PSO

Procedure MO-PSO

Begin

导入林木空间坐标、树种、胸径、林层、各个空间结构指数及林分边界值等信息;

设置合理的模型参数 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 、 m 、 T 、 ε 、 r_1 、 r_2 、 c_1 、 c_2 ;

产生初始粒子群体,其中第 i 个粒子的位置向量 x_i ,速度向量 v_i , $i = 1, \dots, N \times 0.1$;

根据公式(6)—(11)计算每个粒子的适应值 F_i , $i = 1, \dots, N \times 0.1$;

迭代代数 $t = 1$;

while($t < T$)

Begin

根据适应值 F_i 更新粒子的最优位置 p_i 和群体的最优位置 p_g ;

按照粒子位置更新机制更新每个粒子的速度和位置:

$$v_i(t+1) = \omega(t)v_i(t) + c_1r_1[p_{ib} - x_i(t)] + c_2r_2[p_g - x_i(t)]$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) + d_{\min}(x'_i, y_j)$$

计算每个粒子的适应值 F_i , $i = 1, \dots, N \times 0.1$;

$$t = t + 1$$

End

输出粒子所经历的最优位置(具有最优的适应值),即能够显著改善林分空间结构,需要优先调控的空间结构单元及相应的参照树(目标树)。

End

3 结果与分析

3.1 MO-PSO 模型输出结果

以样地 D1 内的林木为本文的空间结构优化经营对象,该样地为青桐、香樟混交群落,起始径阶为 5 cm 以上林木 101 株,分属 6 个树种,其中青桐、香樟、马褂木为本地区顶级树种。将样地边界值、林木空间坐标、林木各类空间指标等作为优化模型的输入量,其中的部分因子还要参与适应值的计算。

通过 Matlab 7 软件编写代码建立湿地森林空间结构 MO-PSO 模型,模型的参数设置如下:粒子初始群体数 $m=12$,惯性因子 $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$,迭代代数 $T=500$,由于本研究中的粒子采用随机方式进行空间搜索,故粒子间无需共享信息,加速因子 $c_1=c_2=0$ 。

MO-PSO 模型中只设置了一种终止条件,当迭代次数超过 500 时,算法强制终止循环,每个粒子所记录的最优位置则为模型的最终计算结果。模型的图形化输出结果如图 1 所示。图 1 为样地内林木的归一化坐标与经模型计算输出的目标树空间分布情况,图中树号为 8、22、39、47、57、62、63、88 的几棵树是影响林分整体空间结构提升的瓶颈,因此重构目标树空间结构单元并调节目标树与相邻木之间的空间关系是改善整个林分结构的关键所在。

3.2 空间结构单元调整

以 MO-PSO 模型输出的目标树及其空间结构单元为调控对象,按照林分空间优化经营目标进行树种组成调节、竞争调节、水平格局调整、林层调节等。经营措施主要包括单株择伐和补植。经营原则为保留珍惜树种及幼树,适地适树、补植乡土树种及本地区顶级树种,补植地点尽量选在天然或人工形成的林隙中,并能促进林木水平分布格局向随机分布演变及促进森林的正向演替^[14]。具体调控措施如表 3 所示。

3.3 经营效果评价

经营措施是否能满足结构调控目标,是否能对空间结构产生正面影响,需要从各个方面来进行评价。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经营的措施及效果。笔者在前期工作中对此进行了系统研究,并提出了林分(林木)均质性量化指数。本研究选用该指数作为优化经营的综合评价指标。以优化模型的 6 个空间目标函数来构造林木均质性指数 L_i ,评估多目标空间结构整体最优化要求,计算公式如下^[13]:

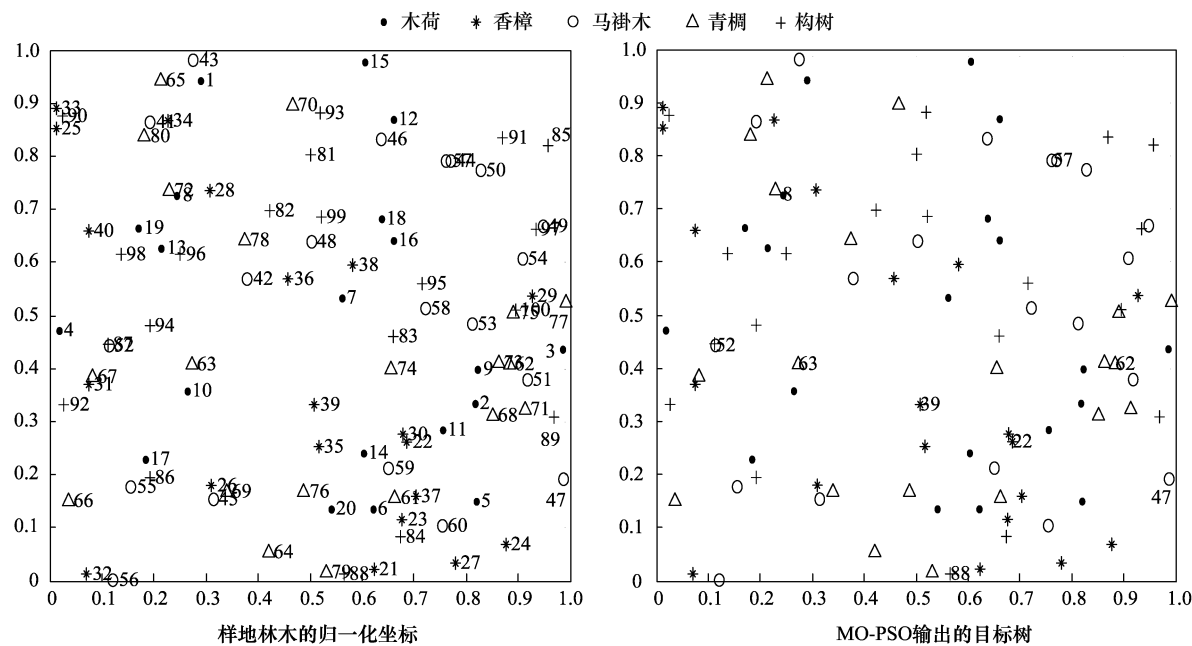


图 1 MO-PSO 模型的图形化输出结果

Fig. 1 The MO-PSO model graphical output results

表 3 目标树空间结构信息及调控策略

Table 3 Target tree spatial structure information and regulation strategies

树号 No.	坐标 Coordinate	树种 Species	胸径/cm DBH	树高/m Height	冠幅/m Crown	调整原因及经营措施 The reason for adjustment and management measures
8	(0.24,0.78)	青桐	14.3	12.1	4	被邻近构树挤压,为保证建群种的生存空间,可择伐邻近构树
22	(0.15,0.3)	香樟	24	20	8	目标树周围3棵过熟木,可将其采伐,补植伴生树种
39	(0.84,0.72)	香樟	15	17.4	4.3	周围存在因枯木倒塌后形成的大面积林隙,可补植青桐等顶级树种,增强混交
47	(0.23,0.52)	马褂木	12	13.2	3.1	该目标树为孤立木,与周围林木相距较远,可在该树周围补植青桐、构树等
57	(0.65,0.38)	马褂木	13.8	15	4.6	所在区域林木密度较大,与相近木竞争激烈,通过择伐调控林木密度,增大混交
62	(0.2,0.66)	青桐	15	18	5.2	面临较激烈的种内竞争,可择伐邻近的青桐,同时补植伴生树,增强树种空间隔离
63	(0.17,0.52)	青桐	14	13	4.2	该空间单元的林木相对目标树呈聚集分布,且相邻木间竞争激烈,可择伐调节林木空间分布,加大空间利用程度
88	(0.76,0.71)	青桐	6.1	10	3.4	目标树为有培育前景的幼树,被相邻木挤压,可采伐相邻的成熟木,改善林层结构,增强目标树的光照条件

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

(14)

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_{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。林木均质性指数的均值为林分均质性指数,反映了林分整体的均质性目标,即:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i \quad (15)$$

优化模型在结构调控前后各指标的平均变化情况如表 4 所示,前 7 项为目标树结构指标,后 5 项为林分结构指标,诸指标按属性可分为非空间结构指标和空间结构指标两大类。在非空间结构指标中,树种、径阶、龄级分布均不变,健康度有较大幅度提高,由于在林隙补植了部分顶级树种及伴生树种,有利于维持林分整体健康和稳定。从空间结构指标的变化来看,除林层指数以外的其它各项指标均得到不同程度的改善,调控后的林分结构趋向良性发展方向转变。通过择伐目标树的直接竞争邻木,减轻了顶级目标树的竞争压力;按照特定角度在目标树周围补植乡土树种,增大了树种隔离程度和多样性,并使结构单元内的林木趋向随机分布;采伐过熟木及在林隙补种顶级树种幼树,使林木密度分布更加均匀并使林内光照利用充分。但以上措施对林层调节效果甚微,后续研究可考虑修枝等措施加强林层垂直分布的调节。调控前,目标树均质性指数维持在较低水平,小于林分均质性指数,说明目标树与其相邻木存在不合理的空间关系,因而拉低了林分整体均质性水平。但通过择伐、补植等经营措施调节目标树空间结构单元,使目标树均质性指数大幅增加,其空间布局趋向合理,从而整体上优化了林分结构。

表 4 调控前后空间结构的平均变化

Table 4 The average change of spatial structure between before and after regulation

编号 No.	参数 Parameter	调控前 Before regulation	调控后 After regulation	变化趋势及幅度/% Change trend and magnitude
1	混交度 mingling degree	0.56	0.78	增加 39
2	竞争指数 competition index	0.17	0.09	降低 47
3	角尺度 uniform angle index	0.61	0.54	降低 11
4	林层指数 stand layer index	0.43	0.44	增加 2
5	空间密度指数 spatial density index	0.67	0.52	降低 22
6	开阔比数 open comparison index	0.44	0.57	增加 29
7	单木均质性指数(归一化) Single wood heterogeneity index(Normalization)	0.34	0.68	增加 50
8	树种 Species	6	6	不变
9	径阶数 Diameter number	8	8	不变
10	健康度 Health degree	0.58	0.72	增加 24
11	龄级分布 Age class distribution	异龄	异龄	不变
12	林分均质性指数(归一化) stand heterogeneity index(Normalization)	0.47	0.61	增加 29

4 结论与讨论

本文综合考虑影响森林水源涵养功能的林木水平分布格局、树种混交、种内及种间竞争、多层次垂直结构,提出基于系统论和结构化森林经营的水源涵养天然次生异龄林空间结构多目标优化的经营模型,利用智能 PSO 算法强大的并行计算能力搜索林分空间的薄弱环节,巧妙地将林分多目标空间规划问题转化为粒子群体迭代寻优问题。模型通过洞庭湖湿地水源涵养林的实际应用,从研究结果来看,应用 PSO 算法求解林分空间结构多目标优化具有明显的效果,通过优化模型经营实例表明,在保持非空间结构树种、径阶、龄级分布均不变的基础上,林分空间结构各项指标(除林层指数外)均得到改善,从整体上提高林分空间结构的均质性目标,对促进生态系统的健康和稳定,恢复洞庭湖湿地森林生态功能具有重要的实际意义。

但由于林木的生长周期长、影响因素多,林分空间结构调控需要一个长期的过程,不能期望一次经营调整立刻达到预期效果,而且一个结构指标的调整往往引起其它指标的变化,实际的经营过程是一个复杂、动态变化的过程,需要通过多次调整才能逐步使森林结构趋于理想状态。另外,本文提出的优化模型设置的约束条件还较少,对模型整体约束较弱,如果能从更广的角度考虑更多的因素来充实本文约束条件,相信可以获取更好的研究结果。本研究旨在探寻一条林分优化经营的空间途径,但非空间因素对于林分经营同样重要,下一步考虑将林分空间结构与非空间结构相结合,更进一步揭示湿地森林生态系统结构与功能的关系。

在本次优化模型经营实践中,虽然结构优化经营模型由于更新定位数据和缓冲区限制等因素导致模型经

营的采伐量较低,但是模型经营结果总体上符合空间结构优化的要求。在后续研究中,将逐步解决更新定位和缓冲区限制等问题,并继续改进模型结构,使之能够更好地优化林分空间结构,同时可结合 GIS 等先进技术手段,研究更大尺度范围如景观、区域尺度的森林空间结构关系。

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] Hui G Y, von Gadow K, Hu Y B, Xu H. *Structure-based Forest Management*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 26-42.
- [3] Hui G Y, von Gadow K. *Modern Forest Management of Germany*. Beijing: A publisher of Science and Technology of China, 2001: 119-134.
- [4] Nagaïke T, Kamitani T, Nakashizuka T. Plant species diversity in abandoned coppice forests in a temperate deciduous forest area of central Japan. *Plant Ecology*, 2003, 166(1): 145-156.
- [5] Liu S Q. The Study on the Decision Model in Management Forest Ecosystem and Adaptive Model in Forest Ecosystem [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2006: 38-61.
- [6] Tang M P, Tang S Z, Lei X D, Li X F. Study on spatial structure optimizing model of stand selection cutting. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(5): 25-31.
- [7] Tang M P. Advances in study of forest spatial structure. *Scientia Silvae Science*, 2010, 46(1): 117-122.
- [8] Hof J, Bevers M. Optimizing forest stand management with natural regeneration and single-tree choice variables. *Forest Science*, 2000, 46(2): 168-175.
- [9] Gadow, K. v. und Hui, G. Y. Analysis of Forest Structure and Diversity- based on neighbourhood relations. *IUFRO International Conference 2002 in Lisbon Portugal*. 2002:103-107.
- [10] 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.
- [11] Zhang H R, Tang M P, Shu Q T. *Theory and Practice of Forest Ecological Harvesting*. Beijing: Publishing House of China Forestry, 2006: 248-255.
- [12] Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H. Evaluating tree species segregation based on neighborhood spatial relationships. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(4): 131-134.
- [13] Li J J, Li J P, Liu S Q, Zhang H W, Feng X L. Homogeneity index of stand spatial structure of mangrove ecological system. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(6): 6-14.
- [14] Zhang H R, Tang S Z. *Research of the Northeast Natural Forest Sustainable Management Technology*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 98-100.
- [15] Kong L, Yang H, Kang X G, Gao Y, Feng Q X. Review on the methods of spatial distribution pattern in forest. *Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(5): 119-125.
- [16] Liu X Y, Liu H. *Artificial Neural Network and Particle Swarm Optimization*. Beijing: Publishing House of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008: 102-103.
- [17] 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.
- [18] Ma S Y, He J H, Yu Y. Model of urban land-use spatial optimization Based on particle swarm optimization algorithm. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 321-326.
- [19] Baskent E Z, Keles S. Spatial forest planning: a review. *Ecological Modelling*, 2005, 188(2/4): 145-173.
- [20] 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): 4717-4727.

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] 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.
- [3] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. *德国现代森林经营技术*. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 119-134.
- [5] 刘素青. *森林生态系统经营决策与自适应模型研究* [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2006: 38-61.
- [6] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 李希菲. 林分择伐空间结构优化模型研究. *林业科学*, 2004, 40(5): 25-31.
- [7] 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] 张会儒, 汤孟平, 舒清态. *森林生态采伐的理论与实践*. 北京: 中国林业出版社, 2006: 248-255.
- [12] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 基于相邻木关系的树种分隔程度空间测度方法. *北京林业大学学报*, 2008, 30(4): 131-134.
- [13] 李建军, 李际平, 刘素青, 张宏伟, 冯湘兰. 红树林空间结构均质性指数. *林业科学*, 2010, 46(6): 6-14.
- [14] 张会儒, 唐守正. *东北天然林可持续经营技术研究*. 北京: 中国林业出版社, 2011: 98-100.
- [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.
- [16] 刘希玉, 刘弘. *人工神经网络与微粒群优化*. 北京: 北京邮电大学出版社, 2008: 102-103.
- [18] 马世友, 何建华, 俞艳. 基于粒子群算法的城镇土地利用空间优化模型. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 321-326.
- [20] 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, 27(11): 4717-4727.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《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 彭少麟

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 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 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