

# 基于 GIS 的森林消防水资源空间区域分布优化配置研究

谢绍锋<sup>1</sup>, 肖化顺

(中南林业科技大学 测绘科学与技术学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**采用 GIS 空间分析技术,首先在森林火险等级的基础上,将道路网络作为关键要素,以时间作为道路的代价,确定每个消防供水设施点的服务范围,分析防火水资源空间分布现状。然后应用 DEM 模型,对不能满足森林防火需求的区域,提出改进方案,采用面积占优网格模型,以最大覆盖高火险森林区域面积为目标,建立评价模型,对广州市白云区森林防火水资源分布进行整体优化。实践表明在投入很小,仅新增几个供水设施点的情况下就能极大满足森林防火需求,提高森林防火水资源合理配置水平,对预防森林火灾及森林火灾的有效扑救具有重要的意义。

**关键词:**防火水资源;网络分析;可达性;优化配置

**中图分类号:**S771.8      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2010)01-0127-04

## Optimal Allocation of Spatial Collocation of Water Resources in Regional Forest Fire by GIS Technology

XIE Shao-feng, XIAO Hua-shun

(College of Surveying and Mapping, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

**Abstract:** By using GIS special analysis technology, based on forest fire danger level, road network was taken as a key element, the service scope of each fire water facility was determined, spatial distribution of water resources was analysed. DEM models were applied to improve program to meet the needs of the regional forest fire prevention. Dominant area grid model was adopted to cover the largest area of high forest fire. The evaluation model was established. Water resources for forest fire prevention in Baiyun district of Guangzhou were optimized comprehensively. The results showed only a limited number of water supply facilities would be supplemented to meet the great demand of forest fire prevention, to improve the forest fire prevention level of water resources.

**Key words:** fire protection of water resources; network analysis; accessibility; optimal allocation

随着气候变暖森林火灾频发,森林防火工作越来越重要,以水灭火是森林火灾扑救的主要方式,水资源的分布已成为森林防火的重要瓶颈因素。在这种背景下,水资源分布优化配置是森林防火首要解决的问题。许多学者从不同方面对水资源分布优化配置开展了大量的研究工作,由早期的定性研究发展为应用数学模型进行定量研究,主要包括承载力研究<sup>[1-2]</sup>、可持续利用研究<sup>[3-4]</sup>、供需平衡研究<sup>[5-6]</sup>、优化配置研究<sup>[7-9]</sup>等方面,结论也多以数据形式表示,而将水资源作为防火资源要素的研究工作较少,对于水资源空间分布的研究未见报道。本文在 GIS

技术支持下,以森林火险等级、交通道路和水系为基础,以消防供水设施点沿道路在确定时间内的可达性<sup>[10-12]</sup>,做缓冲分析,来确定可用水源对森林的影响范围,进行优化配置。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本文以广州市白云区为研究区域,林业用地面积 69 722.05 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率为 57.65%,为防火水资源合理配置提供有利因素主要有:(1)该区经济较发达,对生态环境的破坏近几年呈统计负增长;

(2)优越的地理和区位,降雨量多,地表水汇流面积大,水资源具有较大的调度空间潜力;(3)用水量大的行业和企业较少。不利因素有:(1)现有道路网络条件有限,致使消防设备及消防用水无法到达高火险林区,进行有效扑火;(2)水资源的分布广,但可用于森林防火的水资源不多,无法覆盖高火险林区,难于满足森林防火现状需求。通过分析影响白云区水资源配置的优、劣势因素,确定水资源优化配置措施。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据准备 数字化资料包括地形图、水系图、交通道路图、林相图、消防供水设施点等多种信息,利用地理信息系统软件 ArcGIS,对各类影响水资源优化的空间要素进行分层,建立 1:10 000 空间数据库。

1.2.2 研究方法 利用 MATLAB 和 ArcGIS 软件对各类数据进行分析,系统全面地认识研究区域水资源现状,处理过程如图 1 所示。

图 1 森林防火水资源优化配置流程图

Fig.1 Flow chart of optimal allocation of water resources in forest fire prevention

处理流程为:(1)首先建立道路网络拓扑,制作森林火险等级图,并根据等高线生成三维地形图;(2)使用道路网络拓扑和消防供水设施点图层进行可达性分析,获得消防点服务范围图;(3)将消防点服务区图与森林火险等级图叠加,计算出覆盖高火险区域百分比,分析当前森林防火水资源分布现状;(4)综合森林火险等级、水资源分布、交通道路、地形特征等因素,确立水资源优化配置候选方案集;(5)应用最大覆盖高火险森林区域模型从候选方案集中筛选最优方案。

## 2 结果与分析

### 2.1 森林火险等级图制作

从林相图数据中选取植被(包括植被类型、郁闭度、龄级等)、气候、地形(包括海拔高度、坡度、坡向等)、道路水系网和防火林带等因子,进行聚类分析,将火险区划为 3 个等级,制作森林火险区划图,如图 2。

图 2 森林火险等级图

Fig.2 Forest fire danger level

### 2.2 道路网络拓扑建立

(1)新建道路图层属性,主要包括道路编号、名称、等级(表 1)、道路长度、行驶时间、单行线标志等属性。其中道路长度由矢量要素的长度和地图比例尺的大小计算出;行驶时间等于道路长度/行驶速度,计算出每条道路行驶所要花费的时间。

表 1 道路等级类型

Table 1 The level and types of road

序号	道路等级	行驶速度/(km·min <sup>-1</sup> )
0	高速公路	2.0
1	国道	1.0
2	省道	1.0
3	市内主干道	0.5
4	一般市政道路	0.4
5	乡村道	0.3

(2)新建森林消防供水设施点,即森林防火供水点位置,主要包括序号、类型编号等属性。

(3)参照消防要求、道路约束规则(当前道路是否为单行线)、道路长度等因子,以道路图层作为网络联结边,消防供水设施点图层作为连接点,在 ArcGIS 中生成道路网络。

### 2.3 供水设施点服务范围分析

供水设施点服务范围分析是在道路网络和消防供水点图层基础上进行,由各供水设施点沿道路网络进行搜寻。在网络上的搜寻与所受的阻力(道路是否允许通过,行驶速度)与时间成线性正比关系,这样就能确定每一个供水设施点在给定时间能够到达的位置,即可达性,如图 3,黑点为供水设施点,粗线为给定时间内在道路网中所能到达的位置。

图 3 单位时间取水设施点服务范围

Fig. 3 Unit time service area of water facilities

2.3.1 供水设施点服务范围的确定 设一个带消防供水设施点的道路空间网络为  $G=(V,E,C)$ , 其中  $V$  代表空间网络节点的集合,  $E$  表示边的集合,  $C$  为该网络中的一个消防供水设施点。已知该点的阻值为  $ew$  (设定该点在道路网络上行驶的时间), 网络边  $e_{ij}$  的费用为  $w_{ij}$  (单位时间能够行驶的距离),  $r$  表示空间网络上任何结点到中心的  $(v_i, v_c)$  间的一条路径,  $r_{ic}$  是该路径的费用, 供水设施点服务范围应为满足下列条件的网络边和结点的集合  $F$ :

$$F=\{v_i|r_{ic}\leq ew, v_i\in r\}\{e_{ij}|r_{ic}+w_{ij}\leq ew, v_i\in r\}$$

依次求出到供水设施服务点费用不超过最大阻值  $ew$  的路径, 组成这些路径的网络结点和边的集合, 构成消防供水设施点的服务范围。

2.3.2 搜索过程 将道路空间网络看作是以一个消防供水点为根的一棵树, 采用宽度优先算法进行搜索, 搜索时需考虑到网络边和结点的属性。其具体的算法步骤如下:

①经中心结点作为当前结点, 并存入到达结点表中, 同时扫描它的关联结点, 检查这些结点是否在服务范围内, 将其中满足条件的关联结点存入到搜索结点表中。

②如果已搜索结点表为空, 则结束; 否则, 继续第③步。

③在搜索结点表中, 按表中记录的顺序取出关联结点, 作为当前已到达结点, 存入已检查到达结点表中, 同时记录该结点所在的边。

④扫描当前结点的关联结点, 检查这些结点是否在服务范围内, 将满足条件的关联结点存入已搜索结点表中。

⑤重复执行第②~④步。

2.3.3 供水设施点服务区域分析 由于森林火险区域分布不规则, 为了便于分析, 将森林火险图划分成  $N\times N$  个网格, 如图 4 所示, 按照面积占优的方式来确定每个网格的属性(即是高火险区域还是低火险区域)。道路中各供水设施点沿道路图 20 min 所能到达的位置, 以  $0.5\text{ km}^{[13]}$  范围(道路沿线  $0.5\text{ km}$  以内为可扑救区域)大小做缓冲分析, 产生服务区边

界(图 4 深色部分)。与服务区边界相交的网格, 如该网格为高火险区域, 表示该网格能从供水设施点获取水源实施有效的林火扑救区域。

图 4 面积占优网格模型

Fig. 4 Grid model of dominant area

本文将广州市白云区森林火险图划分为  $0.25\text{ km}^2$  大小的网格单元, 与服务区边界图层叠加, 分析森林防火水资源分布的适宜性, 供水设施点个数为 212 个, 高火险网格单元为 4 320 个, 计算出覆盖高火险区域百分比为 68%, 表明还有 1 383 个高火险网格单元无法满足森林防火需求。

2.4 建立 DEM, 确立水资源配置方案

建立 DEM 可为水资源优化提供直观图形, 并能给出研究区域任意点的坐标、高程、坡向、坡度等, 将水系、道路网络和森林防火水资源分布现状图加入到 DEM 中, 进行 3D 叠加分析。

(1)利用水系图中的河流、水渠、湖泊、水塘等要素与道路要素做邻近分析, 小于  $500\text{ m}$ , 认为可获取消防用水, 则确定一个新的消防供水设施点;

(2)无水源区域, 可根据地形特征, 在路边低洼处修建水池, 并确定一个新的消防供水设施点;

(3)地形平坦, 坡度小于  $30^\circ$  的区域, 可考虑修建林区道路。

将上述条件下所确定的新建消防供水设施点、修建水池和修建林区道路加入到配置候选集方案中。

2.5 建立评价模型, 优化配置

以最大覆盖高火险森林区域的面积为目标函数, 建立评价模型。在给定的时间内  $t(20\text{ min})$ , 从  $m$  个候选消防供水设施点中选择  $p$  个消防供水设施点为  $n$  个森林高火险区域服务, 目标使得为  $n$  个高火险需求点服务的总时间代价最少。每个高火险区域网格单元面积为  $S$ ,  $l_{ij}$  为消防供水设施服务点到需求区域的距离,  $k$  为道路行驶的速度,  $d_{ij}$  为候选供水设施点  $j$  到需求区域的时间代价,  $a_{ij}$  为分配指数, 如果高火险区域  $i$  受供水设施点  $j$  的服务, 则为 1, 否则为 0, 防火水资源分布配置优化用以下数学模型表示:

目标函数为： $\max(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} S)$

①

约束条件为： $\sum_{j=1}^m a_{ij} = 1, i = 1, 2, \cdots, n$

②

$(\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n a_{ij}) = p, p \leq m \leq n$

③

$d_{ij} = \frac{l_{ij}}{k}, i = 1, 2, \cdots, n, j = 1, 2, \cdots, m$

④

$a_{ij} = \begin{cases} 1, d_{ij} \leq t, i \text{ 由 } j \text{ 服务} \\ 0, d_{ij} > t, \text{其它} \end{cases}$

⑤

目标函数①对覆盖网格单元面积求和,使得覆盖面积最大。约束条件②确保每一个网格单元只接受一个供水设施点服务;约束条件③保证只有  $p$  个供水设施点;约束条件④、⑤设定只有在给定的时间代价  $d_{ij}$  所能到达的网格单元才进行服务。约束条件保证每个高火险区域仅接受一个供水设施点服务,且只有  $p$  个供水设施点,避免资源浪费,重复建设。

采用 C++ 语言,调用 MATLAB 函数接口进行二次开发,应用上述模型进行计算,结果如表 2,从候选集中选择 21 个新增供水设施点,对白云区防火水资源的供水设施点进行计算,舍去 8 个供水设施点,其覆盖高火险区域比例已到达 91%,基本满足需要,见图 5。

表 2 优化后结果

Table 2 The optimized results

新增供水设施点	供水设施点合计 ( $m$ )	舍去供水设施点	有效供水设施点 ( $p$ )	实际增加供水设施点	覆盖高火险区域比例/%
21	233	8	225	13	91

图 5 DEM 模型下配置水资源

Fig. 5 Configuration of water resources on DEM model

3 结论与讨论

本文在全要素地形图、林相图、水系图、交通道路图基础上,应用 GIS 空间分析方法,将水资源空间分布作为森林防火要素进行研究,并与道路网络密切结合,分析各供水设施点在给定时间内的服务范围,在 DEM 模型基础上提出改进方案,应用最大覆盖高火险森林区域模型筛选优化。实例中原始供水设施点个数为 212 个,覆盖高火险区域百分比仅为 68%,通过设置候选供水设施点 21 个,应用优化模型舍去 8 个供水设施点,在实际新增 13 个供水设施点的情况下,覆盖高火险区域比例就能达到 91%,结果表明应用此方法在投入很小的情况下就能极大满足森林防火需求。在实际应用优化中,在获取的消防供水设施点信息及道路的准确数据的基础上,并结合防火隔离带及消防队驻扎点位置等因素,最后优化结果会更简便精确。

参考文献:

[1] 李凤霞,高喜明. 我国水资源合理配置研究综述[J]. 长春工程学院学报:自然科学版, 2006,7(4):48-50.

[2] 彭少明,黄强,张新海,等. 黄河流域水资源可持续利用多目标规划模型研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):153-158.

[3] 耿福明,薛联青,吴义锋. 基于净效益最大化的区域水资源优化配置[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):149-152.

[4] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报,2007,26(4):22-28.

[5] 姚华荣,吴绍洪,曹明明. GIS 支持下的区域水土资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2004,20(2):31-35.

[6] 崔远来,王建鹏,张自宽,等. 基于动态规划和自优化模拟混合模型的水资源优化配置[J]. 水电能源科学,2007,25(3):1-5.

[7] 耿艳辉,闵庆文,成升魁. 流域水土资源优化配置的几种方法比较[J]. 资源科学, 2007,29(3):188-193.

[8] 艳芳,远来,顾世祥,等. 系统动力学在水资源优化配置中的应用[J]. 水电能源科学, 2006,24(5):8-11.

[9] 王维平,陈芳林,范明元,等. 滨海地区生态型水资源优化配置模型[J]. 水利学报, 2006,37(8):991-995.

[10] 靳诚,陆玉麒,张莉,等. 基于路网结构的旅游景点可达性分析——以南京市为例[J]. 地理研究,2009,28(1):246-257.

[11] 刘俊,陆玉麒. 江苏省公路交通网络可达性评价研究[J]. 南京师大学报:自然科学版,2009,31(3):129-134.

[12] 陆锋,陈洁. 武汉城市圈城市区位与可达性分析[J]. 地理科学进展, 2008,27(4):68-74.

[13] 李鹏鹏. 林海集团成功开发森林水灭火系统[J]. 森林防火, 2006(1):46.