

林区瞭望塔布局与优化设计

范 续, 武 刚, 陈飞翔, 陈玥璐

(北京林业大学 信息学院, 北京 100083)

摘要: 【目的】为优化林区瞭望塔布局与建设时序, 提高瞭望塔网络建设效率。【方法】以北京郊区某林场为实验点, 针对瞭望塔网络建设的空间性、阶段性和动态性等特点, 设计基于顶点法的最大监测面积模型 (Max-MAM), 利用 Greedy 算法求解近似最优布局方案; 设计基于熵权法的动态多属性建设时序模型 (DMACTSM), 求解近似最优布局方案下的综合最优建设时序。【结果】顶点法共提取到 38 个备选点; 用 Max-MAM 优选出最优布局方案 $\bar{P}_6 = \{a_6, a_{29}, a_{36}, a_{12}, a_{26}, a_{18}\}$, 可使瞭望塔网络的监测覆盖面积最大, 约 71.47%; 用 DMACTSM 模型获得最优建设时序为 $a_{29} > a_{26} > a_{12} > a_6 > a_{36} > a_{18}$, 可使瞭望塔网络建设过程中综合效益最优。【结论】Max-MAM 和 DMACTSM 能够调整建设时序, 解决建设时序最优问题, 结合地理信息系统 (GIS) 实现瞭望塔网络布局优化; 调整后的建设时序在增长监测面积、交通、坡度、已有建筑情况等方面综合最优。图 6 表 3 参 16

关键词: 林业工程; 林区瞭望塔布局; 最大监测面积模型; 动态多属性建设时序模型; 熵权法; Greedy 算法

中图分类号: S781 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)05-0986-06

Layout and optimal design of watchtowers in forest regions

FAN Xu, WU Gang, CHEN Feixiang, CHEN Yuelu

(School of Information, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] With the optimization of tower layout and time sequence in the process of construction, this paper is aimed at the promotion of the construction efficiency of tower networks in forest regions. [Method] With one forest farm in the suburbs of Beijing chosen as the testing spot and features of watchtower network construction such as spatiality, periodicity and dynamicity taken into consideration, efforts were made to figure out a near-optimal layout design built employing Greedy algorithm on the basis of Maximum monitoring area model (Max-MAM) established with the vertex method. Meanwhile, with such a design, on the basis of DAMACSTM which was built employing the dynamic multi-attribute entropy weight method, the optimal time sequence of construction was figured out. [Result] 38 optional points extracted adopting the vertex method, with the optimal layout achieved by Max-MAM, $\bar{P}_6 = \{a_6, a_{29}, a_{36}, a_{12}, a_{26}, a_{18}\}$, the monitoring coverage of the watchtower network was maximized (about 71.47%) while with the optimal time sequence of construction achieved with DAMACSTM, $a_{29} > a_{26} > a_{12} > a_6 > a_{36} > a_{18}$, the comprehensive benefits are maximized. [Conclusion] Two models of Max-MAM and DMACTSM proposed in this paper, can adjust and figure out the optimal time sequence of construction and when combined with GIS, are conducive to the achievement of the optimal layout of watchtower networks. And the optimal time sequence of construction helps maximize the comprehensive benefits in aspects like the increase in the monitoring area, the traffic, the slope, and existing structures. [Ch, 6 fig. 3 tab. 16 ref.]

收稿日期: 2019-10-24; 修回日期: 2020-04-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (TD2014-02)

作者简介: 范续, 从事林业信息服务研究。Email: fanxu0420@foxmail.com。通信作者: 武刚, 教授, 博士, 博士生导师, 从事林业信息化研究。E-mail: wugang@bjfu.edu.cn

Key words: forest engineering; forest watchtower layout; Max-MAM; DMACTSM; entropy weight method; Greedy algorithm

北京西郊林场总面积为 60.59 km², 包含多个风景名胜点和森林公园, 周边环绕着多处党政军民单位, 特殊的地理位置决定了护林防火是林场森林资源管护工作的重中之重。每年防火期林场需要投入大量的人财物, 布设巡航路线、火源检查卡点、火灾监测点以预防和监控林火发生。过去管理者主要通过经验安排防火监测点, 大部分监测是由人工巡视、瞭望完成, 监测效率低。随着经济发展和智慧林业的兴起, 林场拟建立全天候的林火监测体系, 以提高林区监测的效率。基于瞭望塔的林火监测网是智慧林业“地网”感知层的重要基础设施^[1], 对生态保护、防火救灾、森林公园的区域安全都具有重要意义^[2-5]。建立林区瞭望塔监测体系已成为当前研究热点^[6-7]。受地理空间环境与投资总成本约束, 林区瞭望塔应合理布局、统一规划, 从而实现监测覆盖面积最大化。为满足林区瞭望塔建设空间可视性的最大化^[8], 需借助地理信息系统 (GIS) 构建选址模型, 设计相应的算法, 优化瞭望塔的布局。受林区瞭望塔建设耗时且具有明显阶段性和动态性的制约, 应进一步研究近似最优布局中各瞭望塔建设时序, 以优化监测网的阶段效益。除监测 (可视) 面积外, 交通、坡度、已有建筑等也影响瞭望塔建设时序的合理性。即时序优化问题是典型的多属性排序问题, 常用层次分析法、模糊综合评判法求解^[9-13]。本研究收集林场的 1:10 000 等高线地形图、防火公路图、含风景点的建筑设施图等数据, 以顶点法提取瞭望塔备选点集, 根据备选点集建立最大监测面积模型 (maximum monitoring area model, Max-MAM), 利用启发算法中复杂度较低且便于与 GIS 结合的 Greedy 算法, 快速求解近似最优布局方案, 以优化监测网整体监测效率; 利用熵权法建立动态多属性建设时序模型 (dynamic multi-attribute construction time sequencing model, DMACTSM), 对瞭望塔建设时序进行动态优化布局, 以提高瞭望塔建设效益。

1 备选点集的提取

原则上林区中的制高点都可被选建瞭望塔, 可采用顶点法提取林区内有限个通视效果较好的山顶点作为覆盖选址模型的备选点。步骤包括: ①以 ArcGIS 作为分析工具, 利用 1:10 000 等高线矢量图制作出数字高程模型 (DEM)。②焦点统计每个窗口内的最大高程, 获取最大值栅格矩阵。③将最大值栅格矩阵与原有栅格 DEM 差值运算, 标注结果为 0 的栅格即为顶点, 形成瞭望塔布局分析的备选点集 P 。为提高顶点提取精度, 防止漏提与多提, 本研究采用 11×11 的栅格窗口提取林场中的顶点 (DEM 分辨率为 5 m, 最大高程阈值为 20 m)^[14-15]。如图 1 所示, 共得到 38 个后备选点 $P=\{p_0, p_1, \dots, p_{37}\}$ 。

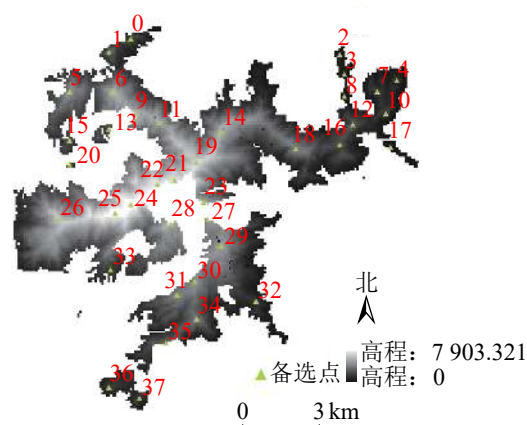


图 1 林场备选点集 P 的分布示意图

Figure 1 P distribution map of alternative set in W Forest Farm

2 基于 Greedy 算法的最大监测面积模型 (Max-MAM)

最大监测面积模型 (Max-MAM) 可表述为从备选点集 P 中选择 n 个点, 使得 n 个点构成监测网络的监测 (可视) 面积最大。设选择 n 个点建成的监测网为 $\bar{P}_n=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。其中, p_n 为第 n 个备选点选建的瞭望塔; $S_n(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为 \bar{P}_n 的监测面积。则最大监测面积模型为:

$$S_n^*(p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*) = \text{Max } S_n(p_1, p_2, \dots, p_n). \quad (1)$$

由式 (1) 可得 $\bar{P}_n^*=\{p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*\}$ 即为最优布局, 此时 n 值为根据约束 (如投资) 或监测网预设目标确定的待建瞭望塔数; p_i^* 为第 i 次选建时的最优瞭望塔; S_n^* 为 \bar{P}_n 的最大监测面积。

Greedy 算法结合 GIS 视域分析工具可实现 Max-MAM 的快速近似求解。记 $P_i = \{p_j^i, j=1, \dots, i, p_j^i \in P\}$ 为第 i 次迭代时备选点集; $\bar{P}_i = \{p_j^{i*}, j=1, \dots, N-i, p_j^{i*} \in P\}$ 为第 i 次迭代时已选瞭望塔集, 满足式 (2) 关系, 其中 $0 \leq i \leq n \leq N$ 。

$$P_0 = P, \bar{P}_0 = \emptyset, P_i \cup \bar{P}_i = P \text{ 且 } P_i \cap \bar{P}_i = \emptyset. \quad (2)$$

根据上述定义, Greedy 算法第 i 次迭代选择的最优备选点 p_i^{i*} 可表示为:

$$S_i^*(p_1^{i*}, p_2^{i*}, \dots, p_{i-1}^{i*}, p_i^{i*}) = \max S_i(p_1^{i-1*}, p_2^{i-1*}, \dots, p_{i-1}^{i-1*}, p_i^i), \text{ 其中 } p_i^i \in P. \quad (3)$$

式 (3) 中, $S_i(p_1, p_2, \dots, p_i)$ 是监测网 \bar{P}_i 的监测面积 (可视域面积), 由 GIS 视域分析工具统计 \bar{P}_i 可视域栅格数 $|V_i|$ 得到。结合 ArcPy 中的 visibility_3d 函数运行上述 Greedy 算法迭代计算可得最大监测面积 $S_i^*(p_1^{i*}, p_2^{i*}, \dots, p_i^{i*})$ 。Greedy 算法应用于 W 林场 38 个瞭望塔备选点, 监测覆盖率随迭代次数变化如图 2 所示。

表 1 列出了 Greedy 算法前 6 次迭代得到的瞭望塔优化布局方案, 当 $i=5$ 时, 优化布局方案 $\bar{P}_6 = \{p_1^*, \dots, p_6^*\} = \{a_6, a_{29}, a_{36}, a_{12}, a_{26}, a_{18}\}$, 结合图 1 可知, \bar{P}_6 的监测覆盖率达 71.47%, 近似实现了设计最少的瞭望塔数目及空间布局、以获得最大监测覆盖面积的整体优化目标。

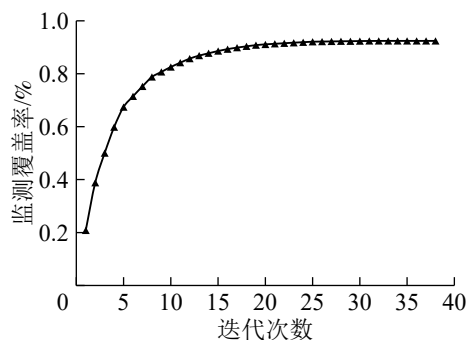


图 2 监测覆盖率变化

Figure 2 Monitoring coverage change

表 1 布局方案与可视栅格总数变化

Table 1 Layout scheme and the change of the total number of visible grids

i	\bar{P}_i	$ V_i $
0	6	1 972
1	6, 29	3 677
2	6, 29, 36	4 737
3	6, 29, 36, 12	5 664
4	6, 29, 36, 12, 26	6 384
5	6, 29, 36, 12, 26, 18	6 767

3 基于 DMACTSM 的建设时序优化方案

为进一步提升瞭望塔网络建设过程的阶段性效益, 建立 DMACTSM 模型, 通过动态计算布局方案中各瞭望塔的综合属性值, 对 \bar{P}_n 中各瞭望塔的建设时序进行优化分析。设 u_i^k 为第 k 次迭代计算瞭望塔 p_i^k 的综合属性值, 则第 k 次迭代得到优先建设的瞭望塔 p_i^{k*} 满足如下最大化问题:

$$u_i^{k*} = \max\{u_i^k\}. \quad (4)$$

式 (4) 中: $p_i^{k*}, p_i^k \in \bar{P}_n (k=0, 1, \dots, n-2)$, 则监测网 \bar{P}_n 的最优建设时序为 $p_i^{0*}, p_i^{1*}, \dots, p_i^{n-1*}$ 。MACTSM 对建设时序的优化包括 3 步。

3.1 决策矩阵的建立

新建塔要求交通便利, 地势平坦, 尽量依附已有建筑建设^[7]。表 2 给出了 MACTSM 的 4 个属性, 增长监测面积、交通情况、坡度与依附建筑情况。记 p_i 的增长监测面积为 y_{i1} , 指加入 p_i 后 \bar{P}_{i-1} 增加的监测面积, 即 p_i 对监测网 \bar{P}_i 的单独监测面积^[8]。 y_{i1} 是正向属性, 反映新增瞭望塔对监

表 2 属性集

Table 2 Attribute set

属性	属性名称	属性类型
y_{i1}	增长监测面积	正向、收益、动态
y_{i2}	交通情况	反向、成本、静态
y_{i3}	坡度	反向、成本、静态
y_{i4}	依附建筑情况	反向、成本、静态

测网总监测面积的贡献, 随监测网变化而变化, 满足 $y_{i1} = (|V_i| - |V_{i-1}|)s$, 其中, $|V_i|$ 是监测网 \bar{P}_i 可视域栅格数, s 是单位栅格面积。设交通情况指瞭望塔所处位置距离道路的远近, 即瞭望塔到最近道路的垂线长度 (m), 对林区防火公路图进行近邻分析求得。坡度指林区地面的陡峭程度 ($^\circ$), 对 DEM 进行坡度分析求得。依附建筑情况指瞭望塔与已有建筑的贴近程度, 即瞭望塔距最近已有建筑的直线距离 (m), 对林区含风景点的建筑设施图进行近邻分析求得。该决策矩阵可记为 $Y = (y_{ij})_{n \times 4}$, 其中, j 为属性编号,

$y_i=(y_{i1}, \dots, y_{i4})$ 为瞭望塔 p_i^* 的属性向量, $i=1, 2, \dots, n$ 。

根据式 (5) 对正向属性 y_{i1} 消除量纲, 对反向属性 y_{i2} 、 y_{i3} 、 y_{i4} 进行极差标准化, 再进行归一化, 得到决策矩阵 $Z=(Z_{ij})_{n \times 4}$ 。

$$\begin{cases} y_j^* = \max_{1 \leq i \leq n} y_{ij}, & y_j^0 = \max_{1 \leq i \leq n} y_{ij}, \\ y_j^0 = \min_{1 \leq i \leq n} y_{ij}, & y_j^* = \min_{1 \leq i \leq n} y_{ij}, \\ x_{ij} = \frac{y_{ij} - y_j^0}{y_j^* - y_j^0}; & x_{ij} = \frac{y_j^0 - y_{ij}}{y_j^0 - y_j^*}; \end{cases} \quad Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}. \quad (5)$$

3.2 熵权法确权

对归一化矩阵 Z 采用熵权法确定权重。熵权法不依赖于专家经验, 可通过数据间差异客观确定属性权重^[16]。根据式 (6) 分 3 步进行确权: 先计算各属性熵值 e_j ; 然后计算各属性差异系数 g_j ; 最后计算各属性权重 ω_j 。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n Z_{ij} \ln Z_{ij}, \text{ 其中, } k = \frac{1}{\ln n}. \quad g_j = 1 - e_j. \quad \omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^4 g_j}. \quad (6)$$

若各属性已有主观权重时, 则可采用式 (7) 修正。建设前期注重增长监测面积可以将 y_{i1} 权值提高, 当 y_{i1} 权值为 1, 表示不关心其他属性, 排序结果与 Greedy 算法一致。

$$\omega_j^0 = \frac{\lambda_j \omega_j}{\sum_{j=1}^4 \lambda_j \omega_j}. \quad (7)$$

3.3 综合属性值的计算

根据式 (8) 对各属性线性加权, 得瞭望塔 p_i 综合属性值。

$$u_i = \sum_{j=1}^4 \omega_j x_{ij}. \quad (8)$$

以林场优化布局方案 $\bar{P}_6 = \{p_1^* \dots p_6^*\} = \{a_6, a_{29}, a_{36}, a_{12}, a_{26}, a_{18}\}$ 为例。当 $k=0$ 时, 对林区 DEM 数据、防火公路图、建筑设施 (含风景点) 图等数据进行领域分析计算, 6 个瞭望塔 4 个属性的初始决策矩阵 Z^0 。

$$Z^0 = \begin{bmatrix} 0.43 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0.27 & 0.22 & 0.32 & 0.22 \\ 0.05 & 0.28 & 0.02 & 0.22 \\ 0.22 & 0.19 & 0.11 & 0.10 \\ 0.03 & 0 & 0.25 & 0.25 \\ 0 & 0.03 & 0.29 & 0.20 \end{bmatrix}.$$

计算可知: 6 个瞭望塔的综合属性值向量 $u^0 = (0.67, 0.76, 0.35, 0.50, 0.30, 0.29)$ 。 $u_2^0 = \max\{u_i^0\} = 0.76$, p_2^* (即 a_{29} 瞭望塔) 率先被加入建设序列。

同理, 当 $k=1$ 时, 对余下 5 个瞭望塔重新计算增长监测面积属性值, 得到归一化决策矩阵 Z^1 , 计算可知: 第 2 个被加入建设序列的瞭望塔为 a_{26} ; 依此类推, DMACTSM 迭代 5 次, 得到各阶段被优先建立的瞭望塔及最终建设时序优化结果, 如表 3 所示。

林场瞭望塔网络优化布局及建设时序效果, 如图 3 所示。对比图 4、图 5 可得: 监测覆盖面积增长最快的建设时序为 a_6 、 a_{29} 、 a_{36} 、 a_{12} 、 a_{26} 、 a_{18} , DMACTSM 调整后建设时序为 a_{29} 、 a_{26} 、 a_{12} 、 a_6 、 a_{36} 、 a_{18} , 不仅保证瞭望塔网络总体效益最优, 也实现了各阶段建设效益的优化, 说明 DMACTSM 对瞭望塔建设过程优化有实际意义。

雷达图可对比优化前后首建瞭望塔的效益 (图 6)。首建 a_6 增长监测面积最大, 在其他成本属性和综合值上均不如率先建立 a_{29} 。

表3 基于 DMACTSM 迭代计算的综合属性值、选优和最终排序

Table 3 DMACTSM iterative computation							
迭代次数	综合属性值						$\max(u_i)$ 优建瞭望塔
	a_{29}	a_{26}	a_{12}	a_6	a_{36}	a_{18}	
0		0.30	0.50	0.68	0.35	0.29	0.76 a_{29}
1			0.45	0.55	0.47	0.44	0.56 a_{26}
2				0.51	0.36	0.50	0.54 a_{12}
3					0.33	0.48	0.54 a_6
4						0.47	0.53 a_{36}

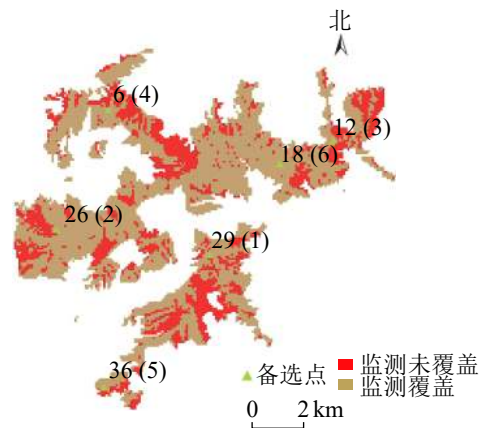


图3 W 林场瞭望塔网络优化设计 (最优布局及建设时序)

Figure 3 Optimal design of watchtower network in W (optimal layout and construction sequence)

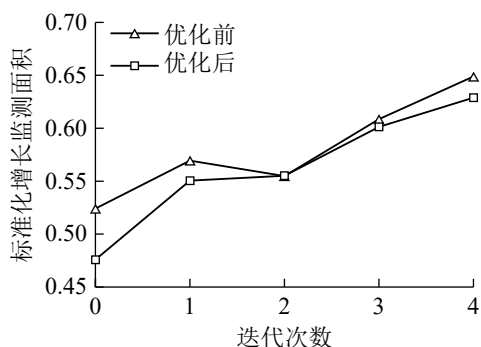


图4 优化前后标准化增长监测面积对比

Figure 4 Comparison of standardized growth monitoring area before and after optimization

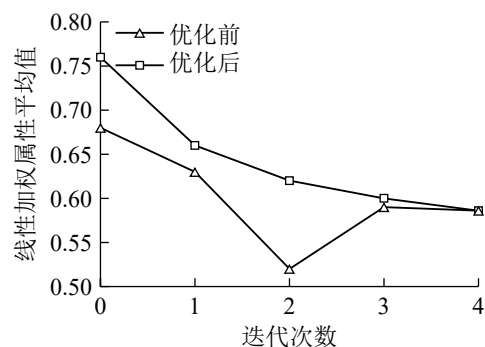


图5 优化前后综合属性值对比

Figure 5 Comparison of comprehensive attribute values before and after optimization

4 结论与讨论

林区瞭望塔网络建设具有明显的空间性、阶段性和动态性。本研究结合林场实际,将林区瞭望塔网络建设规划问题转换为瞭望塔布局与时序优化问题,建立了最大监测面积模型 (Max-MAM) 和动态多属性建设时序模型 (DMACTSM),并利用 GIS 工具设计实现了求解模型的方法。计算和实际验证表明: Max-MAM 及 Greedy 算法可得到满意的优化布局方案; DMACTSM 兼顾收益与多个成本属性,在瞭望塔建设时序的综合优化中兼顾了瞭望塔建设的整体与阶段效益的优化,且计算方法实用可行,为林区瞭望塔网络建设规划提供科学依据。

研究发现: 顶点法提取备选点集是优化的基础,其关键是确定提取窗口的尺寸^[15]。本研究采用 11×11 栅格大小的窗口提取备选点集,窗口尺寸可通过试验计算进一步优化提高顶点提取的效度。监测覆盖率最大与瞭望塔数最小问题互为对偶,当预设约束不是瞭望塔数 n ,而是监测覆盖率时,求解 Max-MAM 同样可得近似最优方案。本研究选取了面积较小的林场作为方法研究实验区,所提出的时空优化设计与研究对象的面积大小无关。在实践中,对于面积大的林区,甚至是 1 个县、1 个州市的林区,更能体现时空优化设计带来的经济效益。

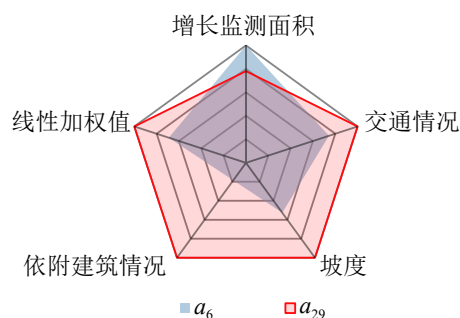


图6 a_6 与 a_{29} 综合属性值对比的雷达图

Figure 6 Radar map for comparison of comprehensive attribute values of a_6 and a_{29}

5 参考文献

- [1] 国家林业和草原局. 中国智慧林业发展指导意见[EB/OL].(2013-08-21)[2020-04-11]. <http://www.forestry.gov.cn/main/72/content-623867.html>.
- [2] ZHANG Kun, HUANG Zhi, ZHANG Songlin. Using an optimization algorithm to establish a network of video surveillance for the protection of Golden Camellia [J]. *Ecol Inf*, 2017, **42**: 32 – 37.
- [3] GÖLTAS M, DEMIREL T, ÇAGLAYAN I. Visibility analysis of fire watchtowers using GIS: a case study in Dalaman State Forest Enterprise [J]. *Eur J For Eng*, 2017, **3**(2): 66 – 71.
- [4] 黄贝. 基于模糊层次分析的森林防火瞭望台选址模型[J]. 林业建设, 2015(1): 19 – 23.
HUANG BEI. Modeling the sitting of forest fire observatory based on fuzzy analytic hierarchy [J]. *For Constr*, 2015(1): 19 – 23.
- [5] 张健, 刘毅, 韩宁, 等. 鹭峰国家森林公园林火视频监控点的选址[J]. 东北林业大学学报, 2009, **37**(5): 24 – 27.
ZHANG Jian, LIU Yi, HAN Ning, *et al*. Site selection for video monitoring spots of forest fire in Jiufeng National Forest Park, Beijing [J]. *J Northeast For Univ*, 2009, **37**(5): 24 – 27.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会发展规划司. 全国森林防火规划 (2016—2025 年)[EB/OL]. (2017-05-18). [2019-10-25]. http://www.ndrc.gov.cn/fzggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201705/t20170518_847772.html.
- [7] 国家林业局计财司. 森林火情瞭望监测设施工程项目建设标准[EB/OL]. (2017-07-28). [2020-04-11]. <https://max.book118.com/html/2017/1215/144197192.shtm>.
- [8] 杨超. 北京市西山试验林场防火监测点布局研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
YANG Chao. *Study on Distribution of Monitoring Spots for Forestry Fire Protection on Beijing Xishan Forestry Farm*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [9] 孙伟, 曹姗姗, 唐小明. 林火视频监控空间优化布局与评价技术[J]. 自然灾害学报, 2013, **22**(2): 61 – 69.
SUN Wei, CAO Shanshan, TANG Xiaoming. Spatial optimal arrangement and evaluation technology of forest fire video monitoring [J]. *J Natural Disasters*, 2013, **22**(2): 61 – 69.
- [10] 肖化顺, 段祝庚, 邓立斌. 林区瞭望台监测网选址研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(7): 6 – 9.
XIAO Huashun, DUAN Zhugeng, DENG Libin. Research on obseravtion network setting in forest area [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2012, **32**(7): 6 – 9.
- [11] 孙传皓, 李贺洋, 郭少斌. 基于层次分析-模糊综合评判法的鄂尔多斯盆地东缘上古界泥页岩储层评判[J]. 地球科学前沿, 2015, **5**: 43 – 52.
SUN Chuanhao, LI Heyang, GUO Shaobin. Shale reservoir evaluation of upper paleozoic in the East Ordos Basin based on AHP-FCE method [J]. *Adv Geosci*, 2015, **5**: 43 – 52.
- [12] 许水燕. 基于 GIS 的森林防火监测系统的研究与实现[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
XU Shuiyan. *Implementation Monitoring System in Forest Fire Prevention Based on GIS*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [13] 周成林, 颜伟, 姜霞. 浅谈山区森林防火监测网优化设计与实现[J]. 贵州林业科技, 2016, **44**(4): 61 – 64.
ZHOU Chenglin, YAN Wei, JIANG Xia. Brief talk about optimization design and implementation of forest fire monitoring network in mountainous areas [J]. *Guizhou For Sci Technol*, 2016, **44**(4): 61 – 64.
- [14] 刘淑琼, 邹时林, 邹胜武, 等. 基于规则格网 DEM 提取山顶点的研究[J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 2013, **36**(增刊): 93 – 95.
LIU Shuqiong, ZHOU Shilin, ZHOU Shengwu, *et al*. Extraction mountain peak based on grid DEM [J]. *J East China Ins Technol*, 2013, **36**(suppl): 93 – 95.
- [15] 陈盼盼, 张友顺, 王春, 等. 基于 DEM 的山顶点快速提取技术[J]. 现代测绘, 2006, **29**(2): 11 – 13.
CHEN Panpan, ZHANG Youshun, WANG Chun, *et al*. Method of extraction surface peaks based on DEM [J]. *Modern Surv Mapping*, 2006, **29**(2): 11 – 13.
- [16] 汤旭, 郑洁, 冯彦, 等. 云南省县域森林生态安全评价与空间分析[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(4): 684 – 694.
TANG Xu, ZHENG Jie, FENG Yan, *et al*. County-level forest ecological security evaluation and spatial analysis in Yunnan Province [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(4): 684 – 694.