

冯卫, 唐亚明, 马红利, 等. 一种基于斜坡单元的山区城镇地质灾害高危危险坡段识别方法[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 64-68.  
[FENG Wei, TANG Yaming, MA Hongli et al. Identification Method of High-Risk Slopes of Geological Disaster in Mountain Towns Based on Slope Unit [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 64-68. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.013.]

# 一种基于斜坡单元的山区城镇地质灾害 高危危险坡段识别方法<sup>\*</sup>

冯 卫<sup>1,2,3</sup>, 唐亚明<sup>2,3</sup>, 马红利<sup>4</sup>, 徐 永<sup>2,3</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;  
3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 4. 自然资源部陕西基础地理信息中心, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 地质灾害高危危险坡段的识别对山区城镇防灾减灾具有重要意义。以山西省石楼县城区为例, 采用层次分析法对石楼县城区斜坡开展地质灾害危险性评价, 初步确定出 14 处高危危险坡段。再利用 Geostudio 软件对初定的高危危险坡段开展稳定性计算, 进一步识别高危危险坡段范围, 最终将 11 处斜坡段内出现整体不稳定或局部不稳定的坡体定为高危危险坡段。经过 ROC 数据曲线验证, 识别出的 11 处地质灾害高危危险坡段较为合理。该方法既弥补了 GIS 分析法缺少岩土体物理力学参数参与计算的不足, 又缩减了逐坡段计算斜坡稳定性的分析时间, 提高了高危危险坡段的识别效率。

**关键词:** 斜坡单元; 高危危险坡段识别; 危险性评价; 地质灾害; 山区城镇

**中图分类号:** X43; X915.5; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0064-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.013

我国山区面积广大, 地质灾害频发, 尤其是地质灾害高危危险坡段对山区城镇的人员和财产构成了严重威胁。近些年来, 国内外学者利用统计分析法、层次分析法、信息量法、模糊评判法、主成分分析法、神经网络法, 并结合 GIS 计算机技术分析, 对地质灾害危险性开展了一系列深入的研究<sup>[1-8]</sup>, 特别是针对斜坡单元, 不少学者在 GIS 分析的基础上, 对地质灾害危险性进行了分区评价。例如, 邱丹丹等<sup>[9]</sup>基于斜坡单元开展了芦山地震滑坡危险性区划, 划分出了高危危险区斜坡范围。谷天峰等<sup>[10]</sup>针对区域斜坡稳定性, 以斜坡单元为基础, 进行了有效、定量的评价, 生成了区域斜坡稳定性分区图。薛强等<sup>[11]</sup>将陕西省绥德县城区周边斜坡划分成若干个斜坡单元, 开展了地质灾害危险性分析和风险评估, 进一步明确了高危危险坡段所在区域。

综合以上国内外地质灾害危险性研究现状, 笔者发现这些研究主要基于 GIS 的相关权重因子叠加计算来确定斜坡单元的危险性, 但是该方法具有一定的主观性, 尤其是缺少引入岩土体物理力学参数参与定量计算。而基于极限平衡理论的边坡稳定性条分计算法<sup>[12]</sup>, 尽管考虑了斜坡体岩土体物理力学参数的作用, 但需逐坡段依次确定分析剖面并推测潜在滑面可能发生的位置, 这对于

斜坡单元过多的山区城镇, 计算工作量过于庞大。

本文依托 GIS 技术在层次分析法初步确定地质灾害高危危险坡段的基础上, 利用 Geostudio 软件有针对性地开展斜坡稳定性定量计算, 进一步识别高危危险坡段范围。这在山区城镇地质灾害高危危险坡段识别中具有一定的探索意义, 可为类似区域识别地质灾害高危危险坡段提供一定的借鉴作用。

## 1 研究区环境地质概况

山西省石楼县地处黄河中游东岸, 吕梁山脉以西, 属于晋西黄土高原一部分。屈产河从县城中部横穿而过, 自东南向西北流入黄河。县城区地势东高西低, 群山连绵, 地表覆盖有深厚的黄土, 因受流水侵蚀、冲刷以及新构造运动的影响, 沟壑纵横, 地形破碎, 区内平均海拔 950 m~1 100 m, 西北部屈产河河谷出境处海拔最低, 高程 907 m, 东部高家山梁顶海拔最高, 高程 1 235 m。

## 2 地质灾害高危危险坡段初判

### 2.1 评价单元划分

斜坡是滑坡和崩塌等地质灾害发生的基本地形

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-06-08 修回日期: 2020-08-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160276; DD20190642)

第一作者简介: 冯卫(1983-), 男, 汉族, 辽宁盖州人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查及风险管理研究。

E-mail: fengwei0510@qq.com

通讯作者: 唐亚明(1973-), 女, 汉族, 湖南永州人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害调查及风险管理研究。

E-mail: tangyaming73@sohu.com

地貌单元。本文利用 1:1 万 DEM 数据,结合水文学原理<sup>[13-14]</sup>,用 DEM 获得集水区,集水区的边界线就是山脊线,再反转原 DEM 获得另一个集水区,边界线即为山谷线,通过融合山脊线和山谷线即可得到自然斜坡单元<sup>[15]</sup>。山西省石楼县城区评价面积约 16.6 km<sup>2</sup>,共划分为 147 个斜坡单元(图 1)。

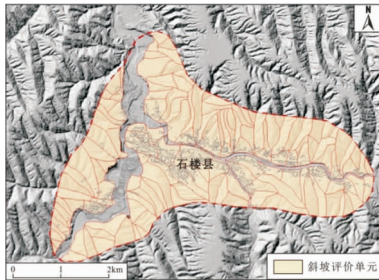


图1 石楼县城区斜坡评价单元分区图

## 2.2 建立评价模型

基于层次分析法<sup>[16]</sup>(简称 AHP),选取斜坡坡度、坡高、岩土体类型、斜坡结构类型、斜坡变形破坏情况和人类工程活动六项主要因素作为地质灾害危险性评价指标,并构造判断矩阵,计算出最大特征值  $\lambda_{\max} = 6.572$ ,由于  $CR = 0.092 < 0.1$ ,满足一致性检验,故可将计算结果作为分析用的权向量。由于石楼县城区暂无泥石流隐患,故评价仅考虑滑坡和崩塌两类地质灾害,并得出滑坡和崩塌危险程度量化评分表(表 1 和表 2)。

斜坡单元危险度值计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^6 a_i x_i \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为地质灾害影响因素的第  $i$  个评价指标;  $a_i$  为  $x_i$  的指标权重。

## 2.3 地质灾害高危险坡段初判

经过斜坡单元危险度计算并结合突变点法,将  $E$  值大于 20 的斜坡段初定为高危险坡段,  $E$  值

介于 14 ~ 20 之间的斜坡段初定为中危险坡段,  $E$  值小于 14 的斜坡段初定为低危险坡段。根据地质灾害危险性分区结果,初步确定石楼县城区地质灾害高危险坡段 14 处(图 2)。

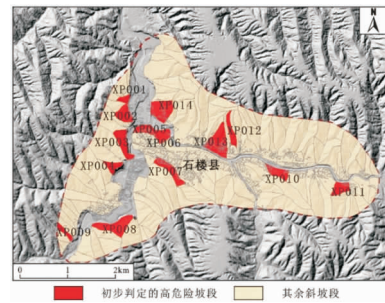


图2 石楼县城区地质灾害高危险坡段初判结果图

## 3 地质灾害高危险坡段识别与验证

### 3.1 地质灾害高危险坡段识别

采用 Geostudio 软件中的 SLOPE/W 模块对石楼县城区的 14 处高危险斜坡段进行稳定性计算,考虑到区内地质灾害的发生与降雨因素关系密切,故在参数选择上分别以天然和暴雨状态下的岩土体物理力学参数作为计算参数(表 3)。根据《GB/T 32864-2016 滑坡防治工程勘查规范》<sup>[17]</sup>,将安全系数  $< 1.05$  定为不稳定斜坡,安全系数在  $1.05 \sim 1.15$  之间定为基本稳定斜坡,安全系数  $\geq 1.15$  定为稳定斜坡。运用 Geostudio 软件分别计算 14 处斜坡段在天然状态下和暴雨状态下的安全系数,对于斜坡前缘和后缘陡峭段再单独计算坡体的局部稳定性。笔者提出,将天然或暴雨工况下出现不稳定或局部不稳定状态的坡体作为识别高危险坡段的关键依据,最终的斜坡体安全系数及高危险坡段识别结果见表 4。

表1 滑坡危险程度量化评分表

| 序号 | 影响因素     | 权重    | 量级划分  |    |   |    |   |    |  |    |
|----|----------|-------|---|----|---|----|---|----|--|----|
|    |          |       | 严重(A)   | 得分 | 中等(B)   | 得分 | 轻微(C)   | 得分 | 一般(D)  | 得分 |
| 1  | 坡度/(°)   | 0.117 | 30 ~ 45   | 40 | 20 ~ 30   | 30 | > 45  | 10 | < 20   | 1  |
| 2  | 坡高/m     | 0.048 | > 80  | 40 | 40 ~ 80   | 30 | 20 ~ 40   | 10 | < 20   | 1  |
| 3  | 岩土体类型    | 0.164 | 松散黄土类多层土体   | 40 | 红粘土及砂砾石双层土体   | 30 | 薄-中层状软硬相间碎屑岩岩组  | 10 | 二级阶地亚砂土及砂砾石双层土体、一级阶地砂土及砂砾石双层土体和河床、河漫滩砂砾石堆积土体 | 1  |
| 4  | 斜坡结构类型   | 0.111 | 黄土斜坡  | 40 | 黄土-红粘土双层结构斜坡  | 30 | 黄土-砂泥岩双层结构斜坡  | 10 | 黄土-红粘土-砂泥岩三层结构斜坡                             | 1  |
| 5  | 斜坡变形破坏情况 | 0.396 | 存在不稳定斜坡变形体;正在活动的滑坡存在                                  | 40 | 具复活条件的滑坡存在  | 30 | 已稳定的古老滑坡存在  | 10 | 无滑坡现象  | 1  |
| 6  | 人类工程活动   | 0.163 | 开挖高度 $\geq 50$ m; 削坡坡比 $\leq 1$ ; 无排水和支挡措施; 坡面或坡顶灌溉严重 | 40 | 50 m > 开挖高度 $\geq 20$ m; $1 < \text{削坡坡比} \leq 2$ ; 排水和支挡措施一般; 坡面或坡顶灌溉较严重 | 30 | 20 m > 开挖高度 $\geq 8$ m; $2 < \text{削坡坡比} \leq 3$ ; 排水和支挡措施较好; 坡面或坡顶灌溉一般 | 10 | 开挖高度 < 8 m; 无削坡; 排水和支挡措施很好; 坡面或坡顶无灌溉         | 1  |

备注: 人类工程活动评价时, 开挖高度、削坡坡比、排水和支挡情况、坡面或坡顶灌溉情况中有一项满足要求即按所在类别归类。

表 2 崩塌危险程度量化评分表

| 序号 | 影响因素     | 权重    | 量级划分                                |    |  |    |  |    |  |    |
|----|----------|-------|-------------------------------------|----|--|----|--|----|--|----|
|    |          |       | 严重(A)                               | 得分 | 中等(B)  | 得分 | 轻微(C)                                      | 得分 | 一般(D)  | 得分 |
| 1  | 坡度/(°)   | 0.117 | ≥55                                 | 40 | 45~55  | 30 | 30~45                                      | 10 | <30  | 1  |
| 2  | 坡高/m     | 0.048 | >30                                 | 40 | 15~30  | 30 | 10~15                                      | 10 | <10  | 1  |
| 3  | 岩土体类型    | 0.164 | 薄-中层状软硬相间碎屑岩岩组                      | 40 | 松散黄土类多层土体                                    | 30 | 红粘土及砂砾石双层土体                                | 10 | 二级阶地亚砂土及砂砾石双层土体、一级阶地砂土及砂砾石双层土体和河床、河漫滩砂砾石堆积土体 | 1  |
| 4  | 斜坡结构类型   | 0.111 | 黄土-砂泥岩双层结构斜坡                        | 40 | 黄土-红粘土-砂泥岩三层结构斜坡                             | 30 | 黄土斜坡                                       | 10 | 黄土-红粘土双层结构斜坡                                 | 1  |
| 5  | 斜坡变形破坏情况 | 0.396 | 中型以上崩塌发生或存在中型以上崩塌的危岩体               | 40 | 小型崩塌发生或存在小型以上崩塌的危岩体                          | 30 | 无崩塌危岩体,时有落石发生                              | 10 | 无崩塌现象  | 1  |
| 6  | 人类工程活动   | 0.163 | 开挖高度≥50 m;削坡坡比≤1;无排水和支挡措施;坡面或坡顶灌溉严重 | 40 | 50 m>开挖高度≥20 m;1<削坡坡比≤2;排水和支挡措施一般;坡面或坡顶灌溉较严重 | 30 | 20 m>开挖高度≥8 m;2<削坡坡比≤3;排水和支挡措施较好;坡面或坡顶灌溉一般 | 10 | 开挖高度<8 m;无削坡;排水和支挡措施很好;坡面或坡顶无灌溉              | 1  |

备注：人类工程活动评价时，开挖高度、削坡坡比、排水和支挡情况、坡面或坡顶灌溉情况中有一项满足要求即按所在类别归类。

表 3 斜坡体物理力学参数表

| 岩土体类别 | 重度/(kN/m <sup>3</sup> ) |      | 粘聚力/kPa |      | 内摩擦角/(°) |    |
|-------|-------------------------|------|---------|------|----------|----|
|       | 天然                      | 暴雨   | 天然      | 暴雨   | 天然       | 暴雨 |
| 马兰黄土  | 18.8                    | 19.6 | 30      | 14   | 25       | 12 |
| 离石黄土  | 19.2                    | 20.8 | 33      | 20   | 26       | 14 |
| 砂岩    | 25.8                    | 26.7 | 2200    | 2100 | 36       | 33 |

结果显示，初定的 14 处斜坡段中，所有斜坡均处于整体稳定或基本稳定状态，但其中的 11 处斜坡段在暴雨工况下均存在发生局部失稳破坏的可能，故将这 11 处斜坡段确定为高危险坡段，最终的识别结果如图 3。

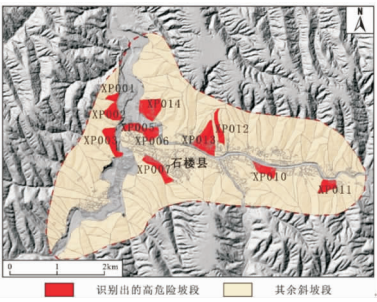


图 3 石楼县城区地质灾害高危险坡段识别结果图

表 4 斜坡体安全系数及高危险坡段识别结果汇总表

| 斜坡编号  | 整体安全系数 |       | 局部安全系数 |       | 最终稳定性判定                   | 识别结果    |
|-------|--------|-------|--------|-------|---------------------------|---------|
|       | 天然     | 暴雨    | 天然     | 暴雨    |                           |         |
| XP001 | 1.668  | 1.582 | 1.130  | 1.032 | 整体稳定，但暴雨工况下前缘不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP002 | 1.782  | 1.553 | 1.142  | 1.013 | 整体稳定，但暴雨工况下后壁不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP003 | 1.662  | 1.480 | 1.163  | 1.042 | 整体稳定，但暴雨工况下后壁不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP004 | 1.602  | 1.495 | 1.214  | 1.113 | 整体稳定，但暴雨工况下前缘基本稳定         | 不是高危险坡段 |
| XP005 | 1.440  | 1.280 | 1.155  | 1.038 | 整体稳定，但暴雨工况下后壁不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP006 | 1.392  | 1.220 | 1.110  | 1.023 | 整体稳定，但暴雨工况下后壁不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP007 | 1.168  | 1.144 | 1.035  | 1.003 | 暴雨工况下基本稳定，但天然和暴雨工况下局部均不稳定 | 是高危险坡段  |
| XP008 | 1.552  | 1.347 | 1.208  | 1.104 | 整体稳定，但暴雨工况下后缘基本稳定         | 不是高危险坡段 |
| XP009 | 1.498  | 1.211 | 1.280  | 1.151 | 整体和局部均稳定                  | 不是高危险坡段 |
| XP010 | 1.591  | 1.403 | 1.168  | 1.045 | 整体稳定，但暴雨工况下局部不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP011 | 1.462  | 1.322 | 1.151  | 1.038 | 整体稳定，但暴雨工况下局部不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP012 | 1.586  | 1.411 | 1.133  | 1.020 | 整体稳定，但暴雨工况下局部不稳定          | 是高危险坡段  |
| XP013 | 1.144  | 1.123 | 1.048  | 0.974 | 整体基本稳定，但天然和暴雨工况下前缘均不稳定    | 是高危险坡段  |
| XP014 | 1.482  | 1.230 | 1.142  | 0.925 | 整体稳定，但暴雨工况下前缘不稳定          | 是高危险坡段  |

### 3.2 数据验证

通过受试者工作特征曲线(简称 ROC 曲线)对初判结果和最终识别结果进行验证,并将 ROC 曲线下的面积值(简称 AUC 值)作为衡量准确度的指标。一般认为, AUC 值在 0.7~0.9 之间表示结果具有一定的可靠性,其值越接近 1 可靠性越高<sup>[18]</sup>。结果显示,本方法最终识别出的高危险坡段 AUC 值为 0.8094,比初判结果具有一定程度的提升,说明最终识别结果比初判结果更为可靠准确(图 4 和表 5)。

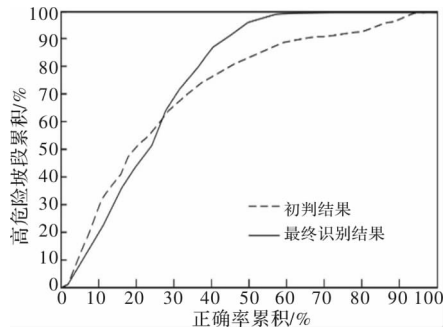


图 4 初判结果和最终识别结果 ROC 曲线对比图

表 5 初判结果和最终识别结果的高危险坡段 AUC 值

| 类型     | 高危险坡段 AUC 值 |
|--------|-------------|
| 初判结果   | 0.7662      |
| 最终识别结果 | 0.8094      |

## 4 结论

(1)针对山区城镇,将基于 GIS 的层次分析法和基于极限平衡理论的边坡稳定性条分计算法相结合,提出了一种基于斜坡单元的地质灾害高危险坡段识别的新方法。

(2)对于山西省石楼县城区,依托 GIS 技术在层次分析法初步确定出的 14 处高危险坡段中,利用 Geostudio 软件开展斜坡稳定性计算,以斜坡段内出现整体不稳定或局部不稳定为关键依据,最终识别出 11 处高危险坡段。经过 ROC 数据曲线验证,识别结果较为可靠准确。

(3)提出的基于斜坡单元的山区城镇地质灾害高危险坡段识别方法,既弥补了 GIS 分析法缺少岩土体物理力学参数参与计算的不足,又缩减了逐坡段计算斜坡稳定性的分析时间,提高了高危险坡段的识别效率,研究成果可为类似区域识别地质灾害高危险坡段提供一定的借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] FRATTINI P, CROSTA G B, FUSI N, et al. Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modeling approach for hazard assessment[J]. Engineering Geology, 2004, 73: 277-295.
- [2] GORSEVSKI P V, GESSLER P E, FOLTZ R B, et al. Spatial prediction of landslide hazard using Logistic Regression and ROC analysis[J]. Transactions in GIS, 2006, 10(3): 395-415.
- [3] JORDI Corominas, JOSE Moya. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes[J]. Engineering Geology, 2008, 102: 1-21.
- [4] 唐川,朱静,张翔瑞. GIS 支持下的地震诱发滑坡危险区预测研究[J]. 地震研究, 2001, 24(1): 73-81.
- [5] 王云龙,文宝萍. 兰州市滑坡地质灾害危险性研究[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1593-1598.
- [6] 唐亚明,张茂省,李林,等. 滑坡易发性危险性风险评价例析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 125-129.
- [7] 王高峰,叶振南,李刚,等. 白龙江流域舟曲县城区地质灾害危险性评价[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 128-133.
- [8] 张茂省,薛强,贾俊,等. 山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 125-135.
- [9] 邱丹丹,牛瑞卿,赵艳南,等. 斜坡单元支持下地震滑坡危险性区划——以芦山地震为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(5): 1470-1478.
- [10] 谷天峰,王家鼎,付新平. 基于斜坡单元的区域斜坡稳定性评价方法[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1400-1405.
- [11] 薛强,张茂省,高波,等. 陕西省绥德县城区地质灾害风险评估[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 711-719.
- [12] 刘立平,姜德义,郑硕才,等. 边坡稳定性分析方法的最新进展[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(3): 115-118.
- [13] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 52-70.
- [14] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 429-445.
- [15] 贾娟,郭孟周,姚昆,等. 斜坡单元支持下基于信息量模型的地灾危险性评价[J]. 河南科学, 2017, 35(5): 787-792.
- [16] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [17] 中华人民共和国国土资源部. GB/T 32864-2016 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. Science, 1988, 240: 1285-1293.

## Entification Method of High-Risk Slopes of Geological Disaster in Mountain Towns Based on Slope Unit

FENG Wei<sup>1,2,3</sup>, TANG Yaming<sup>2,3</sup>, MA Hongli<sup>4</sup> and XU Yong<sup>2,3</sup>

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geology Survey, Xi'an 710054, China;

3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, China;

4. Shaanxi Geomatics Center, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The identification of high-risk slopes of geological disaster is of great significance for disaster prevention and mitigation in mountain towns. In this paper, taking Shilou county town in Shanxi Province as an exam-

ple, the analytic hierarchy process is used to carry out geological hazard assessment on the slopes of Shilou county town, and 14 high-risk slopes are initially identified. The stability calculation of the initial high-risk slopes is carried out using Geostudio software to further identify the range of the high-risk slopes, and the slope with overall instability or local instability in 11 slope sections is finally designated as the high-risk slopes. After the ROC data curve verification, the 11 identified high-risk slopes of geological disaster are more reasonable. This method not only makes up for the lack of GIS analysis method to participate in the calculation of physical and mechanical parameters of rock and soil mass, but also reduces the analysis time of slope by slope stability calculation, and improves the identification efficiency of high-risk slopes.

**Key words:** slope unit; identification of high-risk slopes; hazard assessment; geological disaster; mountain towns

+++++  
(上接第 63 页)

## Study on the Spatial Distribution Characteristics of Low Temperature and Freezing Damage of Landscape Trees in Zhengzhou

HOU Xiaokui and LI Yuanying

(*Department of Traffic Engineering, Huanghe Jiaotong University, Jiaozuo 454950, China*)

**Abstract:** Greening trees are the main part of the landscape, and also the target plants in the landscape construction. However, the green plants are easily affected by the low temperature, cold and frost damage, and then affect the landscape layout. Based on this, the research method of the spatial distribution characteristics of the low temperature and freezing damage of the landscape trees in Zhengzhou is put forward. According to the statistics of the types of trees in Zhengzhou, the samples are classified and sorted according to the tree layer and shrub layer, and the frequency, significance and density are taken as the indexes to calculate the diversity of trees. The comparison results are analyzed. According to the comparison results, the trees are stratified sampled by remote sensing image acquisition technology, and the color characteristics of the frozen vegetation are extracted, and the optimal segmentation threshold is adopted. The algorithm divides the tree and the background, and obtains the gray values of the two regions respectively. Finally, using template matching method, the Mahalanobis distance is used as the standard to identify the frost damage of trees. Combined with the frost damage index, the spatial distribution characteristics are related to the type of vegetation distribution, and the higher the altitude, the more seriously affected by the frost damage. According to the results of spatial distribution characteristics, effective control measures can be taken in time to strengthen the protection of landscape trees in Zhengzhou.

**Key words:** landscape trees; cold and freezing damage; spatial distribution characteristics; remote sensing image processing; Mahalanobis distance