

森林火灾发生后的山体滑坡敏感性分析 ——以木里森林火灾为例

穆通¹, 侯春彩²

¹广东省岭南院勘察设计有限公司, 广东

²国家林业和草原局林草调查规划院, 北京

收稿日期: 2023年6月21日; 录用日期: 2023年9月20日; 发布日期: 2023年10月8日

摘要

利用ArcGIS Living Atlas of the World, 基于“木里藏族自治县3.28森林火灾”受灾区域的地形、降雨量和植被等资料, 采用GIS技术和加权综合法, 对研究区域的山体滑坡敏感性进行分析评价。结果发现, 研究区以中高风险区为主, 占整个研究区总面积的71%, 是发生山体滑坡风险的主体部分。高风险区域有两条道路经过, 需要重点防范。通过使用Living Atlas数据来查找森林火灾过火区域内绿色植被较少、坡度较高和降雨水平较高的区域, 可以有效地节省人力物力, 并实现长期快速检测。

关键词

Living Atlas, 山体滑坡, 降雨量, 植被指数, 坡度, 风险评估

Landslide Sensitivity Analysis after Forest Fires

—Taking the Muli Forest Fire as an Example

Tong Mu¹, Chuncai Hou²

¹Guangdong Lingnan Yuan Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing

Received: Jun. 21st, 2023; accepted: Sep. 20th, 2023; published: Oct. 8th, 2023

Abstract

Based on the ArcGIS Living Atlas of the World, and taking the topography, rainfall, and vegetation data of the affected area of the 3.28 forest fire in Muli Tibetan Autonomous County as the basic

data, the weighted synthesis method was applied to analysis and evaluation the landslide sensitivity of the study area using GIS technology. The results show that the study area is dominated by medium and high risk areas, which account for 71% of the total study area and are the main part of the landslide risk. The high-risk area has two roads passing through it and needs to be focused on prevention. Using Living Atlas data to locate areas with less green vegetation, higher slopes, and higher rainfall levels within the forest fire overfire area would effectively save labor and resources and enable rapid detection over time.

Keywords

Living Atlas, Landslide, Rainfall, Vegetation Index, Slope, Risk Assessment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡是一种地质过程,当重力导致岩石、土壤、碎屑或其混合物沿下坡移动时,就会发生山体滑坡。山体滑坡会严重破坏建筑物、道路和其他基础设施,并破坏野生动物栖息地。在森林火灾之后,由于植被的突然损失,山体滑坡的风险通常增加[1][2]。这使得建立一种简单、有效和易于实施的森林火灾与山体滑坡敏感性相关模型尤为重要。

ArcGIS Living Atlas of the World 是一个不断发展的精选和权威地理信息的集合,可用于构建地图和执行地理分析。通过使用 Living Atlas 数据,可以查找森林火灾过火区域内绿色植被较少、坡度较高和降雨水平较高的区域,综合评价这些因素,可以初步判断出更易发生山体滑坡风险的位置,有效辅助地质灾害固定监测点的选址,节省人力物力。

2. 研究区及数据

2.1. 研究区

以“木里 3·28 森林火灾”的过火区域作为研究区域(见图 1),该区域位于四川省凉山彝族自治州木里藏族自治县。在 2020 年 3 月 28 日 19 时 30 分,四川省凉山州木里县乔瓦镇锄头湾村与项脚蒙古族乡项脚村交界处发生了森林火灾。而在同年 7 月,由于连续强降雨,引发了大规模泥石流,导致了该乡阿牛窝子组境内的山体滑坡、道路中断、农作物大面积受灾,村民房屋和集中安置点被淹没。

木里藏族自治县地处青藏高原东南缘,横断山脉终端,是云贵高原与青藏高原的过渡地带。由于河流深切,岭谷相对高差很大,全县整个地势南倾,主要河流沿断层由北而南,流入金沙江,并与四条南北向的山脉相间排列,构成了木里藏族自治县地貌的主体,属于典型的高山、山原、峡谷地貌。境内有长江上游重要的水源涵养林,是我国仅存不多的成片原始林区[3]。由上述内容可知,木里藏族自治县地势高、地形陡峭、植被覆盖茂密且水源涵养能力强,因此,由于森林火灾导致的植被损失区域存在很大的山体滑坡风险。

2.2. 卫星影像数据

在综合考虑区域地理条件、遥感影像的分辨率和获取难易度后,确定选择基于 ArcGIS Living Atlas of the World 的 Mutispectral Landsat 图层的数据。这些数据是经过 Top of Atmosphere (TOA)校正的,包括用

于可视化和分析的 Landsat GLS 和 Landsat 8 图像, 具有每日更新和每 16 天覆盖全球一次的特点。这些数据的空间分辨率为 30 米, 可以为获取植被生长状况信息提供可靠的数据源。在选择影像时, 考虑火灾扑灭的时间和植被自然恢复的干扰, 选择扑灭林火一个月后的影像, 时间为北京时间 2020 年 5 月 7 日 15 时。Landsat 影像数据情况如表 1 所示。



Figure 1. Geographic location map of the study area
图 1. 研究区地理位置

Table 1. Multispectral bands
表 1. 多光谱波段

Band	Description	Wavelength (μm)	Spatial Resolution (m)
1	Coastal aerosol	0.43~0.45	30
2	Blue	0.45~0.51	30
3	Green	0.53~0.59	30
4	Red	0.64~0.67	30
5	Near Infrared (NIR)	0.85~0.88	30
6	SWIR 1	1.57~1.65	30
7	SWIR 2	2.11~2.29	30
8	Cirrus (in OLI this is band 9)	1.36~1.38	30
9	QA Band (available with Collection 1)	NA	30

2.3. 数字高程数据

选择使用 ArcGIS Living Atlas of the World 数据集中的 Terrain 多分辨率世界高程图层, 该图层服务基于数字地形模型(DTM)提供表示地面高度的数值。这些数据基于多种来源, 其中包括 SRTM_1_arcsec 和

Airbus_WorldDEM4Ortho_24m。SRTM_1_arcsec 的分辨率为 30 米, 而 Airbus_WorldDEM4Ortho_24m 的分辨率为 24 米, 两者都适用于本研究区域。

2.4. 降水量数据

降水量数据选用由 NOAA 提供的年度降雨量数据, 这些数据是由分布在研究区周边的水文监测站年度数据经过插值处理后形成的栅格结果。本次研究选择了 1990 年到 2012 年的年均降水量数据, 单位为英寸。

3. 山体滑坡敏感性提取方法

为便于研究工作的开展, 首先通过 Mutispectral Landsat 影像数据对研究区的过火范围进行区划, 波段组合设置为 Bands-SWIR2, Bands-NIR, Bands-Green (7, 5, 3), 该组合可以清晰的显示出火烧迹地的范围; 其次将 Terrain 的处理模板更改为 Slope_Degrees, 该模板将坡度调整为 0-90 度的整数, 以用于分析; 然后构建基于植被指数、坡度和降水量的山体滑坡敏感性模型; 最后, 根据模型计算结果, 评估研究区在森林火灾发生后的山体滑坡可能性区域[4]。具体研究过程如图 2 所示。

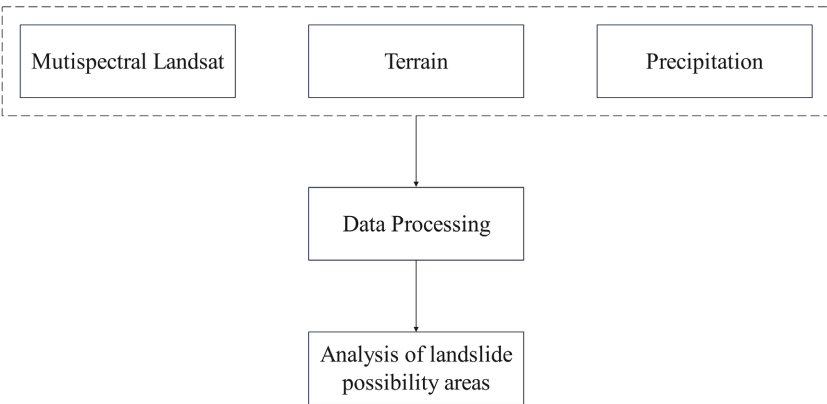


Figure 2. Flow chart of research method
图 2. 研究方法流程图

3.1. 数据处理

基于 ArcGIS Living Atlas of the World, 在 ArcGIS Pro 中加载 Mutispectral Landsat 和 Terrain, 分别进行如下处理:

- 1) 通过 ArcGIS Pro 定义查询的功能, 选择 2020 年 5 月 7 日 Mutispectral Landsat 的影像数据, 并将波段组合设为 Bands-SWIR2, Bands-NIR, Bands-Green (7, 5, 3)。在此基础上, 对过火范围进行区划, 区划结果如图 3 所示。
- 2) 利用 ArcGIS Pro 中的数据处理模板, 将 Terrain 图层调整为 Slope_Degrees, 该模板将动态计算当前范围内高程数据的坡度值, 并以整数的形式, 按 0 到 90 度表示向下倾斜的地形角度, 如图 4 所示。
- 3) 降水量数据通过 NOAA 官方提供的分布在研究区周边的水文监测站年度数据来获取。为了确保数据的连续性, 本研究选择 1990 年到 2012 年的年均降水量数据, 单位为英寸。根据孟庆香, 刘国彬, 杨勤科对气象要素空间差值方法的研究[5], 通过普通克里金插值, 得出区域预测结果, 交叉验证的均方根为 1.97859277043022, 标准平均值为 0.00577005512968018, 标准均方根为 0.763116710611719, 平均标准误差为 1.91264117343464。经过拉伸后如图 5 所示。

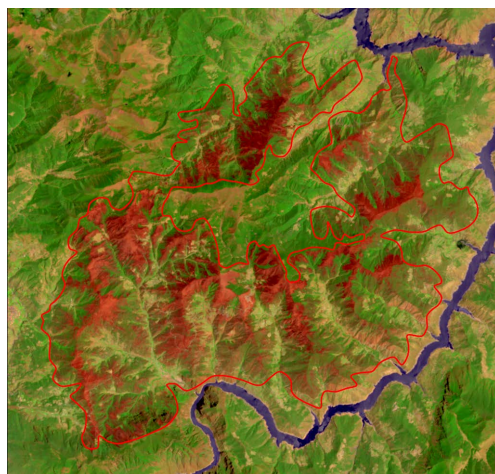


Figure 3. Zoning map of forest fire range
图 3. 研究区过火范围区划图

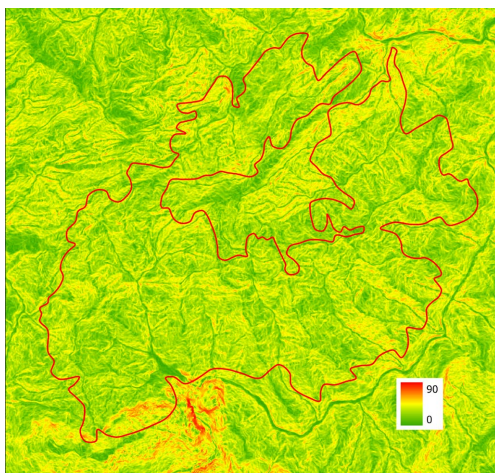


Figure 4. Slope degrees map of the study area
图 4. 研究区地形坡度等级图

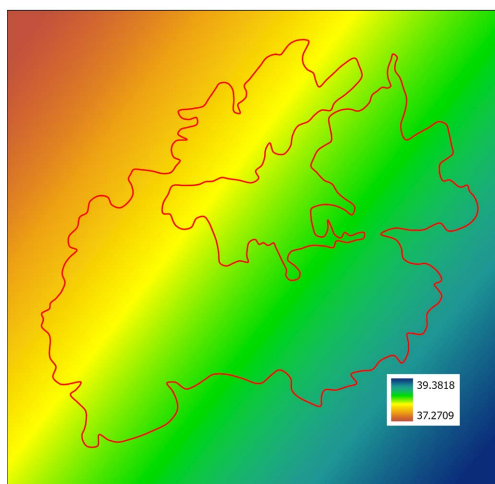


Figure 5. Average annual rainfall map of the study area
图 5. 研究区年均降雨量图

3.2. 构建栅格函数模型

构建栅格函数模型(见图 6), 重分类指数计算结果, 用于分析和标识山体滑坡敏感区域。

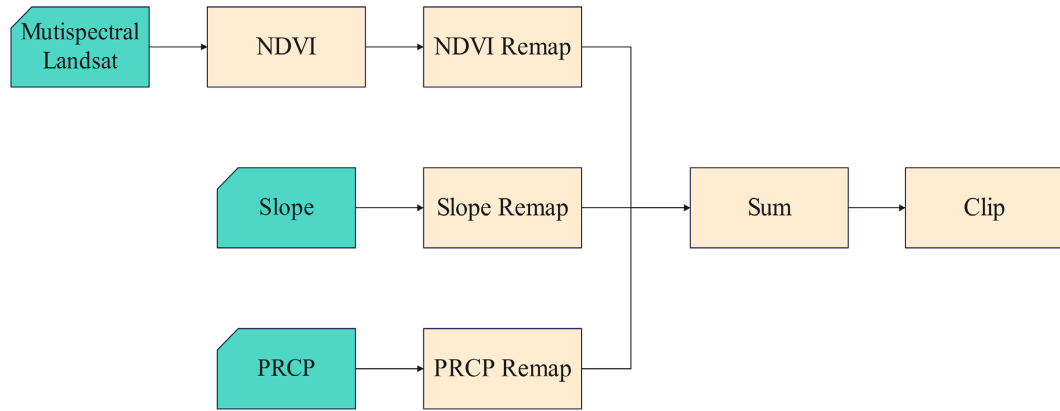


Figure 6. Structural diagram of the landslide sensitivity model

图 6. 山体滑坡敏感性模型结构图

1) 计算植被指数值

归一化植被指数(NDVI)是一个标准化指数, 用于检测植被生长状态、植被覆盖度等。该指数对多光谱栅格数据集中两个波段的特征进行对比, 即红色波段中叶绿素的色素吸收率和近红外(NIR)波段中植物的高反射率[6]。

本模型使用非科学输出的 NDVI 计算方程, 得到 0~200 范围内的值。此范围内的值适合 8 位数据结构, 该结构可以使用特定的色带和色彩映射进行渲染。

计算方程如下:

$$NDVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R)} \times 100 + 100$$

在袁士聪、谷甫刚的 NDVI 分级基础上, 对分类值进行了重新映射, 将其划分为五个新的指数级别[7] [8]。由于植被稀疏可能导致更高的山体滑坡风险, 因此最低的 NDVI 值将被赋予最高的重映射值(表 2)。

Table 2. NDVI index mapping table

表 2. NDVI 指数映射表

最小值	最大值	输出
0	50	5
50	100	4
100	130	3
130	160	2
160	200	1

2) 计算坡度指数值

根据《森林资源规划设计调查技术规程》(GB/T 26424-2010)中规定的坡度分类标准, 对坡度值进行

了重新映射，将其分为五个新的指数级别[9]。由于较陡的坡度更容易导致山体滑坡的发生，因此将较高的坡度值映射到较高的指数值(表 3)。

Table 3. Slope index mapping table
表 3. 坡度指数映射表

最小值	最大值	输出
0	15	1
15	25	2
25	35	3
35	45	4
45	90	5

3) 计算降雨量指数值

根据《中国近 50 年降水量变化区划(1961~2010 年)》的分析结果，对研究区域内年降雨量的值进行了重新映射，将其分为五个新的指数级别[10] [11]，其中，较高的年平均降水量值将被映射为较高的指数值(表 4)。

Table 4. Rainfall index mapping table
表 4. 降雨量指数映射表

最小值	最大值	输出
0	15	1
15	20	2
20	25	3
25	30	4
30	50	5

4) 合并指数值

使用加权综合评价法来对上述三个指数值进行加权和组合，以得出一个综合性的分析结果。在森林火灾多发区域，植被的缺失程度成为评估山体滑坡风险的一个更为关键的因素[12]。根据此结果，赋予 NDVI 较高的权重(NDVI 权重占比 50%、坡度权重占比 25%、降雨量权重占比 25%)，以显示绿色植被密度对结果的影响是坡度或降雨量影响的两倍(表 5)。

Table 5. Weighted sum function weight distribution table
表 5. 加权总和函数权重分配表

最小值	最大值	输出
0	15	1
15	20	2
20	25	3
25	30	4
30	50	5

4. 结果分析

通过执行模型, 得到分析结果, 发现在地图上的深红色区域, 发生山体滑坡的风险相对较高, 而在青绿色区域, 风险则相对较低(图 7)。

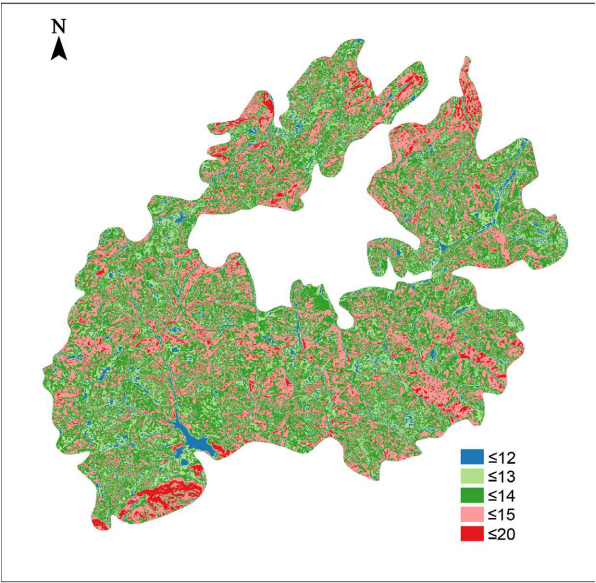


Figure 7. Regional risk zonation of the landslide sensitivity
图 7. 山体滑坡风险区划图

利用自然断点分级法将研究区风险划分为高风险区 V、中高风险区 IV、中风险区 III、中低风险区 II 和低风险区 I, 各风险等级的风险指数范围、面积和占比见表 6。

Table 6. The risk assessment of landslide
表 6. 山体滑坡风险评估

风险等级 Risk level	风险指数范围 Risk Index Range	面积 Area km ²	占比 Proportion%
低风险区 I Low risk area I	≤12	16.4078	5%
中低风险区 II Medium and low risk area II	≤13	62.2180	19%
中风险区 III Medium risk area III	≤14	133.0773	41%
中高风险区 IV Medium and high risk area IV	≤15	99.0541	30%
高风险区 V High risk area V	≤20	15.4394	5%

由图 8 可知, 山体滑坡的高风险区域 V 主要集中在研究区的东部、北部和西南部。这些区域恰好有两条道路经过, 分别是锄头湾 - 白碉乡等外道路和红柯桥 - 项脚乡等外道路。这两条道路是连接木里藏族自治县县城、项脚蒙古族乡、大坡蒙古族乡和白碉苗族乡的主要道路, 因此需要重点防范, 以保障交通和人员安全。

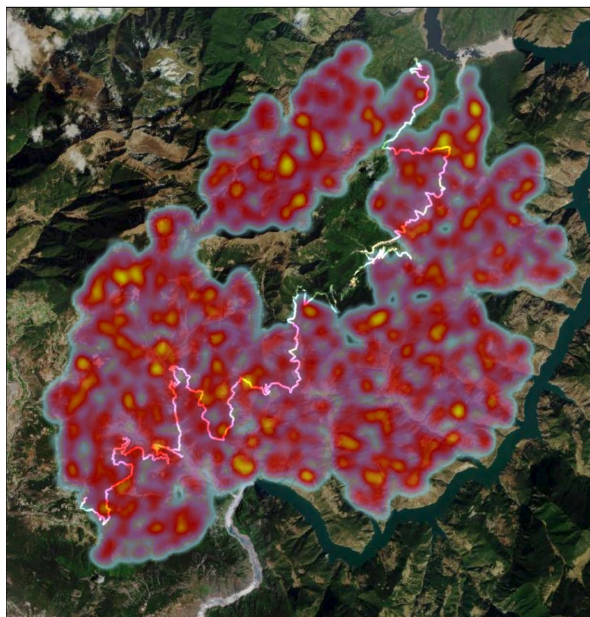


Figure 8. Heatmap of the landslide sensitivity risk zonation
图 8. 山体滑坡风险热点图

研究区中风险区 III 和中高风险区 IV 占整个研究区总面积的 71%，分布较广，一般位于高风险区的外围，是发生山体滑坡风险的主体部分。这些区域的风险等级相对较高，需要采取一定的措施进行预防和控制，以降低山体滑坡的发生概率和影响程度。

低风险区 I 主要位于研究区边界附近，分布相对零散。这些区域的风险等级相对较低，但仍需要加强监测和巡查，以避免潜在的安全隐患。

5. 结论

根据调查，2020 年 7 月 7 日和 7 月 8 日，由于连日持续强降雨，木里县项脚乡和盐源县大坡蒙古族乡分别发生了泥石流灾害，灾害地点位于山体滑坡的高风险区域 V 范围内，连接木里藏族自治县县城、项脚蒙古族乡和大坡蒙古族乡的主要道路上，表明山体滑坡敏感性模型具有一定的灾害指示作用。为了有效预防和控制山体滑坡的发生，应根据研究区的山体滑坡风险分布所呈现的高风险区域集中、中风险区域分布较广、低风险区域相对零散的特点。针对不同的风险等级采取相应的措施，如加强监测、提高应急预案、优化道路设计等，以确保人民群众的生命财产安全。

森林火灾对健康的绿色植被造成了破坏，这在一定程度上增加了山体滑坡的风险。当大雨落在植被已被破坏的陡坡上时，这种风险变得尤为现实。基于植被指数、坡度和降水量，对木里森林火灾地区的山体滑坡进行敏感性和风险分析。在这个过程中，利用 Living Atlas 数据完成了分析 workflow，这种方法的栅格函数处理速度很快，能够迅速确定具有较高山体滑坡风险的潜在区域。此外，这种方法具有仅处理当前可见要素，不创建任何中间输出的优点，减少存储压力。

然而，为了更全面地评估风险，我们还需要考虑其他致灾孕灾因子，如坡向、土壤、地质、气温、风速和人类活动等参数指标。这些因素可以提高模型分析精度，从而更准确地确定山体滑坡的风险区域。

本研究结果可以用于指导关键地区的山体滑坡监测点布设工作，帮助更有效地监控和应对山体滑坡事件。通过这些分析，可以更好地了解山体滑坡的风险，并采取相应的预防和应对措施，从而保护公众安全并减少灾害造成的损失。

参考文献

- [1] 张丽红. 基于气象预报的山洪地质灾害预警技术研究[J]. 人民黄河, 2020(S1): 16-17.
- [2] 席万强. 基于物联网技术的山体滑坡监测及预警系统研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [3] 百度百科. 木里藏族自治县[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/>, 2022-02-24.
- [4] Xiao, X.M., Biradar, C., Wang, A., *et al.* (2011) Recovery of Vegetation Canopy after Severe Fire in 2000 at the Black Hills National Forest, South Dakota, USA. *Journal of Resources and Ecology*, **2**, 106-116.
- [5] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 10-14.
- [6] 孙桂芬, 覃先林, 刘树超, 等. 典型植被指数识别火烧迹地潜力分析[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 204-211.
- [7] 袁士聪, 谷甫刚. 基于归一化指数(NDVI)的植被覆盖度分级研究——以贵州省为例[J]. 环保科技, 2018, 24(3): 38-42.
- [8] 韩春光. 新疆植被指数与气象因子的响应关系研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [9] 唐小平, 陈雪峰, 翁国庆, 张敏, 李晖, 李利国, 等. GB/T 26424-2010 森林资源规划设计调查技术规程[S]. 北京: 国家林业局调查规划设计院, 2011.
- [10] 姚磊. 皖北地区降水的时空演变特征分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2017.
- [11] 梁圆, 千怀遂, 张灵. 中国近 50 年降水量变化区划(1961-2010 年) [J]. 气象学报, 2016, 74(1): 31-45.
- [12] 甘卓亭, 白子怡, 许璟, 等. 基于 GIS 的黄山景区山洪灾害风险区划[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(8): 76-79, 83.