

# 基于 GIS 方法的泸沽湖流域水土流失敏感性评价

蔡文博, 蔡永立

(上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 华东师范大学 地理系, 上海 200241)

**摘 要:** 泸沽湖流域具有珍贵的高原生物和独特的摩梭族文化, 但随着旅游开发的加快, 水土流失风险开始显现。研究基于 RS 和 GIS 技术, 选取土地利用类型、坡度、沟谷密度和土壤 4 个影响因子, 对泸沽湖流域水土流失敏感性空间分布特征进行了分析评价。结果表明: 不敏感和轻度敏感区占流域总面积的 52.61%, 反映泸沽湖流域水土流失保持现状基本良好; 但仍存在明显的水土流失风险及空间差异, 中部敏感区占流域总面积的 38%, 而高度和极敏感区占流域总面积的 9.39%; 高度和极敏感区主要分布在环湖带, 影响因素除了坡度较高外, 筑路和开垦农田等人类活动导致的土地覆被变化及易侵蚀土壤类型是局部区域重要的影响因素。研究结果可为泸沽湖流域水土流失防治和生态保护提供科学依据。

**关键词:** 水土流失敏感性; 泸沽湖流域; GIS

**中图分类号:** S157

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2014)03-0079-05

## GIS-Based Assessment on the Sensitivity of Soil and Water Loss in Lugu Lake Watershed

CAI Wen-bo, CAI Yong-li

(Shanghai Key Laboratory of Ecology of Urbanization Process and Eco-restoration,  
Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** There are many rare alpine species and a unique matriarchal culture (the special Mosuo culture) in the Lugu Lake Watershed. Lugu Lake is a deep alpine fresh water lake with first class water quality. However, with the rapid development of tourism, the risk of soil and water loss has begun to be found. In this study, land use types, soil types, gully density and geographic gradient were selected as indicators used to assess the soil and water loss sensitivity. Based on RS and GIS technology, the spatial distribution of the soil and water loss sensitivity of the Lugu Lake Watershed was studied. The results show that 52.61% of the watershed is insensitive and slightly sensitive, 38% of the watershed is moderate sensitive and 9.39% of the watershed is strong sensitive or extremely sensitive. There are significant differences in the spatial distribution of the soil and water loss sensitivity in the Lugu Lake Watershed and the strong and extreme soil and water sensitive areas mainly distributed around the lake. The change of the land cover caused by human activities (such as road construction and farming) and the easily eroded soil are the important impact factors on local high soil and water sensitivity. Our study provides useful references for the prevention and control of soil and water loss and the ecological conservation in the Lugu Lake Watershed.

**Key words:** soil and water loss sensitivity; Lugu Lake watershed; GIS

水土流失问题已经成为目前全球面临的最严重的生态问题之一, 土壤侵蚀后的沉积物常常会留在陆地生态系统与水域生态系统中, 导致生物栖息地和水质退化<sup>[1]</sup>。影响水土流失的因素很多, 包括降雨强度和频率、植被覆盖、场地的坡度、农田经营模式、土壤

本身的抗侵蚀性等<sup>[1-7]</sup>。水土流失敏感性是指区域生态系统水土流失生态过程发生的潜在可能性及其程度<sup>[7]</sup>, 它是区域生态环境质量、人口负荷、土地利用合理程度的指标之一, 也是实施区域生态环境规划与管理的重要基础依据<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2013-09-26

修回日期: 2013-10-21

资助项目: 国家社科基金重大项目“加快推进生态文明建设研究”(编号 10ZD8-016)

作者简介: 蔡文博(1988—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 景观生态规划。E-mail: cwb8826@163.com

通信作者: 蔡永立(1963—), 男, 安徽怀远人, 教授, 主要从事植被生态学、环境演变和生态规划研究等。E-mail: lycail@geo.ecnu.edu.cn

流域是区域汇水及水土流失生态过程发生的自然单元<sup>[1]</sup>。从流域角度研究水土流失问题,既便于阐明水土流失的机理,也有利于实施区域生态管理。水土流失敏感性评价受到广泛关注,目前国内学者多从行政区域研究水土流失敏感性问题,如全国水土流失敏感性分布规律<sup>[7]</sup>、省域水土流失敏感性<sup>[6]</sup>、区域水土流失敏感性<sup>[5]</sup>等,但以流域为单位进行区域水土流失敏感性的研究还较少。

泸沽湖流域是全世界唯一保存的母系氏族文化——摩梭族文化保护区,具有许多珍贵的生物资源和美丽的自然风光。课题组于 2012 年 4 月对泸沽湖流域进行野外调查,发现该流域水土流失问题是当地最为普遍和严重的生态问题。水土流失不仅直接威胁到当地居民的生命财产安全,也导致一系列的生态问题,如湖泊富营养化和湿地严重淤积,同时也影响到这一地区独特文化的传承。

目前该流域总体开发程度较低,但随着未来香格里拉拉旅游区、机场和泸沽湖流域内道路建设,流域将迅速承受强度较高的旅游开发和筑路工程的压力,对泸沽湖流域水土流失状况造成不可低估的影响。选取土地利用类型、坡度、沟谷密度和土壤 4 个影响因素,对泸沽湖流域的水土流失敏感性及其空间分布特征进行分析评价,研究结果为流域水土流失防治和生态保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

泸沽湖流域(100°43′36″—100°54′20″E,27°36′57″—27°47′2″N)地跨川、滇两省,东部隶属四川省凉山彝族自治州盐源县,西部隶属云南省丽江市宁蒗彝族自治县流域,属温带山地季风气候,年均气温 20℃,最高温 29.1℃,最低温 -5.2℃,年均降水量 910 mm;泸沽湖流域陆生植物有 117 科 414 属 832 种、水生植物 23 科 30 属 42 种,包括珍贵的菠叶海菜花;哺乳类动物 29 种、鸟类 65 种,其中湿地鸟类 39 种,两栖爬行类动物 7 种、裂腹鱼类 40 种,其中厚唇裂腹鱼、泸沽湖裂腹鱼与宁蒗裂腹鱼为泸沽湖所特有;以狮子山为主的海拔 3 000 m 以上山峰有大片的原始森林,其中珍贵的原始植物有云冷杉、云南松、高山栎等<sup>[9]</sup>。目前,泸沽湖流域云南片区旅游开发已经初具规模,高原湖泊自然景观与原始的摩梭族母系氏族文化赋予其发展旅游得天独厚的条件<sup>[10]</sup>。同时,四川片区以保护为主,目前开发程度较低,旅游及道路正在规划之中,由于其内外路网尚不发达,基础设施并不完善,旅游压力相对较弱。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

采用数据包括泸沽湖管理局提供的 25 m 分辨率 dem 数据,30 m 分辨率 2013 年 5 月 Landsat 8 遥感影像(条代号 131,行编号 41,中心经度 100.7000,中心纬度 27.4313),0.5 m 分辨率 2012 年 3 月 Worldview 1 遥感影像(SO-01-2012-0191-1,SO-01-2012-0191-2),泸沽湖管理局提供的 1:10 万土壤类型图及土壤分布等基础资料,以及 2012 年 4 月课题组泸沽湖流域野外调查数据。

### 2.2 评价指标的确定与分级

研究结合小流域内的研究区野外调查现状及泸沽湖管理委员会生态保护总体实施方案对流域水土流失影响的重要程度评估,选取土地利用类型、土壤类型、坡度和沟谷密度 4 个主要因子,将土地利用因子视为最重要因子,坡度与土壤其次,沟谷最次。评价因子权重的确定运用德尔菲法和层次分析法,依据马什·威廉·M 对 4 个因子影响大小的重要性理论评估<sup>[1]</sup>,野外调查中 4 个因子的实际影响调查,对每一层级中各指标两两相比的相对重要性进行判断,并借鉴 Forbes 和 Galow 2002 年创立、国内外水土流失敏感性研究常用的因果分析法<sup>[2-7,11-12]</sup>。为确保水土流失评价因子权重确定的相对合理性,采取主观和客观赋值相结合的权重赋值法,即采用层次分析法与熵值法相结合的方法确定权重<sup>[2,4,6-7,11,13]</sup>。评价因子权重见表 1,各评价因子的选取原因和权重确定原因,以及未选取降雨、土壤侵蚀因子等因子的原因在讨论中说明。

表 1 水土流失评价因子权重值

评价因子	土地利用	坡度	土壤类型	沟谷密度
权重值	0.44	0.22	0.22	0.12

(1) 土地利用类型。采用的土地利用类型因子综合植被覆盖和人类活动两部分的影响,突出体现人类活动干扰对水土流失的影响<sup>[1,14-15]</sup>。运用遥感方法<sup>[15-16]</sup>,利用 ENVI(遥感图像处理软件)与 ArcGIS(地理信息系统平台),对 30 m 分辨率 Landsat 8 遥感影像进行配准、几何精校正等预处理,然后采用人工目视判读法解译卫片,获取泸沽湖流域土地利用的现状数据,并结合 0.5 m 分辨率 2012 年 3 月 Worldview 1 遥感影像和野外调查,对解译的结果进行验证,得到土地利用类型现状图(附图 1)。运用 ArcGIS 平台将预处理后的土地利用数据转化为土地利用类型因子。

(2) 坡度。坡度作为水土流失的直接影响因素

之一,与地形起伏度不同,常被应用于小尺度地区的水土流失敏感性评价中<sup>[1,17]</sup>。依据国家发布的《水土流失保持技术规范》中的坡度图分级标准和国外学者的研究<sup>[1]</sup>,坡度不超过 50°时,水土流失风险程度随坡度的增大而增加,坡度大于 50°后,坡地在雨水中的暴露程度急剧降低,坡度在 50°~65°之间的坡地的水土流失风险程度小于 35°~50°,65°~90°继续降低,到 90°时,则完全消失。故研究将 50°~65°及 65°~80°分别归入高度敏感区和中度敏感区<sup>[1]</sup>。

(3) 土壤。在进行水土流失敏感性评价时,由于具体地区土壤可蚀性因子测定困难,国内学者常采用土壤类型代替土壤可蚀性因子进行评价<sup>[18]</sup>。本研究的土壤因子由基于 ArcGIS 平台数字化处理后的土壤类型图转化成栅格数据生成。

表 2 水土流失敏感性评价分级标准

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
土地利用类型	湖、水塘、密林、居住用地、污水处理场	疏林、湿地	经济林、河流	道路、农田、梯田	裸地
坡度	<8	8~15	15~25 或 65~80	25~35 或 50~65	35~50
土壤类型	亚高山草甸土	山地暗棕壤、泥炭沼泽土	山地棕壤、河流冲积土	山地黄棕壤	棕紫泥
沟谷密度	0~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	
分级赋值	1	3	5	7	9

2.3 水土流失综合敏感性评价方法

利用 ArcGIS 叠置分析模块,将上述各因子对水土流失敏感性影响的分布图进行乘积运算,综合反映泸沽湖流域的水土流失敏感性。公式如下<sup>[5]</sup>:

$$SS_j = \sum_{i=1}^4 S_i$$

式中:SS<sub>j</sub>——j 空间单元水土流失敏感性指数;  
S<sub>i</sub>——i 因素敏感性等级值。采用自然分界法将乘积结果分成 5 类<sup>[5]</sup>,绘制泸沽湖流域水土流失综合敏感性分级图。

3 评价结果

3.1 单因子结果

3.1.1 土地利用类型 人类活动的干扰对泸沽湖流域自然环境造成破坏,造成人地矛盾严重。流域内的极敏感、高度敏感和中度敏感区面积共计 39.58 km<sup>2</sup>,占总面积的 12.73%。其中极敏感和中度敏感区面积较低,而高度敏感区面积为 38.26 km<sup>2</sup>,占总面积的 12.31%(表 3)。高度敏感区主要分布于人类活动频繁的地区,这些地区修路、耕作、砍伐等人类活动影响大,山体和植被破损相对比较严重。

表 3 土地利用对水土流失敏感性评价

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
面积/km <sup>2</sup>	173.09	98.17	0.39	38.26	0.93
百分比/%	55.68	31.58	0.13	12.31	0.30

(4) 沟谷密度。研究证明,沟谷密度与山地滑坡的产生具有一定的相关性,沟谷密度越大,地面越破碎,越容易产生滑坡<sup>[19]</sup>。为保证相对精确性,本研究在 DEM 模型分析前进行了洼地填充预处理,再以 dem 模型为基础,采用 GIS 模拟水文分析法,生成集水区和沟谷网络,并以此为依据计算沟谷密度<sup>[20]</sup>。

(5) 泸沽湖流域水土流失敏感性评价分级标准。在结合泸沽湖流域土地利用调研情况的前提下,土地利用类型图分级标准依据《生态自然功能区暂行规程》;土壤类型分级标准依据泸沽湖管理局提供的土壤分级标准以及盐源县志中土壤类型分级;沟谷密度分级标准参考相关文献<sup>[19-20]</sup>;坡度图分级标准依据《水土流失保持技术规范》和《景观规划的环境学途径》。具体分级情况见表 2。

3.1.2 坡度 在泸沽湖流域,极敏感区与高度敏感区面积共计 84.90 km<sup>2</sup>,占总面积的 27.39%。其中,极敏感区面积为 31.66 km<sup>2</sup>,占总面积的 10.21%,泸沽湖流域约十分之一的山地坡度在 35°~50°,易导致泥石流和山体滑坡的风险。高度敏感区,即坡度在 25°~35°和 50°~60°的地区面积为 53.24 km<sup>2</sup>,占总面积的 17.18%,地形较陡峭,在植被破损的前提下,存在较高的水土流失风险(表 4)。

表 4 坡度对水土流失敏感性评价

项目	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
面积/km <sup>2</sup>	112.37	44.58	68.10	53.24	31.66
百分比/%	36.25	14.38	21.97	17.18	10.21

3.1.3 土壤 流域内,极敏感地区在舍垮村以东的山地,主要土壤类型为可侵蚀性极强的棕紫泥,面积达 2.37 km<sup>2</sup>,占总面积的 0.77%。高度敏感区主要分布山地黄棕壤,面积高达 166.54 km<sup>2</sup>,占总面积的 53.72%(表 5)。山地黄棕壤是泸沽湖流域主要的土壤类型,环绕泸沽湖广范分布于高程 2 600~3 200 m 的地带,是可侵蚀性强的土壤之一,直接导致流域内水土流失风险的广泛存在。

表 5 土壤对水土流失敏感性评价

项目	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
面积/km <sup>2</sup>	61.94	31.93	47.21	166.54	2.37
百分比/%	19.98	10.30	15.23	53.72	0.77

3.1.4 沟谷密度 泸沽湖流域内高度敏感区总面积达 154 km<sup>2</sup>, 占 49.67%。其中, 高度敏感区范围最广, 面积达 153.99 km<sup>2</sup>, 占总面积的 49.67%(表 6)。高度敏感区(沟谷密度在 1.5~2 km/km<sup>2</sup>)主要位于泸沽湖北两侧的山地, 这两侧山地河网密集, 在植被覆盖遭受破坏的条件下, 径流对山体坡面的冲刷将加剧这些区域的水土流失风险。

表 6 沟谷密度对水土流失敏感性评价

项目	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感
面积/km <sup>2</sup>	60.00	16.73	79.30	153.99
百分比/%	19.35	5.40	25.58	49.67

3.2 综合分析结果

对泸沽湖流域水土流失敏感性进行综合评价发现, 极敏感和高敏感区面积总和达 29.09 km<sup>2</sup>, 占总面积的 9.38%, 泸沽湖流域水土流失总体现状良好, 但是本研究表明, 流域内存在水土流失风险。极敏感地区斑块数达 130 块, 占总斑块数的 6.60%; 面积达 1.41 km<sup>2</sup>, 占总面积的 0.45%(表 7)。其中, 极敏感面积最大斑块位于在污水处理厂附近的山体, 面积为 0.10 km<sup>2</sup>, 这里有山坡裸地和高侵蚀性的山地黄棕壤分布。高敏感地区 493 块, 占总斑块数量的 25.01%; 面积达 27.68 km<sup>2</sup>, 占 7.24%; 其中高度敏感面积最大斑块位于小草海以北, 泸沽湖镇以西, 面积为 4.27 km<sup>2</sup>, 这里除坡度较缓外, 具有敏感性较高的农田、高侵蚀性的山地黄棕壤和仅次于最高的沟谷密度。

表 7 水土流失敏感性综合评价

项目	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
面积/km <sup>2</sup>	51.05	111.91	117.73	27.68	1.41
百分比/%	16.48	36.13	38.00	8.93	0.45

4 讨论

研究评价因子的选取受到数据可获得性及研究方法的制约。严格意义上, 研究区流域内各细分区域的降雨量并不相同, 但是由于本文研究区范围相对较小和资料可获得性的原因, 本文将研究区小流域内的降雨因子视为恒定因子, 不将降水侵蚀力作为评价因子。另外, 研究区流域内地形主要为山地, 地形复杂, 土壤可侵蚀因子的具体数值测量难度较大, 本文参考国内学者的方法用土壤类型代替土壤可蚀性因子<sup>[18]</sup>。改进本研究需要获得区域降雨量等详尽的泸沽湖流域气象数据, 对山地、湿地及湖区土壤进行全面调查, 以便计算可靠的降雨侵蚀因子和土壤可蚀性因子。

虽然敏感性评价和评价因子权重确定应用因果分析法、德尔菲法和层次分析法, 保证相对科学性和

合理性, 但是仍具有一定的主观性。野外调查发现, 人类修路、砍伐、耕作等活动对流域内水土流失现状及未来发展的影响超过自然因素, 而土地利用因子综合体现了人类活动及部分自然因素(例如植被等)对研究区水土流失状况的影响, 研究视其为最重要的因子; 坡度和土壤类型都对当地水土流失产生重要影响, 咨询多位专家认为不能断定两者的重要性孰重孰轻; 相对而言, 沟谷密度对当地水土流失产生的影响较小, 可能是由于泸沽湖流域大部分地区河网不稠密、支流水量小所致。改进本研究需要对各个影响因子在泸沽湖流域的实际影响进行长期观察和评估。

5 结论

泸沽湖流域整体水土流失现状良好, 但是自北向南分布着多处水土流失敏感性较高的区域。结果表明: 除了易侵蚀土壤所在区的水土流失敏感性较高外, 道路施工区和农田耕作区的水土流失敏感性较高。

从高度与极度水土流失敏感区的空间分布来看, A—D 区是流域北部的密集分布区: A 位于泸沽湖北面小洛水至达祖沿岸, B 位于泸沽湖镇西面至湖靠近小草海附近的农田区及道路两侧山体, C 位于泸沽湖镇北面小河流经谷地, D 位于泸沽湖镇以东母支至海门道路两侧山体。E 位于密瓦、山南至直普附近的农田区、梯田区及道路两侧山体, F 位于舍垮东面的大片农田、梯田及山体。这些地区分布着开垦的农田和道路两侧山体上的裸地、坡度相对较高、可侵蚀性较高的山地黄棕壤广泛分布, 沟谷密度在流域内相对较高。其中, 极敏感区主要分布于坡度较高、山地裸地分布的区域。高度敏感区大都分布于农田和梯田区(附图 2)。

E 区是流域中部的密集分布区。虽然沟谷密度和坡度值相对不高, 但也是水土流失高敏感区和极敏感区分布的主要区域之一。这些区域山体裸地和农田、梯田广泛分布, 水土流失敏感性受山地黄棕壤及少量极具可侵蚀性的棕紫泥的影响。

F 区是流域南部的密集分布区。湖以东, 舍垮东面的大片农田、梯田及山体是水土流失高敏感和少量极敏感区, 这些区域是当地可侵蚀性最强的土壤—棕紫泥的主要分布区。

极敏感与高敏感区的空间分布情况表明, 人类活动是导致泸沽湖流域大部分区域水土流失敏感性较高的主因。流域内旅游开发和城镇建设的速度正在提升, 必须在开发强度增大前, 预先针对敏感性高的地区加强防护措施, 并对目前存在问题的地区进行生

态修复,及时保护流域生态环境,维护文化依存的生态基础。研究表明,修路、采石和砍伐造成的山体裸露以及农田和梯田耕作造成的土地退化,是造成泸沽湖流域水土流失的主因,如果不经防护和修复,将造成泸沽湖流域水土流失的长期隐患。

后龙山地区(附图2中圈划地区)建议列为核心区重点保护。后龙山地区植被覆盖度高,是原生态状况良好的大面积斑块之一,必须尽早控制游客进入和开发,以免其在旅游高压下改变生态状况,引发新的水土流失问题。

同时,大草海湿地对于进入泸沽湖水体前的水土净化起到至关重要的作用,泸沽湖流域的地表水在汇入湖泊前必须经过大草海湿地。目前,大草海湿地仍有私自侵占改造为农田和苗圃的问题,如果不能对大草海湿地采取及时有效的保护措施,那么水土流失所带来的不利影响将直接对湖泊水体及生物产生影响。建议泸沽湖管理委员会全面禁止大草海内的私人造田和种植苗木的活动,并且建设围栏等措施进行隔离保护。

#### 参考文献:

- [1] 朱强,黄丽玲,俞孔坚.景观规划的环境学途径[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] Füssel H M. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research[J]. Global Environmental Change,2007,17(2):155-167.
- [3] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2003,100(14):8074-8079.
- [4] V F, P C. Applying weight of evidence in retrospective ecological risk assessment when quantitative data are limited[J]. Human and Ecological Risk Assessment,2002,8(7):1625-1639.
- [5] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2011,31(21):6353-6362.
- [6] 刘康,欧阳志云,王效科,等.甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布[J].生态学报,2003,23(12):2711-2718.
- [7] 王效科,欧阳志云,云肖寒,等.中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J].生态学报,2001,21(1):15-19.
- [8] 刘康,康艳,曹明明,等.基于GIS的陕西省水土流失敏感性评价[J].水土保持学报,2004,18(5):168-169.
- [9] 江鸿,严凌.构建泸沽湖区生态安全、民族文化与经济发展良性耦合模式[J].西南民族大学学报:人文社会科学版,2013,34(7):124-128.
- [10] 余艳红,宋福强.泸沽湖风景区规划环评旅游环境承载力研究[J].环境科学导刊,2010,29(3):101-104.
- [11] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性区域差异性研究[J].生态学报,2000,20(1):9-12.
- [12] 尹辉,蒋忠诚,罗为群,等.西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J].水土保持研究,2011,18(1):66-70.
- [13] 高俊峰,许妍.太湖流域生态风险评估研究[M].北京:科学出版社,2012:51-52.
- [14] 胡媛,查轩,黄少燕.重要水源地东圳库区土地利用与水土流失特征空间关系分析[J].水土保持研究,2012,19(2):53-56.
- [15] 马松增,史明昌,杨贵森,等.基于GIS的土地利用时空动态变化分析:以塔里木盆地农垦区为例[J].水土保持研究,2013,20(1):177-181.
- [16] 陈爱侠,李敏,苏智先,等.基于RS/GIS公路路域水土流失动态变化的研究[J].生态学报,2011,31(12):3424-3431.
- [17] 陈海滨,陈志彪.侵蚀红壤小流域水土保持措施的土壤肥力效应评价:以朱溪小流域为例[J].水土保持研究,2011,18(5):81-86.
- [18] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J].水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [19] 张秀平,许小华,钟发牯,等.基于DEM的鄱阳湖区沟谷网络提取及沟壑密度分析[J].江西水利科技,2011,37(2):83-86.
- [20] 周志华,林维芳,徐标.基于GIS与信息量模型的沟谷密度与滑坡发育关系的研究[J].中国矿业,2012,21(1):120-124.