

基于 GIS 的喀斯特地区生态环境敏感性评价

张浪¹ 贺中华^{1, 2, 3} 夏传花¹ 任荣仪¹¹

(1 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2 贵州师范大学 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001;

3 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

【摘要】: 以位于贵州省境内的典型喀斯特地区乌江流域为研究对象, 以 ArcGIS 平台为技术支撑, 采用单因子与多因子评价相结合的方法, 根据乌江流域的具体实际情况及其特有的地形地貌, 选取了“4+1”模式, 即生态类因子土地利用类型、坡度、水系、植被盖度, 地质类因子喀斯特地貌分布等 5 个评价因子, 制定乌江地区的单因子敏感性评价指标。结果表明: 1) 乌江流域整体敏感性程度较高, 中度敏感、重度敏感与极度敏感约占流域总面积的 24%、35.66%、15.21%, 尤其是流域的中部极为明显。2) 流域内东北部地区与西南部地区地形起伏较为平缓, 城市建设用地面积大, 故生态环境表现出不敏感或轻度敏感, 如毕节市七星关区、大方县、纳雍县, 以及铜仁市沿河县等地, 流域内不敏感约占 9.2%、轻度敏感约占 15.93%。3) 乌江流域内植被覆盖与水环境之间具有极显著的正相关性, 坡度与其他各单因子及综合因子间均呈负相关性, 流域的土地利用类型对敏感性综合评价起重要作用, 两者之间具有极强的、显著的正相关性。

【关键词】: 乌江流域 生态敏感性评价 空间分析

【中图分类号】: X171.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1003-6563(2021)02-0045-08

0 引言

随着我国经济建设发展力度的加大和城镇化进程的日益加快, 许多的恶劣现象也随之而出现, 如生态环境状况正在不断恶化, 大气污染日益加重, 资源短缺等生态问题, 已经严重影响了人们的健康和经济的可持续发展, 虽然对石漠化等生态问题的治理提高了区域的资源利用率, 可持续性得到增强, 但是生态保护仍必须引起重视^[1]。喀斯特地区具有较强的环境脆弱性, 具体特征表现为生态环境的承灾能力较弱、生态系统稳定性差、植被的变异敏感程度高, 因此在贵州利用各类喀斯特景观发展旅游业的过程中, 对流域内各地区的生态敏感性做出科学评价并提出相应的发展对策迫在眉睫。

目前, 国内外对生态环境敏感性方面的研究主要是以基于 GIS 的单因子叠加法为主, 利用单因子评价与多因子综合评价相结合的研究占少数。李昌平等^[2]以贵州省县级行政区划单位作为敏感性评价单元, 采用层次分析法、均匀分布函数、模糊综合评判模型等方法, 对土壤侵蚀、石漠化、生物多样性及生境、酸雨等因素进行定量评价, 最后根据最大隶属原则确定敏感性评价

作者简介: 张浪(1995-), 女(仡佬族), 贵州黔西人, 在读硕士, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。

贺中华(1976-), 男, 贵州兴义人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。

基金项目: 国家自然科学基金(u1612441;41471032);贵州省水利厅自然科学基金(KT201402);贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目

等级, 该文章提出了贵州省生态环境敏感性评价方法的选用原则, 为后期研究者选择研究方法提供了参考。李荣彪等^[3]人主要以单因子土地利用类型为例, 利用数学、统计学等方法建立分析模型, 对喀斯特地区生态环境敏感性评价指标的分级方法进行了研究, 以土地利用类型为主要评价因子, 从自然、人文等不同角度出发, 并结合聚类分析等方法进行探讨, 为生态环境敏感性研究提供了更合理的指标分析依据。而武鹏达等^[4]人则以土地利用类型、土壤质地、水环境、植被覆盖度、人口密度、坡度等作为敏感性因子, 建立以水环境为主要因子的土地生态敏感性指数模型, 对金坛市做了土地生态敏感性评价分析, 该方法在分析出单因子的分布状况与影响程度的同时还可以综合分析出多个因子对土地的生态环境影响程度。雷雨菁^[5]通过文献分析、实地考察、统计分析三种方法, 采用 GIS 加权叠加法、层次分析法, 从植物生境、动物生境、生态等三个方面对丹霞梧桐自然保护区敏感性进行研究。目前已有的研究主要集中在流域、省、市等大尺度上, 文献[6]–文献[14]分别对市级如宝鸡市、慈溪市、西安市、乌海市、太原市等和大尺度区域如长江三角洲地区、东湖国家自主创新示范区、秦巴山区、延龙图地区等的生态敏感性进行综合评价, 这为本文的研究提供了技术与方法的参考性。以上研究者们按照严格的原则制定了敏感性因子的选取指标, 使用层次分析法、模糊综合评判模型、统计学等评价方法, 从生态、生物、地质、土地、社会经济等方面对研究区进行不同角度的分析, 虽然使用的评价因子类型众多, 得出的研究结果遍布各方面, 但是结果过于分散, 不具有针对性。

综合前人的研究, 根据研究区的具体实际情况及其特有的地形地貌, 在乌江流域的生态环境敏感性评价体系中加入了一个特别的评价因子——喀斯特地貌分布, 希望能够对研究区的敏感性做出科学的、综合的、正确的评价。研究结果的着重点在于生态环境的保护规划, 通过对流域内生态环境现状划分不同的敏感性等级, 以确定不同敏感性等级的不同开发力度与保护措施, 为乌江流域的土地资源整合、土地生态环境保护和规划提供参考。

1 研究区概况

位于贵州省境内的乌江流域, 范围主要介于 $99^{\circ} 20' 00'' E \sim 103^{\circ} 50' 00'' E$, $24^{\circ} 30' 00'' N \sim 28^{\circ} 00' 00'' N$ 之间。乌江是贵州省内的第一大河, 是典型的山区河流, 河流全长约 1037km, 其中约 874km 位于贵州境内, 流域内河网密集, 河流众多, 流域面积多达 8.79 万 km^2 。其大部分流域位于云贵高原, 地势西南高, 东北低, 主要以高原、山地及低山丘陵为主, 由于地势高差大, 切割性强, 自然景观垂直变化明显, 属于典型的喀斯特地区。一方面乌江流域生态环境脆弱, 土壤剧烈侵蚀, 基岩裸露率高, 另一方面, 地势高差较大, 植被根系固土能力差, 故此区域易发生水土流失。



图 1 乌江流域(贵州境内)地理位置图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据

本文所使用的数据主要包括 2010 年 Landset8 遥感影像、基础地理数据、专题数据和其他相关的项目数据与文献资料等六个方面。参考已有的关于空间尺度选取和前人的研究以及个人数据收集能力,选择了分辨率为 30m 的 Landset8 遥感影像数据;以乌江流域(贵州境内)的数字高程数据(DEM)为基础数据;专题数据主要为乌江流域地表水资源分布数据、喀斯特地貌分布数据、土地利用类型数据(地理国情普查数据)以及流域的县级行政中心分布数据和县级行政区划数据、乌江流域边界数据(来源于“贵州省水系资源整理”项目)。

2.2 方法

生态环境敏感性主要是用来反映研究区域的生态系统遭到外界因素干扰时,发生生态环境问题的可能性大小和抗干扰能力的强弱程度。选用了坡度、土地利用类型、喀斯特分布、植被盖度、水环境等五个要素,构建了研究区的生态敏感性综合评价体系。

1) 图像预处理

对 DEM 数据以及县级行政区划数据、县级行政中心分布数据、乌江流域地表水系分布数据、乌江流域喀斯特分布数据等专题数据进行几何校正,为这些数据定义统一的投影坐标,本次研究采用的投影坐标系为:CGCS_2000_Degree_GK_CM_105E;在 ArcGIS 中为遥感数据定义投影类型,使用标准边界进行地理配准以校正遥感影像,鉴于此次使用的影像为贵州省遥感数据,所以调整好影像后还需要利用边界使用掩膜提取法(Extract by Mask)裁剪研究区。

2) 数据提取

计算植被覆盖度。利用流域的 Landset8 遥感影像数据,以 ENVI 为技术平台,利用 NDVI 植被指数近似估算植被覆盖度,绘制出乌江地区的“植被覆盖度因子分级图”。

在 Band Math 中根据公式:

$$N = (b1 \text{ it } NDVI_{min}) * 0 + (b1 \text{ gt } NDVI_{max}) * 1.0 + (b1 \text{ ge } NDVI_{min} \text{ and } b1 \text{ le } NDVI_{max}) * ((b1 - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})) \quad (1)$$

式中, N 为植被盖度, b1 赋值为 NDVI, $NDVI_{min}$ 、 $NDVI_{max}$ 分别为直方图中 NDVI 的最大值和最小值。

DEM 提取坡度。利用乌江流域 DEM 数据,使用 ArcGIS 中 Slope 工具,提取地面坡度数据,使用重分类(Reclassify)中的自然断点法,生成“坡度因子分级图”。

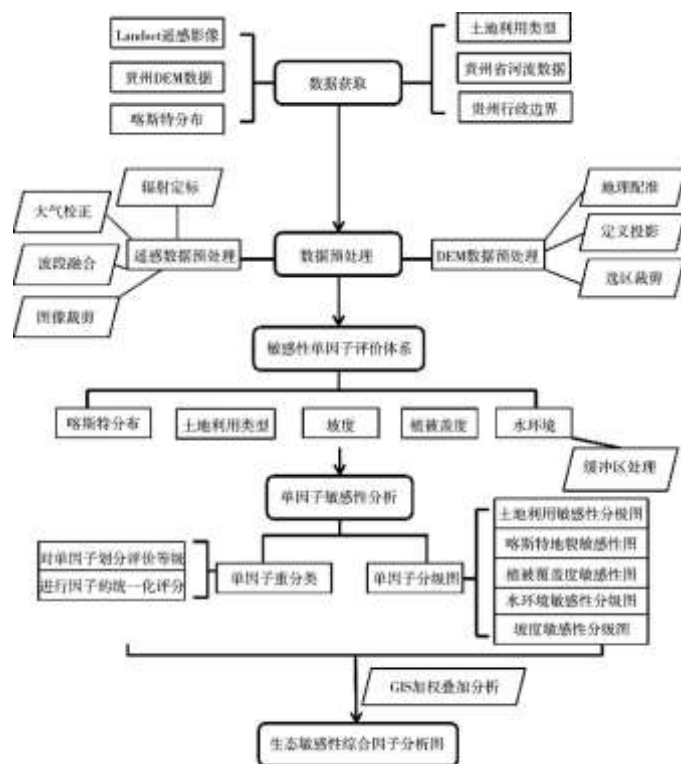


图 2 技术流程图

参考敏感性评价标准，对土地利用类型、喀斯特地貌分布划分不同敏感性等级，绘制“土地利用因子分级图”“喀斯特因子分级图”。

水环境的缓冲分析。利用乌江地区地表的水资源分布数据，将水系统按照评价指标进行不同尺度的缓冲分析，得到不同距离的水环境分布，最终绘制“水环境因子分级图”。

3) 评价因子的叠加分析

进行单因子的数据提取计算，并为不同的等级赋以不同的权重^[15]，运用 GIS 技术平台中的栅格计算器(Raster Calculator)与重分类法(Reclassify)结合使用，然后使用自然断点法将 H 值划分为 5 个等级，对研究区土地进行多因子生态敏感性综合评价。

栅格计算公式如下：

$$H = \sum_{i=1}^5 S_i (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

式中，H 为生态敏感性值； S_i 为对应因子权重。

2.2.1 评价因子的选择

生态环境敏感性的评价研究其重点是选取具有代表性、综合性、科学性的评价因子并建立统一的、规范的、具有可行性的评价标准。主要聚焦于研究区的生态环境问题，从环境的开发与保护方向出发，故选取的评价因子以生态类因子为主，地质类、土地类因子为辅。随着城镇化进程加快，可供人们利用的土地资源逐渐减少，由此引发一系列城市用地与自然生态环境的矛盾，人地矛盾是一个永恒的话题，人们对土地的利用方式直接影响着流域内的生态环境敏感度的大小。因此，土地利用是一个必不可少的评价因子。其次，乌江流域位于典型的喀斯特山区——云贵高原，其地质地貌具有典型的喀斯特特性，喀斯特地貌影响着陆地表面的植被生长，从而对环境内生态的敏感性有着一定的影响，流域内生态环境脆弱，地势高差较大，植被根系固土能力差，故此区域易发生水土流失。同时，流域内的生态环境敏感性与流域的地形坡度息息相关，坡面越陡，人为活动强度越低，植被郁密度越好，敏感性程度越高，故坡度、喀斯特地貌分布、水环境等是研究的重要因子，对坡度因子的敏感性等级划分主要参考庄元^[9]等人和张景华^[15]的评价标准，由于喀斯特分布主要分为3种类型，故根据其分布状态将敏感性程度对应的分为不敏感、中度敏感以及极敏感。最后，植被覆盖度的大小在一定程度上可以反映植被对土壤侵蚀能力作用的大小，植被覆盖度越大，说明土壤侵蚀越不明显，反之，土壤侵蚀越严重，根据植被覆盖度由高到低依次划分为5个等级^[8]，因此，本文选用植被覆盖度作为评价乌江流域生态敏感性程度的一个重要因子。最终确定了土地利用类型、坡度、植被盖度、水系分布、喀斯特分布等5个评价因子。

2.2.2 敏感性评价指标体系

乌江流域的土地生态环境敏感性评价等级一共划分为五个：极敏感区、重度敏感区、中度敏感区、轻度敏感区、不敏感区^[2-16]。利用层次分析法，按照不同因子在生态环境中的不同影响程度赋以权重1、3、5、7、9,剩余的2、4、6、8为中间值，分别制定各单因子的敏感性划分标准^[17]。

表1 乌江流域生态环境敏感性评价指标体系

评价指标	土地利用类型	坡度	植被覆盖度	水环境 (距河流距离)	喀斯特地貌	分级赋值
不敏感	建设用地、裸地	0~5	<20%	非缓冲区	非喀斯特	1
轻度敏感	灌草丛	5~15	20%~30%	3~4km	—	3
中度敏感	耕地	15~25	30%~45%	2~3km	半喀斯特	5
重度敏感	林地	25~35	45%~60%	1~2km	—	7
极敏感	水域、湿地	>35	>60%	<1km	全喀斯特	9

3 结果与讨论

3.1 单因子敏感性评价

3.1.1 土地利用因子

综合各种分类标准^[9-14]，总结得出建设用地与裸地、空闲用地等对生态环境的敏感程度最低，对环境的敏感性程度反应最强的是河流、水域、水库、湿地等地区，水田和旱地的敏感性程度位于中等，耕地与草地等对生态承载力的承受能力减弱，在敏感性评价中占有重要的分量^[18]。由图3(d)可以直观明显地看到，乌江流域整体上的生态环境比较敏感，其中东北、西南部的敏

感性等级较低，局部地区内生态环境存在极度敏感，原因是区域内存在面积较大的河流和湖泊，如平坝县-清镇市的红枫湖旅游景区、金沙县金沙河、黔西县野纪河等地。贵阳市内南明区、小河区、云岩区等由于地处行政中心，其建筑密集度高，裸地与空闲用地等面积较大，受外界环境变化的影响程度低，故其敏感性等级偏低。

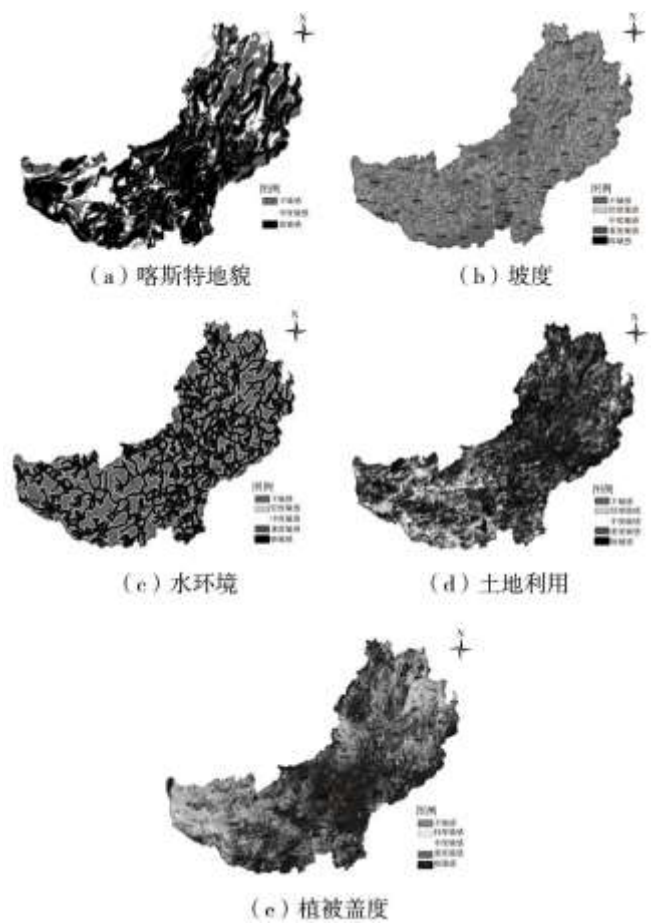


图 3 乌江流域五个生态敏感因子分布图

3.1.2 坡度因子

坡度、坡向等地形因子与地表的石漠化程度息息相关，进而影响到地表的生态脆弱性^[19]。由图 3(b)可看出乌江流域地区地势西南与东北较高，坡度整体敏感性偏低，绝大部分为不敏感，地形多以低山丘陵为主，高大的山脉较少。坡度中部敏感性等级最低，地形主要以丘陵为主，坡度起伏较为平缓，为不敏感，流域两侧遍布复杂山脉，地势高低不平，蜿蜒曲折，坡度，土层贫瘠。

3.1.3 水环境因子

根据研究区内的大部分河流进行 GIS 缓冲区分析得到不同缓冲距离的水环境，由水环境距河流的远近可明显看出：距离河流越远，其敏感性程度越低；离河流越近，则生态环境的敏感性程度越高。由于研究区内水系众多，河网密集，水环境敏感性类型绝大多数为重度敏感和极敏感，这部分地区离河流较近，地形较为平坦，适宜生产生活所需，人类活动频繁，对环境的扰动较大。距河流缓冲 4000m 以外的区域为不敏感型，这些地区远离河流，不能满足生产的供给和生活的需求，人类活动对水环境的影响力较小，对其污染能力低，水环境的生态敏感性较低。

3.1.4 喀斯特因子

喀斯特地貌分布地区岩石裸露率高，地表易遭受流水侵蚀、潜蚀进而导致水土流失，生态环境的保水性差，植被的生长环境相对严酷，恶劣的环境抑制了植被的正常生长。由图 3(a)可了解到，乌江地区绝大部分为中度敏感和极敏感，主要是因为这些地区石灰岩岩石裂隙发达，地下多岩溶和暗河，以致于地表漏水严重且工程性缺水严重^[20]。流域内土层浅薄，植被涵养水源的能力差，进而影响到流域内的整体自然环境发展。

3.1.5 植被覆盖度因子

乌江水系的植被覆盖敏感性类型较为复杂，东北部地区主要以中度敏感、轻度敏感和不敏感为主，西南部地区主要以轻度敏感和不敏感为主，这些地区主要是城镇的建成区和大面积的居民点，此种地类的生态价值低，生态环境对人类的生产生活活动的反应性低，不易出现生态环境问题。重度敏感和极敏感主要分布于中部地区，这些区域的自然植被生长茂盛，生物物种丰富，若区域内的自然植被遭受破坏，那么土壤就易遭受侵蚀，生物的多样性也会降低，从而会引发一系列的生态环境问题。

3.2 敏感性因子综合评价

3.2.1 敏感性综合评价

1) 整体上看，乌江流域的生态敏感性较高，但是从局部来看，不同地区的生态环境敏感性程度却略有不同。乌江流域的生态环境极敏感区主要分布于流域的中部，如开阳、息烽、金沙、遵义、瓮安等地区，面积约 9977.11km²，约占 15.21%。由各单因子敏感性分级图可知，导致流域内生态环境极敏感的主要因素是土地利用类型与植被盖度分布，中部地区的植被盖度偏高，植被生长茂盛，土地利用多以水域、湿地及林地为主，表明此区域的整体环境要素对人类活动的忍受能力弱，植被生长脆弱性强，对外界环境的变化反应比较敏感。

2) 根据表 2 的综合评价结果，我们了解到流域内的生态环境敏感性程度普遍较高，中度敏感、重度敏感遍布流域，面积约 15742.37km²、23389.39km²，占比分别为 35.66%、24%。由于地处典型的喀斯特地区，喀斯特地貌遍布流域范围内，只有极少数地区是非喀斯特或者为潜在型喀斯特。此种地形上的植被涵养水源的能力较差，因为经常性发生水土流失，土层浅薄，土质疏松。生态环境抵抗外界因素干扰的能力较差，生态环境自身的脆弱性较强。

表 2 乌江流域生态环境敏感性等级占比

敏感性	单因子权重	面积/km ²	占比/%
不敏感	1	6034.64	9.20
轻度敏感	3	10439.20	15.93
中度敏感	5	15742.37	24.00
重度敏感	7	23389.39	35.66
极敏感	9	9977.11	15.21

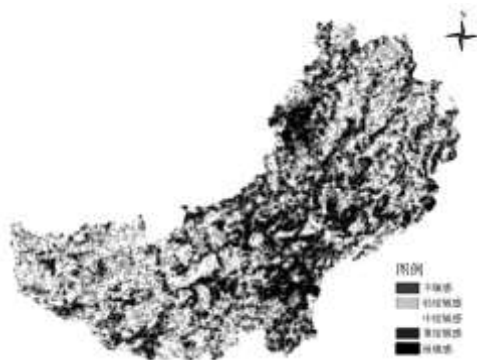


图 4 乌江流域敏感性综合评价

3) 流域的东北、西南地区主要以不敏感和轻度敏感为主，面积约 6034.64km²、10439.20km²，占比分别为 9.20%、15.93%。典型的有西南部的赫章、六盘水、普定、贵阳、毕节以及东北部的务川、沿河、德江、印江、正安等地区，这些区域的建设物相对密集、裸土地、空闲地面积较大，植被覆盖面积较少，表明环境承受能力较强，环境要素对人类的生产生活行为反应不敏感，外界影响因素对其的干扰性低，因此流域内遭受人类生产生活的破坏后对生态的影响程度不明显。

3.2.2 各区县敏感性分布情况

1) 在各个地区的敏感性等级分布中，可明显看到重度敏感在区域内的占比最高。由图 5 可知重度敏感遍布流域内，占比最大约为 48%，主要分布于绥阳县、瓮安县、龙里县、开阳县、遵义市、凤岗县、红花岗区、湄潭县、金沙等地区，这些地区内植被覆盖度高，绿色植被的生长状况良好，若生态环境遭受到外界的侵蚀与干扰，这些地区受到的影响程度则是最强的。

2) 部分地区内生态环境极为敏感，极度敏感所占比重位于区域内第二。如绥阳县、乌当区、龙里县、开阳、遵义、湄潭县等地区，所占比例分别为 0.29、0.31、0.29、0.33、0.25、0.22，生态植被脆弱性较强，生态环境极易随环境的变化而受到干扰。

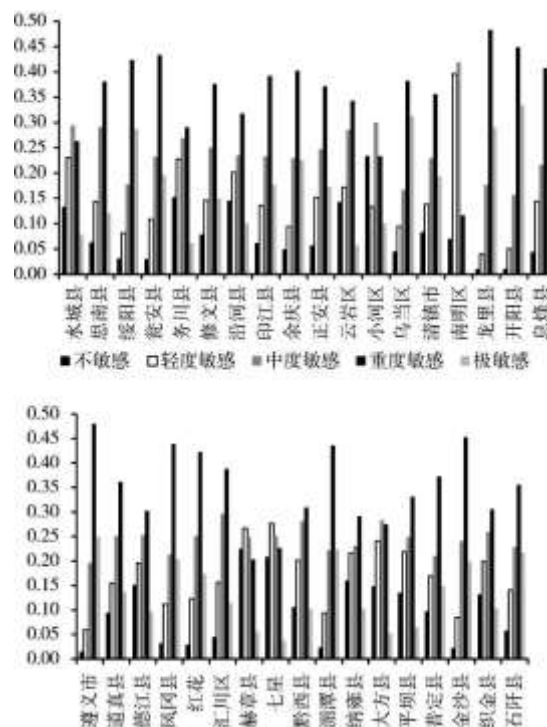


图 5 部分地区不同敏感性等级分布情况

3)流域内少数地区生态环境抗干扰能力强,不敏感与轻度敏感占比较大。如贵阳市内南明区、赫章县、毕节市七星关区、水城县等地,不敏感占比分别为 0.07、0.23、0.21、0.14,轻度敏感占比分别为 0.39、0.26、0.28、0.23。这部分地区城市经济发展快速,经济水平较高,城市内建设用地、裸土地面积较大,建筑物密集,地势起伏低,地形较为平缓,河网分布较为稀疏,故敏感性等级偏低,生态环境不易受外界因素的扰动。

3.3 因子间相关性分析

由表 3 可明显看出,坡度与其他各单因子、综合性因子之间均呈负相关性,随着坡度的上升,其他各评价因子的敏感性逐渐增强,生态脆弱性越强。植被覆盖与水环境之间具有极显著的正相关性(相关系数 $r=0.904$),水资源丰富的地区,其植被生长状况良好,植被覆盖率高,相反,植被的生长对水资源具有涵养作用,在一定程度上增强了地区的土壤含水量。另外,对乌江地区的生态环境敏感性评价起重要作用的是流域的土地利用类型,两者之间具有极强的显著的正相关性(相关系数 $r=0.958$)。

表 3 各评价因子间的相关性分析及显著性检验

		相关性分析					
		综合评价因子	坡度	喀斯特	水环境	植被覆盖	土地利用
显著性检验	综合评价因子	-	-0.63	-0.43	0.336	0.055	0.958**
	坡度	0.129	-	-0.04	-0.54	-0.58	-0.47
	喀斯特	0.235	0.477	-	0.481	0.712	-0.63
	水环境	0.290	0.175	0.206	-	0.904*	0.058
	植被覆盖	0.465	0.154	0.089	0.018	-	-0.23
	土地利用	0.005	0.210	0.126	0.463	0.355	-

4 结论

1)从整个流域的敏感性分布上看,流域内整体敏感性偏高,东北部与西南部地区的生态环境对外界因素的抗干扰能力较强,敏感性较低,中部的大部分地区都变出较为明显的脆弱性,其中,轻度敏感占 15.93%、不敏感占 9.2%、中度敏感面积占比 24%、重度敏感占 35.66%、极敏感约占 15.21%。重度敏感占比最大,是流域治理的首要部分,对这部分治理直接影响到流域的生存与发展。中度敏感比重则位居第二,这是乌江流域生态环境治理的重要部分,对这部分流域治理得当,中度敏感可转为轻度敏感,甚至是不敏感,但若是不引起重视,或者治理不当,则会加重乌江的生态环境问题。

2)乌江流域内各地区的生态环境对外界环境变化波动的感知能力存在差异性。绥阳县、乌当区、龙里县、开阳县、遵义市、湄潭县等地的极敏感与重度敏感所占比例最大,针对这部分区域,在经济发展中应注重对森林、湖泊、湿地等自然环境的保护,做好水土保持工作,而贵阳市内南明区、赫章县、毕节市七星关区等地由于地形平坦、建筑物密集、未利用空闲地与裸地面积大、土地人类扰动强度大,故地区内不敏感与轻度敏感所占比例较大,在今后发展中应注重避免经济发展与自然环境的失衡。在今后的流域发展规划中,针对不同地域的生态环境状况应制定不同的战略措施。

3) 水资源量与植被覆盖之间具有极强的正相关性, 流域的土地利用类型在敏感性的整体评价中起着不可忽视的作用, 对其具有重要的影响, 并与敏感性综合评价因子之间有显著的正相关性。而乌江流域位于典型的喀斯特地貌区, 由于其特有的地貌发育条件, 这里环境比较恶劣, 土层浅薄, 土壤含水量低, 地表蓄水能力差, 地下水不易储存以供植被生长所需, 直接影响着陆地表面植被的生长状态, 间接影响着人类的生产生活方式, 流域治理过程中, 喀斯特地貌是一个重要的影响因素。“绿水青山就是金山银山”这是习总书记在 2005 年在浙江考察时提出的科学论断, 我们必须将这句话贯彻到底。城市化发展是一股不可逆流趋势, 但是一味追求经济效益而忽视了生态的存在, 以牺牲生态环境而换来的经济必定不会长久。喀斯特地貌的大部分地区生态敏感性程度较高, 甚至极敏感的区域亦不在少数, 在未来的发展规划中, 应加强敏感区域的生态保护, 降低其生态脆弱性, 走生态与经济相结合的发展道路。

参考文献:

- [1] 李晨, 熊康宁, 李晓娜, 等. 贵州喀斯特生态脆弱区生态恢复响应[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 19-23.
- [2] 贺秋华, 钱谊, 李昌平, 等. 贵州省生态环境敏感性评价方法研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(15): 6432-6433.
- [3] 李荣彪, 洪汉烈, 强泰, 等. 喀斯特生态环境敏感性评价指标分级方法研究——以都匀市土地利用类型为例[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 1-7.
- [4] 武鹏达, 鲁学军, 侯伟, 等. GIS 支持下土地生态环境敏感性评价——以金坛市为例[J]. 测绘科学, 2016, 41(2): 1-6.
- [5] 雷雨菁. 南雄丹霞梧桐自然保护区生态敏感性评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018: 1-135.
- [6] 李淑芳, 马俊杰, 唐升义, 等. 基于 GIS 的宝鸡市土地生态环境敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 1-5.
- [7] 杨新华, 王侃, 杨雪玲, 等. 基于 GIS 的慈溪市土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 1-6.
- [8] 李军, 曹明明, 邱海军, 等. 基于 GIS 的西安市土地生态环境敏感性评价研究[J]. 西北大学学报, 2014, 44(1): 1-6.
- [9] 庄元, 段志勇, 左志敏. 基于 GIS 的乌海市生态环境敏感性评价[J]. 阴山学刊, 2013, 27(4): 1-4.
- [10] 侯志华, 马义娟, 贾宇平. 基于 GIS 的太原市域生态敏感性综合评价[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 204-210.
- [11] 吴爱玲. 长江三角洲地区土地生态敏感性时空分析[D]. 上海: 东华大学, 2017: 1-76.
- [12] 高远. 基于 GIS 的区域生态环境敏感性评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 1-63.
- [13] 党国锋, 纪树志. 基于 GIS 的秦巴山区土地生态环境敏感性评价——以陇南山区为例[J]. 中国农学通报, 2017, 33(7): 118-127.
- [14] 张瑞, 赵小娜, 李明玉. 延龙图地区土地生态敏感性评价[J]. 延边大学农学学报, 2017, 39(2): 1-7.
- [15] 张景华, 高慧, 欧阳渊, 等. 贵州省黔西县土壤侵蚀敏感性评价[J]. 中国水土保持科学报, 2018, 16(2): 88-94.

-
- [16]万邦江, 况亚勇, 胡武洪. 乌江流域水环境污染现状调查及治理对策[J]. 当代化工研究, 2017(8):70-71.
- [17]倪金生, 李道亮, 于雷易, 等. 3S 技术二次开发实践教程方法和应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [18]余蓉蓉, 王克林. 桂西北喀斯特区可持续发展现状评价与趋势预测[J]. 生态与农村环境学报, 2008(3):7-11.
- [19]张盼盼, 胡远满, 肖笃宁, 等. 喀斯特高原山区土地潜在石漠化与地形因子的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 20-24.
- [20]王永超, 焦树林, 黄福卫. 西南喀斯特地区农业旱灾脆弱性评价研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(3):13-17.