

基于生态安全格局的三峡库区腹地 低丘缓坡土地开发利用

杨远琴^{1,2}, 任平^{1,2}, 洪步庭^{1,2}

(1. 四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室,
成都 610066; 2. 四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610066)

摘要: 对低丘缓坡土地资源的合理开发利用进行研究, 以期为研究区缓解用地紧张、优化区域土地资源配置提供参考依据。以三峡库区腹地的 5 县为研究区, 首先对低丘缓坡范围进行了界定, 然后基于 ArcGIS 10.1 软件, 对研究区生态敏感性和生态系统服务功能重要性进行了评价, 基于评价结果, 提取出生态源地, 接着应用最小累计阻力模型构建研究区生态安全格局, 把生态安全格局空间分布图与低丘缓坡土地资源空间分布图进行了叠加分析。结果表明: 研究区低丘缓坡面积共计 3 930.90 km², 禁止开发型、限制开发型、适度开发型和优先开发型, 其面积分别为 1 182.02 km², 1 775.19 km², 835.71 km², 137.98 km², 研究区低丘缓坡土地资源大部分属于禁止开发型与限制开发型, 适宜于开发利用的低丘缓坡土地资源面积较小; 对 4 种开发利用类型特征进行了分析, 提出适宜了相应的开发利用建议。基于生态安全格局的研究方法, 有利于促进研究区低丘缓坡土地资源的合理开发利用, 有利于生态环境的保护。

关键词: 低丘缓坡; 生态安全格局; 土地资源开发; 最小累积阻力模型; 三峡库区腹地

中图分类号: F301.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0305-06

Development and Utilization of Gentle-Slope Hilly Land Based on Ecological Security Pattern Theory of Three Gorges Reservoir Area

YANG Yuanqin^{1,2}, REN Ping^{1,2}, HONG Buting^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Resources Valuation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China; 2. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

Abstract: Research on the development and utilization of low-slope hilly land resources was carried out in order to provide reference for alleviating land shortage and optimizing regional land resource allocation in the study area. Taking the Three Gorges reservoir area as the research area, we firstly defined the scope of low-slope hilly land resources, and then evaluated the ecological sensitivity and the importance of ecosystem service function based on the ArcGIS 10.1 platform. Based on the evaluation results, the ecological source was extracted. Then the minimum accumulated resistance model was used to construct the ecological security pattern in the study area. The ecological security pattern was superposed with the spatial distribution map of gentle-slope hilly land resources. Area of gentle-slope hilly land resources was 3 930.90 km². There were four land development types: prohibited, limited, moderate and priority developments, their areas were 1 182.02 km², 1 775.19 km², 835.71 km² and 137.98 km², respectively. Most of the gentle-slope hills were prohibited and limited developments, and the area suitable for human development was small. The features of each development type were carried out, and corresponding development and utilization suggestions were put forward. The research method based on the ecological security pattern is conducive to promoting the rational development in the study area, which is conducive to the protection of the ecological environment.

Keywords: gentle-slope hilly; ecological security pattern; land resources development; minimum cumulative resistance model; Three Gorges Reservoir Area

随着中国城镇的迅速发展,城镇建设用地需求大增,占用了一定的生态环境用地与耕地,导致生态环境用地与社会经济发展用地的矛盾日益尖锐。我国低山丘陵面积广阔,低丘缓坡土地资源丰富,合理开发低丘缓坡土地资源,可为社会经济发展提供后备土地资源,有效保护耕地资源。目前,关于低丘缓坡的研究主要集中于低丘缓坡开发的适宜性评价^[1-2]、低丘缓坡开发的生态风险评估^[3]以及开发对策探索^[4-5]等方面,取得了丰富的研究成果。如何合理开发利用低丘缓坡土地资源,促进社会经济与生态环境协调发展成为研究的热点之一。

许多学者提出要合理开发利用低丘缓坡土地资源,应基于生态安全视角,划定生态红线范围,构建土地利用生态安全格局,识别出对区域生态安全起重要作用的生态源地。构建土地利用生态安全格局的方法丰富多样,如俞孔坚等^[6]借助GIS和空间分析技术,构建了北京市土地利用生态安全格局;蒙古军等^[7]借助多目标化模型,构建了鄂尔多斯市土地利用生态安全格局;李晶等^[8]基于最小累积阻力模型构建了准格尔旗土地利用生态安全格局。如何基于生态安全格局,划分不同的低丘缓坡土地资源开发类型,是保障区域生态环境安全,缓解生态环境保护与低丘缓坡土地资源开发利用之间矛盾的关键所在。

本文选取典型的生态脆弱区:三峡库区腹地的5个县为研究区,从实践操作层面探讨低丘缓坡土地资

源开发利用方式。基于生态安全视角,首先对研究区生态敏感性和生态系统服务功能重要性进行评价,在此基础上提取生态源地,接着利用最小累积阻力模型构建生态安全格局,通过将生态安全格局空间分布图与低丘缓坡空间分布图进行叠加,提出不同生态安全水平下的低丘缓坡土地资源的开发利用方式,以期为研究区低丘缓坡土地资源的合理开发利用提供参考依据,优化区域土地资源配置。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

三峡库区是指受长江三峡工程淹没并有移民任务的区县,包括重庆市和湖北省的20个区县。《三峡库区近、中期农业和农村经济发展总体规划(1995—2010年)》将三峡库区划分为库首区、库腹地区和库尾区三大区域,库腹地区包括重庆市的巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开县、万州区、忠县、武隆县、石柱县、丰都县和涪陵区。本文选取三峡库区腹地的巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开县作为研究区(图1),因为该区属于重庆市五大功能区建设中的渝东北生态涵养发展区,地形地貌复杂,地表起伏度大,海拔约为64~2 696 m,地势整体上呈西北—东南走向,生态环境十分脆弱;以山地丘陵为主,耕地面积十分狭小,坡耕地开垦严重,人地矛盾十分严峻;对其低丘缓坡土地资源开发利用进行研究,可为其合理开发利用土地资源提供参考依据。

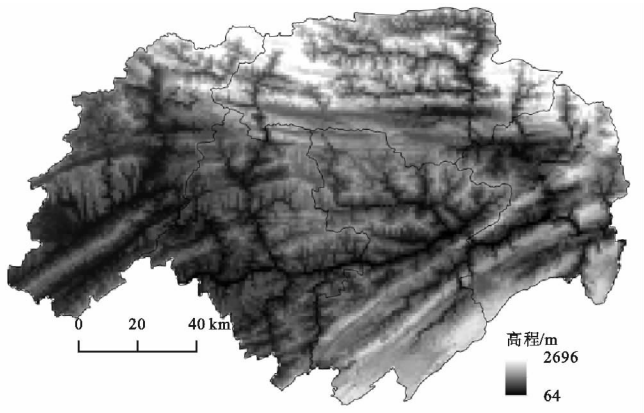
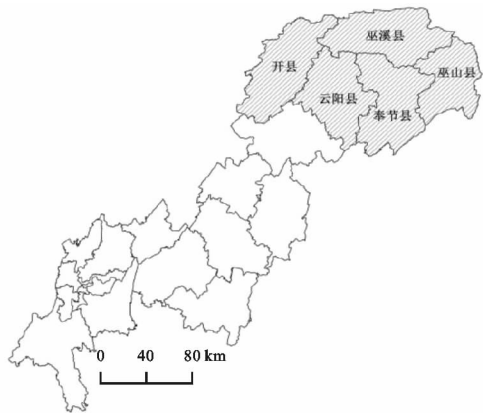


图1 研究区位置及地形

1.2 数据来源

本文使用的数据主要包括土地利用数据、水系和道路分布数据、土壤质地数据、地貌数据、土壤侵蚀数据、DEM与NDVI数据等,数据属性及来源见表1。

2 研究方法

2.1 低丘缓坡范围界定

本文参照已有研究^[9-10],并结合研究区实际情况,选取海拔500 m以下,坡度小于25°的区域为研究区的低

丘缓坡土地资源(图2),低丘缓坡土地资源的面积共计3 930.90 km²,占研究区总面积的21.04%。

2.2 生态敏感性和生态系统服务功能重要性评价

生态敏感性是指生态系统对人类活动反映的敏感程度,用来反映产生生态失衡与生态环境问题的可能性大小^[11]。研究区地貌以山地丘陵为主,耕地面积小,地形结构复杂,水土流失严重,泥石流、滑坡、地质等地质灾害频发,石漠化分布较广泛。因此本文选取土壤侵蚀敏感性、地质灾害敏感性和石漠化敏感性对研究区生态敏感性进行评价。

表 1 数据属性及来源

数据名称	属性	来源
土地利用数据	2015 年中国土地利用现状遥感监测数据	资源环境数据云平台
水系、道路数据	1 : 100 万全国基础地理数据库	全国地理信息资源目录服务系统
土壤质地数据	1 : 100 万土壤数据	寒区旱区科学数据中心
地貌数据	1 : 100 万数字地貌数据库	地理国情监测云平台
土壤侵蚀数据	500 m 分辨率栅格	中国生态系统与生态功能区划数据库
DEM 数据	30 m 分辨率 GDEM 数据	地理空间数据云平台
NDVI 数据	MODIS 月合成产品	地理空间数据云平台

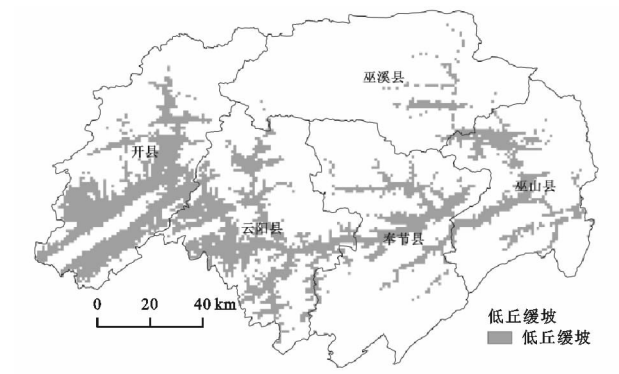


图 2 低丘缓坡分布

其中,土壤侵蚀敏感性与区域海拔高度、气候条件、自然环境等密切相关,因此选择了高程、降雨侵蚀力、植

被类型和土壤质地 4 个指标,各指标分级标准参照国家发布的土壤侵蚀分级标准以及潘峰等人提出的克拉玛依市土壤侵蚀敏感性分级标准^[12]。地质灾害敏感性与区域地形、自然环境等息息相关,本文选取了高程、坡度、植被覆盖度、距灾害点距离和距水系距离 5 个指标,各指标分级标准在考虑研究区地质灾害发育与分布的情况下,参照李建军等提出的万荣县地质灾害敏感性分级标准^[13]。石漠化敏感性主要与喀斯特地貌、地形、植被等有关,因此选取了地貌、坡度和植被覆盖度 3 个指标,各指标分级标准引用于原国家环境保护总局发布的《生态功能区划暂行规程》(2 003)。共选取了 12 个指标构建生态敏感性评价体系,各因子具体的分级标准见表 2。

表 2 生态敏感性评价指标体系

生态敏感性	评价指标	敏感性程度			
		轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
	高程/m	<100	100~200	200~500	>500
土壤侵蚀	降雨侵蚀力/ (J·cm·m ⁻² ·h ⁻¹)	<100	100~400	400~600	>600
	植被类型	树木	草地	农作物	无植被
	土壤质地	石砾、沙、粗砂土、细砂土	黏土、面砂土、壤土	砂壤土、粉黏土、壤黏土	砂粉土、粉土
	高程/m	0~300	300~600	600~1500	>1500
	坡度/(°)	0~10	10~15	15~20	>20
地质灾害	植被覆盖度/%	>70	50~70	20~50	<20
	距灾害点距离/km	>1.5	1.0~1.5	0.5~1.0	<0.5
	距水系距离/km	>3	2~3	1~2	0~1
	喀斯特地貌	否	是	是	是
石漠化	坡度/(°)		<15	15~20	>20
	植被覆盖度/%		>50	20~50	<20
分级赋值		1	3	5	7

生态系统具有调节气候、保持土壤、涵养水源、保护生物多样性等功能,生态系统服务功能重要性评价是指对生态系统及其生态过程所形成的有利于人类生存与发展的生态环境条件与效用的评估^[14]。本文结合研究区实际情况,选取水源涵养重要性、土壤保持重要性和生物多样性保护重要性对研究区生态系统服务功能重要性进行评价。

保障以及调节洪水能力上,本文选取河流与地表覆被作为评价指标,指标分级标准参照李月臣提出的三峡库区水源涵养重要性分级标准^[15]。土壤保持重要性体现于土壤侵蚀现状的严重程度以及潜在的土壤侵蚀危险程度,因此选取土壤侵蚀强度和土壤侵蚀敏感性作为评价指标,指标分级标准参照非凡得提出的桂西北喀斯特地区土壤保持重要性分级标准^[16]。生物多样性保护功能是指生态系统在基因、

其中,水源涵养重要性体现在为区域提供水资源

物种、生态系统多样性维护过程中发挥的作用,本文选取土地利用类型和植被覆盖度作为评价指标,分级标准参照杨伟州等提出的河北省生物多样性保护重要性分级标准^[17]。共选取了 6 个指标构建生态系统服务功能重要性评价指标体系,各因子具体的分级标准见表 3。

表 3 生态系统服务功能重要性评价指标体系

生态重要性	评价指标	重要性程度			
		极重要	高度重要	中等重要	一般重要
水源涵养	河流缓冲/km	一级河流:0~1、二级河流:0~0.2、其余水域	一级河流:1~2、二级河流:0.2~0.4	一级河流:2~3、二级河流:0.4~0.6	其他地区
	地表覆被	常绿(阔叶林、针阔混交林、落叶阔叶混交林)	常绿针叶林、灌丛、竹林	落叶阔叶林、针阔混交林、经济林、草地	农业区及其他地区
土壤保持	土壤侵蚀强度	极强度和剧烈	强度	中度	微度和轻度
	土壤侵蚀敏感性	极敏感	高度敏感	中度敏感	轻度敏感
生物多样性	土地利用类型	林地	草地、水域	耕地、未利用地	建设用地
	植被覆盖度/%	>70	50~70	20~50	<20
分级赋值		7	5	3	1

对生态敏感性与生态系统服务功能重要性的评价主要基于 ArcGIS 10.1 软件,首先,采用几何平均数模型计算单项敏感性指数和重要性指数;接着,利用栅格计算器,对单项生态敏感性和生态系统服务功能重要性结果进行乘数运算,采用自然断裂点法把综合生态敏感性分为轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感 4 级,将综合生态系统服务功能重要性分为一般重要、中等重要、高度重要和极重要 4 级。

2.3 生态安全格局构建

生态安全格局的构建主要包括三大步骤:生态源地识别、生态阻力面构建和生态安全等级阈值的确定。生态源地是物种或生态事件向外扩散的起点,可以促进生态过程的发生和发展,是保障区域生态安全

的关键区域^[18]。本文把极敏感区与极重要区定义为研究区的生态源地,通过 ArcGIS 10.1 的空间分析功能提取得到生态源地。

最小累计阻力模型(minimal cumulative resistance model,MCR)是模拟某个物种从“源”到达目的地运动过程中所需克服阻力而耗费代价的模型,该模型包括 3 个要素:“源”、阻力层和阻力值,可衡量“源”到某点的易达性^[19]。本文利用 ArcGIS 10.1 的 cost distance 工具来构建最小累积阻力模型,计算各栅格到生态源地的最小累计阻力值。

参考相关研究^[20-21],本文选取高程、坡度、距铁路距离、距高等级公路距离和距二级公路距离 5 个因子构建生态安全格局阻力评价体系(表 4)。

表 4 生态安全格局阻力系数

阻力因子	生态阻力系数(R)				
高程/m	<200	200~400	400~600	600~800	>800
坡度/(°)	<6	6~12	12~18	18~24	>24
距铁路距离/km	>10	5~10	2~5	1~2	0~1
距高等级公路距离/km	>5	3~5	1.5~3.0	0.5~1.5	0~0.5
距二级公路距离/km	>3	2~3	1~2	0.5~1.0	0~0.5
分级赋值	1	3	5	7	9

阈值确定是划分生态安全等级的关键,参照已有研究^[22],选取最小累积阻力值分布频率的拐点来作为划分生态安全等级的阈值,最终将研究区生态安全格局划分为低生态安全水平、较低生态安全水平、中等生态安全水平和高生态安全水平 4 级。

2.4 低丘缓坡开发类型确定

将生态安全格局空间分布图与低丘缓坡土地资源空间分布图进行叠加,参照已有研究^[23],依据表 5,把研究区低丘缓坡土地资源开发利用分为禁止开发型、限制开发型、适度开发型和优先开发型 4 类。

表 5 低丘缓坡开发类型

土地类型	生态安全类型	开发类型
低丘缓坡	低生态安全水平	禁止开发区
低丘缓坡	较低生态安全水平	限制开发区
低丘缓坡	中等生态安全水平	适度开发区
低丘缓坡	高生态安全水平	优先开发区

3 结果与分析

3.1 生态敏感性与生态系统服务功能重要性评价
由附图 12 可知,生态敏感性极敏感和高度敏感集

中分布于巫溪县、巫山县和奉节县,中度敏感和轻度敏感集中分布于开县和云阳县,整体上呈现出东高西低的分布态势,是由于东部地势高于西部,地形条件更为复杂,生态系统极其脆弱,导致生态敏感性极强烈。另外,极敏感占比为 26.24%,高度敏感占比最高,为 38.22%,中度敏感占比为 26.20%,一般敏感占比最低,为 9.34%,研究区生态敏感性整体上较强烈,大部分属于极敏感区与高度敏感区,这是由于研究区地处三峡库区的重要位置,该区域以低山丘陵为主,是典型的生态脆弱区,水土流失严重,地质灾害频发,石漠化广布,因此生态环境抗干扰能力差,敏感性高。

由附图 13 可知,生态系统服务功能重要性空间分布相对分散,各等级呈相互交错分布态势,其中极重要占比为 21.00%,高度重要占比为 31.77%,中等重要占比为 25.18%,一般重要占比为 22.05%,占比最高的为高度重要,其他 3 类占比相当,研究区生态系统服务功能重要性整体上表现为较重要。因为研究区水系较发达,水源涵养能力强;地形以山地丘陵为主,植被覆盖度高,植被以亚热带常绿阔叶林为主,生物多样性丰富;该区域为亚热带季风气候,多暴雨,再加上地势起伏不平,因此水土流失严重;基于此,研究区生态系统服务功能较重要。

3.2 生态安全格局构建

图 3 为提取的研究区生态源地,由图可知,生态源地分布较广泛,面积为 7 622.66 km²,占研究区总面积的 40.80%,集中分布在东部的巫山县、巫溪县和奉节县,分布态势与生态敏感性、生态系统服务功能重要性评价结果相一致。

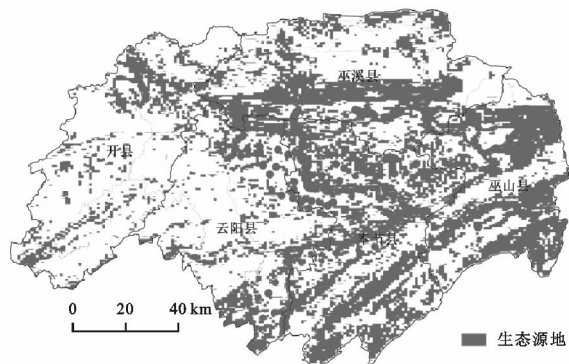


图 3 生态源地分布

根据表 4 对生态安全格局阻力因子进行赋值,利用 ArcGIS 10.1 的空间分析工具生成环境阻力面(附图 14),再利用 cost distance 工具计算最小累积阻力值(附图 15)。由附图 15 可知,距生态源地越近,最小累积阻力值越小,反之越大,生态源地处的最小累积阻力值最小,为 0;最小累积阻力值的高值集中分布于研究区的西部和北部。

本文选取阻力值 0, 11 220, 32 130, 115 750 作为划分生态安全水平等级的阈值,得到研究区生态安全水平空间分布图(附图 16),由图可知,低安全水平区域由生态源地组成,集中分布于研究区的东部,面积为 7 622.66 km²,占研究区总面积的 40.80%;较低生态安全水平区集中分布于低生态安全水平的外围,面积为 6 768.85 km²,占研究区总面积的 36.23%;中等安全水平区主要分布在高安全水平的外围,面积为 3 448.88 km²,占研究区总面积的 18.46%;高安全水平区集中分布于最小累积阻力值的高值区:即西部和北部,面积为 842.60 km²,占研究区总面积的 4.51%;研究区大部分处于低安全水平与较低安全水平,生态系统非常脆弱,容易遭受人类活动的干扰。

依据表 5 生成研究区低丘缓坡土地资源开发利用类型空间分布图(附图 17),由图可知,禁止开发区是指处于低安全水平下的低丘缓坡,集中分布于巫山县、巫溪县、奉节县,以及云阳县和开县的一部分。该区域由生态极敏感区与生态系统服务功能极重要区组成,是低丘缓坡中生态系统服务价值最高的区域,是维护区域生态系统安全的核心区域,且其抵抗人类社会干扰的能力弱。因此该区域应被划分为禁止开发区,应构建生态保护重点区域,构建自然保护区,保护该区域的原生自然植被,禁止人类的开发与破坏。

限制开发区是指处于较低生态安全水平下的低丘缓坡,分布相对分散,各县均有分布,主要分布于禁止开发区的外围。该区域的生态敏感性较强烈,生态系统服务功能较重要,生态系统服务价值较高,仅次于生态源地,对生态源地起保护和屏障作用,也是联系各生态源地的纽带。因此该区域应被划分为限制开发区,可构建森林公园、湿地公园等,应注重对其生态环境的保护。

适度开发区是指处于中等生态安全水平下的低丘缓坡,主要分布于开县和云阳县以及巫山县的一小部分,分布于优先开发区的外围。该区域处于生态屏障带与人类活动带的过渡区域,生态敏感性与生态系统服务功能重要性均处于中等水平,对人类社会的干扰具有一定的抵抗能力。因此该区域应被划分为适度开发区,在确保生态安全的情况下,可进行适度的经济开发活动,以缓解建设用地对耕地的占用,优化土地资源的配置,促进研究区土地资源可持续利用。

优先开发区是指处于高安全水平下的低丘缓坡,主要分布于开县和云阳县。该区域的生态敏感性弱,生态系统服务功能重要性较低,生态系统服务价值也低,具有较强的抗外界干扰能力,适宜于人类开发利用。因此该区域应被划为优先开发区,在该区域可以

合理的布局为人类社会经济活动用地,因地制宜的进行人类开发建设活动,如进行工业区布局、居住区布局、农业区布局等,打造成主要的人类活动区,营造舒适的人居环境。

由表 6 可知,限制开发型面积最大,为 1 775. 19 km²,占研究区低丘缓坡总面积的 45. 16%,其次为禁止开发型,面积为 1 182. 02 km²,占低丘缓坡总面积的 30. 07%,第三为适度开发型,面积为 835. 71 km²,占低丘缓坡总面积的 21. 26%,面积最小的为优先开发型,为 137. 98 km²,占低丘缓坡总面积的 3. 51%。研究区虽然低丘缓坡总面积较大,但极大部分属于禁止开发型和限制开发型,适宜于人类开发利用的优先开发型占比非常小,由此可知,虽然低丘缓坡在理论上是可以被开发利用的,是人类拓展社会经济活动空间的重要领地,但并不是所有的低丘缓坡都适宜被开发为人类活动用地,因此,在对低丘缓坡土地资源进行开发之前,对其适宜性进行评价是非常必要的。

表 6 低丘缓坡土地资源分布

开发类型	禁止开发型	限制开发型	适度开发型	优先开发型
面积/km ²	1182. 02	1775. 19	835. 71	137. 98
占比/%	30. 07	45. 16	21. 26	3. 51

4 结论与讨论

(1) 研究区生态敏感性整体上较强烈,大部分属于极敏感区与高度敏感区,极敏感占比为 26. 24%,高度敏感占比最高,为 38. 22%,中度敏感占比为 26. 20%,一般敏感占比最低,为 9. 34%。研究区生态系统服务功能整体上较重要,极重要占比为 21. 00%,高度重要占比为 31. 77%,中等重要占比为 25. 18%,一般重要占比为 22. 05%。生态源地分布较广泛,面积为 7 622. 66 km²,占研究区总面积的 40. 80%,集中分布于东部的巫山县、巫溪县和奉节县。

(2) 研究区大部分处于低安全水平与较低安全水平,低安全水平区集中分布于研究区的东部,占比最高,为 40. 80%;较低生态安全水平区集中分布于低生态安全水平的外围,占研究区总面积的 36. 23%;中等安全水平区主要分布在高安全水平的外围,占研究区总面积的 18. 46%;高安全水平区集中分布于研究区的西部和北部,占比最低,为 4. 51%。

(3) 研究区低丘缓坡土地资源共计 3 930. 90 km²,其中限制开发型面积最大,为 1 775. 19 km²,占低丘缓坡面积的 45. 16%,其次为禁止开发型,面积为 1 182. 02 km²,占低丘缓坡面积的 30. 07%,第三为适度开发型,面积为 835. 71 km²,占低丘缓坡面积

的 21. 26%,面积最小的为优先开发型,为 137. 98 km²,占低丘缓坡面积的 3. 51%。

本文在构建生态安全格局的基础上,对低丘缓坡土地资源开发利用进行类型的划分,选取的指标主要是参照前人的研究成果,具有较大的主观随意性,直接影响到评价结果的精度,因此在今后的研究中还需进一步规范指标体系,引进相关数学模型来提高评价的精度。另外,本文在划分低丘缓坡土地资源开发类型时,注重于对生态用地的保护,侧重考虑了土地资源的自然属性,没有较多的考虑人类社会活动的影响,在今后需进一步考虑人类社会经济活动对其的影响,完善生态阻力面指标构建体系。

参考文献:

[1] 刘焱序,彭建,韩忆楠,等. 基于 OWA 的低丘缓坡建设开发适宜性评价:以云南大理白族自治州为例[J]. 生态学报,2014,34(12):3188-3197.

[2] 李红波,张慧,赵俊三,等. 基于元胞生态位适宜度模型的低丘缓坡土地开发建设适宜性评价[J]. 中国土地科学,2014,28(6):23-29,97.

[3] 彭建,谢盼,刘焱序,等. 低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡:以大理白族自治州为例[J]. 地理学报,2015,70(11):1747-1761.

[4] 陈超,曹磊. 中部五省低丘缓坡区耕地后备资源开发利用对策分析[J]. 中国农业资源与区划,2013,34(2):38-43.

[5] 黄杉,陈前虎,梁影君,等. 浙江省开化县城关工业区低丘缓坡开发的评价方法与利用策略[J]. 中国土地科学,2009,23(6):31-38.

[6] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京市生态安全格局及城市增长远景[J]. 生态学报,2009,29(3):1189-1204.

[7] 蒙古军,朱利凯,杨倩,等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报,2012,32(21):6755-6766.

[8] 李晶,蒙古军,毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建:以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J]. 北京大学学报:自然科学版,2013,49(4):707-715.

[9] 陈军,洪新岩. 金华市低丘缓坡地资源合理开发利用的探讨[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,1989,12(2):134-138.

[10] 刘卫东,严伟. 经济发达地区的低丘缓坡土地资源合理开发利用:以浙江省永康市为例[J]. 国土资源科技管理,2007,24(3):1-5.

[11] 尹海伟,徐建刚,陈昌勇,等. 基于 GIS 的吴江东部地区生态敏感性分析[J]. 地理科学,2006,26(1):64-69.

[12] 潘峰,田长彦,邵峰,等. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究[J]. 地理学报,2011,66(11):1497-1507.

- [13] Markus J A, McBratney A B. An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia[J]. Soil Research, 1996,34(3):453-465.
- [14] Marr K, Fyles H, Hendershot W. Trace metals in Montreal urban soils and the leaves of *Taraxacum officinale*[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999,79(2):385-387.
- [15] Sánka M, Strnad M, Vondra J, et al. Sources of soil and plant contamination in an urban environment and possible assessment methods[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1995,59:327-343.
- [16] 郭平,谢忠雷,李军,等.长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J].地理科学,2005,25(1):108-112.
- [17] 李章平,陈玉成,杨学春,等.重庆市主城区土壤重金属的潜在生态危害评价[J].西南农业学报:自然科学版,2006,28(2):227-230.
- [18] 邓秋静,宋春然,谢锋,等.贵阳市耕地土壤重金属分布特征及评价[J].土壤,2006,38(1):53-60.
- [19] 管东生,陈玉娟,阮国际.广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响[J].中山大学学报:自然科学版,2001,40(4):93-96.
- [20] 吴新民,李恋卿,潘根兴.南京市不同功能区土壤中重金属 Cu, Zn, Pb 和 Cd 污染特征[J].环境科学,2003,24(3):105-111.
- [21] 殷丽萍,张博,李昂,等.土壤酸碱度对重金属在土壤中行为的影响[J].辽宁化工,2014,43(7):865-867.
- [22] 孙花,谭长银,黄道友,等.土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J].湖南师范大学:自然科学版,2011,34(4):82-87.
- [23] 林俊杰,王云智,陈国祥,等.万州老城区楼顶菜地土壤重金属污染特征[J].环境科学研究,2011,24(6):679-683.
- [24] 李其林,刘光德,郭义.公路两侧土壤和蔬菜中重金属的含量特征[J].环境科学与技术,2004,27(6):35-36.
- [25] 曹立新,李惕川,刘莹,等.公路边土壤和水稻中铅的分布、累积及临界含量[J].环境科学,1995,16(6):66-68.
- [26] 林健,邱卿如,陈建安.公路旁土壤中重金属和类金属污染评价[J].环境与健康杂志,2000,17(5):284-286.
- [27] 柴世伟,温琰茂,张云霓,等.广州郊区农业土壤重金属含量与土壤性质的关系[J].农村生态环境,2004,20(2):55-58.

~~~~~

(上接第 310 页)

- [13] 李建军,苏志珠,王言荣.基于 GIS 的万荣县生态敏感性评价与区划[J].中国农业资源与区划,2014,35(5):48-54.
- [14] 贾良清,欧阳志云,赵同谦,等.安徽省生态功能区划研究[J].生态学报,2005,25(2):254-260.
- [15] 李月臣,刘春霞,闵婕,等.三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J].生态学报,2013,33(1):168-178.
- [16] 凡非得,罗俊,王克林,等.桂西北喀斯特地区生态系统服务功能重要性评价与空间分析[J].生态学杂志,2011,30(4):804-809.
- [17] 杨伟州,邱硕,付喜厅,等.河北省生态功能区划研究[J].水土保持研究,2016,23(4):269-276.
- [18] 周锐,工新军,苏海龙,等.平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J].生态学报,2015,35(6):2003-2012.
- [19] 潘竟虎,刘晓.基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化:以张掖市甘州区为例[J].应用生态学报,2015,26(10):3126-3136.
- [20] 俞孔坚,王思思,李迪华,等.北京市生态安全格局及城市增长前景[J].生态学报,2009,29(3):1189-1204.
- [21] 彭建,赵会娟,刘众序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.
- [22] 谢花林.土地利用生态安全格局研究进展[J].生态学报,2008,28(12):6305-6311.
- [23] 王旭熙,彭立,苏春江,等.基于景观生态安全格局的低丘缓坡土地资源开发利用:以四川省泸县为例[J].生态学报,2016,36(12):3646-3654.