

吴栋哲,姜琦刚,顾宗瑞,等.基于 AHP 的海峡沿岸地区生态地质环境质量评价:以马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区为例. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2):619–632. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220170.

Wu Dongzhe, Jiang Qigang, Gu Zongrui, et al. Evaluation of Eco-Geological Environment Quality in Strait Coastal Areas Based on AHP: Taking Southwest Coastal Areas of Malaysia of North Coast of Malacca Strait as an Example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2):619–632. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220170.

基于 AHP 的海峡沿岸地区生态地质环境质量评价 ——以马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区为例

吴栋哲¹,姜琦刚¹,顾宗瑞¹,张 森¹,付长亮²

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026
2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

摘要:生态地质环境质量显示一个区域地质作用与生态空间分布的整体情况。为了给马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区的生态保护修复及“一带一路”投资建设提供依据,将地理信息系统技术与层次分析法相结合,以马来西亚基础地质、地质灾害遥感地质专题应用及编图项目成果数据集为基础数据,构建了该区的生态地质环境质量评价指标体系并进行综合评价。通过分析结果将研究区的生态地质环境质量划分为优等、良好、中等、较差 4 个等级,其中:优等区和良好区面积较大,分别为 2 753.31 km² 和 2 960.33 km²,占研究区总面积的 34.19%和 36.76%,主要分布在北部平原地区及沿海地区;中等区和较差区面积分别为 1 702.72 km² 和 618.57 km²,占研究区总面积的 21.37%和 7.68%,主要分布在雪兰莪州中部、森美兰州南部及马六甲州北部地区。从评价结果上看,该地区总体上生态地质环境质量较好,优等区和良好区总和占研究区总面积的 70.00%以上,中等区和较差区主要受地层构造和生态条件的限制,需要针对具体问题进行环境保护及生态修复。

关键词:层次分析法;生态地质环境;地理信息系统;质量评价;海峡地区

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220170

中图分类号:TP79

文献标志码:A

Evaluation of Eco-Geological Environment Quality in Strait Coastal Areas Based on AHP: Taking Southwest Coastal Areas of Malaysia of North Coast of Malacca Strait as an Example

Wu Dongzhe¹, Jiang Qigang¹, Gu Zongrui¹, Zhang Sen¹, Fu Changliang²

1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China

Abstract: The eco-geological environment quality shows the overall situation of regional geological

收稿日期:2022-08-27

作者简介:吴栋哲(1997—),男,硕士研究生,主要从事环境遥感及其技术应用方面的研究, E-mail:1398260355@qq.com

通信作者:姜琦刚(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感地学方面的研究, E-mail:jiangqigang@jlu.edu.cn

基金项目:中国地质调查局项目(DD20191011)

Supported by the Project of China Geological Survey (DD20191011)

action and ecological spatial distribution. In order to provide the basis for the ecological protection and restoration of the southwest coastal areas of Malaysia of the north coast of Malacca Strait and the investment and construction of “One Belt and One Road”, GIS technology and hierarchical analysis method are combined. Based on the data set of Malaysia basic geology and geological disaster remote sensing geological application and mapping project results, the eco-geological environment quality evaluation index system of the southwest coastal area of Malaysia along the north coast of Malacca Strait was constructed and comprehensively evaluated. Through the analysis of the results, the eco-geological environment quality of the study area was divided into four grades: excellent, good, medium and poor. The area of excellent and good area was larger, which was $2\,753.31\text{ km}^2$ and $2\,960.33\text{ km}^2$, respectively, accounting for 34.19% and 36.76% of the total area of the study area, and mainly distributed in the hilly areas of the northern coastal plain. The medium and poor districts are $1\,702.72\text{ km}^2$ and 618.57 km^2 , accounting for 21.37% and 7.68% of the total area of the research area, respectively, and are mainly distributed in southern Sembilan central, Selangor and northern Malacca. According to the evaluation results, the eco-geological environment quality of this area is good on the whole. The excellent area and good area account for 70.00% of the total area of the study area. The medium area and poor area are mainly restricted by the stratigraphic structure and ecological conditions, so it is necessary to carry out environmental protection and ecological restoration according to specific problems.

Key words: analytic hierarchy process; eco-geological environment; geographic information system; quality evaluation; straits

0 引言

随着当今社会经济的快速发展和人口的持续增加,加上长期以来人类对于生态环境保护的认识不足,重开发轻保护,导致生态环境带来的压力越来越大,随之而来的是日益凸显的森林破坏、土地过度开发、地质灾害、水源污染等问题,这些生态地质环境问题严重制约和威胁着人类的生存和发展^[1-4];因此如何使得经济发展与环境保护齐头并进,实现区域经济的可持续发展,是当今社会急需解决的问题。这种情况下需要人类选择科学的评价指标,建立合理的评价体系,对区域生态地质环境进行系统、科学、客观的评价^[5]。

生态地质环境评价是生态环境保护及可持续发展的基础工作,是在调查清楚区域内基础地质、水文地质、工程地质以及诸多生态要素的条件下,对区域内各要素进行综合性评价,并判定区域生态地质环境的质量状况^[6]。根据综合评价结果可制定与该区域环境承载能力相匹配的经济发展模式,也可为区域内生产开发、资源利用、环境保护、生态建设等提供合理的技术保障和科学依据^[7]。但目前的生态地质环境质量评价主要停留在宏观定性研究阶段,定

量研究较少。而且生态地质环境评价主要针对矿山地区、地质灾害多发地区以及城市区域,对于海峡沿岸地区的研究较少,导致该区缺乏科学合理的生态地质环境质量评价体系。

海峡沿岸地区大多地处板块交界前沿地带,具有地质构造复杂、断裂构造较多、地质灾害频发、环境影响敏感度较高等特点,而且由于海峡沿岸地区地理位置特殊,区域人类社会经济活动十分频繁,导致海峡沿岸地区的生态地质环境较为复杂^[8]。随着经济全球化的不断发展,海峡沿岸地区的开发建设活动越来越多,对海峡沿岸地区进行生态地质环境质量评价,不仅能为当前区域生态地质环境质量提供评估,而且能为未来区域的开发建设及环境保护提供科学性建议。

近年来,随着我国“一带一路”倡议的推行,马来西亚的经济发展迅速^[9],伴随着一系列的工程开发和基础设施建设,马来西亚的生态地质环境发生了重大的变化。自 2015 年开始,秉承“一带一路”倡议提出的可持续发展和合作共赢理念,我国科研工作者在科技部指导下对“一带一路”沿线区域开展了生态环境遥感监测工作,并取得了一定的成果。但目前现有的生态地质环境评价对于境外地区,特别是

海峡沿岸地区的研究较少,因其属于生态地质环境较为复杂的区域,较难进行实地考察验证和获取相应的实测数据,故缺乏科学稳定的评价体系。本文通过对该地区进行生态地质环境质量评价,在已有研究的基础上构建一套具有可推广性的境外地区生态地质环境质量评价体系,并选择马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区进行研究,对该地区的生态地质环境质量进行具体分析;以期为分析研究该地区生态地质环境存在的问题及相应的防治策略提供理论基础和决策依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

1.1.1 自然地理

研究区位于马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区,地理位置为 100° 42′ 27″ E—102° 40′ 01″ E, 2° 07′ 46″ N—4° 00′ 19″ N(图 1),研究区总面积约为 0.8 万 km²。该区域地形崎岖,河流短促,地势自西北向东南降低。

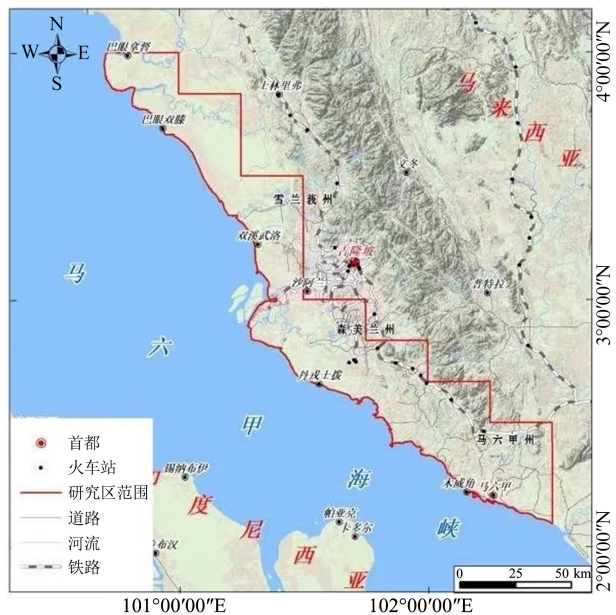


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

1.1.2 地质概况

研究区位于欧亚板块、太平洋板块、印度洋板块

三大地壳板块结合部位,所属大地构造位置较为复杂。该地区为热带气候,形成了岩体风化严重、风化带多、山地较多且地形复杂的地貌特征,易发生滑坡、泥石流等次生地质灾害。

1.1.3 生态环境

研究区靠近赤道,属于热带雨林气候,终年高温多雨,年均气温在 30℃ 左右,年均降水量在 2 000~2 500 mm 之间。水系分布较多,植被覆盖率较高,原生态环境质量较好。但随着近年来经济开发等因素影响,人为条件对生态系统破坏较大。

1.2 数据源

本研究以“马来西亚基础地质、地质灾害遥感地质专题应用编图”项目(编号 DD20191011)^①所获取的解译数据作为基础数据(表 1),结合补充使用的遥感数据(包括高分辨率遥感数据、多光谱遥感数据和雷达数据),分析得到了 2018—2019 年研究区的工程地质、水文地质、断裂构造分布和植被指数等生态地质环境影响指标。

2 研究方法

2.1 生态地质环境质量评价体系

近年来,系统评价体系已经被各界学者接受,逐渐成为解决综合生态问题的主流方法^[10]。区域生态地质环境十分复杂,对其形成原理进行分析,找出合适的方法和评价因子进行生态地质环境质量评价,可为生态环境的开发和保护提供科学依据。要实现对区域生态地质资源的了解、管理以及可持续发展的目的,需要对区域生态地质环境进行科学客观的评价^[11]。所以,选取合理的评价因子以及建立科学的评价体系是进行区域生态地质环境质量评价的基础和前提^[12]。

目前国内进行的生态地质环境评价研究主要针对国内一些矿山区域和地质灾害易发区域^[13-14],对于境外地区尤其是海峡周边区域研究较少。在方法方面较多采用定性分析,定量分析较少,而且在采用的评价因子选择上标准不一,具有一定的局限性,导致建立的评价体系科学性、客观性、实用性和可推广度不高。

本研究基于国内外生态地质环境评价的相关研究成果,选择德尔菲法(Delphi method)与层次分析

①付长亮,杨怡.海丝路:重要海峡通道遥感地质调查.北京:中国自然资源航空物探遥感中心,2020.

表 1 数据使用说明
Table 1 Data usage instruction

数据类型	数据详情	数据用途	分辨率	数据来源
数字高程数据	30 m ASTER DEM	提供高程信息及坡度、坡向和地形起伏度信息	30 m	NASA 下载
遥感数据	Landsat - 7、Landsat - 8、Planet、Google Earth 影像	提取植被指数信息及辅助解译	Landsat - 7、Landsat - 8 15 m，Planet 3 m，Google Earth 1 m	USGS、Planet、Google Earth 下载
基础地质数据	地层信息、地质界线、断裂信息、褶皱信息	提供断裂构造信息	1：5 万	项目数据遥感解译
工程地质数据	工程岩体信息、工程土体信息	提供工程地质岩组信息	1：5 万	项目数据遥感解译
水文地质数据	地表水数量及分布特征、地下水类型	提供河网及地下水类型信息	1：5 万	项目数据遥感解译
地质灾害数据	崩塌、滑坡、泥石流、岩溶塌陷、地裂缝五类信息	提供地质灾害信息	1：5 万	项目数据遥感解译
土地覆被数据	GlobeLand30 数据集	提供土地利用类型信息	30 m	GlobeLand30 下载

法相结合的方法进行评价因子的选择和评价体系的建立,选取的评价网格大小为 100 m×100 m,对马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区进行生态地质环境质量评价。

德尔菲法又名专家调查法,是 1946 年由美国兰德公司创立的一种评价方法,其本质上是一种反馈匿名函询法。该方法先将要研究的问题向相关领域专家问询,之后将每个人的意见进行整理汇总,按照专家综合意见对评价因子依据重要程度进行筛选排序,最后建立评价因子体系^[15]。

层次分析法(analytic hierarchy process)简称 AHP 法,是由美国匹兹堡大学教授、运筹学家 Saaty^[16]于 20 世纪 70 年代初提出的一种多层次多准则决策分析方法。这种方法是先将与决策任务相关的各类因子拆分成目标层、准则层和方案层等部分,然后以此对问题进行定性或者定量的分析。此方法适用性较为广泛,能够较好地解决评价因子错综复杂、评价目标难以定量描述的决策问题^[17]。

2.2 AHP 法的设计与实现

1)构建层次结构模型。将生态地质环境质量评价层次化,按照评价目标层、评价要素层和评价因子层来划分层次,并且结合研究区实地情况,从三个方面选取生态地质环境质量评价的评价因子,构建生态地质环境质量评价指标体系^[18]。

2)通过对评价因子进行两两比较,按照 Satty^[16]给出的 1—9 标度法来构建判断矩阵,分析各层次各因子的权重,并且利用随机一致性比率

(consistency ratio, R_C)来对矩阵结果进行检验,其计算公式为:

$$R_C = I_C / I_R ;$$
 (1)

$$I_C = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) ;$$
 (2)

$$I_R = (I_{C_1} + I_{C_2} + \cdots + I_{C_n}) / n 。$$
 (3)

式中: I_C 为判断矩阵一致性指标, I_C 越接近 0,即越一致; I_R 为判断矩阵随机一致性指标, I_R 与判断矩阵的阶数 n 有关; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根。当 $R_C < 0.1$ 时,则表示该判断矩阵一致性较好,结果符合要求^[19]。

3)构建生态地质环境质量评价指数。基于 AHP 法计算的生态地质环境质量评价因子及其权重构建生态地质环境质量评价指数^[20],其计算公式为

$$A = \sum_{i=1}^m \omega_i D_i 。$$
 (4)

式中: A 为某一区域评价指数; m 为评价因子数; ω_i 为评价因子 i 的权重; D 为因子指标标准化值。

评价时先根据计算生态地质环境质量评价指数的综合阈值建立生态地质环境质量综合评价等级,将计算所得的等级值进行划分,再确定各个等级的区间范围值。

3 评价指标体系的建立

3.1 评价因子的选择与分级

本研究根据马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区的环境特征,结合前人研究^[1-3],选择地质条件、地形条件、生态条件作为一级评价因子,其中:地质

条件包括工程地质、断裂构造密度、地质灾害密度和地下水类型,地形条件包括高程、坡度、坡向和地形起伏度,生态条件包括河网密度、植被指数以及土地利用类型,共计 11 个评价因子作为二级评价因子。评价指标体系见图 2,指标分级标准见表 2,各指标图示见图 3—5。

3.1.1 工程地质

工程地质是决定区域内地质环境稳定和断裂发育程度的重要条件^[21]。其能够反映岩体的质量和性能,区域岩体越稳定、地质灾害越少,说明该区域生态地质质量较好。根据遥感提取结果将研究区工程地质划分为 4 级:坚硬岩 C、D(良好),较坚硬岩 A、B(较好),较软岩 A、B,软岩 A(中等)和含粗粒的细粒土、细粒土、砾类土(较差)(图 3a)。

3.1.2 断裂构造密度

断裂构造密度是一定区域内断裂构造的个数,反映了区域断裂构造发育程度和区域地壳的稳定性^[22]。本文根据自然间断点法将断裂构造密度分为 4 级:无断裂构造(良好),断裂构造密度极低(较好),断裂构造密度较低(中等),断裂构造密度高(较差)(图 3b)。

3.1.3 地质灾害密度

地质灾害密度反映一定范围内地质灾害发育的

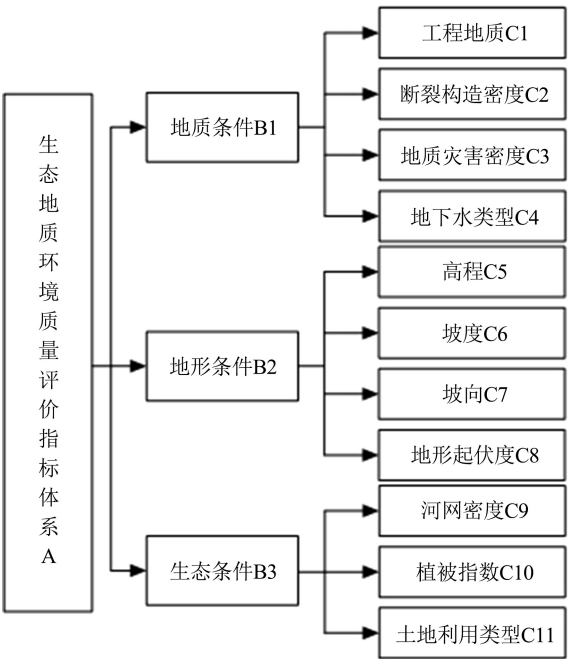
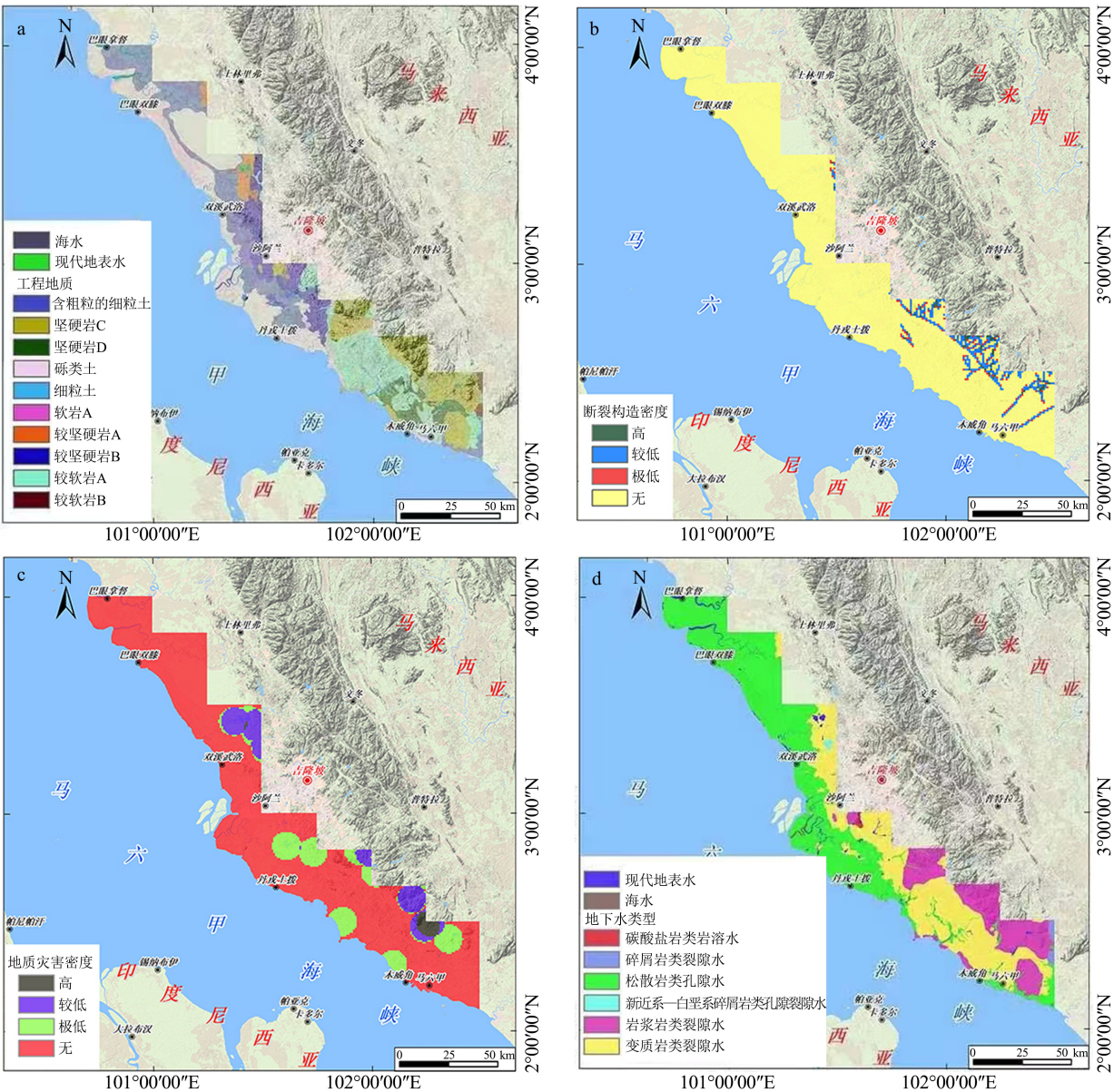


图 2 研究区评价指标体系
Fig.2 Evaluation index in the study area

评价系统 B		评价因子 C			
		分级			
		良好(4 分)	较好(3 分)	中等(2 分)	较差(1 分)
地质条件 B1	工程地质 C1	坚硬岩 C、D	较坚硬岩 A、B	较软岩 A、B,软岩 A	含粗粒的细粒土、细粒土、砾类土
	断裂构造密度 C2	无断裂构造	断裂构造密度极低	断裂构造密度较低	断裂构造密度高
	地质灾害密度 C3	无地质灾害	地质灾害密度极低	地质灾害密度较低	地质灾害密度高
	地下水类型 C4	碳酸盐岩类岩溶水	松散岩类孔隙水	新近系—白垩系碎屑岩类孔隙裂隙水	碎屑岩类、变质岩类、岩浆岩类裂隙水
地形条件 B2	高程 C5	<50 m	50~200 m	200~400 m	>400 m
	坡度 C6	<5°	5°~15°	15°~25°	>25°
	坡向 C7	平地、阳坡	半阳坡	半阴坡	阴坡
	地形起伏度 C8	<10°	10°~21°	21°~39°	>39°
生态条件 B3	河网密度 C9	河网密度高	河网密度较高	河网密度低	河网密度极低
	植被指数 C10	植被指数高	植被指数较高	植被指数较低	植被指数低
	土地利用类型 C11	林地、水体、湿地	耕地、人造地表	草地	裸地



a. 工程地质;b. 构造断裂密度;c. 地质灾害密度;d. 地下水类型。

图 3 研究区地质条件单因子评价

Fig.3 Geology condition single factor evaluation in the study area

程度,显著影响地区生态地质环境质量^[23-24]。将地质灾害密度分为 4 级:无地质灾害(良好),地质灾害密度极低(较好),地质灾害密度较低(中等),地质灾害密度高(较差)(图 3c)。

3.1.4 地下水类型

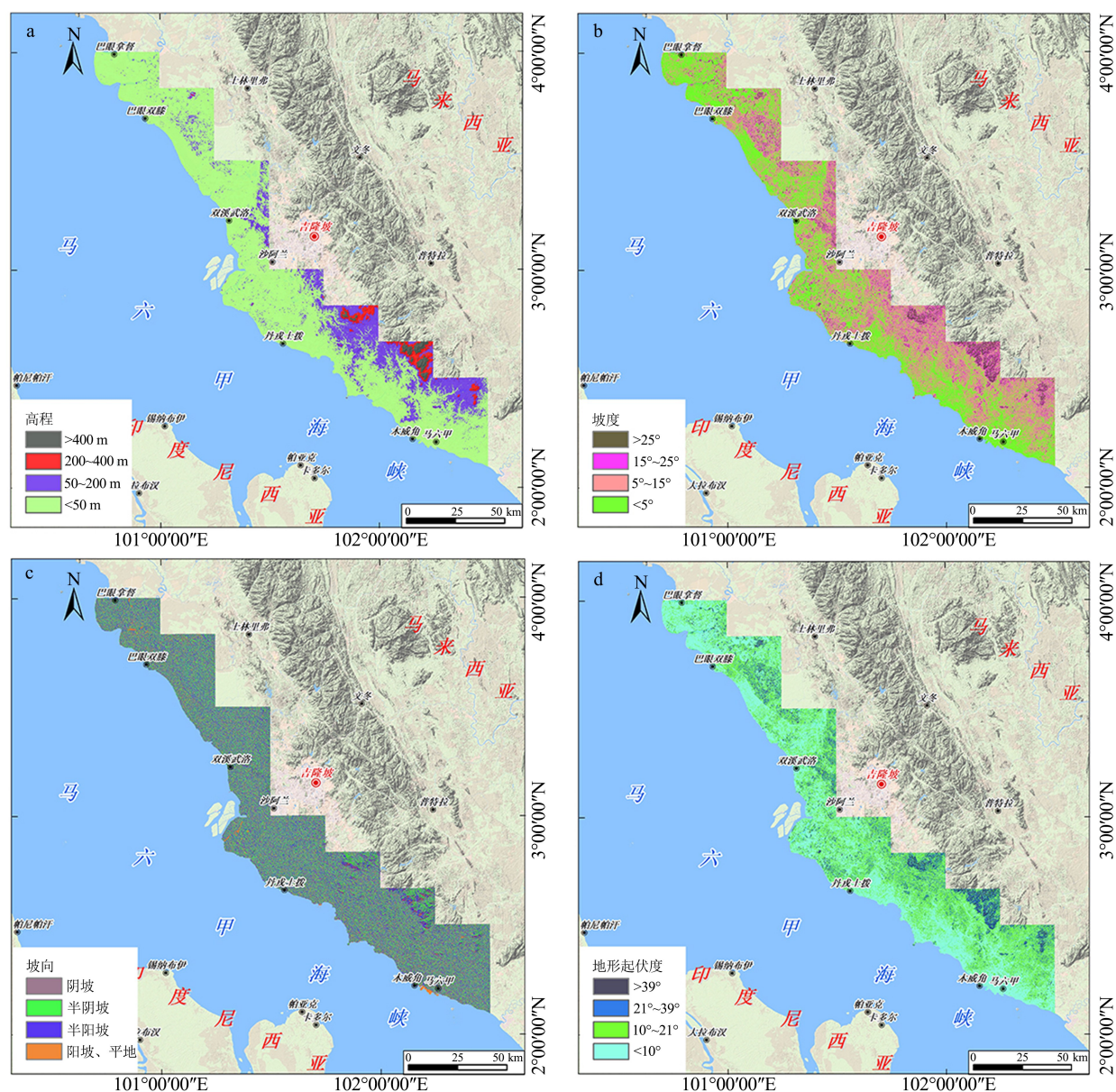
地下水类型主要取决于岩类富水性,根据前人研究成果将地下水类型划分 4 级:碳酸盐岩类岩溶水(良好),松散岩类孔隙水(较好),新近系—白垩系碎屑岩类孔隙裂隙水(中等),碎屑岩类、变质岩类、岩浆岩类裂隙水(较差)(图 3d)。

3.1.5 高程

高程反映地壳运动的结果,对区域内各生态地质要素具有很大的影响作用,是生态环境评价体系的重要评价指标。根据区域提取的高程结果将高程因子分为 4 级:<50 m(良好),50~200 m(较好),200~400 m(中等),>400 m(较差)(图 4a)。

3.1.6 坡度

坡度是重要的自然地理要素,体现了地区地面的倾斜程度,坡度增加会影响植被发育,增加地质灾害发生的可能性。按照自然间断点法划分为 4 级:



a. 高程;b. 坡度;c. 坡向;d. 地形起伏度。

图 4 研究区地形条件单因子评价

Fig.4 Topography conditions single factor evaluation in the study area

<5°(良好),5°~15°(较好),15°~25°(中等),>25°(较差)(图 4b)。

3.1.7 坡向

坡向体现了坡面方向对太阳热资源的分布。本文根据坡向分级标准并结合区域实际情况将坡向因子划分为 4 级:阳坡、平地(良好),半阳坡(较好),半阴坡(中等),阴坡(较差)(图 4c)。

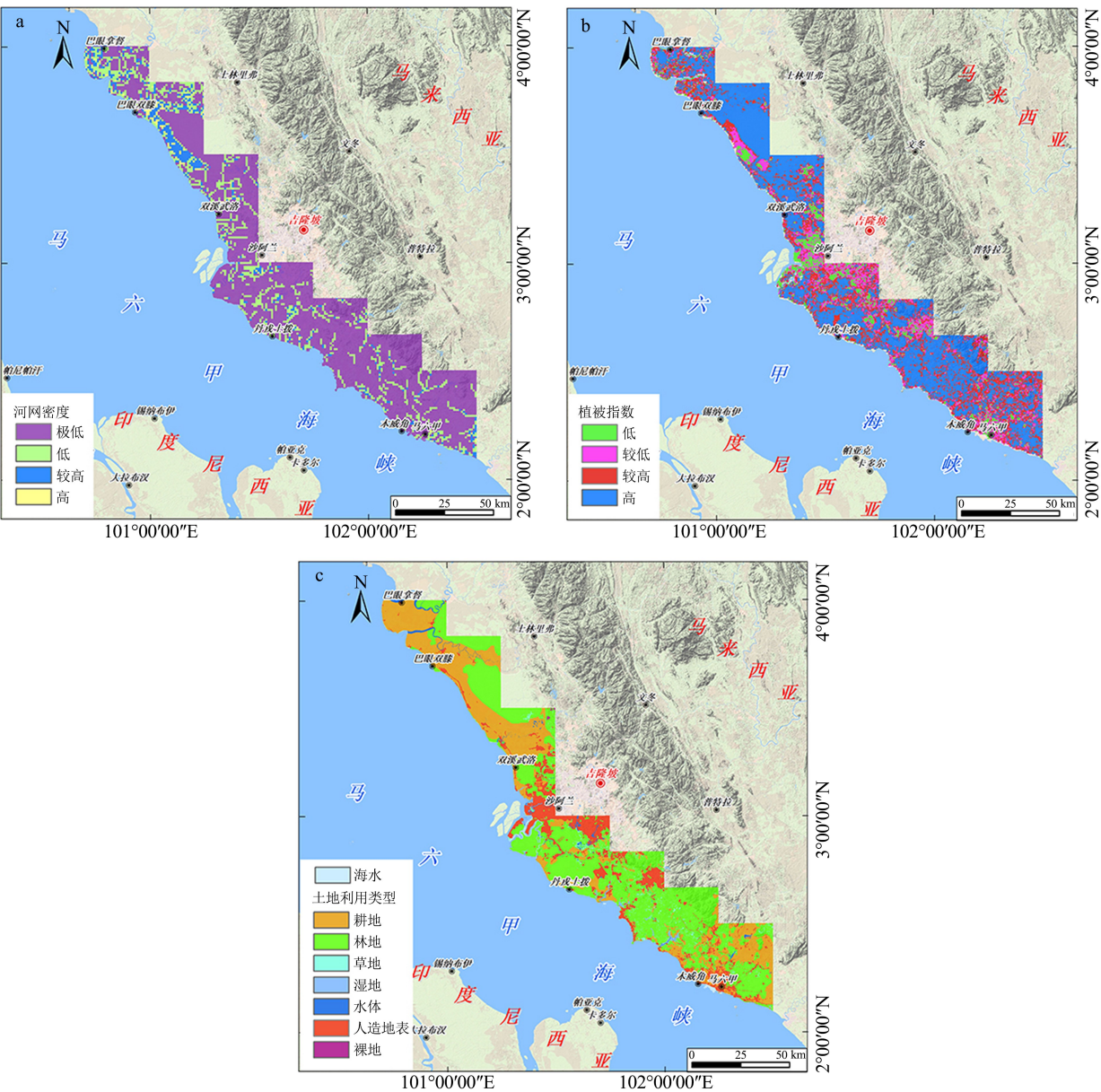
3.1.8 地形起伏度

地形起伏度是区域内最高海拔点与最低海拔点

的差值,反映了区域地表的起伏情况,起伏度增加影响水土流失、滑坡等地质灾害的易发程度^[25]。按照自然间断点法将地形起伏度分为 4 级:<10°(良好),10°~21°(较好),21°~39°(中等),>39°(较差)(图 4d)。

3.1.9 河网密度

河网密度反映了区域内水系的发育情况,按照自然间断点法将河网密度因子划分为 4 级:河网密度高(良好),河网密度较高(较好),河网密度低(中等),河网密度极低(较差)(图 5a)。



a. 河网密度;b. 植被指数;c. 土地利用类型。

图 5 研究区生态条件单因子评价

Fig.5 Ecology conditions single factor evaluation in the study area

3.1.10 植被指数

植被指数是直接表示区域生态地质环境质量的标志之一,可以敏感地反映区域的生态环境变化。植被指数高,则该地区生态系统复杂,生态地质环境稳定性高。本文采用归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)作为标准,将该区域植被指数划分为 4 级:植被指数高(良好),植被指数较高(较好),植被指数较低(中等),植被指数低

(较差)(图 5b)。

3.1.11 土地利用类型

土地利用类型反映了区域自然生态环境与人类社会经济活动的相互作用,在一定程度上显示了人类对土地利用方式和强度。本文按照前人研究结果,根据利用类型中各类型的生态条件的好坏划分为 4 级:林地、水体、湿地(良好),耕地、人造地表(较好),草地(中等),裸地(较差)(图 5c)。

3.2 评价单元

较为常见的评价单元主要有三角形剖分法、正方形网格法和不规则多边形网格法 3 种。由于本研究区范围较大,而且正方形网格法可以根据区域实际条件来调整大小,所以本研究选择正方形网格法作为评价单元划分方式,采用 100 m×100 m 的间距划分网格。

4 生态地质环境质量评价结果

4.1 构建判断矩阵及一致性检验

按照 Saaty^[16]提出的 1—9 标度法,将生态地质环境质量评价因子相互之间进行重要性比较,将得到的结果按照标度值 1—9 或者其倒数来表示,即可获得判断矩阵。对判断矩阵进行一致性检验,可进一步分析判断矩阵赋予的权重是否合理。

本研究判断矩阵计算结果表明,11 个评价因子经过一致性检验后随机一致性比率 R_C 均小于 0.1,说明判断矩阵构建合理,具有比较好的一致性,详见表 3—6。

表 3 研究区要素层权重矩阵

Table 3 Factor layer weight matrix in the study area

生态地质环境质量	地质条件	地形条件	生态条件	权重
地质条件	1.0	2.0	1.0	0.412 6
地形条件	0.5	1.0	1.0	0.259 9
生态条件	1.0	1.0	1.0	0.327 5

注:判断矩阵随机一致性比率 R_C 为 0.051 6;对总目标的权重为 1.000 0;矩阵最大特征值为 3.053 6。

表 4 研究区地质条件因子权重矩阵

Table 4 Geology condition factor weight matrix in the study area

地质条件	工程地质	断裂构造密度	地质灾害密度	地下水类型	权重
工程地质	1.00	0.50	1.00	1.00	0.198 8
断裂构造密度	2.00	1.00	2.00	2.00	0.397 6
地质灾害密度	1.00	0.50	1.00	2.00	0.236 4
地下水类型	1.00	0.50	0.50	1.00	0.167 2

注:判断矩阵随机一致性比率 R_C 为 0.022 6;对总目标的权重为 0.412 6;矩阵最大特征值为 4.060 4。

表 5 研究区地形条件因子权重矩阵

Table 5 Topography condition factor weight matrix in the study area

地形条件	高程	坡度	坡向	地形起伏度	权重
高程	1.00	0.50	2.00	1.00	0.219 4
坡度	2.00	1.00	4.00	2.00	0.438 7
坡向	0.50	0.25	1.00	0.33	0.099 1
地形起伏度	1.00	0.50	3.00	1.00	0.242 8

注:判断矩阵随机一致性比率 R_C 为 0.007 7;对总目标的权重为 0.259 9;矩阵最大特征值为 4.020 6。

表 6 研究区生态条件因子权重矩阵

Table 6 Ecology condition factor weight matrix in the study area

生态条件	河网密度	植被指数	土地利用类型	权重
河网密度	1.00	0.33	0.50	0.163 4
植被指数	3.00	1.00	2.00	0.539 6
土地利用类型	2.00	0.50	1.00	0.297 0

注:判断矩阵随机一致性比率 R_C 为 0.008 8;对总目标的权重为 0.327 5;矩阵最大特征值为 3.009 2。

4.2 各评价因子权重及排序

通过各要素层和各因子层分别相互对比,计算出各个评价因子的总权重,并进行排序,结果见表 7。由表 7 可见,植被指数权重值最高,断裂构造密度、坡度、地质灾害密度等因子依次降低,说明该地区生态地质环境受地表植被影响最大,同时受断裂构造发育、地表坡度、各类地质灾害等地质和地形条件影响也较大,本文排序结果与前人研究结果^[1-4]基本一致。

表 7 研究区生态地质环境评价因子及权重排序

Table 7 Eco-geological environment evaluation factors and weight ranking of the study area

评价因子	权重	排序
工程地质	0.082 0	6
断裂构造密度	0.164 1	2
地质灾害密度	0.097 5	4
地下水类型	0.069 0	7
高程	0.057 0	9
坡度	0.114 0	3
坡向	0.025 8	11
地形起伏度	0.063 1	8
河网密度	0.053 5	10
植被指数	0.176 7	1
土地利用类型	0.097 2	5

4.3 分区结果

先将各评价因子的数据图层进行空间叠加分析,并且结合各评价因子及其分类的权重和评分,通过 ArcGIS 软件叠加计算获得研究区各一级因子的评价结果(图 6—8);再利用式(4)计算出研究区生态地质环境质量评价指数,并进行自然间断法的 4 级切割,按照其分值高低进行排序,分级结果和对应

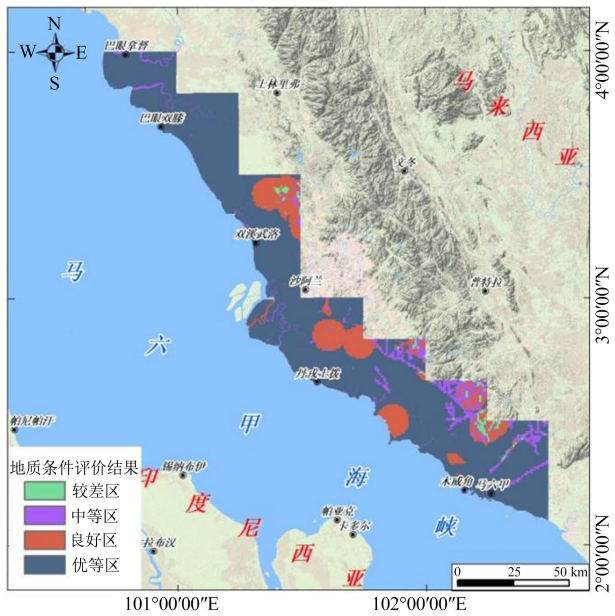


图 6 研究区地质条件评价结果

Fig.6 Geology condition evaluation results in the study area

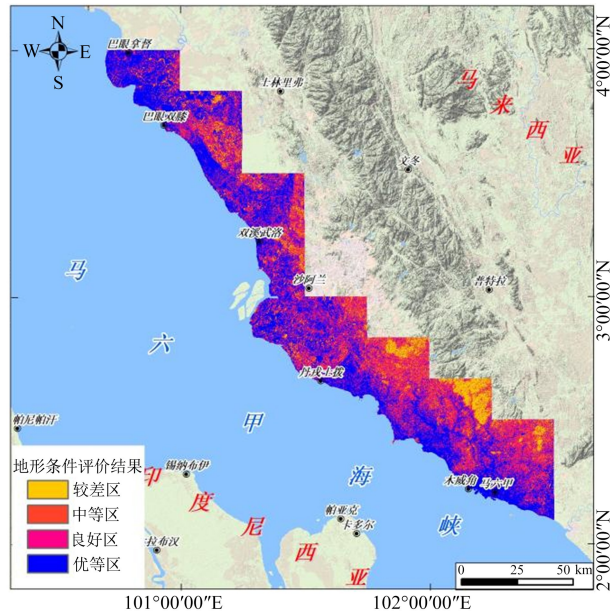


图 7 研究区地形条件评价结果

Fig.7 Topography condition evaluation results in the study area

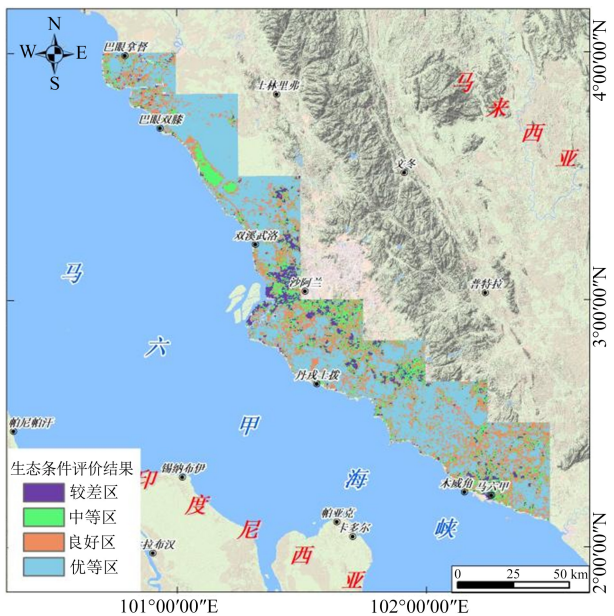


图 8 研究区生态条件评价结果

Fig.8 Ecology condition evaluation results in the study area

分值区间见表 8;最后获得生态地质环境质量评价结果(图 9)。

4.4 分区结果分析

根据研究区生态地质环境质量评价分区评价结果(图 9)总结了该地区的生态地质环境问题及成因,并提出了相应的保护开发建议(表 9)。具体分析如下。

生态地质环境较差区面积较少,主要分布在研究区东南部一带,即雪兰莪州中部、森美兰州南部和马六甲州北部,面积约为 618.57 km²,占总面积的 7.68%。此区域主要地形地貌为山地,高程、坡度和地形起伏度较大,水土流失较为严重;断裂构造发育密集,地质灾害点分布较多,地层稳定性较差,发生地质环境问题的可能性较大;且河网和植被分布一般,地下水质量较差,评价为生态地质环境较差区域。

表 8 研究区生态地质环境分区方案	
Table 8 Eco-geological environment classification of the study area	
等级	对应分值区间
优等	(3.28,3.75]
良好	(3.02,3.28]
中等	(2.72,3.02]
较差	[0,2.72]

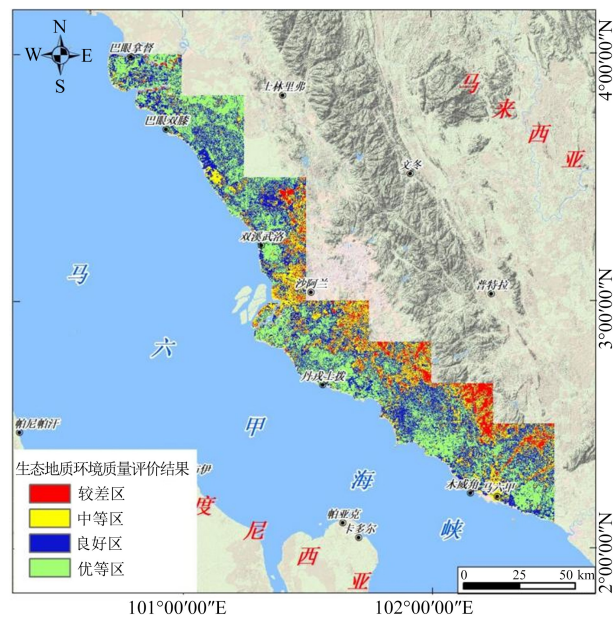


图 9 研究区生态地质环境质量评价结果

Fig.9 Eco-geological environment quality evaluation results in the study area

生态地质环境中等区主要分布在雪兰莪州中部、森美兰州南部及马六甲州北部地区,面积约为

1 702.72 km²,占总面积的 21.37%。此区域主要为平原地区,但也有少量地质灾害点分布,受断裂构造发育和地质灾害影响;工程地质环境较差,主要分布粗粒土、砾类土等土类;植被覆盖度低,受植被分布影响较大,为生态地质环境中等区域。

生态地质环境良好区面积较大,主要在北部平原地区,面积约为 2 960.33 km²,占总面积的 36.76%。此区域主要地形为平原和丘陵,地形环境较好,主要分布软岩及较软岩,受断裂构造和地质灾害影响较小;河网分布和地下水质量一般;植被覆盖度较高,为生态地质环境良好区域。

生态地质环境优等区面积较大,主要分布于研究区的北部平原地区及沿海地区,面积约为 2 753.31 km²,占总面积的 34.19%。此区域主要为平原地区,地形条件好;主要分布坚硬岩及较坚硬岩,工程地质环境良好,地下水质量较好,无断裂构造及地质灾害点,地质灾害不易发,地质条件好;土地覆被类型主要为林地和耕地,河网密度高,植被覆盖度高,生态条件好,为生态地质环境优等区域。

表 9 研究区生态地质环境分区及保护开发建议

Table 9 Eco-geological environment zoning and protection and development suggestions in the study area

生态地质环境分区	面积/km ²	占比/%	生态环境修复与保护策略	产业开发建议
优等区	2 753.31	34.19	注意涵养水土,加强对周边平原地区的环境污染治理,保护农业及建设用地,预防自然灾害	可进行大型经济产业园建设,沿海地区可开发港口,发展工农业及生态旅游,但要避免环境污染,促进区域经济可持续发展
良好区	2 960.33	36.76	保护沿海地区湿地及植被,注重水土保持和生物多样性维持,预防地质灾害的发生	可发展生态农业及循环经济
中等区	1 702.72	21.37	加强生态恢复与水土流失治理,预防地质灾害的发生,恢复植被覆盖率	适当发展生态农林业,注意地质灾害的预防,改善生态环境
较差区	618.57	7.68	注重山地及断裂构造区的生态修复与水土流失治理,注意在地质灾害易发地区增加植被覆盖,利用植被覆盖进行自然生态修复及涵养水源,保护地质环境,减少泥石流等地质灾害发生频率	以水土保持和生态修复为主,开发自然保护区及发展生态林业

5 结论与建议

1) 本文采取 AHP 法与地理信息系统相结合的方法, 选择了地质条件、地形条件和生态条件作为一级评价因子, 并确定工程地质、地形起伏度、植被指数等 11 个评价因子作为二级评价因子, 进行生态地质环境质量评价体系的构建, 开展了对于马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区的生态地质环境质量的评价。

2) 研究区生态地质环境质量较差区和中等区分别占研究区总面积的 7.68% 和 21.37%, 主要分布在森美兰州南部、马六甲州北部及雪兰莪州中部地区, 主要表现为断裂构造和地质灾害较多, 地形条件较差, 植被覆盖度低, 生态环境危险性较大; 生态地质环境良好区和优等区面积较大, 分别占研究区总面积的 36.76% 和 34.19%, 主要为平原地区, 地形条件好, 地质灾害不易发, 植被覆盖度高, 生态环境安全性高。

3) 本次研究采用德尔菲法来确定评价因子的权重, 其实用性和普遍适用性仍然需要进行深入探索, 确保评价因子权重的科学性和客观性。而且生态地质环境质量评价是一个极其复杂的研究过程, 具有很强的综合性, 受限于现实情况, 研究主要基于理论进行, 还需要对评价的结果进行野外实地考察, 评判评价结果的精度和准确性。

参考文献 (References):

- [1] 马健钧. 基于 GIS 技术的盐源县生态地质环境质量评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
Ma Jianjun. Evaluation of Ecological Geological Environment Quality in Yanyuan County Based on GIS Technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [2] 钟路远. 金川县生态地质环境质量评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
Zhong Luyuan. Research on Evaluation of Eco-Geological Environment Quality in Jinchuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [3] 陈朝亮, 林玲, 李强, 等. 内江市生态地质环境质量综合评价[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(1): 20-25.
Chen Chaoliang, Lin Ling, Li Qiang, et al. Comprehensive Evaluation of Ecological Geological Environment Quality in Neijiang City [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology,

- 2019, 34(1): 20-25.
- [4] 马雪莹, 柳浩然, 吴璇, 等. 济南市生态地质环境质量综合评价[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(7): 145-148.
Ma Xueying, Liu Haoran, Wu Xuan, et al. Comprehensive Evaluation of Ecological Geological Environment Quality in Jinan City [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(7): 145-148.
- [5] 王克晓, 陈刚, 陈伟涛, 等. 生态地质环境评价方法研究[J]. 测绘科学, 2015, 40(7): 78-82.
Wang Kexiao, Chen Gang, Chen Weitao, et al. Comprehensive Assessment of Eco-Geological Environment [J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(7): 78-82.
- [6] 李史干, 陈浩, 周慧杰, 等. 基于定量遥感的赣州市中心城区生态地质环境监测与评价[J]. 大众科技, 2017, 19(6): 26-29.
Li Shigan, Chen Hao, Zhou Huijie, et al. Based on the Quantitative RS of Ecological Geological Environment Monitoring and Evaluation in Ganzhou Central Urban Area [J]. Popular Science and Technology, 2017, 19(6): 26-29.
- [7] 陈绪钰, 王东辉, 倪化勇, 等. 长江经济带上游地区丘陵城市工程建设适宜性评价: 以泸州市规划中心城区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(1): 194-207.
Chen Xuyu, Wang Donghui, Ni Huayong, et al. Building Suitability Evaluation of Hilly City in Upper Reaches of Yangtze River Economic Belt: In Case Study of Urban Central Planning of Luzhou City [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(1): 194-207.
- [8] 孟玲羽. “一带一路”沿线国家绿色发展水平研究: 以中南半岛经济走廊为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
Meng Lingyu. Research on the Green Development Level of Countries Along the “Belt and Road”: Taking the Indo-South Peninsula Economic Corridor as an Example [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [9] 陈培昌, 马健. “一带一路”倡议下中马经贸关系现状及动因解析[J]. 江苏商论, 2021(4): 38-41.
Chen Peichang, Ma Jian. The Status Quo and Motivation Analysis of China-Malaysia Economic and Trade Relations Under the “One Belt One Road” Initiative [J]. Jiangsu Commercial Forum, 2021(4): 38-41.
- [10] 徐兆祥, 李英, 韩强强. 灵武图幅生态地质环境质量评

- 价与分析[J].地下水,2020,42(2):104-107.
- Xu Zhaoxiang, Li Ying, Han Qiangqiang. Evaluation Analysis of the Ecol-Geological Environment Quality of Lingwu Map [J]. Ground Water, 2020, 42(2): 104-107.
- [11] 闫佰忠,孙剑,王昕洲,等.基于 GIS-FAHP 的石家庄市地下水源热泵适宜性分区[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(4):1172-1181.
- Yan Baizhong, Sun Jian, Wang Xinzhou, et al. Suitability Zoning of Groundwater Source Heat Pump in Shijiazhuang Based on GIS-FAHP[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1172-1181.
- [12] 尚晓雨,王磊.生态地质环境评价方法探讨[J].地球,2019(2):95-97.
- Shang Xiaoyu, Wang Lei. Discussion on Evaluation Method of Ecological Geological Environment [J]. Earth, 2019(2): 95-97.
- [13] 赵玉灵.基于层次分析法的矿山环境评价方法研究:以海南岛为例[J].国土资源遥感,2020,32(1):148-153.
- Zhao Yuling. Study and Application of Analytic Hierarchy Process of Mine Geological Environment: A Case Study in Hainan Island[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 148-153.
- [14] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等.基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价[J].国土资源遥感,2019, 31(3): 183-192.
- Zhang Xiaodong, Liu Xiangnan, Zhao Zhipeng, et al. Geological Disaster Hazard Assessment in Yanchi County Based on AHP[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(3): 183-192.
- [15] 李振,彭华,马秀敏,等.琼州海峡西线跨海通道工程地质评价[J].地质力学学报,2019, 25(6): 1150-1156.
- Li Zhen, Peng Hua, Ma Xiumin, et al. Engineering Geological Evaluation on the West Line of the Cross-Sea Channel in the Qiongzhou Strait[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(6): 1150-1156.
- [16] Saaty T L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281.
- [17] Hasekiogulları G D, Ercanoglu M. A New Approach to Use AHP in Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study at Yenice (Karabuk, NW Turkey) [J]. Natural Hazards, 2012, 63(2): 1157-1179.
- [18] 丁宇雪,周向斌,初炜钰,等.国产高分影像在矿业城市生态安全性评价中的应用:以黑龙江省七台河市为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2021, 51(2): 533-542.
- Ding Yuxue, Zhou Xiangbin, Chu Weiyu, et al. Application of High Resolution Remote Sensing Images in Ecological Safety Assessment of Mining Cities in China: An Example of Qitaihe County in Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 533-542.
- [19] 丁宇雪,毛龙,周向斌,等.基于高分影像的松嫩低平原地区生态环境问题解析:以黑龙江省肇源县为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2020, 50(4): 1240-1248.
- Ding Yuxue, Mao Long, Zhou Xiangbin, et al. Analysis of Eco-Environmental Problems in Songnen Low Plain Based on High Score Image: A Case Study of Zhaoyuan County of Heilongjiang Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 1240-1248.
- [20] 赵多明,李建花,赵永强,等.基于德尔菲法和层次分析法构建中医医院多专业一体化诊疗模式评价指标体系的研究[J].西部中医药,2022, 35(8): 52-57.
- Zhao Duoming, Li Jianhua, Zhao Yongqiang, et al. Construction of Multi-Specialty Integrated Diagnosis and Treatment Model Evaluation Index System in TCM Hospital Based on the Delphi Method and Analytic Hierarchy Method [J]. Western Journal of Traditional Chinese Medicine, 2022, 35(8): 52-57.
- [21] 张艳红,苏生,刘兆礼,等.生态保护红线区生境风险评估:以吉林省镇赉县为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2023, 53(1): 241-250.
- Zhang Yanhong, Su Sheng, Liu Zhaoli, et al. Habitat Risk Assessment of Ecological Conservation Redline Area: Taking Zhenlai County, Jilin Province as an Example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 241-250.
- [22] 王雪冬,张超彪,王翠,等.基于 Logistic 回归与随机森林的和龙市地质灾害易发性评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2022, 52(6): 1957-1970.
- Wang Xuedong, Zhang Chaobiao, Wang Cui, et al. Geological Disaster Susceptibility in Helong City Based on Logistic Regression and Random Forest [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1957-1970.
- [23] 王峰,杨帆,江忠荣,等.基于沟域单元的康定市泥石流易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2023, 34(3): 145-156.

Wang Feng, Yang Fan, Jiang Zhongrong, et al. Susceptibility Assessment of Debris Flow Based on Watershed Units in Kangding City, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 145 - 156.

[24] 于开宁, 吴涛, 魏爱华, 等. 基于 AHP-突变理论组合模型的地质灾害危险性评价: 以河北平山县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 146 - 155.

Yu Kaining, Wu Tao, Wei Aihua, et al. Geological Hazard Assessment Based on the Models of AHP, Catastrophe Theory and Their Combination: A Case Study in Pingshan County of Hebei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 146 - 155.

[25] 王俊德, 杜晓阳, 黄天浩, 等. 河南省嵩县地质灾害风险评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 86 - 96.

Wang Junde, Du Xiaoyang, Huang Tianhao, et al. Risk Assessment of Geological Hazards in Song County, Henan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 86 - 96.