



科尔沁沙地西北缘生态地质环境评价

杨柳, 唐振, 施璐

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 采用层次分析法对科尔沁沙地西北缘地质环境、生态环境、社会环境进行分析, 构建一套以适应农牧业发展为目标层的评价指标体系, 并计算区域生态地质环境质量的综合指数, 对生态地质环境状况进行评价。通过对评价结果统计认为: 生态环境较比地质环境、社会环境对整个评价结果的影响更大, 其中土地质量是最主要因素; 研究区所有的评价单元中有 86% 处于中等及偏下的水平。该研究结果对正确认识研究区生态地质环境具有重要的意义。

关键词: 层次分析法; 生态地质; 环境评价; GIS; 科尔沁沙地; 内蒙古

ECO-GEOLOGICAL ENVIRONMENT EVALUATION ON THE NORTHWEST MARGIN OF HORQIN SANDY LAND

YANG Liu, TANG Zhen, SHI Lu

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: In this study, the geological, ecological and social environment of the northwest margin of Horqin sandy land are analyzed by analytic hierarchy process (AHP). An evaluation index system is established to adapt to the development of agriculture and animal husbandry as target layer, and the comprehensive indexes of regional eco-geological environment quality are calculated to evaluate the eco-geological environment. According to the results, it is considered that the eco-environment impacts on the whole evaluation results more than the geological and social environment does, with land quality as the key factor. Of all the evaluation units in the study area, 86% are at a medium or lower level. The results are of great significance to correctly understand the eco-geological environment of the area.

Key words: analytic hierarchy process; eco-geology; environment evaluation; GIS; Horqin sandy land; Inner Mongolia

0 前言

将地质环境作为一个独立系统, 从环境地质学角

度研究受社会生态环境和自然生态环境双重影响下的地质环境与人类生存环境相互关系, 这种相互关系即

收稿日期: 2022-11-10; 修回日期: 2022-12-07. 编辑: 黄欣.

基金项目: 中国地质调查局项目“内蒙古 1:5 万乌兰花、达巴艾勒、奈玛拉吉、巨里河、荷叶哈达幅区域地质调查”(DD20190039-03); 沈阳地质调查中心主任基金项目“淋溶作用对黑土中钾元素迁移的影响”(SJ202304).

作者简介: 杨柳(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事地质相关分析测试与研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//282412082@qq.com

通信作者: 唐振(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地质调查与研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//303094990@qq.com

为生态地质环境系统^[1],生态地质环境是由岩石圈表层、水圈、大气圈、生物圈和人类圈相互渗透、交织组成的复杂体系,其中某一圈层的变异会引发生态地质环境的整体失衡^[2],科学评价生态地质环境,有利于客观掌握区域地质环境条件和可能出现的地质环境问题,便于决策者制定合理的生态地质环境保护方针,以促进人类社会可持续发展^[3],生态地质环境评价作为环境质量评价体系中重要组成部分,自 20 世纪以来其理论方法和应用实践都得到了广泛的拓展创新^[4],考虑到生态地质环境系统中多指标的复杂性,本研究采用层次分析法,结合线性加权综合评价模型在科尔沁沙地西北缘对内蒙古 1:5 万巨里河幅生态地质环境质量进行系统分析评价。

研究区位于内蒙古自治区通辽市西北部(图 1),地处大兴安岭中南段与科尔沁沙地草原结合部位,地形地貌整体从西北部中山山地逐渐向东南过渡到低山丘陵区,地形多样,主要形成有低山丘陵和山地草原。研究区地处欧亚大陆中高纬度带东部,属中温带大陆性季风气候区,呈干旱、半干旱特征,区内大小时令河流共有 7 条,属乌力吉木仁河水系(西辽河水系),河流总长度 63.38 km。

层次分析法(AHP)是由美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代中期提出的一种多层次权重分析决策方法,具有系统、灵活和实用等特点^[5],AHP 法是将评价(决策)有关的元素分解成目标、准则、指标等层次,并在此基础上进行定性定量相结合的评价^[6],AHP 法能将复杂问题中的各种因素通过划分为相互联系的有序层次使之条理化,并能将数据、专家意见和分析者的客观判断直接而有效地结合^[7]。

1 构建层次分析评价模型

使用层次分析法解决问题,首先要把研究的问题进行层次化处理,构建出一个层次分析的模型,将有关要素进行分类归纳,并按一定层次组织影响因子的分组,将其与上一级相关的因子依次排列,通过因子间相互比较取值,最终可得出基本因子对目标因子的影响程度^[8]。

1.1 评价指标的选取

建立科学、完善、可行的评价指标体系及选择恰当的评价标准是成功进行生态地质环境质量评价的关键,生态地质环境质量评价指标的选取要能够表征研究区域的生态系统的特征,要具有代表性、典型性,另

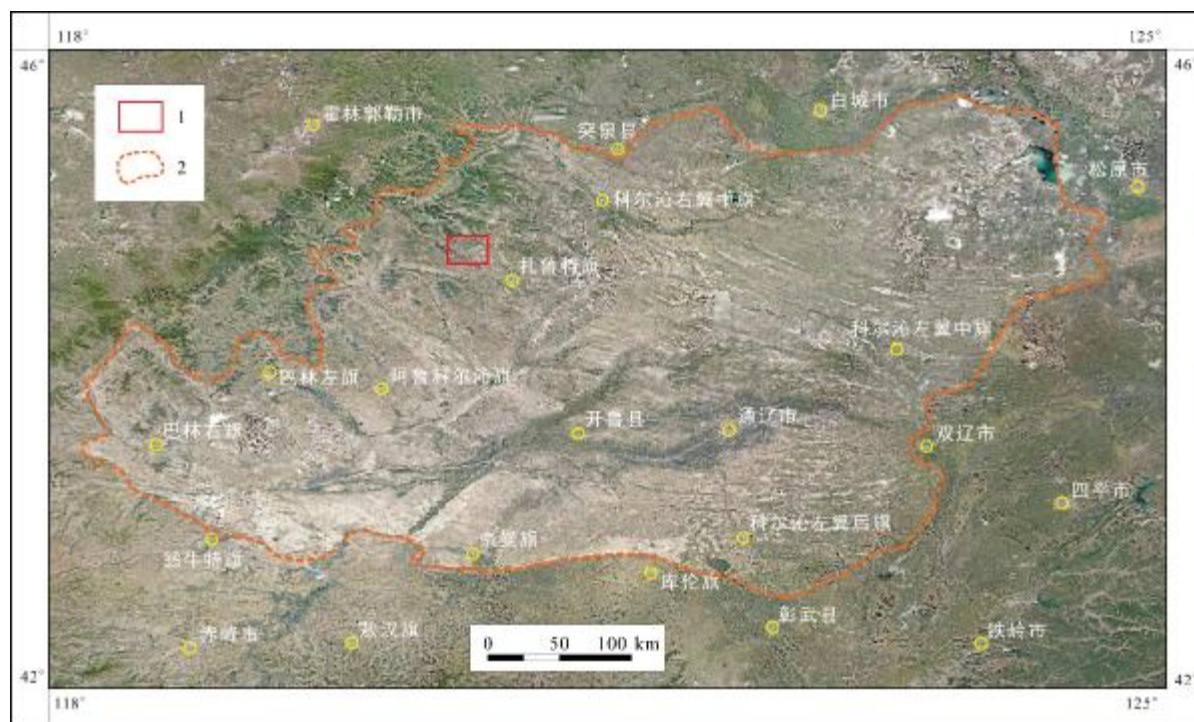


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1—研究区范围(study area); 2—科尔沁沙地范围(Horqin sandy land)

一方面,选择的指标要基于现实数据资源的获取。

生态地质环境是一个多成分的复杂系统,主要由岩石环境、土壤环境和水环境 3 个系统组成,每个系统内部又存在多种影响因子。本研究遵循科学性、标准性、可度量性以及可操作性的原则,参考《生态环境状况评价技术规范》(HJ192—2015),参考前人研究成果^[9-17],根据研究区的生态地质环境特点,在综合考虑自然地理、基础地质、生态条件等基础上确定评价指标体系,如图 2、表 1。

1)高程

高程是地壳运动结果的表现形式,反映地表高低起伏形态,对地质灾害易发性、土地生产力、植被类型及覆盖度等具有制约性和主导性影响作用,是地区生态地质环境变化和发展的关键因素。参考了高玄或^[18]对地貌基本形态的主客分类法,结合研究区相对高度变化,将研究区分为平原、丘陵、低山、高山。数据的提取采用 ArcGIS 系统工具中 Data Management Tools 栅格模块对已经裁剪后的 DEM 数据依据分类标准进行重分类。

2)坡度

坡度表现为地面倾斜度,直接影响着地表径流、水土保持和人类活动。不同坡度具有不同的水热条件,导致的土壤侵蚀程度也有所不同。坡度是影响土壤养分流失最主要的地形因子之一^[19]。划分依据参考《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)中关于地面坡度的划分标准。数据的提取采用 ArcGIS 系统工具中 3D Analyst Tools 栅格表面模块对已经裁剪后的 DEM

数据依据分类标准进行重分类。

3)坡向

坡向是指局部地表面在水平面上的投影与正北方向的夹角。坡向的不同导致太阳辐射和降水的空间二次分配,伴随光辐射、光照时长、大气温度、土壤水分和土壤养分等环境因子的差异,进而影响着植物群落类型、物种组成、物种多样性和功能多样性的变化^[20]。植物功能多样性主要受坡向影响,且功能丰富度在阴坡、半阴坡显著高于阳坡。划分依据参考多位学者的研究成果^[21-23],数据的提取采用 ArcGIS 系统工具中 3D Analyst Tools 栅格表面模块对已经裁剪后的 DEM 数据依据分类标准进行重分类。其中阴坡为 315~45°,半阴坡为 45~90°、270~315°,阳坡为 135~225°,半阳坡为 90~135°、225~270°。

4)断裂带密度

地质构造对生态地质环境有着重要的影响,众多学者在宏观以及中小尺度研究^[24]上都获得了较为成熟的成果。数据的提取采用 ArcGIS 系统工具中 Spatial Analyst Tools 密度分析模块对绘制转化好的 MapGIS 软件中的断裂带密度图进行栅格提取,进行线密度分析,搜索半径为 1 000 m,将矢量化后的断裂带线密度量化图按相等间隔分为 4 个等级。

5)岩石风化程度

岩石的风化程度在大循环中影响着成土过程,小循环中影响植物营养元素在生物体与土壤中的转移转化,岩石的风化程度对区域生态环境具有重要的直接和间接影响。对评价点位岩石风化程度的判断是通过

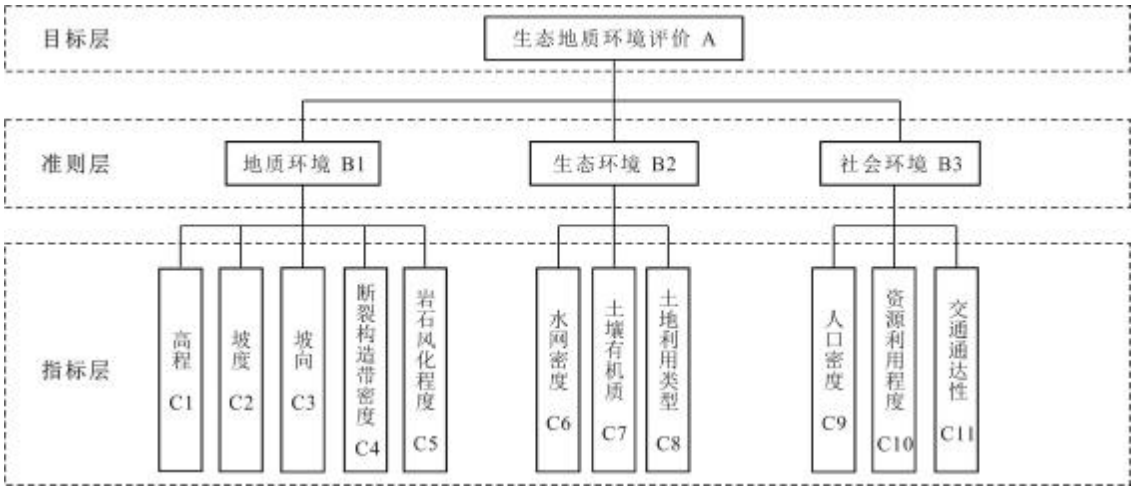


图 2 生态地质环境质量评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of eco-geological environment quality

表 1 生态地质环境评价指标体系一览表

Table 1 Value and grading of eco-geological environment evaluation index

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)	分级标准及阈值(P)			
			良好(4)	较好(3)	中等(2)	较差(1)
科尔沁沙地西北缘生态地质环境评价	地质环境 B1	高程 C1/m	255~400	400~475	475~635	635~739
		坡度 C2/(°)	0~5	5~10	10~15	15~25
		坡向 C3	阴坡	半阴坡	半阳坡	阳坡
		断裂带线密度 C4/km ⁻¹	1.83~2.44	1.21~1.83	0.61~1.21	0~0.61
	生态环境 B2	岩石风化程度 C5	全风化	强风化	中风化	弱风化
		水网密度 C6/km ⁻¹	1.97~2.63	1.31~1.97	0.66~1.31	0~0.66
		土壤有机质含量 C7/10 ⁻³	>30	20~30	10~20	<10
		土地利用类型 C8	耕地	林地	草地	砂地
	社会环境 B3	人口密度 C9/(人/km ²)	<100	100~200	200~500	>500
		资源开发程度 C10	未开发	轻度开发	中度开发	重度开发
		交通通达性 C11/km ⁻¹	1.31~1.75	0.87~1.31	0.44~0.87	0~0.44

野外调查与区域地质情况相结合的方式确定的。

6)水网密度

水网密度反映了地表水流水侵蚀和水系发育程度,影响着区域生态地质环境质量。根据区域内水系分布特征,将研究区水文密度分为 4 个等级。数据的提取采用 ArcGIS 系统工具中 Spatial Analyst Tools 水文分析模块对已经裁剪后的 DEM 数据进行一系列的栅格河网矢量化处理,将处理后的水网矢量化图形进行线密度分析,搜索半径为 1 000 m,按相等间隔分为 4 个等级。

7)土壤有机质

土壤有机质是以各种形式存在于土壤中的含碳有机化合物的统称,是衡量土壤肥力的重要指标。根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中土壤养分地球化学等级评价要求,对研究区内土壤中有机质含量进行评价。为评价指标的统一,将一等评价标准和二等评价标准合并,划分为 4 个等级。采用的数据是研究区内评价点位的土壤测试数据分析值。

8)土地利用类型

数据的获取基于实际野外调查与遥感解析,按照生态系统服务价值由高到低划分为耕地、林地、草原和沙地 4 个等级。

9)人口密度

它是表示各地人口的密集程度的指标(单位:人/km²)。研究区人口分布较为分散,以村为行政单位聚集分布。本次评价以各村为中心,以 2 000 m 为活动半径,应用 ArcGIS 系统工具中 Spatial Analyst Tools 距离模块对已经裁剪后的 DEM 数据进行欧式距离分析,将矢量化后的欧式距离图按相等间隔分为 4 个等级。

10)资源利用程度

研究区的资源利用主要有矿业、建筑、农业、畜牧业等,根据实际的调研结果将本研究区的资源利用程度分为 4 个等级。

11)交通通达性

交通通达性反映了区域与外界进行经济、社会和文化交流的可能性和潜力,是衡量区域社会经济发展程度的重要指标。路网的调查范围包括国道、县乡路、主要街道和机耕路。数据的提取采用 ArcGIS 系统工具中 Spatial Analyst Tools 密度分析模块对绘制转化好的 MapGIS 软件中的交通路线图进行栅格提取,进行线密度分析,搜索半径为 1 000 m,将矢量化后的交通路线密度量化图按相等间隔分为 4 个等级。

1.2 评价指标的取值和分级

评价指标可分为定性指标和定量指标:定量指标

包括高程、植被覆盖度、人口密度等可由具体数值进行量化的指标;定性指标包括地层岩性、矿业活动等取值常表现为属性,只能进行定性描述的指标.为使两者能同时进行综合比较,采用分级打分方法,给予不同的定性或定量指标 1~4 的阈值(表 1),应用层次分析法 yaahp 软件进行计算.

2 构建判断矩阵

构建判断矩阵是完成层次分析法的一个关键步骤,从层次结构模型的方案层开始,将所面临的复杂问题分解为一个个独立的层面,而后建立层次模型,各自独立处理.假设目标元素为 A ,同与之相连的有关元素 $B_1、B_2\cdots B_n$ 有支配关系.假设以上一层次某目标元素 A 作为准则,通过向决策者询问在原则 A 下元素 B_i 的优劣比较,构造判断矩阵表(表 2).其中 b_{ij} 表示对于 A 来说, B_i 对 B_j 相对重要性的数值体现,通常 b_{ij} 可取 1~9 以及它们的倒数作为标度(表 3).

表 2 判断矩阵

Table 2 Judgment matrix

A	B1	B2	...	Bn
B1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1n}
B2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2n}
...	...	...	...	...
Bn	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nn}

表 3 标度及含义

Table 3 Scale and representation

标度值	含义
1	两个因素相比,具有相同的重要性
3	两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2/4/6/8	分别为上述相邻判断的中值
倒数	一个因素比另一个因素不重要程度的描述

1)权重分配

以适应农牧业发展为本次生态地质环境评价的目标层逐一给定每个因素的权值.判断所对应的特征值

λ ,并计算特征向量 W ,最后进行归一化操作,归一后的特征向量为相对应的指标权重.

2)一致性检查

在评价过程中,为防止有其他特殊因素对结果造成影响,需要对其一致性进行检查.其公式如下:

$$CR=\frac{CI}{RI}$$

式中, CR 为随机一致性比例, CI 为一致性指标, RI 为随机一致性指标.

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$$

式中, λ_{max} 为判断矩阵的最大特征根; n 为判断矩阵的阶数.

RI 的取值由大量实验数据计算(表 4).

表 4 随机一致性指标

Table 4 Random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

当 $CR<0.1$ 时,判断矩阵才满足一致性的要求,否则要对矩阵进行调整,直至满足 $CR<0.1$ 为止. CR 值愈小,矩阵一致性愈好,当 $CR=0$ 时,矩阵完全一致.

3 评价指标权重计算结果

通过对计算数据的整理,得出科尔沁沙地北缘地区生态地质环境评价指标的权重(表 5—9).

表 5 准则层 B 相对于目标层 A 的判断矩阵及权重

Table 5 Judgment matrix and weight of criterion layer (B) to target layer (A)

A	B1	B2	B3	权重
B1	1.00	0.25	0.50	0.14
B2	4.00	1.00	3.00	0.63
B3	2.00	0.33	1.00	0.23

注: $\lambda_{max}=3.018$.

4 研究区生态地质环境评价

将研究区按面积大小分为 100 个评价单元,按质量指数作为定量化指标,为此建立评价数学模型:

$$M_j=\sum_{j=1}^n P_j\times W_j \quad (j=1,2,3,\cdots,n)$$

表 6 指标层 C 对准则层 B1 的判断矩阵及权重
Table 6 Judgment matrix and weight of index layer (C)
to criterion layer (B1)

B1	C1	C2	C3	C4	C5	权重
C1	1.00	3.00	0.20	7.00	0.50	0.16
C2	0.33	1.00	0.20	3.00	0.20	0.07
C3	5.00	5.00	1.00	7.00	3.00	0.49
C4	0.14	0.33	0.14	1.00	0.25	0.04
C5	2.00	5.00	0.33	4.00	1.00	0.23

注:一致性比例 0.0850, $\lambda_{\max}$ =5.3808.

表 7 指标层 C 对准则层 B2 的判断矩阵及权重
Table 7 Judgment matrix and weight of index layer (C)
to criterion layer (B2)

B2	C6	C7	C8	权重
C6	1.00	0.25	0.33	0.12
C7	4.00	1.00	2.00	0.56
C8	3.00	0.50	1.00	0.32

注:一致性比例 0.0176, $\lambda_{\max}$ =3.0183.

表 8 指标层 C 对准则层 B3 的判断矩阵及权重
Table 8 Judgment matrix and weight of index layer (C)
to criterion layer (B3)

B3	C9	C10	C11	权重
C9	1.00	3.00	0.33	0.27
C10	0.33	1.00	0.25	0.12
C11	3.00	4.00	1.00	0.61

注:一致性比例 0.0707, $\lambda_{\max}$ =3.0735.

表 9 指标层 C 对目标层 A 的综合权重
Table 9 Comprehensive weight of index layer (C)
to target layer (A)

A	综合权重	位数
C1	0.0223	9
C10	0.1465	3
C11	0.028	8
C2	0.01	10
C3	0.0672	5
C4	0.0055	11
C5	0.0316	7
C6	0.0762	4
C7	0.349	1
C8	0.1998	2
C9	0.064	6

式中, M —评价指标的生态地质环境评价质量指数; P_j —评价指标相对应的阈值; W_j —评价指标的综合权重.

目前, 针对生态地质环境评价的分级尚没有统一的标准, 本区域的评价分级标准按指数大小, 将研究区生态地质环境划分为 5 个等级, 划分标准如表 10.

表 10 生态地质环境质量划分标准
Table 10 Classification criterion of eco-geological
environment quality

生态地质环境等级	I(好)	II(较好)	III(中)	IV(较差)	V(差)
生态地质环境质量指数(M)	>10	9~10	8~9	7~8	<7

5 评价结果

本次评价涉及的 100 个评价单位中质量指数最大值为 11.93, 最小值为 6.3, 根据评价结果绘制科尔沁沙地北缘生态地质环境质量评价分级图 (图 3). 通过对评价区域计算结果进行概率统计可知, 评价指数处于 IV 级和 V 级的单元个数占总评价单元个数的 45%; 处于 III 级的单元个数占总评价单元个数的 41%, 该级评价单元质量指标平均值为 8.09; 处于 I 级和 II 级的单元个数占总评价单元个数的 14%.

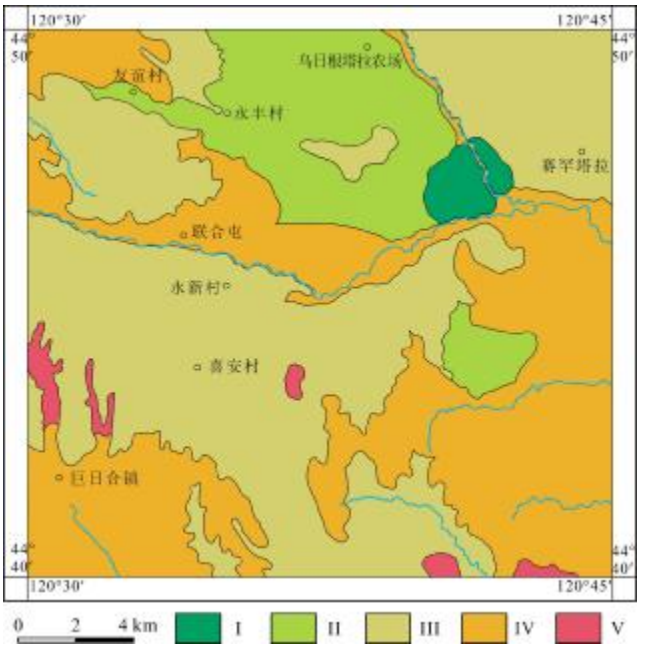


图 3 区域生态地质环境质量评价等级分区图

Fig. 3 Evaluation grading map of regional eco-geological
environment quality
I—V: 生态地质环境质量等级 (quality grade of eco-geological environment)

6 结论

在深入分析影响科尔沁沙地西北缘生态地质环境因子的基础上,结合野外实际工作及遥感数据,利用层次分析法构建以地质环境、生态环境、社会环境为准则层,以高程、坡度、水网密度、人口密度等 11 个指标为指标层的评价模型,利用生态地质环境评价数据模型进行线性加权计算,得出 100 个评价单元的生态地质环境质量指数。结果显示,研究区有 45% 的评价单元处于较差和差的质量等级,有 41% 的评价单元处于中等质量等级,可以看出科尔沁沙地西北缘生态地质环境总体处在中等偏下的水平。

综合评价结果显示 3 个准则层中生态环境因素对区域生态地质环境影响处于主导地位,对本次评价的贡献率为 62.5%。研究区土壤绝大部分属于砂壤,生态地质环境较为脆弱,区域社会经济的发展比较依赖畜牧业和部分地区的采矿业,对区域生态地质环境影响较大。为保护区域生态环境,要加大自然资源管理监督力度,尤其是对于生态地质环境较差的区域,更要注意易诱发生态环境问题的因素,如土壤沙化、过度放牧、不规范的矿区开采等。

参考文献(References):

- [1] 陈梦熊. 论生态地质环境系统与综合性生态环境地质调查[J]. 水文地质工程地质, 1999(3): 5-8, 14.
Chen M X. Discussions on the eco-geological environment systems and the eco-environmental survey [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999(3): 5-8, 14.
- [2] 黄润秋. 生态环境地质的基本特点与技术支持[J]. 中国地质, 2001, 28(11): 20-24.
Huang R Q. Basic characteristics and technical support of the eco-environmental geology[J]. Geology in China, 2001, 28(11): 20-24.
- [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 C L, Lin L, Li Q, 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] 周爱国, 周建伟, 梁合诚, 等. 地质环境评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008: 136-139.
Zhou A G, Zhou J W, Liang H C, et al. Assessment on geological environment [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008: 136-139. (in Chinese)
- [5] 田辉, 金洪涛, 孙岐发, 等. 基于层次分析法的盘锦湿地生态评价[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 268-271, 287.
Tian H, Jin H T, Sun Q F, et al. Ecological evaluation on Panjin wetland based on analytic hierarchy process[J]. Geology and Resources, 2018, 27(3): 268-271, 287.
- [6] 郑长远, 张启兴, 贾君, 等. 层次分析法在长江源区生态地质环境质量(脆弱性)评价中的应用[J]. 西北地质, 2010, 43(1): 137-145.
Zheng C Y, Zhang Q X, Jia J, et al. The application of analytic hierarchy process (AHP) in source region of the Yangtze River's geological environment quality (vulnerabilities) evaluation [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(1): 137-145.
- [7] 李崧, 邱微, 赵庆良, 等. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 1031-1034.
Li S, Qiu W, Zhao Q L, et al. Applying analytical hierarchy process to assess eco-environment quality of Heilongjiang Province[J]. Environmental Science, 2006, 27(5): 1031-1034.
- [8] 李明. 盐边县桐子林镇生态地质环境质量评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2018: 28-32.
Li M. Evaluation on ecological geological environment quality of Tongzilin Town in Yanbian County[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018: 28-32.
- [9] 杨澍, 初禹, 杨湘奎, 等. 层次分析法(AHP)在三江平原地质环境质量评价中的应用[J]. 地质通报, 2005, 24(5): 485-490.
Yang S, Chu Y, Yang X K, et al. Application of the analytic hierarchy process (AHP) in the evaluation of the geo-environmental quality in the Sanjiang Plain [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(5): 485-490.
- [10] 梁帅, 戴慧敏, 刘国栋, 等. 黑龙江双阳河流域土壤-作物-人体系统中硒元素及生态环境与人体健康评价[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1064-1074.
Liang S, Dai H M, Liu G D, et al. Geochemical characteristics and evaluation of ecological environment and human health of selenium in soil-crop-human system in Shuangyang River Basin, Heilongjiang[J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1064-1074.
- [11] 陈树旺, 邢德和, 丁秋红, 等. 生态地质调查评价——以辽宁铁岭地区为例[J]. 地质与资源, 2012, 21(6): 540-545.
Chen S W, Xing D H, Ding Q H, et al. Ecogeological survey and evaluation: A case study of Tieling area, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2012, 21(6): 540-545.
- [12] 李霄, 柴璐, 王晓光, 等. 基于层次分析法的丹东地区地下水污染防治区划[J]. 地质与资源, 2018, 27(4): 396-405.
Li X, Chai L, Wang X G, et al. Regionalization of groundwater pollution prevention in Dandong area based on analytic hierarchy process[J]. Geology and Resources, 2018, 27(4): 396-405.
- [13] 黄润秋, 向喜琼. GIS 技术在生态环境地质评价中的应用[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 98-101.
Huang R Q, Xiang X Q. Application of the GIS technique in the assessment of the eco-environment[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(2): 98-101.

- [14]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 K X, Chen G, Chen W T, et al. Comprehensive assessment of eco-geological environment[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(7): 78-82.
- [15]孙张涛,余正伟,舒思齐,等.中国省域生态系统服务价值评价与生态地质调查工作建议[J].中国地质,2023,50(2):479-494.
Sun Z T, Yu Z W, Shu S Q, et al. Evaluation of ecosystem services of Chinese provincial land and suggestions for ecological geological survey[J]. Geology in China, 2023, 50(2): 479-494.
- [16]孟晖,李春燕,张若琳,等.全国地质环境承载能力评价[J].地质通报,2021,40(4):451-459.
Meng H, Li C Y, Zhang R L, et al. Assessment of carrying capacity of national geological environments in China[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(4): 451-459.
- [17]魏路,刘建奎,肖永红,等.安徽省地质环境承载能力评价[J].地质通报,2020,39(1):102-107.
Wei L, Liu J K, Xiao Y H, et al. The evaluation on the bearing capacity of geological environment in Anhui Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(1): 102-107.
- [18]高玄或.地貌基本形态的主客分类法[J].山地学报,2004,22(3):261-266.
Gao X Y. The subjective and objective classification of geomorphologic forms[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3): 261-266.
- [19]张君,蔡德宝,杨树琼,等.丹江口库区不同坡度对土壤肥力特征的影响[J].中国土壤与肥料,2021(2):32-38.
Zhang J, Cai D B, Yang S Q, et al. Soil fertility characteristics of different slopes in the Danjiangkou Reservoir area[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(2): 32-38.
- [20]徐婷,赵成章,段贝贝,等.兰州北山刺槐不同等级叶脉密度与叶大小关系的坡向差异性[J].生态学杂志,2016,35(1):41-47.
Xu T, Zhao C Z, Duan B B, et al. Slope-related variations of different levels of vein density and leaf size in *Robinia pseudoacacia* in the northern mountains of Lanzhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 41-47.
- [21]盘远方,李娇凤,姚玉萍,等.桂林岩溶石山青冈群落植物功能多样性和环境因子与坡向的关联研究[J].生态学报,2021,41(11):4484-4492.
Pan Y F, Li F J, Yao Y P, et al. Changes in plant functional diversity and environmental factors of *Cyclobalanopsis glauca* community in response to slope gradient in Karst hills, Guilin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4484-4492.
- [22]刘玉祯,刘文亭,冯斌,等.坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响[J].草地学报,2021,29(6):1166-1173.
Liu Y Z, Liu W T, Feng B, et al. Effects of slope aspect and elevation on vegetation distribution pattern of alpine mountain meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6): 1166-1173.
- [23]刘旻霞,南笑宁,张国娟,等.高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系[J].生态学报,2021,41(13):5398-5407.
Liu M X, Nan X N, Zhang G J, et al. Relationship between species diversity and functional diversity of plant communities on different slopes in alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5398-5407.
- [24]黄建军.生态环境与地质构造的耦合关系研究[J].地球环境学报,2015,6(4):231-237.
Huang J J. Study on the coupling relation between eco-environment and geotectonic [J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 231-237.

(上接第 89 页/Continued from Page 89)

- [17]张开军,魏迎春,徐友宁.小秦岭某金矿区土壤-农作物重金属元素富集规律[J].地质通报,2015,34(11):2018-2023.
Zhang K J, Wei Y C, Xu Y N. The discussion on heavy metal accumulation regularity in the soil and crop of the Xiaolinling gold mining area[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2018-2023.
- [18]曾路生,史衍玺.寿光蔬菜大棚土壤有效态 Hg、As、Cu 和 Zn 含量的变化[C]//第二届重金属污染防治技术及风险评价研讨会暨重金属污染防治专业委员会 2012 年首届学术年会论文集.中国环境科学学会,2012:244-249.
Zeng L S, Shi Y X. Available Hg, As, Cu and Zn content in vegetable greenhouse soil of Shouguang[C]//The Second Symposium on Heavy Metal Pollution Prevention and Risk Assessment. Chinese Society for Environmental Sciences, 2012: 244-249.
- [19]季冬雪,华璐,王学东,等. Cu-Cd、Zn-Cd、Cu-Zn 复合污染对水稻毒性和重金属吸收的影响[J].环境污染与防治,2018,40(10):1141-1146.
Ji D X, Hua L, Wang X D, et al. The effects of combined heavy metals (Cu-Cd, Zn-Cd, Cu-Zn) on the toxicity and uptake of metal elements in rice[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(10): 1141-1146.
- [20]吕笃康,巴音山,赵玉.铜、镉污染对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2012,31(9):108-111.
Lv D K, Ba Y S, Zhao Y. Effects of copper and cadmium pollution on wheat seed germination and seedling growth[J]. Seed, 2012, 31(9): 108-111.
- [21]谢素,寇士伟,吴鹏辉,等. Cd-Cu-Pb 复合污染对芥菜吸收 Cd、Cu 和 Pb 及矿质元素的影响[J].环境科学研究,2012,25(4):453-459.
Xie S, Kou S W, Wu P H, et al. Effects of Cd-Cu-Pb compound contamination on absorption of Cd, Cu, Pb and mineral elements in mustard [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(4): 453-459.