

矿山驱动下的区域生态环境状况与承载力研究——以湖北省竹山县为例

吴垚¹, 代力², 唐亮¹, 杨放¹, 毛志强¹, 吴扬³

(1. 地球与行星科学学院 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 3. 四川省天晟源环保股份有限公司, 四川 成都 610037)

摘要: 本研究将遥感生态指数 (RSEI) 运用到湖北省竹山县生态环境质量状况的评估中, 通过对比引入矿山密度指标前后 RSEI 的变化情况, 重点分析了矿山分布对生态环境状况的影响程度。同时, 使用 DPSIR-TOPSIS 耦合模型对 2001—2021 年竹山县的生态环境承载力进行评价, 构建了涵盖 19 项指标的指标体系。结合层次分析法与熵值法计算指标权重, 并引入障碍度函数, 识别了承载力的主要制约因素。结果显示, 县内生态环境承载力总体呈指数型增长, 影响其变化的主要障碍因子有“全社会固定资产投资”、“人均 GDP”、“年均降雨”、“年均气温”、“人口密度”和“一般公共预算支出”等。可将驱动生态环境承载力变化的主要因素归纳为: “经济发展”、“人口变化”、“自然条件”及“政策响应”。加入矿山密度指标后, 竹山县生态环境质量中等以下区域面积占比上升了 1.96%, 等级为“较差”和“差”的区域面积分别增加 42.96 km² 和 27.21 km²。该研究对指导竹山县生态环境改善具有一定的意义。

关键词: 矿山分布; 生态环境; 遥感生态指数; 生态环境承载力; 竹山县

doi:10.12476/kczhly.202304240217

中图分类号: TD989;X24 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0205-10

引用格式: 吴垚, 代力, 唐亮, 等. 矿山驱动下的区域生态环境状况与承载力研究——以湖北省竹山县为例[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 205-214.

WU Yao, DAI Li, TANG Liang, et al. Study on the ecological environment conditions and carrying capacity of a mining-driven region: case of zhushan county, hubei province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 205-214.

湖北省竹山县矿产资源丰富, 有绿松石矿、金属矿、铌钽矿和稀土矿等^[1-3]。矿山开采活动导致的水体、大气、土壤及噪声等污染, 会对当地生态环境产生显著负面影响^[4-5], 这种影响不仅在矿山开采期间尤为明显, 甚至在矿山关闭后也难以立即消失。如张登峰和孙建伟^[6]研究了矿产资源开发对豫西熊耳山矿集区河流水体及底泥中重金属污染的影响, 结果表明, 受污染点位占样品总量的 28%, 主要污染物为砷 (As) 和汞 (Hg), 且污染主要集中于矿业活动密集区域。王亚捷和

李杰锋^[7]以山西铝矿区复垦土壤为研究对象, 采用定量分析方法评估其污染状况, 发现浅层复垦区土壤中重金属 (Cr、Pb、Zn 和 Ni) 含量显著高于深层未复垦区, 其中铅 (Pb) 对环境的潜在影响最为突出。

徐涵秋^[8]在对福州主城区的生态环境时空变化进行分析时, 提出了一种基于遥感技术, 集成了绿度、湿度、热度和干度等多种生态因子的区域生态环境评价方法——遥感生态指数 (Remote Sensing based Ecological Index, RSEI)。生态环境

收稿日期: 2025-03-24

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20242280)

作者简介: 吴垚 (2001-), 男, 硕士, 主要从事环境地球化学工作。

承载力则被用于描述人类活动与自然环境之间的关系^[9]。定义为：在维系环境系统功能与结构不变的前提下，环境系统能承受的人类经济、社会活动的阈值^[10]。本研究引入 RSEI 及生态环境承载力，旨在明确控制竹山县生态环境承载力在时间尺度上变化的主要因素，并分析矿山分布在空间尺度上对生态环境的影响。基于数据的可获取性和完整性，构建了 DPSR-TOPSIS 模型，结合障碍度分析，对 2001—2021 年期间竹山县生态环境与社会经济发展的时空响应关系进行了系统研究。同时，使用 Python 及 ArcMap 中的主成分分析工具对 2021 年竹山县的生态环境状况进行评估，并分析了矿山密度对生态环境的空间影响。对指导竹山县生态环境改善具有一定意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

竹山县位于湖北省十堰市西南方，面积约 3 580 km²。以山地为主，地势由南西向东北倾斜，平均海拔 500 m。属于亚热带季风气候，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，年均气温约 15 ℃，年降水量在 800~1 200 mm 之间。县内植被覆盖率常年达到 97%，森林、生物资源丰富。截至 2020 年底，该县共有 45 座矿山，以小型矿山为主（40 座），主要分布于中北部地区。全县常住人口约 34.61 万人，农业人口占比较大，地区生产总值（GDP）约 135.57 亿元。竹山县河流均属堵河水系，全县有大小河流 646 条，长 2 740.7 km，是南水北调中线工程的重要水源涵养地，生态环境保护对于区域可持续发展至关重要。随着经济发展，竹山县面临生态环境保护与经济增长的双重压力。

1.2 指标体系构建

结合竹山县生态环境和经济社会发展状况^[11]，使用 DPSR 模型，选取 4 个层面共 19 个指标作为综合评价的依据。其中，驱动力层指标 4 个，压力层指标 6 个，状态层指标 5 个，响应层指标 4 个（表 1）。正向指标数值越大，对生态环境承载力的正向影响越大；负向指标数值越大，对生态环境承载力的反向作用越大。

驱动力子系统指标主要从社会和经济发

表 1 DPSR 模型指标权重描述				
Table 1 Index weight description of DPSR model				
目标层	准则层	指标层	指标性质	指标权重
生态环境承载力	D驱动力 (0.229 5)	人均GDP D ₁	+	0.087 7
		工业产值D ₂	+	0.045 5
		农村居民人均可支配收入D ₃	+	0.025 6
		城镇居民人均可支配收入D ₄	+	0.023 4
	P压力 (0.208 0)	人口密度P ₁	-	0.106 5
		耕地占比P ₂	-	0.007 1
		建设用地占比P ₃	-	0.014 9
		PM _{2.5} 浓度P ₄	-	0.017 6
		PM ₁₀ 浓度P ₅	-	0.019 2
		规模以上工业企业数P ₆	-	0.026 6
	S状态 (0.248 4)	年均气温S ₁	+	0.074 0
		年均降雨S ₂	+	0.069 3
		年度蒸散发量S ₃	+	0.047 8
		耕地粮食单产S ₄	+	0.020 6
		耕地油料单产S ₅	+	0.032 5
	R响应 (0.314 6)	植被覆盖度R ₁	+	0.113 6
		第三产业占比R ₂	+	0.061 8
		一般公共预算支出R ₃	+	0.067 9
		全社会固定资产投资R ₄	+	0.138 5

注：+表示正向指标，-表示负向指标。

潜在原因。压力子系统可定义为在驱动力作用后，造成生态环境承载力恶化的直接因素，表明人类活动对生态环境系统的压迫，主要以人口增长、经济发展引起的生态环境压力作为衡量指标。状态子系统表示社会经济发展和生态环境压力作用下的物理特征状态，主要从生态环境质量状态，及农产品产量状态两方面进行评价。响应子系统指为应对生态环境变化所采取的保护措施，主要以资金投入及所取得的成效作为指标^[12]。

层次分析法（Analytic hierarchy process）适用于多层次、多目标的复杂决策问题，特点在于分层比较、综合优化，可以为区域承载力评价提供便捷，但主观性强^[13]。熵值法是一种客观条件下通过评价指标的数值来确定指标权重的方法，具有较强的可操作性和客观性，指标值差异越大，该指标就越重要，权重也越大^[14]。熵值法对数据质量的依赖性较强，不能解释指标之间可能存在的关联性。为此，本研究综合层次分析法和熵值法来计算指标的权重，较大程度避免主观因素干扰，又避免熵值法权重与实际不符的问题^[15]。

1.3 TOPSIS 算法

TOPSIS 算法是通过计算每个方案与正理想解和负理想解的距离来选择较优方案。正理想解指在每个准则下表现较好的假设方案，负理想解指在每个准则下表现最差的假设方案^[16]。通过计算每个方案与正理想解和负理想解的贴近度 (C_i)，确定较优方案， C_i 值越接近于 1，表明该指标越靠近最优结果，生态环境承载力水平越高^[17]。与其他方法相比，TOPSIS 法能客观地反映区域承载力的动态变化趋势^[18]。

1.4 障碍度分析

障碍度分析是评估各个因素对系统目标的阻碍程度，识别出系统中极有可能影响目标达成的因素。障碍因素计算采用因子贡献度 (A_j)、指标偏离度 (B_{ij}) 和障碍度 (C_j) 3 个指标来进行分析诊断。 A_j 表示单项指标对总目标（生态环境承载力）的影响程度； B_{ij} 表示单项指标与生态环境承载力最大目标值之间的差距，即 1 与单项指标标准化值之差； C_j 表示第 i 年各指标或子系统对生态环境承载力的影响，是生态环境承载力障碍诊断的目标和结果^[19]。引入障碍度函数模型可以检测影响竹山县环境承载力水平的障碍因素，也可以直观反应竹山县生态环境承载力的主控障碍因子^[20]。 C_j 越小，生态环境承载力受到的阻碍作用越弱；反之越强。

1.5 遥感生态指数计算

RSEI 是一种完全基于遥感信息，各指标对 RSEI 的影响是根据其数据本身的性质决定，避免了人为计算的主观性^[21]，使各指标的集成结果更为客观合理^[22]。RSEI 不仅能对区域生态质量进行定量评估，还能在时空上实现生态环境质量评价结果的高精度、可视化呈现^[23]。基于 Landsat 8 数据，分别计算 RSEI 的 4 个关键指标：绿度 (NDVI)、湿度 (WET)、干度 (NDBSI) 和热量 (LST)。随后将所有指标归一化，并用主成分分析 (PCA) 整合，提取第一主成分作为 RSEI^[24]。

2 研究结果

2.1 承载力水平

竹山县生态环境承载力的变化趋势经历了从低速增长到快速增长的过程，整体呈指数型增长特征（图 1a）。2001—2008 年，综合承载力 C_i 值

相对较低且变化不大 (0.101 7~0.117 4)，说明整体环境承载力较弱，未出现显著提升。2008 年后，综合承载力 C_i 值从 0.117 4 增加到 0.891 4，呈现指数型增长趋势，说明在多系统协同作用下，竹山县综合生态环境承载力得到了改善。

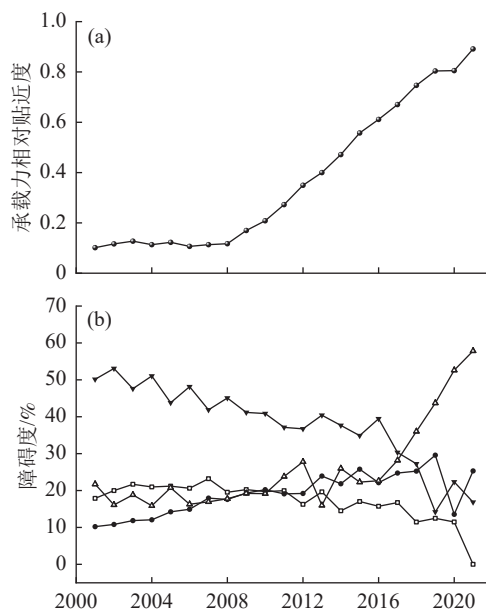


图1 竹山县 2001—2021 年承载力变化趋势 (a) 及各子系统障碍度变化趋势 (b)

Fig.1 Changing trend of bearing capacity (a) and changing trend of obstacle degree of each subsystem (b) range from 2001 to 2021 in Zhushan county

2.2 障碍度

根据公式得到各指标的障碍度，并计算了各子系统的障碍度值 (C_j ; 图 1b)，每个子系统的 C_j 值代表该子系统在生态环境承载力中的影响和制约程度，障碍度越高，说明该子系统对生态环境承载力的制约越强^[25]。结果表明，(1) 驱动力子系统的 C_j 值总体上呈现缓慢降低趋势，几乎维持在 20% 以下，说明该子系统对生态环境承载力的限制相对较小。(2) 压力子系统的 C_j 值在整个时间段内相对平稳，基本维持在 10%~20% 之间。整体变化较小，2012 年后障碍度稍有上升，2019 年达到 20% 左右，之后回落。(3) 状态子系统 C_j 值在 2001—2016 年期间波动较大，保持在 20% 上下。2016 年以后， C_j 值逐渐上升，2017 年以后逐渐取代响应子系统成为新的主控障碍因子。2021 年接近 60%，表明状态子系统的障碍作用持续加强。状态子系统反映在压力子系统作用下，体现生态系统的健康状况的指标^[26]，包括水

质、空气质量、生物多样性等。其障碍度的波动可能说明生态系统经历了较大的变化,比如自然灾害、气候变化或人类活动等。(4)响应子系统Cj值在整个时间段内一直持续下降,2001年到2010年间障碍度维持在30%~55%之间。2016年后,下降速度有所加快,在2019年降至10%左右,此后波动降低。响应子系统代表针对生态环境问题的反馈措施和管理能力^[27]。主要障碍因子由响应子系统到状态子系统的转变,可能表明生态环境治理和管理取得了一定成效。

2.3 生态环境质量

将RSEI指数以0.2为间隔分成差、较差、中等、较好、好5个等级^[28]。结果表明(图2a),2021年时,竹山县的生态环境质量状况整体较好,中等及以上的区域面积占比达到了93.22%。生态环境质量差的区域分布较为集中,主要位于县中北部城镇、乡村等人口分布密集的区域,说明人类活动对生态环境的破坏较大,而植被覆盖度更高的山区生态环境质量相对较高,与竹山县的实际情况相符。

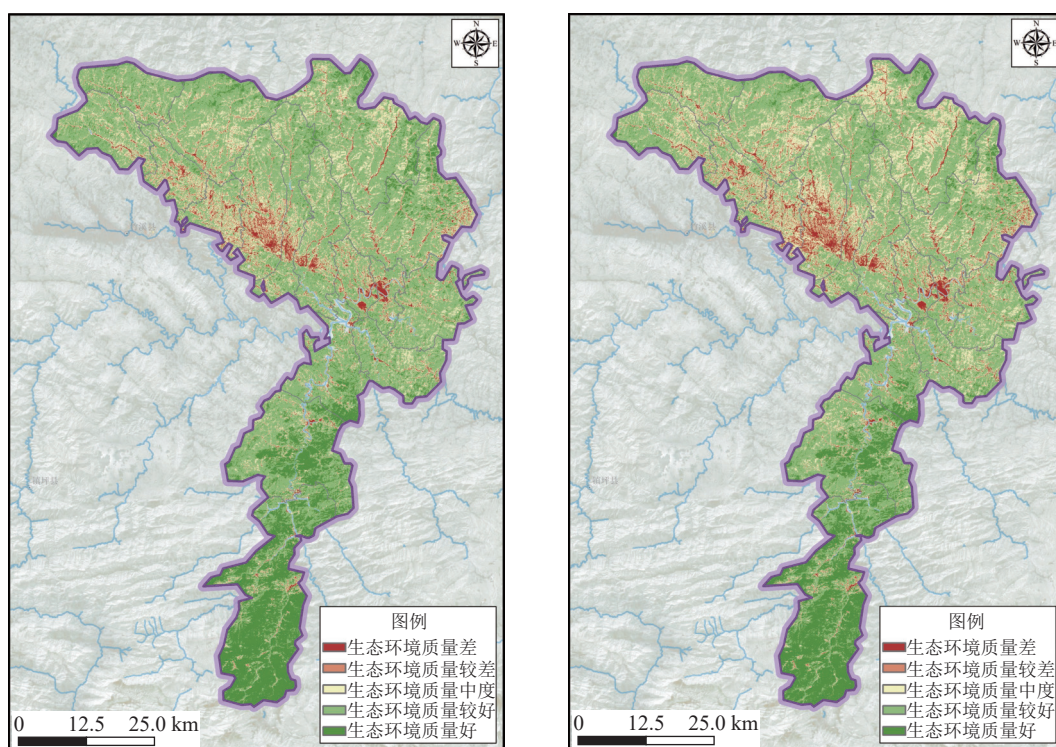


图2 竹山县2021年生态环境质量分级(a:未加入矿山密度指标;b:加入矿山密度指标)

Fig.2 Zhushan County 2021 ecological environment quality classification map

(a: no mine density index; b: added the mine density index)

3 讨论

3.1 承载力障碍因子分析

2001—2021年期间,人均GDP(D_1)、人口密度(P_1)、一般公共预算支出(R_3)和全社会固定资产投资(R_4)的障碍度基本都维持在8%以上,是竹山县生态环境承载力较为主要的障碍因子,见图3。同时,驱动力子系统(D)和响应子系统(R)中各指标障碍度均表现出逐渐下降的趋势,而状态子系统(S)中各指标障碍度整体逐渐上升,暗示了主要障碍因子的转变。其中年均气温(S_1)和年均降雨(S_2)障碍度主要在3%~

15%范围内波动,对承载力的制约作用不可忽视。年度蒸散量(S_3)和耕地粮食单产(S_4)的障碍度值在2001—2016年间整体较小,但2017年后上升速率均有所加快,说明 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 有望发展成为影响竹山县生态环境承载力变化的主要障碍因子。

在识别了2001—2021年竹山县生态环境质量的主要障碍因子变化规律的基础上,筛选出年度障碍度排序前6的因子,对相同的因子进行数值累加^[29]。最终,得到累加障碍度最高的6个指标因子及累加障碍度值(图4)。累加障碍度值最高

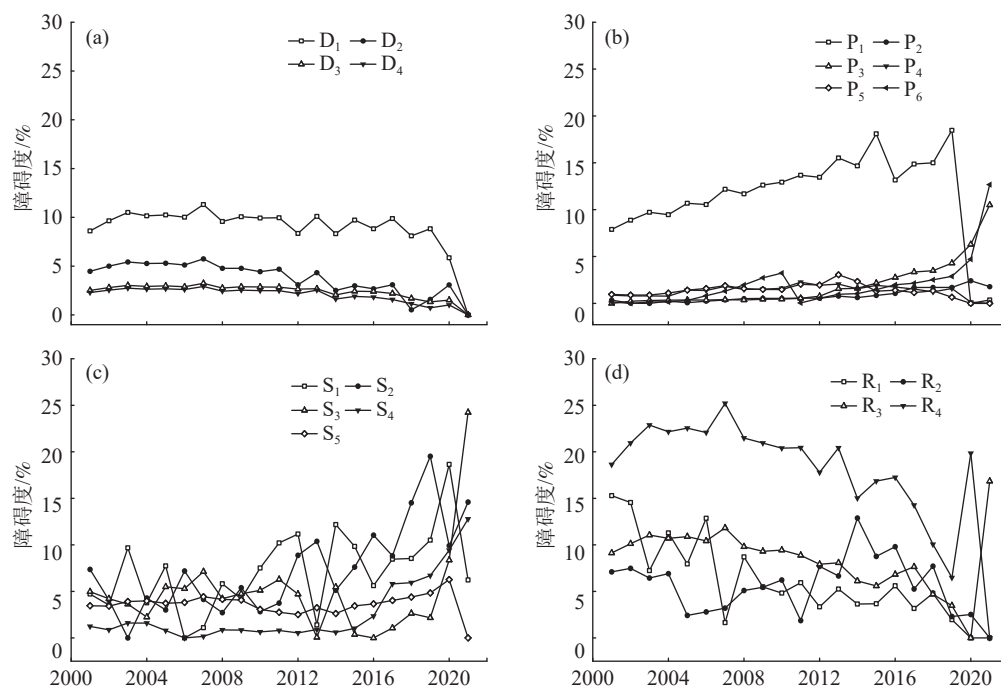


图3 竹山县2001—2021年各指标障碍度变化趋势（图例解释见表1）

Fig.3 Change process of obstacle degree of each index in Zhushan county from 2001 to 2021 (Table 1 for legend description)

的6个指标因子分别是全社会固定资产投资（ $R_4 = 3.81$ ）、人均GDP（ $D_1 = 2.02$ ）、年均降雨（ $S_2 = 1.42$ ）、年均气温（ $S_1 = 1.40$ ）、人口密度（ $P_1 = 1.34$ ）和一般公共预算支出（ $R_3 = 1.28$ ）。由此可知，经济发展和人口增长造成的生态环境压力过载，最终导致生态环境系统稳定性破坏。此外，提升生态环境质量的响应能力，也是造成竹山县生态环境承载力改变的主要影响因素。因此，协调人类活动与自然环境之间的发展关系，增加用于环境治理的公共预算支出（ R_3 ），有利于提高生态环境承载力变化的响应效率，有效提高竹山县生态环境质量。

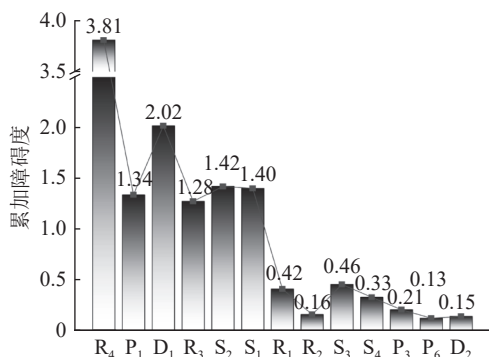


图4 竹山县主要障碍度值累加变化

Fig.4 Cumulative change map of the main obstacle degree values in Zhushan county

3.2 承载力变化驱动因素

3.2.1 经济发展

工业化、城市化等往往带来资源消耗和污染物的排放，产生的城市建成区扩张、生态环境破坏等问题使生态环境的载荷增加^[30]。图5a、b显示，竹山县2001年的人均GDP值为1438元，2021年为12977元，增长了11539元；人均可支配收入从5751元增加到44158元；油料产量从2001年的53 ton/km²增长到了2021年的205 ton/km²。虽然经济增长能够带来生活水平提高和环境管理资金的增加，但在经济发展早期，往往会忽视对环境的保护，造成生态系统功能退化。此外，随着建设用地面积、规模以上工业企业数量的增多（图5c、d），也会对生态系统原有的平衡产生破坏，从而导致生态系统承载力水平下降。

3.2.2 人口变化

人口变化是影响生态环境承载力等级变化的主要驱动因素之一^[31]。2021年竹山县的常住人口约34.7万人，相比于2001年（约44.7万人），减少了约10万人，人口密度从129.2人/km²（2001年）减少到96.5人/km²（2021年）（图5e）。可知，竹山县人口总量在逐年下降。但受地形影响，竹山县的人口分布非常集中，导致部分区域人口承载压力较大。以2021年的常驻人口数据为

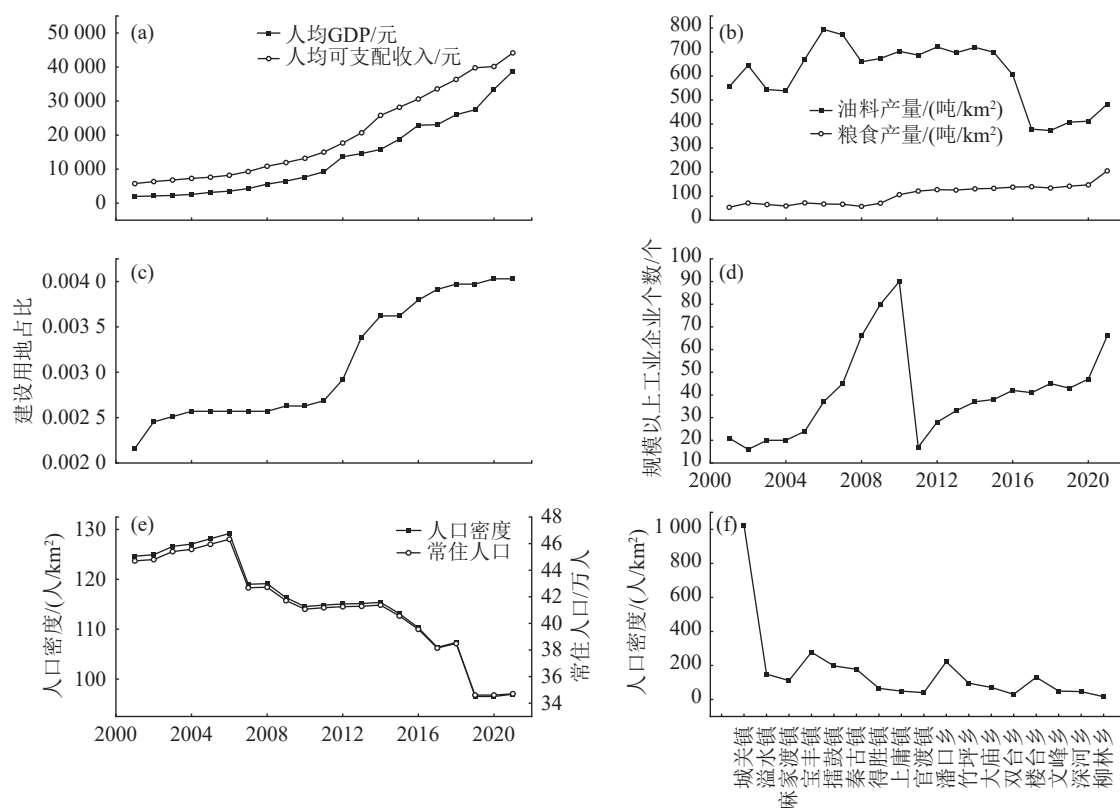


图5 竹山县 2001—2021 年经济发展指标变化 (a、b、c、d)、人口密度及常住人口变化 (e) 及竹山县各镇 2021 年人口密度 (f) (数据源:十堰市统计年鉴(2001—2021 年))

Fig.5 Changes in economic development indicators (a, b, c, d), population density and permanent population changes (e) and population density maps (f) of Zhushan county from 2001 to 2021. (Data: Shiyan City Statistical Yearbook (2001—2021))

例,城关镇的人口密度高达 1 024.8 人/km²,显著高于其他乡镇(200 人/km²;图 5f)。因此,人口压力造成的环境问题不容忽视,如土地利用强度过大、自然资源过度开发、水体污染及生物多样性丧失等问题。使得产业发展与生态保护矛盾突出,生态系统压力增大,最终造成生态环境承载力降低^[32]。

3.2.3 自然条件

竹山县植被覆盖度常年维持在 97% 以上,对维护生态系统稳定提供了重要保障。2001—2021 年,年均降雨量在 785~1 236 mm 之间,随着海拔的升高而增加。降雨的增多,可能会导致地质灾害的频发,从而加速生态环境承载力的退化;年均气温在 13.9~14.9 ℃ 之间,中北部气温相对较高,南部较低。此外,竹山县 2001—2021 年的极端高温一直处于 38~41 ℃ 之间,持续的高温天气会产生森林火灾等灾害,进而引起空气污染、水体蒸发和土壤退化等问题。

3.2.4 政策响应

2011—2015 年是中国经济和社会发展第十二

个五年规划(“十二五”)的实施时间,并在 2012 年首次提出了“五位一体”总体布局的战略目标,这一时期是竹山县经济发展和环境保护从负相关性转变为正相关性的重要节点。

2011 年,竹山县规模以上工业企业数量从 90 减少到 17 个(图 5c、d),推测与《国家环境保护“十二五”规划》的提出有关。之后建设用面积增速加快的时间(2012—2014 年)与规模以上工业企业个数开始增加的时间(2012 年)几乎吻合。同时,竹山县 2001—2021 年的 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度整体呈现先上升后下降的趋势(图 6a),开始下降的时间节点在 2012—2014 年。说明竹山县在保证经济发展的同时也加强了环境保护,经济发展和环境保护不再矛盾。此外,竹山县全年一般公共预算支出,以及全社会固定资产投资额度不断升高,分别由 2001 年的 1.2 亿元、2.2 亿元提升至 2021 年的 39.5 亿元、243.0 亿元,呈现指数型增长的趋势(图 6b)。说明环境保护政策的实施缓解了生态系统承载的压力,并且对生态环境承载力的提高产生了影响。

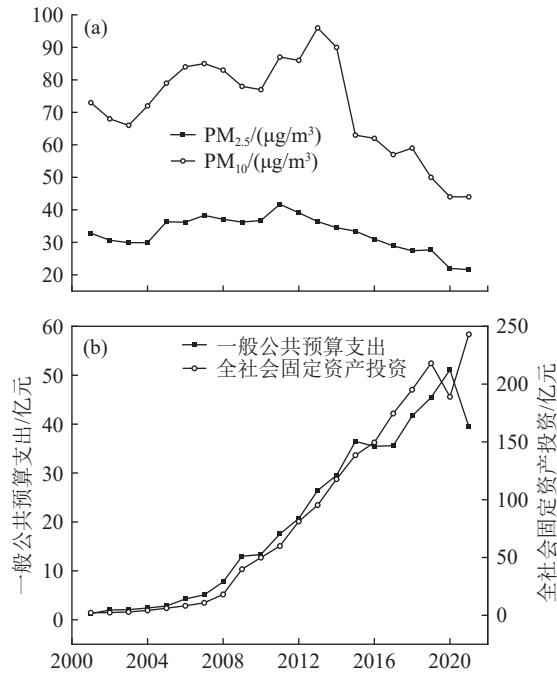


图6 竹山县2001—2021年PM_{2.5}、PM₁₀变化(a)及公共预算支出、投资额度变化(b)(数据源:十堰市统计年鉴(2001—2021年))

Fig.6 changes in PM_{2.5} and PM₁₀ from 2001 to 2021 in Zhushan county (a) and changes in public budget expenditure and investment amount (b) (Data: Shiyan City Statistical Yearbook (2001-2021))

3.3 矿山分布对生态环境的影响

使用 ArcGIS 中的密度分析工具提取了竹山县内矿山的密度分布情况,将矿山密度当作负向指标进行归一化,同 RSEI 的 4 个关键指标一起进行主成分分析,以期对矿山密度指标分配一个权重值,从而评价采矿对生态环境状况的影响程度(图 2b)。加入矿山密度指标后,竹山县生态环境质量中等以下区域的占比由 6.78% 上升到了 8.74%,生态环境质量“差”和“较差”的区域面积分别上升 27.21 km² 和 42.96 km²(表 2),并且生态环境质量等级降低的区域与矿山分布的区域基本吻合,越靠近矿山的区域,其数值下降越明显,说明竹山县的生态环境状况的确受到矿山分布的影响。所以如何在矿山开采的过程中减少对生态环境的破坏,是未来矿业开发过程中的重要考虑因素。

4 结 论

(1) 2001—2021 年期间,竹山县的生态环境承载力呈现指数上升趋势,基本符合竹山县的发展现状。综合评价指数数值在 0.1~0.9 之间。

表2 竹山县2021年生态环境质量分级信息
Table 2 Ecological environment quality classification of Zhushan county in 2021

RSEI 分级	未加入矿山密度指标		加入矿山密度指标	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差 (0~0.2)	71.24	1.99	98.45	2.75
较差 (0.2~0.4)	171.48	4.79	214.44	5.99
中等 (0.4~0.6)	671.25	18.75	835.93	23.35
较好 (0.6~0.8)	2 079.62	58.09	1 952.89	54.55
好 (0.8~1.0)	586.41	16.38	478.29	13.36

2016 年以后,数值超过 0.6,说明承载力水平已经达到较高水平。影响竹山县生态环境承载力的主要障碍因子为:全社会固定资产投资、人均 GDP、年均降雨、年均气温、人口密度和一般公共预算支出。

(2) 结合承载力变化趋势和障碍因子分析得出,提升竹山县的生态环境承载力水平,需控制人口密度,降低经济发展过程中污染物的排放,减少自然环境破坏、增加环保支出,以及环保政策的有效实施等。

(3) 通过对比加入矿山密度指标前后 RSEI 的变化情况,发现矿山分布对竹山县的生态环境质量状况产生了较为显著的影响。这一结果表明,矿山开采过程中的污染控制是未来矿业开发的关键环节,需采取有效措施以减轻其对生态环境的影响。

参考文献:

- [1] 李潇雨,刘星,熊文良,等.湖北某地铌钽铁矿物工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):194-199.
- LI X Y, LIU X, XIONG W L, et al. Process mineralogy of niobium tantalum iron ore in Hubei[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):194-199.
- [2] 刘兴平,曾牧源,陈松,等.湖北某高磷高钙低品位碳酸锰矿选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(5):148-153.
- LIU X P, ZENG M Y, CHEN S, et al. Beneficiation process of low-grade manganese carbonate ore with high phosphorus and calcium in Hubei Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(5):148-153.
- [3] 王建国,周丽君,李宏建.湖北某磷矿选矿实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(5):160-165.
- WANG J G, ZHOU L J, LI H J. Research on beneficiation of a phosphate ore in Hubei Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(5):160-165.
- [4] 何振嘉,罗林涛,杜宜春,等.碳中和背景下矿区生态修复

减排增汇实现对策[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):9-14+56.

HE Z J, LUO L T, DU Y C, et al. Countermeasures to realize ecological restoration and emission reduction and increase of sinks in mining areas under the background of carbon neutrality[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):9-14+56.

[5] 毛益林, 杨进忠, 刘小府. 攀西地区某典型铜矿尾矿资源化技术研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(6):84-88+93.

MAO Y L, YANG J Z, LIU X F. Study on resource utilization technology of typical copper tailings from Panxi region[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(6):84-88+93.

[6] 张登峰, 孙建伟. 熊耳山矿集区小河流域水体及底泥重金属污染评价[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(1):109-119.

ZHANG D F, SUN J W. Water body and sediment of xiaohe watershed in Xiongershan ore concentration area heavy metal pollution assessment[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(1):109-119.

[7] 王亚捷, 李杰峰. 铝矿区复垦土地重金属富集特征以及污染研究[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(5):197-203.

WANG Y J, LI J F. Effect of iron tailings powder on the mechanical properties and calcium hydroxide content in limestone powder concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(5):197-203.

[8] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(24):7853-7862.

XU H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7853-7862.

[9] 代力, 谭洪旗, 周雄. 川西锂矿带资源环境特征与生态地质环境承载力评价[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):157-168+173.

DAI L, TAN H Q, ZHOU X. Eco-geological environment carrying capacity and resource and environmental characteristics of lithium ore belt in Western Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):157-168+173.

[10] 王兆峰, 周颖. 长江经济带生态环境承载状态分析及其影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(6):1293-1301.

WANG Z F, ZHOU Y. Analysis on carrying state of ecological environment of Yangtze River economic belt and its influencing factors[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(6):1293-1301.

[11] 许杨, 陈菁, 夏欢, 等. 基于 DPSIR-改进 TOPSIS 模型的淮安市水资源承载力评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(4):47-52+62.

XU Y, CHEN Q, XIA H, et al. Evaluation of water resource carrying capacity in Huai'an city based on DPSIR-improved TOPSIS model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(4):47-52+62.

[12] HUANG Q Q, PENG B H, WEI G, et al. Dynamic

assessment and early warning of ecological security: A case study of the Yangtze river urban agglomeration[J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(3):2441-2461.

[13] 张琛, 汪宙峰, 汪裕峻, 等. 基于 TOPSIS 和热点分析的都汶公路沿线地质生态环境承载力评价[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2):704-715.

ZHANG C, WANG Z F, WANG Y J, et al. Evaluation of geological and ecological environment carrying capacity along Dujiangyan-Wenchuan Highway based on TOPSIS and hotspot analysis[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2):704-715.

[14] LI X F. TOPSIS model with entropy weight for ecological environment carrying capacity assessment[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, 82(44):103805.

[15] 左其享, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2):1-7.

ZUO Q T, ZHANG Z Z, WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2):1-7.

[16] 罗德江, 吴昊, 何苏, 等. 基于犹豫模糊 TOPSIS 的绿色矿山多属性评价方法[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):41-49.

LUO D J, WU H, HE S, et al. Multiattribute evaluation method for green mines based on hesitant fuzzy TOPSIS[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):41-49.

[17] WANG Y M, YUAN M K, ZHOU X F, et al. Evaluation of geo-environment carrying capacity based on intuitionistic fuzzy TOPSIS method: A case study of China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(10):8121.

[18] FU J Y, ZANG C F, ZHANG J M. Economic and resource and environmental carrying capacity trade-off analysis in the Haihe River basin in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270(28):122271.

[19] 张锐, 刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(7):945-951.

ZHANG R, LIU Y Z. Evaluation on cultivated land ecological security based on the psr model and diagnosis of its obstacle indicators in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(7):945-951.

[20] 吴明艳, 晋王强, 杨斌, 等. 甘肃省资源环境承载力水平评价及耦合协调性研究[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(1):213-223.

WU M Y, JIN W Q, YANG B, et al. Evaluation and coupling coordination of resource and environment carrying capacity in Gansu, China[J]. *Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2023, 41(1):213-223.

[21] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12):

3913-3919.

SONG H M, XUE L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan city, Northwest China based on RSEI model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12):3913-3919.

[22] 刘智才, 徐涵秋, 李乐, 等. 基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(4): 728-739.

LIU Z C, XU H Q, LI L, et al. Ecological change in the Hangzhou area using the remote sensing based ecological index[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(4):728-739.

[23] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 277-284.

YANG J Y, WU T, PAN X Y, et al. Ecological quality assessment of Xiongan new area based on remote sensing ecological index[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 23(4): 728-739.

[24] 王晓雷, 高汇锋, 满卫东, 等. 基于遥感生态指数的迁安矿区生态环境质量变化研究[J]. 矿产综合利用, 2023, 44:1-20.

WANG X L, GAO H F, MAN W D, et al. Study on the change of ecological environment quality in Qian'an mining area based on remote sensing ecological index[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023, 44:1-20.

[25] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3):20-25.

LI S P, ZHAO H, WANG F Q, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):20-25.

[26] 谢庆. 基于 DPSR 模型的城市水安全评价与保障能力提升[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(7):41-47+56.

XIE Q. Urban water security assessment and improvement suggestions based on driver-pressure-state-response model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(7):41-47+56.

[27] 马新萍, 龙双双, 李玉婷, 等. 基于 DPSR 模型的陕西关中城市群生态安全预警评价研究[J]. 国土资源科技管理,

2020, 37(1):82-94.

MA X P, LONG S S, LI Y T, et al. On early warning and evaluation of ecological security in Guanzhong urban agglomeration based on DPSR model[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2020, 37(1):82-94.

[28] 张灿, 徐涵秋, 张好, 等. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估——以福建省长汀县为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6):917-928.

ZHANG C, XU H Q, ZHANG H, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of southeastern China: Changting County, Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6):917-928.

[29] 周超凡, 王毅勇, 田思婷, 等. 基于 DPSR 模型的宝鸡市水环境评价及障碍因子诊断[J]. 西安理工大学学报, 2023: 1-9.

ZHOU C F, WANG Y Y, TIAN S T, et al. Evaluation of water environment and diagnosis of obstacle factors in Baoji City based on DPSR modeling[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023: 1-9.

[30] 王同达, 曹锦雪, 赵永华, 等. 基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):1563-1572.

WANG T D, CAO J X, ZHAO Y H, et al. Evaluation of land ecosystem health in Shaanxi Province, Northwest China based on PSR Model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5):1563-1572.

[31] 吕一河, 傅微, 李婷, 等. 区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1):130-138.

LYU Y H, FU W, LI T, et al. Progress and prospects of research on integrated carrying capacity of regional resources and environment[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1):130-138.

[32] 丁国峰, 吕振福, 曹进成. 我国绿色矿山建设水平不均衡性分析及对策建议[J]. 矿产综合利用, 2023(5):166-173.

DING G F, LYU Z F, CAO J C. Analysis and suggestions on imbalance of development of green mines[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(5):166-173.

Study on the Ecological Environment Conditions and Carrying Capacity of a Mining-driven Region: Case of Zhushan County, Hubei Province

WU Yao¹, DAI Li², TANG Liang¹, YANG Fang¹, MAO Zhiqiang¹, WU Yang³

(1.College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3.Sichuan Tianshengyuan Environmental Services Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610037, China)

Abstract: The study applied the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) to the assessment of the ecological environment quality in Zhushan County, Hubei Province. By comparing the changes in the RSEI before and after the introduction of the mine density index, the impact of mine distribution on the ecological environment was analyzed. At the same time, the DPSR-TOPSIS coupling model was used to evaluate the ecological environment carrying capacity of Zhushan County from 2001 to 2021, and an index system covering 19 indicators was constructed. The index weights were calculated by combining the analytic hierarchy process and the entropy method, and the barrier function was introduced to identify the main constraints of the carrying capacity. The results showed that the ecological environment carrying capacity in the county generally showed an exponential growth, and the main obstacle factors affecting its change were: "total social fixed asset investment", "per capita GDP", "average annual rainfall", "average annual temperature", "population density" and "general public budget expenditure". The main factors driving the change of ecological environment carrying capacity can be summarized as "economic development", "population change", "natural conditions" and "policy response". After adding the mine density index, the area with medium or lower ecological environment quality in Zhushan County increased by 1.96%, among which the area of the "rather poor" and "poor" grades increased by 42.96 km² and 27.21 km² respectively. This study has certain significance in guiding the improvement of ecological environment and carrying capacity in Zhushan county.

Keywords: mine distribution; ecological environment; remote sensing ecological index; ecological environment carrying capacity; Zhushan county

////////////////////////////////////
(上接第 204 页)

Process Mineralogy Research on a Gold Concentrate in Shandong

LIU Jiaxing¹, WANG Panzhi², GAO Yun², HAN Baisui¹

(1.School of Minging Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan , Liaoning 114051, China; 2.Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou), Yantai, Shandong 261441, China)

Abstract: With the continuous exploitation of gold resources, the composition of ores has become increasingly complex, and the gold grade has gradually decreased, leading to an increase in the number of refractory gold ores. In such ores, gold is often embedded in minerals like pyrite and chalcopyrite in the form of micro-encapsulated particles, making it difficult to improve recovery rates through traditional beneficiation methods. A certain gold concentrate from Shandong Province faces challenges due to declining ore grade and complex mineral composition, increasing the difficulty of beneficiation. The study used chemical multi-element analysis and Automated Mineralogy and Chemical Imaging System (AMICS) to analyze the ore's mineral composition, gold occurrence state, particle size distribution, and mineral associations to identify the reasons for poor recoverability and provide a basis for optimizing the beneficiation process. The results showed that the gold content of the ore was 42.24 g/t, with gold mainly occurring as telluride gold-silver minerals encapsulated in pyrite and chalcopyrite. The telluride minerals are insoluble and react slowly with cyanide, leading to a low leaching rate. Gangue minerals such as quartz, illite, and orthoclase form associations with gold minerals, complicating the beneficiation process. Gold minerals are fine-grained, and traditional physical beneficiation methods cannot effectively recover gold. Pyrite has a high degree of dissociation, while chalcopyrite and gold minerals have lower dissociation, further limiting gold recovery. The complex encapsulation and association of gold minerals with other minerals is the main reason for the poor recoverability of this ore. The study suggests that chemical beneficiation methods be adopted to improve gold grade for this ore.

Keywords: automatic mineral identification and characterization system; gold concentrate; reasons for difficulty selection; process mineralogy; chemical beneficiation