

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.017

基于SOFM方法的安徽省矿产资源 开发主体功能区划研究

李臻¹, 陈义华¹, 陈从喜², 李政², 任升莲¹, 任芳语¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 自然资源部信息中心, 北京 100036)

摘要:文章选择安徽省主要的矿产资源分布区,构建矿产资源开发功能区划指标体系,并通过自组织特征映射(self-organizing feature map, SOFM)网络方法对指标数据进行聚类,根据各聚类结果的区域特征,对安徽省矿产资源开发功能区进行研究。结果表明:安徽省矿产资源分布显著集中,矿产资源富集区主要分布在皖江及皖北地区;安徽省整体生态环境较好,研究区内80.77%的县区生态环境适宜进行适度开发;矿产资源较丰富的县区内生态环境适宜开发,而生态环境指数较高的县区矿产资源匮乏,表明安徽省矿产资源开发与生态保护不存在根本冲突。研究结果解释了安徽省矿产资源空间分布规律,可为分区制定差别化管理政策提供理论依据,对安徽省矿产资源可持续发展规划有一定的参考价值。

关键词:矿产资源开发;主体功能区划;自组织特征映射(SOFM)网络;空间开发格局

中图分类号:F205 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0111-07

Research on major function oriented zoning of mineral resources development in Anhui Province based on SOFM

LI Zhen¹, CHEN Yihua¹, CHEN Congxi², LI Zheng², REN Shenglian¹, REN Fangyu¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Information Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100036, China)

Abstract: This paper selects the main distribution areas of mineral resources in Anhui Province, constructs the index system of functional zoning of mineral resources development, clusters the index data by self-organizing feature map(SOFM), and studies the functional zones of mineral resources development in Anhui Province according to the regional characteristics of each clustering result. The results show that the distribution of mineral resources in Anhui Province is significantly concentrated, and the mineral resource-rich areas are mainly distributed in Wanjiang and northern Anhui Province. The overall ecological environment of Anhui Province is great, and 80.77% of the ecological environment in counties in the study area are suitable for appropriate development. The ecological environment in counties with rich mineral resources is suitable for development, while the mineral resources in counties with high ecological environment index are scarce, indicating that there is no fundamental conflict between mineral resources development and ecological protection in Anhui Province. The major function oriented zoning of mineral resources not only explains the spatial distribution law of mineral resources in Anhui Province, provides theoretical basis for zoning and formulating differentiated man-

收稿日期:2021-09-08;修回日期:2021-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72074198);自然资源部部门预算资助项目(121101000000180044)

作者简介:李臻(1997—),女,安徽肥东人,合肥工业大学硕士生;

陈义华(1973—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学讲师,通信作者,E-mail:yihuach@163.com;

陈从喜(1963—),男,安徽萧县人,博士,自然资源部信息中心研究员;

任升莲(1963—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

agement policies, but also has a certain reference value for the planning of sustainable development of mineral resources in Anhui Province.

Key words: mineral resources development; major function oriented zoning; self-organizing feature map(SOFM) network; spatial development pattern

0 引言

目前对于矿产资源可持续发展方面的研究,主要集中在矿产资源开发主体功能区划研究^[1]、基于资源承载力的地域开发研究^[2]、矿产资源型城市的产业转型升级^[3]、矿业经济区发展^[4]等方面。其中矿产资源开发主体功能区划研究对矿产资源开发空间格局优化、促进经济与资源环境协调发展具有重大意义^[5]。

在 20 世纪 80 年代,研究人员开始将资源因素引入区划研究中,综合区划能更好地反映区域的实际情况,更有效地促进区域经济发展^[6]。矿产区划与国土、生态、水资源、产业布局区划工作等形成耦合,能够为国民经济宏观布局提供重要基础信息^[7]。文献^[8-9]对矿产资源综合区划的概念、内涵、特点、区划体系及划分方法等内容进行系统梳理,使矿产资源综合区划研究形成了基本的研究体系。目前,很多研究者开展矿产资源区划研究,并将研究成果应用到资源合理开发规划中^[10-11]。

矿产资源开发主体功能区划是指以有矿产资源分布的地域为研究对象,通过对影响矿产资源开发的资源、环境、经济、社会等要素进行综合评价,计算出矿产资源开发的适宜性,确定不同地区矿产资源开发的主导功能,从而实现矿产资源的可持续发展和生态文明建设^[12]。

安徽省矿产资源丰富,主要矿种储量大,多种重要矿产储量在全国占重要位置^[4]。丰富的矿产资源为安徽省经济发展提供了有利条件,矿业经济成为安徽省重要的支柱型产业之一。本文对安徽省矿产资源开发主体功能区划进行研究,以期对安徽省矿产资源合理开发,推动皖江、皖北、皖南和皖西四大板块协调发展提供基础数据。

1 研究区概况、研究方法与数据

1.1 研究区概况

本文以安徽省 8 种主要矿产分布地区为研究对象,研究区面积为 $7.894 \times 10^4 \text{ km}^2$,占安徽省总面积($14.013 \times 10^4 \text{ km}^2$)的 56.33%,在皖北、皖江、皖南、皖西均有分布。研究区涉及 16 个市,

共 52 个县区,见表 1 所列。

表 1 研究区范围

地区	市	县区
皖北	淮北	杜集区、相山区、烈山区、濉溪县
	宿州	埇桥区、萧县
	亳州	涡阳县、蒙城县、利辛县
	阜阳	颍东区、颍上县
	淮南	八公山区、潘集区、谢家集区
	蚌埠	禹会区、蚌山区、五河县
皖江	合肥	肥东县、巢湖市、庐江县
	滁州	凤阳县、全椒县、琅琊区、天长市、明光市
	安庆	宜秀区、怀宁县、宿松县、枞阳县
	马鞍山	雨山区、当涂县
	芜湖	鸠江区、无为县、繁昌县、南陵县
	铜陵	铜陵县、郊区、狮子山区、铜官山区
	池州	东至县、青阳县、贵池区
	宣城	宣州区、泾县、绩溪县、宁国市
皖南	黄山	歙县、休宁县、祁门县
皖西	六安	霍邱县、金寨县、霍山县

注:2015 年后狮子山区与铜官山区合并为铜官区;枞阳县划归铜陵。

1.2 研究方法

目前,主体功能区划的研究方法主要有层次分析法、引力模型法、综合指数法等,其中大多数为监督学习方法,主观性较强。随着人工神经网络的发展,其在地理模式识别、地理过程模拟及复杂地理系统的优化计算等方面表现出明显的优势。目前,人工神经网络有自组织特征映射(self-organizing feature map, SOFM)网络、多层后向传播(back propagation, BP)神经网络、径向基神经网络等多种模型,而 SOFM 模型在处理影响因素较多的复杂情况时,具有自组织、自学习的优势,能够很好地解决方案决策问题。因此,本文用 SOFM 方法对构建的指标数据进行综合聚类分析。

SOFM 方法是 1981 年由神经网络专家 Kohonen 提出的^[13],属于竞争性网络学习方法,能够对输入数据进行自组织学习,实现输入神经元的自动分类。该方法通过模拟脑神经系统 SOFM 功能,进行无监督的网络训练,在地理和生态的聚类分析研究中得到广泛应用,是一种很好的无监督分类方法。

SOFM 网络计算原理为:将外部输入数据分门别类地放在不同区域,特征相似的输入数据较靠近,差异较大的数据较分离。SOFM 网络算法结构如图 1 所示。图 1 中: r 为输入矢量数; s 为输出神经元数; W 为网络权值矩阵; P 为输入矢量; n 为表示邻域大小的量; C 为输出向量; g 为获胜神经元。

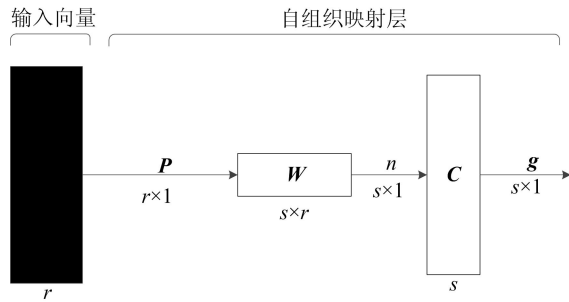


图 1 SOFM 网络算法结构

SOFM 网络的学习步骤^[14]如下:

(1) 初始化。首先将输入矢量 P_k 及网络权值 W_{ij} (第 j 行第 i 个值) 赋 $0 \sim 1$ 的随机数,并进行归一化;然后确定初始学习率 $\eta_{(0)}$ ($0 < \eta_{(0)} < 1$) 及初始邻域 $N_g(0)$ 。邻域 $N_g(t)$ 是指以获胜神经元 g 为中心,包含其他若干神经元的区域范围,它随着迭代次数的增加而单调递减。

(2) 提供一个学习模式,计算出 P_k 与 W_j 之间的最小欧氏距离,确定获胜神经元 g 。

(3) 修正输入层神经元与竞争层内所有神经元之间的权值,选取另一学习模式,返回步骤(2),得出新学习率 $\eta(t)$ 及邻域 $N_g(t)$ 。

(4) 确定总的学习次数 T ,令 $t = t + 1$,直到 $t = T$,学习结束。

1.3 数据来源

安徽省矿产资源数据来自自然资源部信息中心固体矿产采矿权数据,基本属性包括查明资源储量、设计开采规模等;交通数据通过全国地理信息资源目录服务系统获取;各县区生态数据来自中国生态系统评估与生态安全格局数据库;各县区水资源数据、三大产业结构数据均来自 2019 年安徽省统计年鉴^[15]。

1.4 指标体系构建与数据计算

1.4.1 指标体系构建

由于矿产资源开发常常受到资源环境和社会经济等多种因素的综合影响,矿产资源开发主体功能区划研究要有机地结合当地自然条件和社会经济发展状况,本文综合考虑资源环境数据与社

会经济数据的可获得性,选择矿产资源丰度、生态环境指数、交通优势度、水资源丰缺度、工业化水平等因素为准则层,构建指标体系,如图 2 所列。

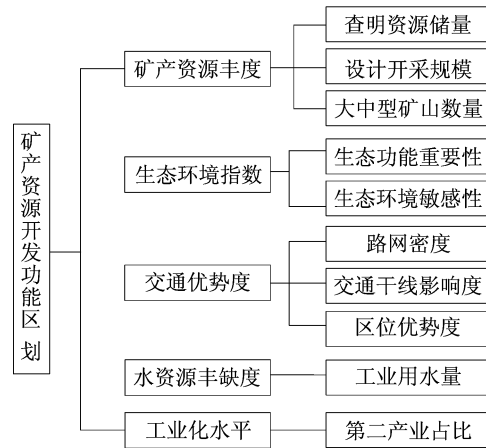


图 2 矿产资源开发功能区划指标体系

1.4.2 矿产资源丰度计算方法

矿产资源是区域勘察开发的前提和基础,其丰度是影响矿产资源开发主体功能区划的重要因素之一。选择安徽省 2006—2018 年矿产资源较多的煤、铁、铜、铅、锌、金、硫铁、磷 8 种矿产资源为主要矿种,计算其丰度;以查明资源储量、设计开采规模及大中型矿山数量 3 项指标计算安徽省矿产资源的丰富度^[16]。

(1) 查明资源储量。各地区所拥有的矿产资源种类不一,储量也不同,对各类矿产资源数据首先进行极差标准化^[17],再对各县区各类矿产资源进行综合,计算公式为:

$$F_{ij} = \sum_{j=1}^v Q_j X_{ij} \quad (1)$$

$$X_i' = \text{sum}(F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{ij}) \quad (2)$$

其中: F_{ij} 为 i 县区 j 类矿种查明资源储量归一化后的数值; $i = 1, 2, \dots, u$; $j = 1, 2, \dots, v$; u 为县区数; v 为矿种的数量; Q_j 为 j 类矿种的权重; X_{ij} 为 i 县区 j 类矿种储量无量纲化后的数值; X_i' 为 i 县区多矿种查明资源储量指数。

(2) 设计开采规模。首先对县区内各类矿产资源设计开采年限取平均值,再对各类矿产资源开采规模分别进行无量纲化处理,最后综合各类矿产资源的标准化值进行汇总,计算方法与矿产资源储量计算方法一致。

(3) 大中型矿山数量。根据文献^[18],确定安徽省各县区大中型矿山数量,其中矿山规模划分见表 2 所列。

确定上述 3 项指标后,对其赋权重,然后求和计算矿产资源丰度值,再利用地理信息系统(geographic information system, GIS)自然间断点分级法,将矿产资源的丰度分为匮乏、一般、较丰富、丰富 4 个等级。

表 2 矿山生产建设规模分类 单位:10⁴ t/a

矿种 类别	最低开 采规模	矿山生产建设规模			备注
		大型	中型	小型	
煤(地下)	9.0	≥120	120~45	<45	原煤
煤(露天)	9.0	≥400	40~100	<100	原煤
铁(地下)	3.0	≥100	100~30	<30	矿石
铁(露天)	5.0	≥200	200~60	<60	矿石
铜	3.0	≥100	100~30	<30	矿石
铅	3.0	≥100	100~30	<30	矿石
锌	3.0	≥100	100~30	<30	矿石
金(岩金)	1.5	≥15	15~6	<6	矿石
硫铁	5.0	≥50	50~20	<20	矿石
磷	10.0	≥100	100~30	<30	矿石

1.4.3 生态环境指数计算方法

在生态条件分级中,通过生态功能重要性数据和生态环境敏感性数据进行评价。利用 GIS 的空间分析技术,提取安徽省各县区生态功能重要性及生态环境敏感性最大等级作为该区的生态等级,生态环境指数计算公式^[19]为:

$$K = \max(M_i, N_i) \quad (3)$$

$$I_i = \frac{S_{K=9}}{S_i} \quad (4)$$

其中: K 为 i 县区生态重要性与生态环境敏感性中较大的等级; M_i 为 i 县区生态重要性等级; N_i 为 i 县区生态环境敏感性等级; I_i 为 i 县区生态环境指数; $S_{K=9}$ 为 i 县区中生态等级为 9 的面积; S_i 为 i 县区面积。根据生态环境指数 0.3、0.5、0.8 将地区生态环境重要程度划分为一般、中等、高、极高 4 个等级。

1.4.4 交通优势度

交通运输条件直接影响矿山生产的运输成本,矿产品的运输总量大、运输距离长、运输成本高,必须依靠便利的交通设施将矿产资源优势转化为经济优势。采用路网密度、交通干线影响度和区位优势度 3 项指标计算交通优势度^[20]。

(1) 路网密度,即单位面积内县区交通干线总长,计算公式为:

$$D_i = L_i / S_i \quad (5)$$

其中: D_i 为 i 县区的路网密度; L_i 为 i 县区的交通干线总长。

(2) 交通干线影响度。该指标依据交通设施的技术、经济特征,按照专家打分,采用分类赋值的方法进行评价。

(3) 区位优势度。采用最短距离模型计算各县区到安徽省枢纽城市(合肥市)的最短距离,距离越短,表示区位优势度越高。

将上述 3 项指标按一定方法进行标准化处理,根据一致化原则对 3 项指标赋权重,然后求和计算各县区的交通优势度,再利用 GIS 自然间断点分级法分为低、一般、较高、高 4 个等级。

1.4.5 水资源丰缺度

矿产资源开发利用各个环节都离不开水资源,水资源的丰富程度对矿产资源产业发展具有决定性的作用^[21]。根据 GIS 自然间断点分级法对各县区的工业用水量进行分级评价,分为缺乏、较缺乏、基本不缺水、不缺水 4 个等级。

1.4.6 工业化水平

第二产业占比反映矿产资源开采强度,在一定程度上反映地区对工业的依赖程度,从侧面反映了对矿产资源开发的需求程度,本文用其评价县区的工业化水平,同样利用 GIS 自然间断点分级法分为低、一般、较高、高 4 个等级。

2 计算结果及功能区划分析

基于上述计算、分析,首先进行单因素结果分析,再对各单因素数据综合分析,从而明确各县区的主体功能区类别。

2.1 单因素结果分析

安徽省矿产资源开发 5 类指标评价结果如图 3 所示。

由图 3a 可知,矿产资源丰富及较丰富地区主要分布在皖江经济带和皖北部分地区,皖南、皖西、皖中地区矿产资源较为贫乏。

由图 3b 可知,皖北、皖江地区生态环境指数较低,可以进行适度开发,而皖南、皖西地区生态环境指数较高,不利于矿产资源开发。

由图 3c 可知,安徽省交通优势度总体较高,皖北、皖南部分偏远地区交通优势度相对较弱。

由图 3d 可知,水资源总体上表现为南、北方地区工业用水较为缺乏,皖江大部分地区水资源情况较好,工业用水量较大。

由图 3e 可知,皖北部分地区以农业为主导产业,第二产业占比较低,对矿产资源开发需求不高,而皖江地区第二产业占比较高,工业是经济增长的主要动力,对矿产资源开发需求度较高。

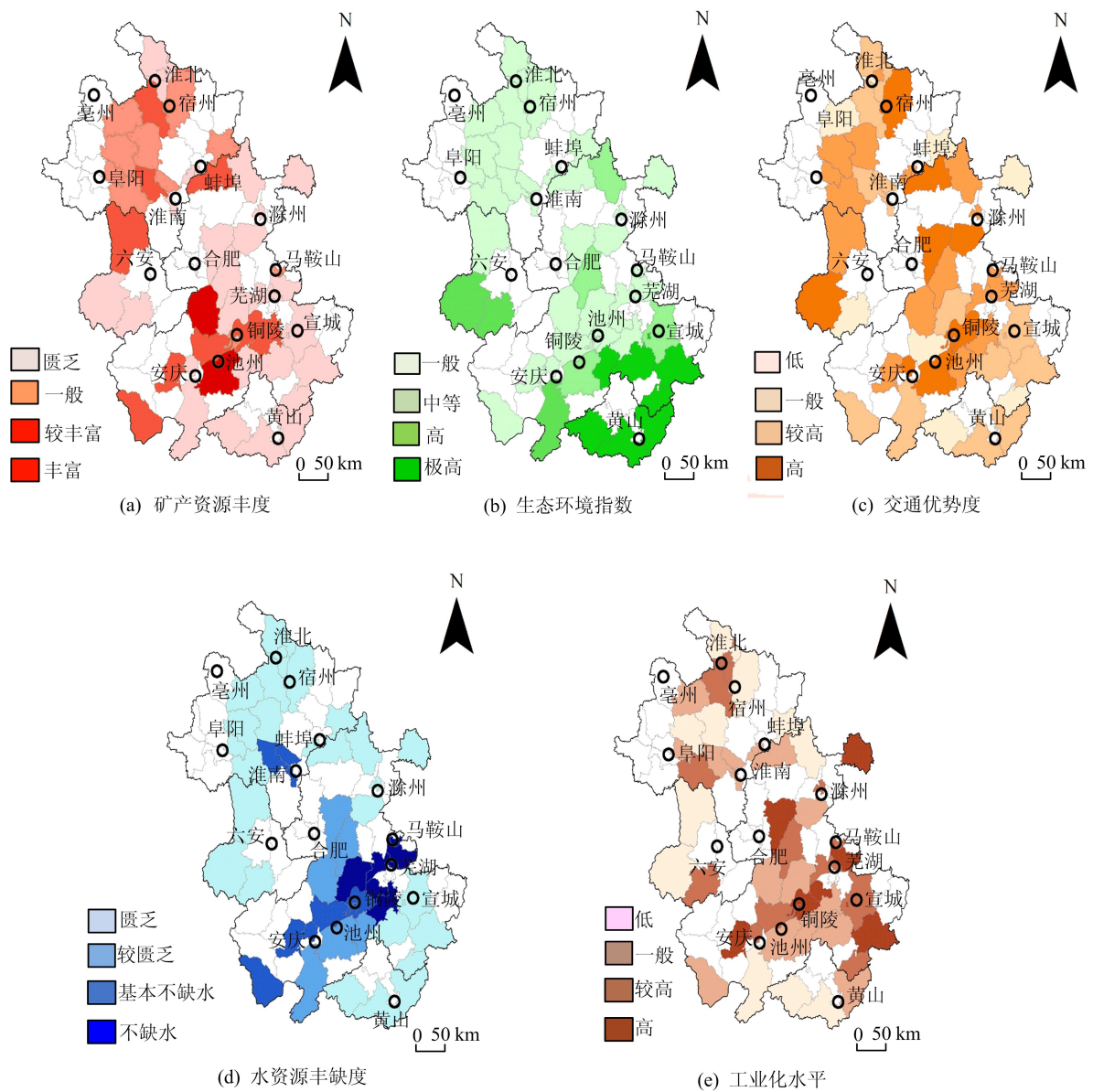


图3 安徽省矿产资源开发5类指标评价结果

2.2 综合区划分析

在单因素分析的基础上,通过SOFM网络对52个县区进行聚类分析。

(1) 在MATLAB平台下,将2.1节预处理得到的指标数据(52×5维的数据)作为输入层,将输出层即类别数设为4,得到I、II、III、IV 4种县区类型。

(2) 对4种类型县区的矿产资源丰度、生态环境指数、交通优势度、水资源丰缺度及工业化水平5类指标归一化的特征值进行统计,结果见表3所列。

I型县区矿产资源最为丰富,生态环境指数低,适宜进行矿产资源开发,区域内交通优势度较高,工业用水量较丰富,第二产业占比较高,总体

条件适合矿产资源大规模开发,判别为重点开发区。

表3 4种类型县区5类指标特征值统计结果

评价指标	县区类型				平均值
	I (10)	II (8)	III (24)	IV (10)	
矿产资源丰度	0.919	0.157	0.170	0.069	0.293
生态环境指数	0.180	0.070	0.075	0.875	0.248
交通优势度	0.563	0.623	0.396	0.307	0.446
水资源丰缺度	0.295	0.618	0.123	0.070	0.222
工业化水平	0.483	0.535	0.460	0.440	0.472

注:括号中数值表示县区数。

II型县区矿产资源丰度一般,生态环境指数低,区域内交通优势度高,工业用水量高且第二产业占比高,表明该区域矿产资源开发过度,需要进行保护性开发,将II型县区判别为一般开发区。

Ⅲ型县区矿产资源丰度一般,生态环境指数低,区域内交通优势度不高,工业用水量较少,第二产业占比较低,表明该区域矿产资源开发程度不高,基础设施条件欠缺,将Ⅲ型县区判为限制开发区。

Ⅳ型县区矿产资源匮乏,生态环境指数极高,不适宜进行矿产资源开发,区域内交通优势度低,工业用水量少,第二产业占比低。该区域生态环境影响突出,且矿产资源匮乏,将Ⅳ型判为禁止开发区。

(3) 根据判别结果,通过 GIS 可视化方法对主体功能区空间分布进行显示,如图 4 所示。从图 4 可以看出,矿产资源开发主体功能区划表现出较高的空间集聚性,空间分异主要体现在南、北方的差异,可以概括为皖北限制开发区、皖江重点开发区、皖西禁止开发区、皖南禁止开发区。

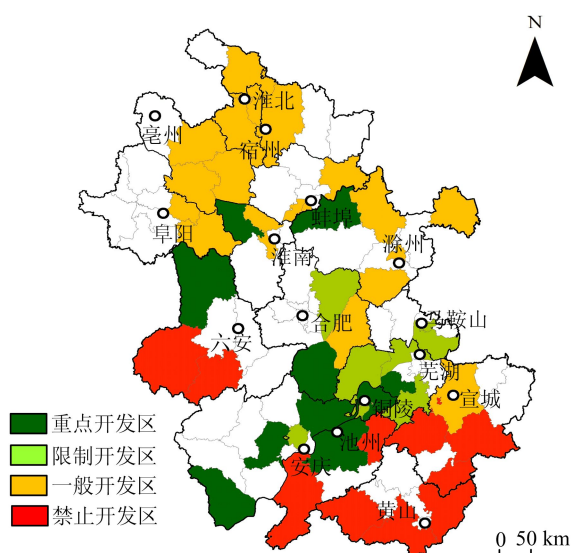


图 4 安徽省矿产资源开发主体功能区划空间分布

3 分析结果及主体功能区划建议

上述分析结果表明,安徽省 52 个县区的矿产资源开发主体功能区划表现出较高的异质性,本文据此对安徽省今后矿产资源开发及矿业发展提出以下建议。

(1) 重点开发区。安徽省的重点开发区共有 10 个县区,主要分布在安徽省皖江经济带。区域内矿产资源丰富,开发支撑条件较好,工业化水平有待提高。建议在重点开发区加强基础地质矿产资源勘探投入,提高地区内矿产资源开发规模,增强产业集聚和人口集聚,实现地区的规模化生产开发,促进资源优势转换为经济优势;在重点开发

区发展深加工产业,通过适当延长产业链提高产品的附加值,优化供给侧矿产品结构性改革,逐步形成矿产资源加工基地,发挥第二产业对经济的带动作用。

(2) 一般开发区。安徽省的一般开发区共有 8 个县区,主要分布在重点开发区周边。在一般开发区,工业化发展水平较高,要做好科学规划,控制矿产资源开发强度,做好矿产资源战略储备,同时利用区位优势,发挥辐射带动作用,促进周边重点开发区矿产资源开发的规模化发展。

(3) 限制开发区。安徽省的限制开发区共有 24 个县区,是功能区划的主体部分,主要分布在皖北、皖中部分地区。限制开发区的主要限制因素为矿产资源丰度,其次为矿产资源开发的外部支撑条件。为了实现矿产资源的可持续开发利用,需要严格控制矿产资源的开采规模,严格执行矿山企业市场监管制度。皖北地区是我国的农产品基地,农产品资源丰富,但区域内水资源及交通优势不突出,因此需要加强水利、交通基础设施建设,以促进农产品提质增效,从而带动地区经济发展。

(4) 禁止开发区。安徽省的禁止开发区共有 10 个县区,主要分布在皖西、皖南山区,区域内生态功能重要性及生态环境敏感性程度高,且矿产资源匮乏,属于生态保护区。应当根据地区特色发展经济,提高第一、第三产业发展水平。

4 结 论

(1) 安徽省矿产资源分布显著集中,矿产资源丰富区主要分布在皖北、皖江城市带。

(2) 安徽省整体上生态环境较好,研究区内 80.77% 的县区生态环境适宜进行适度开发,生态保护需求较高的县区占 19.23%,主要分布在皖南、皖西山区。

(3) 研究区内矿产资源富集区主要分布在 I、II、III 型县区,其生态环境指数低,矿产资源开发与生态环境保护不存在根本冲突;整体开布局较为合理,需要根据地区主体功能定位调整区域发展重心。

目前,安徽省正处于矿业高质量发展的关键阶段,矿产资源开发主体功能区的划分对实现矿产资源可持续发展具有重要意义。本文依据矿产资源开发主体功能区划结果提出差别化管理建议,对安徽省矿产资源可持续发展规划具有一定的参考价值。

[参 考 文 献]

- [1] 周璞,侯华丽,刘天科. 我国矿产资源综合区划模型与实证研究[J]. 中国矿业,2016,25(2):115-119,124.
- [2] 师跃华. 矿产资源型城市综合承载力评估及时空分异研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [3] 梁元,罗德江,骆毓燕,等. 资源型城市县域矿业经济区评价指标体系及方法[J]. 中国矿业,2017,26(12):134-138.
- [4] 胡小平. 我国矿产资源经济区划与产业布局[J]. 地域研究与开发,1998,17(2):50-56.
- [5] 安徽省人民政府. 安徽省主体功能区规划(2016-2020)[EB/OL]. (2013-12-04)[2021-07-10]. <http://www.ah.gov.cn/public/1681/96760.html>.
- [6] 吴绍洪. 综合区划的初步设想:以柴达木盆地为例[J]. 地理研究,1998,17(4):32-39.
- [7] 何贤杰. 矿产区划,夯实找矿基础[N]. 中国国土资源报,2012-06-06(7).
- [8] 侯华丽,吴尚昆,张玉韩,等. 对我国开展矿产资源综合区划相关问题的思考[J]. 国土资源科技管理,2015,32(3):78-83.
- [9] 侯华丽. 我国主要固体矿产资源开发功能区划研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- [10] 马吉宇. 基于聚类分析的我国铁矿资源勘查开发基地划分研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- [11] 李雯燕,米文宝. 地域主体功能区划研究综述与分析[J]. 经济地理,2008,28(3):357-361.
- [12] 侯华丽,张玉韩. 我国矿产资源开发功能区划实证研究[J]. 中国国土资源经济,2016,29(5):12-17,49.
- [13] KOHONEN T. Self-organization and associated memory [M]. Berlin:Springer-Verlag,1987:1-65.
- [14] 吴聘奇,黄民生. SOM网络在福建省城市职能分类中的应用[J]. 经济地理,2005,25(1):68-70,83.
- [15] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴:2019[M]. 北京:中国统计出版社,2019:16-24.
- [16] 侯华丽,张玉韩,吴尚昆,等. 基于多要素的中国固体矿产资源丰度评价[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(2):240-244.
- [17] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:448-456.
- [18] 国土资源部. 矿产资源登记统计管理办法[EB/OL]. (2004-01-09)[2021-07-10]. <http://www.gov.cn/gongbao/content/2004/content-62948.html>.
- [19] 沈明,沈镭,钟帅,等. 基于生态敏感条件的中国资源型城市去产能空间格局优化[J]. 资源科学,2016,38(10):1962-1974.
- [20] 金凤君,王成金,李秀伟. 中国区域交通优势的甄别方法及应用分析[J]. 地理学报,2008,63(8):787-798.
- [21] 张玉韩,吴尚昆,董延涛. 长江经济带矿产资源开发空间格局优化研究[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(4):839-852.

(责任编辑 张淑艳)

(上接第 95 页)

线逐渐逼近于无噪声曲线,损伤识别效果也越来越好。基于车-桥耦合振动理论得到的位移响应信噪比较高,因此本文的方法具有实际意义,后续需要加强降噪研究。

[参 考 文 献]

- [1] YANG Y B, LIN C W, YAU J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [C]//WANG C M, LIU G R, ANG K K. Proceedings of the Second International Conference on Structural Stability and Dynamics. [S. l.]: World Scientific Publishing Company, 2002:172-180.
- [2] SALAWU O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review[J]. Engineering Structures, 1997,19:718-723.
- [3] MALEKJAFARIAN A, OBRIEN E J. Identification of bridge mode shapes using short time frequency domain decomposition of the responses measured in a passing vehicle [J]. Engineering Structures,2014,81:386-397.
- [4] LI Z H, AU F T K. Damage detection of bridges using response of vehicle considering road surface roughness[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015,15(3):1450057-1-1450057-28.
- [5] 王树栋,卜建清,娄国充. 基于过桥汽车动力响应的桥梁损伤识别[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008,28(3):67-71,104.
- [6] NGUYEN K V, TRAN H T. Multi-cracks detection of a beam-like structure based on the on-vehicle vibration signal and wavelet analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010,329:4455-4465.
- [7] LI Z H, AU F T K. Damage detection of a continuous bridge from response of a moving vehicle[J]. Shock and Vibration, 2014,2014:146802.
- [8] 袁家冬. 变截面连续梁桥车桥耦合振动非线性分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
- [9] 战家旺,夏禾,陈上有. 基于车激响应和灵敏度分析的桥梁结构损伤识别方法研究[J]. 工程力学,2011,28(11):38-44.
- [10] SIMSEK M, KOCATÜRK T. Nonlinear dynamic analysis of an eccentrically prestressed damped beam under a concentrated moving harmonic load[J]. Journal of Sound and Vibration,2009,320:235-253.

(责任编辑 张淑艳)