宁正-彬长煤矿区地应力场分布规律及其复杂性评价方法

程香港[1],乔　伟[1],窦林名[2],黄艳利[2],贺　虎[1],巩思园[2],冯培超[1],张金魁[1,3],李永元[4]
(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州　221116;2. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州　221116;
3. 陕西正通煤业有限责任公司,陕西 咸阳　7136004;4. 华能煤炭技术研究有限公司,北京　100070)

摘要: 准确表征岩体赋存应力环境差异状态,评估煤矿区地应力场复杂性对煤炭资源开发以及地下工程设计具有重要作用和意义. 本文以宁正-彬长煤矿区为研究区,通过区域构造演化、震源机制解析和地应力实测分析,探究了宁正-彬长煤矿区现今构造应力格局和地应力场特征;基于主应力分解,提出了用于表征岩体赋存地应力环境差异的应力状态指数,选取煤层开采深度、最大水平主应力、围岩强度应力比和应力状态指数4个指标,构建了煤矿地应力场复杂性评价模型. 结果表明:宁正-彬长煤矿区震源机制类型多样,宏观应力场处于扭压兼挤压的构造应力作用,且具有围绕中间主应力滑移的性质. 实测水平主应力随着深度变化斜率明显高于我国煤矿平均水平,且以北东—南西向为主. 研究区胡家河煤矿、高家堡煤矿以及亭南煤矿部分测点应力状态指数在2.7以上,表明这些区域围岩应力差异性大. 研究区中部以及北部地应力场复杂性指数相对较高,局部在0.8以上. 南部及雅店煤矿附近区域总体在0.3以下,评价结果与研究区冲击地压显现实际情况基本一致.

关键词: 宁正-彬长煤矿区;地应力场;震源机制解;状态表征;复杂性
中图分类号: TD 167　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0499-15

Distribution characteristics and complexity evaluation method of in-situ stress field in the Ningzheng-Binchang coal mining area

CHENG Xianggang[1], QIAO Wei[1], DOU Linming[2], HUANG Yanli[2], HE Hu[1], GONG Siyuan[2], FENG Peichao[1], ZHANG Jinkui[1,3], LI Yongyuan[4]
(1. School of Resource and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Shaanxi Zhengtong; Coal Industry Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi 713600, China; 4. Huaneng Coal Technology Research;Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Accurately characterizing the spatial heterogeneity of rock mass stress environments and evaluating the tectonic-geomechanical coupling complexity of coal mine stress fields therefore exert

收稿日期: 2025-06-06　　**修回日期:** 2025-10-15　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250208
基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1004208);国家自然科学基金面上项目(42472334);中国博士后科学基金资助项目(2025M771774)
第一作者: 程香港(1997—),男,安徽省利辛县人,师资博士后. E-mail:xgcheng@cumt.edu.cn
通信作者: 乔　伟(1984—),男,山东省蒙阴县人,教授,博士生导师. E-mail: qiaowei@cumt.edu.cn
引用格式: 程香港,乔　伟,窦林名,等. 宁正-彬长煤矿区地应力场分布规律及其复杂性评价方法[J]. 中国矿业大学学报,2026,55(2):499-513.
CHENG Xianggang,QIAO Wei,DOU Linming,et al. Distribution characteristics and complexity evaluation method of in-situ stress field in the Ningzheng-Binchang coal mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 499-513.

critical significance for both coal resource exploitation optimization and disaster-resilient underground infrastructure design. Ningzheng-Binchang mining area was taken as the study area, explores the current tectonic stress pattern and the characteristics of the in-situ stress field through the regional tectonic evolution analysis, focal mechanism interpretation, and in-situ stress test. Based on the decomposition of principal stresses and considering the three-dimensional stress state of rock masses, a stress state index used to characterize the differences in the in-situ stress environment of rock masses was proposed. By selecting four indicators, namely the mining depth of the coal seam, the maximum horizontal principal stress, the strength-stress ratio of the surrounding rock, and the in-situ stress difference parameter, an evaluation model for the complexity of the in-situ stress field of coal mine was constructed. The results show that the focal mechanisms types of study area are diverse and the macroscopic stress field is under the action of tectonic stress with torsion-compression and compression, with the property of slipping around the intermediate principal stress. Moreover, the fitting curves of the horizontal maximum principal stress with the change of depth significantly exceeds the national average level of coal mines in China, and is mainly in the near northeast-southwest direction. The stress state index at some measurement points in Hujiahe coal mine, Gaojiapu coal mine, and Tingnan coal mine exceeds 2.7, indicating significant differences in surrounding rock stress in these regions. The complexity index of the in-situ stress field in the central and northern parts of the study area is relatively high, with local values above 0.8. The overall area near the southern and Yadian coal mines is below 0.3, and the evaluation results are basically consistent with the actual situation of rock burst in the study area.

Key words: Ningzheng-Binchang mining area; in-situ stress field; seismic source mechanism analysis; state representation; degree of complexity

随着我国煤炭资源开采强度和深度的逐渐增加,深部开采常态化以及高产高效工作面的主流化,由采动诱发的冲击地压灾害活动性强、频次高,使得现有认知体系下的防冲压力愈发显著[1].在诱发冲击地压的各种因素中地应力是关键因素之一,因此,准确掌握煤矿区地应力状态对于防治冲击地压至关重要[2-3].

近年来,专家学者们对地应力测量方法和技术进行了有益的探索和研究[4-5],目前地应力测量方法多达20多种,主要包括应力恢复法、应力解除法、水力压裂法、声发射法和地球物理探测法等.常用的测量方法主要为水压致裂法、应力解除法和声发射法[6].其中,水压致裂法主要通过向钻孔内注入高压水,使孔壁岩体产生水压裂隙,利用裂隙扩展时的压力数据反算地应力.应力解除法通过钻孔或切割去除测点周围部分岩体,使测点处岩体因"应力解除"而发生弹性回弹变形,利用变形数据反算地应力.声发射法则通过判断岩体Kaiser效应点,进而获得原位岩石的地应力.文献[7]基于钻孔围岩力学,提出了水压致裂法三维地应力测量方法,修正了水压致裂单孔平面测量的局限性.文献[8]开发了一套便携式煤岩体原位测试系统,能够实现钻孔孔径为50 mm快速大规模水压致裂地应力测试.文献[9]优化了应力解除法在垂直深孔中应用,提出了一种垂直深孔的地应力快速测试技术,并在金山店铁矿进行了现场实践.文献[3]基于静压传递原理,研发了一套三向应力监测系统,并在徐庄煤矿7335工作面进行了应力传感性能测试.在地应力测试技术的基础上,许多专家学者依据测量结果进行了分析研究和讨论,文献[10]采用水力压裂法对沁水盆地南部现今地应力场进行了测量,并研究了地应力场对煤储层水力压裂裂缝扩展的影响.文献[11]采用小孔径水压致裂地应力测量法对西山矿区进行了地应力测量,研究了西山矿区地应力场分布规律,探究了岩性对矿区地应力场分布规律的影响.文献[12]统计分析了黄陇侏罗纪煤田现代应力场特征,阐述了地应力与煤储层压力耦合关系及其对煤层气开发和安全生产的影响.文献[13]采用小孔径水压致裂地应力测量法对阳泉矿区煤矿主采煤层地应力进行了实测,分析了阳泉矿区地应力场类型和分布规律.文献[14]针对首山一矿进行了地应力测试,分析了埋深、岩性和地质构造

对地应力的影响，确定了地质构造是影响首山一矿地应力分布的主控因素，褶皱形态控制地应力的水平应力分布．

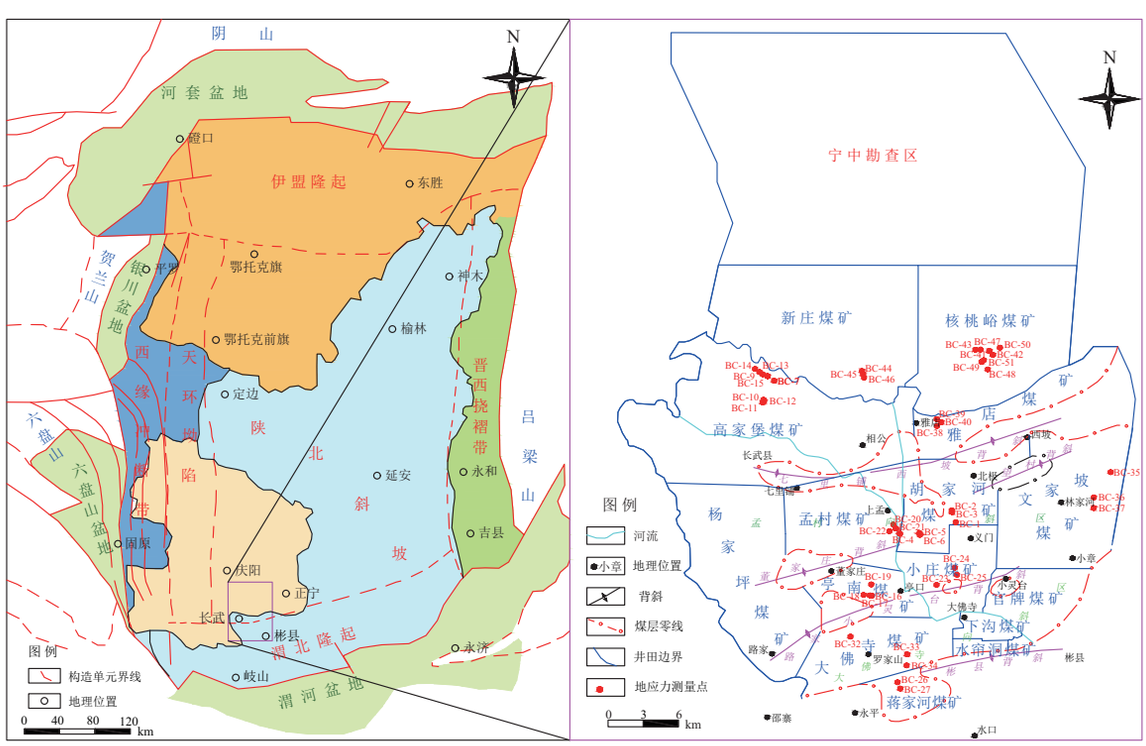
准确判别和评估地应力场宏观状态是工程设计需求性问题，文献[15]提出了3个主应力与3种主要断层类型之间关系的理论，将地应力场划分为正断型应力机制、走滑型应力机制以及逆断型应力机制．文献[16]依据3个主应力的量值关系，将地应力场划分为大地静力场、大地动力场和准静水压力场3种类型．此外，我国现行规范条文中[17-19]，均进行了岩体地应力场评估，但由于地应力场的复杂性存在模糊性，很难明确界定地应力场是“简单”还是“复杂”．文献[20]以最大主应力大小和分布作为主要的指标，并参考最小主应力和最大剪应力的分布，进行了贵州构造应力分区划分．《防治煤矿冲击地压细则》中综合指数法[21]按照开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比γ的大小，以10%，20%和30%为阈值，将冲击地压地应力场分成了4种等级．以往的研究常用最大主应力大小和分布作为表征岩体赋存应力环境的重要指标，忽略了岩体三维地应力状态对岩石破裂变形和矿井地质动力灾害触发机制的影响．因此，准确表征岩体赋存应力环境差异状态，评价煤矿地应力场复杂性，对煤炭资源开发以及井下防冲工程设计具有重要价值和意义．

随着宁正-彬长煤矿区深部资源大规模开发，冲击地压等动力灾害事故频发，区内胡家河煤矿、亭南煤矿、孟村煤矿、高家堡煤矿等均发生了不同程度冲击地压．本文以宁正-彬长煤矿区为研究区，通过区域构造演化分析、震源机制解分析，探究了宁正-彬长煤矿区现今构造应力格局．结合煤矿51处测点的地应力测量结果，分析宁正-彬长煤矿区现今应力场分布特征．通过主应力分解，提出用于表征岩体赋存应力环境的应力状态指数，进行了地应力状态参数对比讨论，并选取煤矿地应力场复杂性评价指标，构建煤矿地应力场复杂性评价模型，以期为煤炭资源开发以及井下防冲卸压工程设计提供重要补充资料．

1　区域地质概况及构造分析

1.1　研究区工程地质条件

宁正-彬长煤矿区位于鄂尔多斯盆地西南部黄陇侏罗纪煤田中部，行政区划属陕西省咸阳市和甘肃省庆阳市管辖，矿区规划面积1 677.73 km^2，煤炭资源储量为149.91×10^8 t．目前，区内生产矿井有核桃峪矿、新庄矿、胡家河矿、高家堡矿、亭南矿等共计15对生产矿井，宁正-彬长煤矿区区域位置及井田分布见图1(图中BC-1～BC-51为矿井序号)．



(a) 区域位置　　(b) 井田分布

图1　宁正-彬长煤矿区区域位置及井田分布

Fig. 1　Regional location and coal mine field distribution of the Ningzheng-Binchang mining area

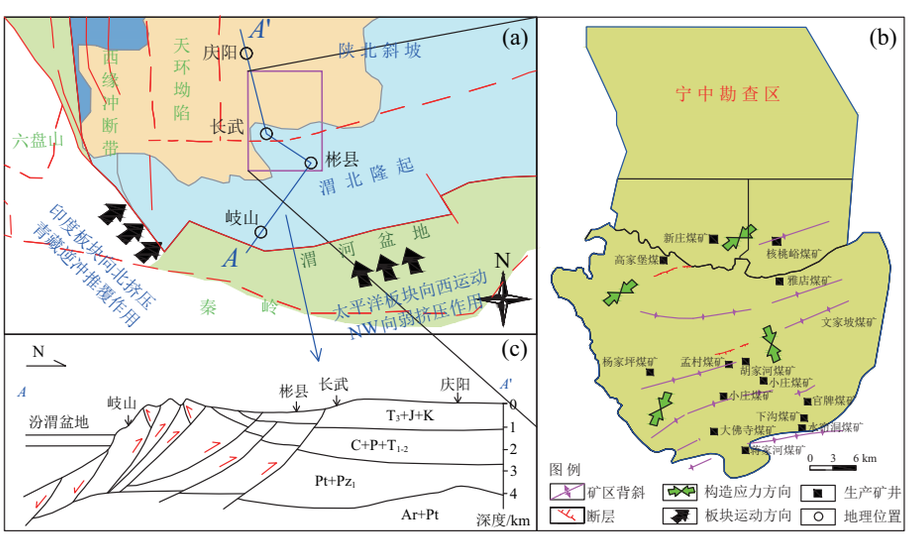
宁正-彬长煤矿区含煤地层为侏罗系中统延安组地层,煤层多为中厚～厚层,4煤为主采煤层.区内大部分基岩层被第四系黄土层所覆盖,且侏罗系地层呈单斜构造,走向北东,倾向北西.研究区展布一些宽缓而不连续的次级褶皱,断裂构造少见[22].从南到北分布有彬县背斜、路家—小灵台背斜、七里铺—西坡背斜等,褶皱两翼不对称,南缓北陡,南翼倾角1°～3°,北翼倾角4°～8°.

1.2 区域构造演化

从区域构造单元上来看,宁正-彬长煤矿区处于陕北斜坡构造单元和渭北隆起构造单元的交界处.近年来,学者们对鄂尔多斯盆地区域构造演化做了很多研究工作[23-24],取得了丰硕的成果.中侏罗世末开始的早燕山运动,库拉—太平洋板块向北和北东方向运动,与欧亚大陆板块的相互斜向碰撞,导致鄂尔多斯盆地以东地区发生强烈的构造变形和抬升.早白垩世末的晚燕山运动,盆地进一步褶断隆升,宁正-彬长煤矿区上侏罗统芬芳河组完全剥蚀,下白垩统宜君组和洛河组地层均遭受不同程度的剥蚀.燕山运动使鄂尔多斯盆地形成了以NW—SE向为主要挤压方向的构造应力场[25],由于拉萨地块与已处于欧亚大陆边缘的羌塘地块碰撞产生的远程构造效应,使得研究区处于NE—SW方向的挤压应力状态.

新生代以来的喜山运动时期,鄂尔多斯盆地形成了一环绕地块的断陷盆地系统(银川盆地和吉兰泰—河套盆地、汾渭盆地),这些现象是喜马拉雅期区域拉张断陷作用在鄂尔多斯盆地的表现[26].研究区部分煤矿形成了一系列以NE—SW向正断层,如高家堡煤矿一盘区F8断层、胡家河煤矿F22断层等,这些断层是该时期拉伸断陷作用的产物.新构造运动以来,鄂尔多斯盆地西部六盘山构造带受挤压作用持续隆升,其北段以逆冲和左旋走滑活动为主,而其南段活动不强烈且盆地的西南缘没有发育拉张性质为主的地堑式盆地,而是以一组向北突出的弧形断裂为特色,该弧形断裂自第四纪以来以强烈的挤压性质及左旋走滑运动区别于其他边缘的活动断裂(图2a).

自晚更新世晚期以来,印度板块与欧亚大陆发生陆-陆碰撞,青藏高原开始隆升,在中国西部形成巨大的青藏逆冲推覆构造系统[27],形成了以NE—SW向为主要挤压方向的构造应力场.由于盆地西部青藏逆冲推覆的强烈的碰撞与造山运动以及盆地块体逆时针旋转作用,且受到渭河盆地NW向弱挤压作用,使得研究区现今构造运动形式以走滑变形为主,且处于强烈的NE—SW方向的挤压应力场中(图2b).



(a) 区域地质构造特征 (b) 宏观应力场格局 (c) 区域地质剖面

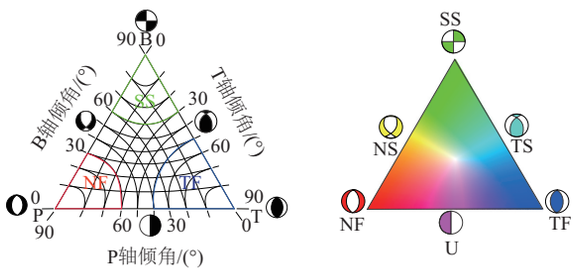
图2 宁正-彬长煤矿区现今构造演化及应力分布

Fig. 2 Current tectonic evolution and stress distribution in the Ningzheng Binchang area

1.3 区域震源机制解析

地震是指在地壳或构造应力场作用下岩石沿着裂隙或断层突然破裂的过程,分析震源机制能够理解地球内部板块构造运动相关的信息[28].单一震源机制解所确定的主应力轴(P轴、T轴、B轴)表示了其发震机理,不同的发震机理通过不同样式的震源球表示.而在一个区域内的多个离散分布地震的震源机制解资料的综合能够反映这个区域的构造应力场情况[29-30].Frohlich图提供了一种定义震源机制类型的方法,其通过震源机制解

的3个应力轴倾角大小划分为6个类型(图3)：正断型(NF)、逆断型(TF)、走滑型(SS)、正走滑型(NS)、逆走滑型(TS)、无法确定型(U).



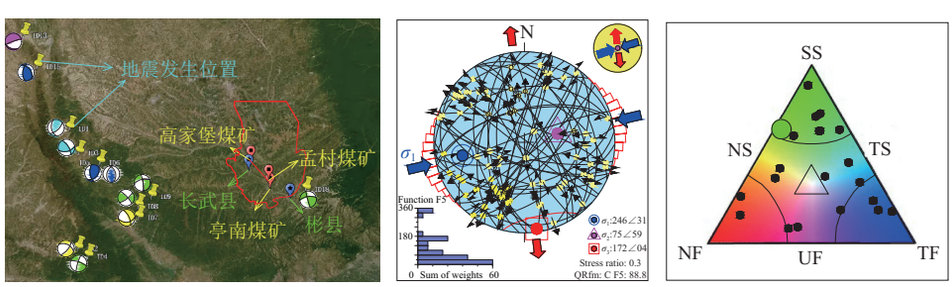
(a) 分类球面三角形图　　(b) 色彩编码分类图

图3　震源机制解类型划分

Fig. 3　Types of focal mechanism solutions

通过搜集1976年以来的宁正-彬长煤矿区及其邻近区域地震数据参数，主要来源于国家地震科学数据中心[31]和global CMT数据库，共获取了23个地震参数，并使用Win_Tensor程序对其进行分析，宁正-彬长煤矿区及邻近区域地震及震源机制解分布见图4.

由图4可知，通过23个震源机制数据进行了一阶应力场联合反演，采用QRfm法对反演结果的质量进行评估，采用主应力比$v=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$以反映$\sigma_2$相对于$\sigma_1$和$\sigma_3$的大小[32]，结果表明：水平应力方向以NE—SW方向为主，见图4b. 主应力比v为0.3，表明最大主应力、最小主应力和垂向主应力间明显差异，具有围绕中间主应力滑移的性质[33]，应力状态以走滑型为主. 宁正-彬长煤矿区及其邻近区域震源机制解类型多为走滑型(图4c)，其中，研究区的西南部震源机制以走滑型和正走滑型为主，P轴的方向以北东和北北东向为主，表现为块体的北东向挤压运动，主压力轴为北东-南西向. 西北部以正断型和逆走滑型为主，表现为以北东和北东东方向上的挤压应力场为主，且均具有一定的走滑构造应力分量，这与文献[34]分析的鄂尔多斯盆地区域震源机制结果一致. 研究区东南部震源机制以走滑型和正断型为主，表明该区域受渭河盆地伸展断陷构造运动的作用，局部具有一定的走滑构造应力分量(图4a). 研究区西南部由挤压兼左旋走滑状态向右旋走滑的剪切拉张状态过渡.



(a) 区域局部地震震源分布　　(b) 一阶应力场联合反演　　(c) 震源机制解

图4　宁正-彬长煤矿区及其邻近区域地震震源分布及震源机制

Fig. 4　Distribution of earthquakes and focal mechanism solutions in the Binchang mining area and its adjacent areas

2　宁正-彬长煤矿区现今地应力场特征

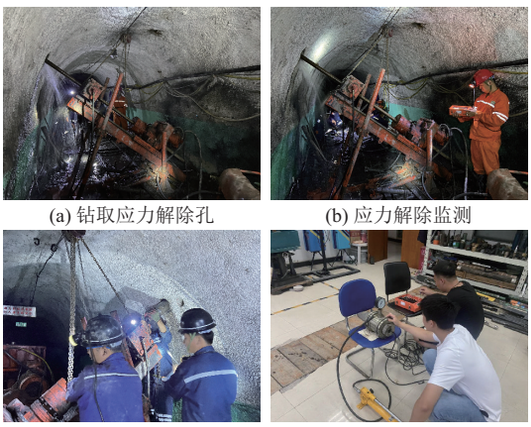
2.1　地应力实测

1)地应力测点布置

根据宁正-彬长煤矿区工程地质条件，研究区煤层赋存稳定，煤层直接顶为厚度相对较薄的软弱泥质岩组，岩性多为泥岩、砂质泥岩及粉砂岩，基本顶为厚度相对较厚的坚硬砂岩岩组，岩性多为细粒砂岩，厚度分布范围为5～12 m. 据此，选取了细粒砂岩作为地应力测试的主要层位，在胡家河煤矿、高家堡煤矿、核桃峪煤矿进行了地应力测点布置，并选择测试地点位于巷道跨度小或巷道迎头附近区域.

2)应力解除测试流程

采用应力解除法在现场巷道进行了地应力测量，其测试流程为：先在围岩中打一个应力解除孔，其次在应力解除孔内打一个同心的传感器安装孔并安装KX-2002型空心包体应力计，然后同心套钻钻取含空心包体的岩心，具体流程见图5. 岩心上的应力因解除而发生膨胀变形，根据应力解除前后仪器所测得的应变量差值，结合围压率定结果，即可算出地应力的大小和方向[14]，代表性地应力测点的应变-解除距离曲线及解除包体岩心如图6所示. 基于弹性力学理论，结合应力解除岩心变形参数和率定参数，求解研究区地应力3个主应力的大小和方向. 结合以往专家学者在宁正-彬长煤矿区的地应力测试结果[35-37]，采用应力解除法、水压致裂法和声发射法在研究区范围内生产矿井进行了地应力测量，共统计了51个地应力测点的测试结果，见表1.



(a) 钻取应力解除孔 (b) 应力解除监测

(c) 同心套钻含空心包体岩芯 (d) 岩芯围压率定

图 5 研究区地应力测试流程

Fig. 5 Flow chart of in-situ stress test in the study area

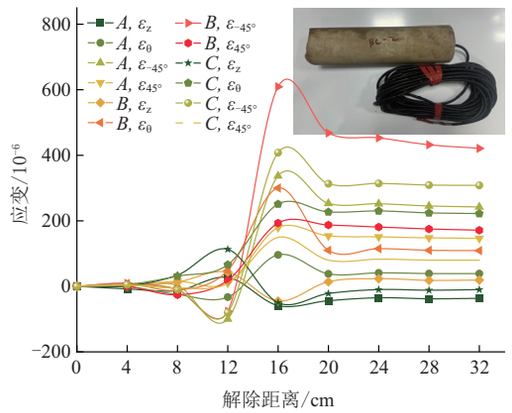


图 6 研究区典型应力解除曲线及空心包体岩心

Fig. 6 Typical strain-relieving distance curves and hollow inclusions of rock core in the study area

表 1 宁正-彬长煤矿区地应力实测结果统计

Table 1 Statistics of in-situ stress measurement results in the Ningzheng-Binchang mining area

序号	矿井	深度/m	σ_H/MPa	σ_v/MPa	σ_h/MPa	σ_H方位角/(°)	测试层位	测量方式	数据来源
BC-1	胡家河煤矿	710.0	38.14	11.41	9.64	187.52	延安组细砂岩	应力解除法	实测及矿方资料
BC-2		702.0	45.98	12.28	10.73	268.93			
BC-3		710.0	46.08	12.82	10.28	267.67			
BC-4		420.1	18.04	9.60	8.78	255.30			
BC-5		636.9	29.15	15.82	13.25	247.60	延安组煤层		
BC-6		626.2	33.87	15.35	8.36	239.80			
BC-7	高家堡煤矿	799.81	38.23	21.46	14.44	215.16	延安组粉砂岩		
BC-8		888.37	41.98	22.23	20.60	215.69			
BC-9		1 012.50	44.04	24.29	20.79	210.23	延安组细砂岩		
BC-10		1 077.60	44.87	19.94	19.11	235.44			
BC-11		1 065.70	44.72	15.67	13.16	238.90	延安组中砂岩		
BC-12		1 080.40	44.21	15.07	14.63	231.60			
BC-13		947.00	42.24	24.59	19.98	220.00	延安组砂岩		
BC-14		914.00	41.54	23.96	20.25	194.00			
BC-15		888.00	42.33	23.07	19.29	214.00			
BC-16	亭南煤矿	560	17.56	8.84	7.62	157.89	延安组砂岩		
BC-17		498	16.50	8.05	6.88	168.89			
BC-18		627	19.47	10.02	8.10	144.89			
BC-19		695	20.38	11.82	9.80	174.58			
BC-20	孟村煤矿	690.01	37.62	17.93	23.34	157.81	延安组中砂岩		
BC-21		617.92	26.24	15.77	18.30	145.23			
BC-22		703.95	30.52	18.38	19.46	170.78			
BC-23	小庄煤矿	632	30.17	16.04	18.34	333.27	延安组砂岩		文献[35]
BC-24		632	29.63	16.28	16.86	354.81			
BC-25		500	21.23	11.38	12.57	351.23			
BC-26	蒋家河煤矿	626.4	15.48	15.27	8.00	43.6	延安组煤层	水压致裂法	文献[36]
BC-27		630.8	16.46	15.34	9.13	59.5			
BC-28	杨家坪煤矿	817.65	24.95	17.38	16.09				
BC-29		849.17	18.27	12.46	12.32				
BC-30		910.55	26.48	17.59	16.68				
BC-31		943.95	20.10	13.57	13.30				
BC-32	大佛寺煤矿	550	22.37	13.82	12.76	3.83	延安组砂岩	应力解除法	文献[35]
BC-33		520	23.91	13.91	15.82	346.17			
BC-34		540	20.38	13.77	14.95	351.84			

续表 1

序号	矿井	深度/m	σ_H/MPa	σ_v/MPa	σ_h/MPa	σ_H方位角/(°)	测试层位	测量方式	数据来源
BC-35	文家坡煤矿	550	24.86	13.81	15.36	324.67	延安组砂岩		
BC-36		640	26.37	17.55	19.03	311.92			
BC-37		670	25.94	16.26	14.49	310.14			
BC-38	雅店煤矿	470	14.79	10.37	10.16	111.51	延安组煤层	水压致裂法	文献[37]
BC-39		518	15.41	11.59	12.01	96.59			
BC-40		430	28.10	14.17	17.76	249.08			
BC-41	核桃峪煤矿	957.80	28.88	23.95	15.06	217.30	延安组煤层	水压致裂法	实测及矿方资料
BC-42		946.10	22.64	23.65	11.47	203.70			
BC-43		972.60	30.34	24.32	15.48	209.20			
BC-47		958.00	25.31	21.96	13.11	196.65	延安组细砂岩	应力解除法	
BC-48		962.00	34.50	23.78	11.13	215.69			
BC-49		916.42	25.37	20.11	16.12	177.80	延安组中砂岩	声发射法	
BC-50		954.48	30.28	21.93	10.33	188.70			
BC-51		916.42	22.82	20.80	21.44	177.80			
BC-44	新庄煤矿	966.8	26.93	24.17	13.68	221.5	延安组煤层	水压致裂法	
BC-45		975.2	25.23	24.38	13.88	212.8			
BC-46		967.4	24.94	24.19	13.36	223.8			

2.2　地应力场宏观类型及量级

根据 3 个主应力的大小和方向关系，地应力场可以划分为 3 种宏观类型[15]：① $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 型，为正断型应力机制；② $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 型，为走滑型应力机制；③ $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 型，为逆断型应力机制。

研究区地应力测试结果表明：研究区 51 个测点中有 37 个测点最大水平主应力 σ_H 大于垂向主应力 σ_v，且垂向主应力 σ_v 大于最小水平主应力 σ_h，属 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 型，表现为走滑型应力机制，这与震源机制解和区域构造演化分析结果基本一致。此外，13 个地应力测点测试结果中垂向主应力 σ_v 小于最小水平主应力 σ_h，属 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 型，表现为逆断型应力机制，多位于孟村煤矿、小庄煤矿和大佛寺煤矿附近区域。

尽管矿区地应力实测点位置均位于不同的埋藏深度，但是实测层位均位于延安组地层中，因此，未考虑深度的情况下，依据相关判定标准[18]，结合彬长矿区实测数据对地应力实测点进行了分区（图 7）。宁正-彬长煤矿区地应力整体上最大水平主应力在 20～40 MPa 之间，属于高地应力区；局部区域在 40 MPa 以上，属于超高地应力区。

2.3　地应力方向特征

在宁正-彬长煤矿区地应力实测数据中，最大水平主应力方向总体上以 NE—SW 向为主，如图 8 和图 9 所示。



图 7　宁正-彬长煤矿区最大水平主应力分布

Fig. 7　Distribution of the maximum horizontal principal stress in the Ningzheng-Binchang mining area

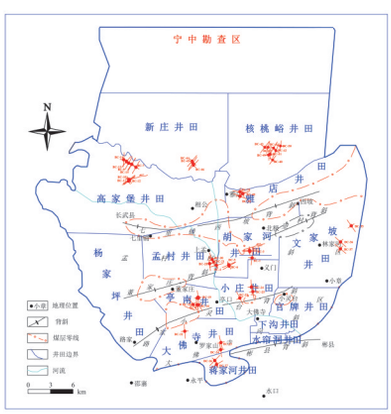


图 8　宁正-彬长煤矿区地应力方向分布

Fig. 8　Distribution of the horizontal principal stress direction in the Ningzheng-Binchang mining area

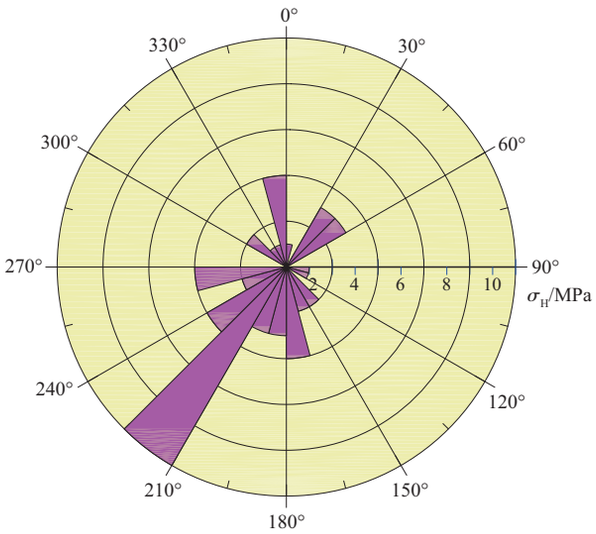


图 9 宁正-彬长煤矿区最大水平主应力方向玫瑰花图

Fig. 9 Rose diagram of the maximum horizontal principal stress direction in the Ningzheng-Binchang mining area

这与上述区域构造演化分析以及震源机制解析结果基本一致. 受渭河盆地北西向弱挤压作用影响,且研究区内褶皱构造较为发育,使得构造附近测点最大水平主应力方向与褶皱轴迹线呈正交趋势,反映了地应力场分布受地质构造的控制作用[6,14].

2.4 地应力随深度变化规律

宁正-彬长煤矿区各主应力随深度变化拟合公式为

$$\begin{cases}\sigma_H = 0.0249H + 9.78 & R = 0.511,\\ \sigma_v = 0.0222H & R = 0.982,\\ \sigma_h = 0.0069H + 8975 & R = 0.318,\end{cases} \quad (1)$$

式中:σ_H,σ_v,σ_h,分别为最大水平主应力、垂直主应力、最小水平主应力,MPa;H为测试深度,m.

由式(1)和图 10 可知,宁正-彬长煤矿区各主应力整体上呈现随着深度增加呈近似线性增长的关系,垂向主应力随深度变化的斜率在我国煤矿以及宁正-彬长煤矿区 2 个范围内的差异性较小,符合我国煤矿区地应力一般规律. 但由于各测点在地质条件、岩石力学性质、地形地貌等方面不尽相同,导致矿区局部测点主应力随深度变化与拟合曲线具有一定的离散性. 研究区最大水平主应力随深度变化的斜率明显高于我国煤矿平均水平,表明研究区覆岩层中水平构造应力相对较高,反映了研究区处于强烈的区域板块挤压应力场中,与区域构造演化分析以及震源机制解析结果基本一致.

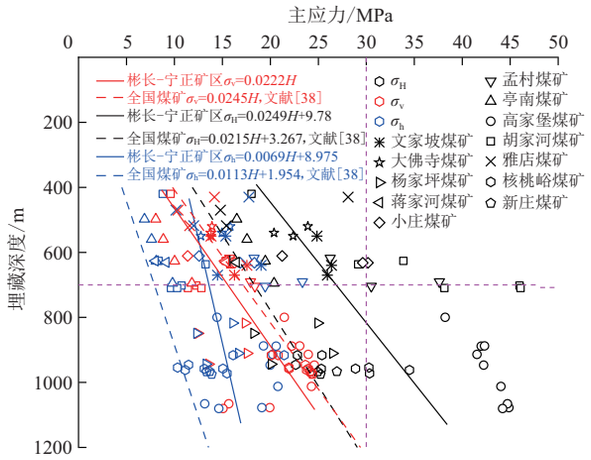


图 10 各主应力随深度变化规律

Fig. 10 Distribution of each main stress changing with depth

3 煤矿地应力场状态表征

冲击地压是由动载和静载叠加引起的[39],应力的高度集中是冲击地压发生的基础. 由于宁正-彬长煤矿区地应力场较为复杂,准确表征矿井岩体赋存地应力环境差异对于揭示矿井工程地质灾害孕灾机制,合理设计支护方式和开采方案等具有重要作用和意义.

3.1 应力状态指数推导和计算

文献[40]采用最大主应力与单轴抗压强度的比值作为岩爆发生的应力判据. 地应力差异系数K_i可以在一定程度上反映地应力的变异程度,被广泛运用于表征地下某点的地应力状态[41],K_i按下式计算:

$$K_i = (\sigma_H - \sigma_h)/\sigma_h, \quad (2)$$

式中:K_i为应力差异系数,无量纲. 岩体的破坏通常是由剪切破坏引起的. 此外,水平应力差δ在一定程度上反映了矿井深部围岩的稳定性[42],水平应力差按下式计算:

$$\delta = \sigma_H - \sigma_h, \quad (3)$$

式中:δ为水平应力差,MPa. 上述参数仅依据水平应力大小、综合指数法[21]中将开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比γ作为反映地应力场的重要指标,其计算如下:

$$\gamma = \frac{1}{\sigma_v}\left(\sigma_H - \frac{\sigma_v}{1-\mu}\right). \quad (4)$$

文献[43]提出不能忽略中间主应力对冲击地压的影响,因此,考虑岩体三维应力状态对分析冲击地压等动力灾害触发机制具有重要意义. 对于应力空间中的一点,其受力状态可分解为两两垂

直的3个主应力[44]. 在水平主应力平面上，最大主应力和中间主应力可合为一个水平面上的合力σ'，见图11.

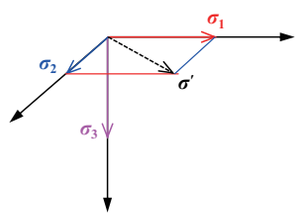


图11　主应力分解示意

Fig. 11　Schematic diagram of principal stress decomposition

由于主应力间相互垂直，则某点水平合力σ'与最小主应力σ_3的比值是指某点三向应力间的比值，能够表征岩体赋存应力环境差异性，准确描述岩体受力状态，记为应力状态指数ξ. 其中，应力状态指数ξ越高，说明该点水平应力和垂向应力差异性越大，受力越不均匀，围岩越容易发生破坏. 应力状态指数ξ按下式计算：

$$\sigma'=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2}, \tag{5}$$

$$\xi=\frac{\sigma'}{\sigma_3}. \tag{6}$$

3.2　地应力状态参数对比讨论

依据表1中地应力测试结果，宁正-彬长煤矿区上述地应力差异系数K_i、水平应力差δ、开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比γ以及应力状态指数ξ等参数计算结果如表2所示.

表2　宁正-彬长煤矿区矿井各参数计算结果统计

Table 2　Calculation of each constants in the Ningzheng-Binchang mining area

序号	矿井	K_i	δ/MPa	γ/%	ξ	序号	矿井	K_i	δ/MPa	γ/%	ξ
BC-3	胡家河煤矿	3.48	35.80	216.58	4.65	BC-9	高家堡煤矿	1.12	23.25	38.45	2.42
BC-6	胡家河煤矿	3.05	25.51	77.79	4.45	BC-19	亭南煤矿	1.08	10.58	29.56	2.40
BC-2	胡家河煤矿	3.29	35.25	231.57	4.44	BC-14	高家堡煤矿	1.05	21.29	30.52	2.37
BC-1	胡家河煤矿	2.96	28.50	191.41	4.13	BC-40	雅店煤矿	0.58	10.34	55.45	2.35
BC-48	核桃峪煤矿	2.10	23.37	2.22	3.76	BC-4	胡家河煤矿	1.05	9.26	45.06	2.33
BC-50	核桃峪煤矿	1.93	19.95	−4.78	3.62	BC-8	高家堡煤矿	1.04	21.38	45.99	2.31
BC-11	高家堡煤矿	2.40	31.56	142.53	3.60	BC-23	小庄煤矿	0.65	11.83	45.24	2.20
BC-12	高家堡煤矿	2.02	29.58	150.51	3.19	BC-25	小庄煤矿	0.69	8.66	43.70	2.17
BC-7	高家堡煤矿	1.65	23.79	35.29	3.04	BC-35	文家坡煤矿	0.62	9.50	37.16	2.12
BC-42	核桃峪煤矿	0.97	11.17	−47.13	2.85	BC-37	文家坡煤矿	0.79	11.45	16.68	2.11
BC-26	蒋家河煤矿	0.94	7.48	−41.48	2.72	BC-24	小庄煤矿	0.76	12.77	39.15	2.09
BC-18	亭南煤矿	1.40	11.37	51.45	2.70	BC-33	大佛寺煤矿	0.51	8.09	29.03	2.06
BC-17	亭南煤矿	1.40	9.62	62.11	2.67	BC-32	大佛寺煤矿	0.75	9.61	19.01	2.06
BC-44	新庄煤矿	0.97	13.25	−31.44	2.65	BC-21	孟村煤矿	0.43	7.94	23.53	2.03
BC-46	新庄煤矿	0.87	11.58	−39.76	2.60	BC-49	核桃峪煤矿	0.57	9.25	−16.70	2.01
BC-16	亭南煤矿	1.30	9.94	55.79	2.58	BC-22	孟村煤矿	0.57	11.06	23.19	1.97
BC-10	高家堡煤矿	1.35	25.76	82.17	2.57	BC-30	杨家坪煤矿	0.59	9.80	7.68	1.91
BC-47	核桃峪煤矿	0.93	12.20	−27.60	2.56	BC-28	杨家坪煤矿	0.55	8.86	0.70	1.89
BC-45	新庄煤矿	0.82	11.35	−39.37	2.53	BC-36	文家坡煤矿	0.39	7.34	7.40	1.85
BC-43	核桃峪煤矿	0.96	14.86	−18.10	2.51	BC-34	大佛寺煤矿	0.36	5.43	5.15	1.84
BC-5	胡家河煤矿	1.20	15.90	41.40	2.50	BC-31	杨家坪煤矿	0.51	6.80	5.26	1.82
BC-15	高家堡煤矿	1.19	23.04	40.63	2.50	BC-29	杨家坪煤矿	0.48	5.95	3.77	1.79
BC-41	核桃峪煤矿	0.92	13.82	−22.27	2.49	BC-38	雅店煤矿	0.46	4.63	−0.23	1.78
BC-20	孟村煤矿	0.61	14.28	66.96	2.47	BC-39	雅店煤矿	0.28	3.40	−9.90	1.69
BC-27	蒋家河煤矿	0.80	7.33	−35.56	2.46	BC-51	核桃峪煤矿	0.06	1.38	−33.15	1.51
BC-13	高家堡煤矿	1.11	22.26	28.92	2.45						

由表2可知,开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比γ在一定范围内存在不适用的情况,即当地应力场类型为正断型或最大水平主应力与垂向主应力接近时,其计算结果为负值,如新庄煤矿、核桃峪煤矿、雅店煤矿和蒋家河煤矿部分测点结果.而宁正-彬长煤矿区地应力差异系数范围为0.06~3.48,平均为1.09;水平应力差范围为1.38~35.8 MPa,平均为14.48 MPa;应力状态指数范围为1.51~4.65,平均为2.54.综合来看,围岩应力环境的差异大以及构造应力高是导致宁正-彬长煤矿区冲击地压灾害频发的原因之一.

值得注意的是,曾发生过冲击地压显现的矿井测点应力状态指数相对较高,尤其是胡家河煤矿、高家堡煤矿以及亭南煤矿部分测点应力状态指数在2.7以上,表明这些区域围岩应力差异性大,易破坏诱发矿井地质动力灾害.其中,胡家河煤矿BC-2,BC-3,BC-6测点和高家堡煤矿BC-12,BC-11测点应力状态指数均在3.5以上,水平应力差在28 MPa以上,且地应力差异系数在2.0以上,表明该区域工作面围岩应力差异性大,易发生破坏.与上述几个矿井相比,小庄煤矿BC-24测点开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比以及水平应力差相对较大,但是其地应力差异系数、应力状态指数相对较小,这是由于该区域水平应力与垂向应力差异性相对较小,表明在围压条件下,围岩应力环境相对均匀岩石发生破裂时的临界应力逐渐增大,其内部稳定性增高[45].此外,蒋家河煤矿测点地应力差异系数、水平应力差与其他几个矿井较小,但是其应力状态指数均在2.5以上,这是由于其最大水平主应力和垂向主应力远大于最小水平主应力,这使得该区域围岩应力差异性大,在应力差的主导下易发生变形破坏,也表明与地应力差异系数和水平应力差相比,应力状态指数对于表征围岩体地应力差异性具有较好的指示作用.

4 煤矿地应力场复杂性评价模型

4.1 评价指标选取与模型构建

4.1.1 评价指标选取

地应力场不仅影响采区围岩的稳定性,而且还对采矿过程中冲击地压、矿震等灾害具有一定的决定性作用[46].因此,分析煤矿地应力场复杂性对于现场采掘施工和冲击地压等动力灾害防治具有重要的应用意义.煤矿地应力场复杂性是指对煤矿地应力的大小、方向及分布均匀性、稳定性对井下施工作业影响程度,可为煤矿巷道支护选型、防冲设计及风险防控提供可量化的判断标准.受地质构造、岩石性质、地形地貌等多种因素耦合的影响,地应力场复杂性评价应包含量值和分布差异性等特征.据此,量值复杂性选择煤层开采深度、最大水平主应力2个指标,分布差异性选择围岩强度应力比和应力状态指数2个指标.各指标选取依据分述如下:

1)煤层开采深度

随着开采深度的增加,围岩应力水平逐渐增加,初始应力场逐渐趋向于静水压力分布.而综合指数法[21]中将开采深度400 m和800 m进行了典型的分类,认为采深400 m以内的矿井冲击危险性相对较小,采深800 m以上的矿井冲击危险性相对较高.因此,选取煤层开采深度作为评估煤矿地应力场复杂性的指标之一.

2)最大水平主应力

文献[18]根据最大水平主应力量值大小将地应力场分为4种类型,表明最大水平主应力是指示煤矿地应力场复杂性的基础指标[18].此外,冲击地压产生与地应力聚集特性和地应力量级有着密切关系,最大水平主应力越集中,容易积蓄大量弹性能,受采掘等因素易触发产生冲击[47].因此,选取最大水平主应力作为评估煤矿地应力场复杂性的指标之一.

3)围岩强度应力比

我国现行《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)、《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50487—2016)等规范[17-18]条文中将围岩强度应力比作为岩体地应力场评估的关键指标,这与冲击地压机理中强度理论和刚度理论的思路基本一致.因此,选取围岩强度应力比作为评估煤矿地应力场复杂性的指标之一.

4)应力状态指数

考虑到应力状态指数能够表征岩体赋存应力环境差异性,准确描述岩体受力状态,因此,选择应力状态指数作为评估煤矿地应力场复杂性的指标之一.

4.1.2 评价模型构建

层次分析法的基本原理是对评价系统有关方案的各种要素分解成若干层次,以上一层要求为准则,对同一层次的要素进行两两的判断比较和计算,求出各要素的权重,确定最优评价模型.根据对

影响煤矿地应力场复杂性各个主指标的分析，可将该系统分为3个层次．以煤矿地应力场复杂性评价为模型的目标层（A层次）；量值复杂性、分布差异性作为解决问题的中间环节，为准则层（B层次）；各具体的主控指标构成了模型的决策层（C层），即可建立煤矿地应力场复杂性层次结构模型（图12）．

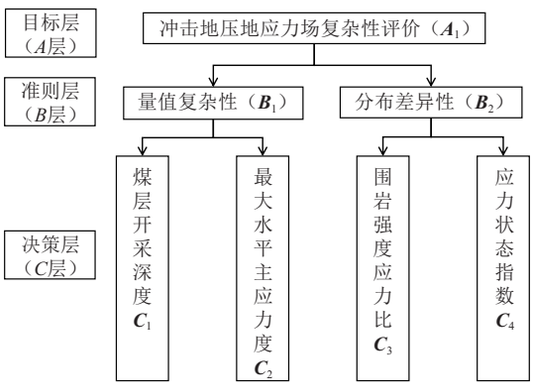


图12　煤矿地应力场复杂性层次结构

Fig. 12　Hierarchical model of stress field complexity for Rockburst

由于各因素之间相互影响的程度均有不同，根据判定的各因素相对重要性，采用T. L. Satty创立的1～9标度法，进行专家打分，建立判断矩阵．根据对应的特征方程解出各指标的权重，最后根据求解结果进行检验．其中，CI为判断矩阵逻辑一致性检验指标；CR为判断矩阵平均随机一致性指标．

表3　判断矩阵 A_1～B_i（i=1，2）

Table 3　Judgment matrix A_1～B_i（i=1，2）

A_1	B_1	B_2	权重 $w(A_1/B_i)$
B_1	1	5/4	0.44
B_2	4/5	1	0.56

表4　判断矩阵 B_1～C_i（i=1，2）

Table 4　Judgment matrix B_1～C_i（i=1，2）

B_1	C_1	C_2	权重 $w(B_1/C_i)$
C_1	1	2	0.33
C_2	1/2	1	0.67

表5　判断矩阵 B_2～C_i（i=3，4）

Table 5　Judgment matrix B_2～C_i（i=3，4）

B_2	C_3	C_4	权重 $w(B_2/C_i)$
C_3	1	3/2	0.4
C_4	2/3	1	0.6

以上各组矩阵计算出一致性指标CI=0，存在的CR值均小于0.1，认为判断矩阵通过一致性检验，从而确定各指标的权重值如表6所示．

表6　煤矿地应力场复杂性评价各指标权重

Table 6　Indicator weight of stress field complexity for Rockburst

指标	煤层开采深度	最大水平主应力	围岩强度应力比	应力状态指数
权重 w_i	0.145	0.295	0.224	0.336

由于评价煤矿地应力场复杂性的指标之间的量纲不同，为了消除数据由于量纲不同对评价结果的影响，需将数据采用归一化方法进行归一化处理．归一化值具有可比性和统计意义，按下式(7)计算：

$$q_i=\frac{x_i\min(x_i)}{\max(x_i)-\min(x_i)},\tag{7}$$

式中：x_i为第i个评价指标的原始数据；$\max(x_i)$，$\min(x_i)$分别为第i个评价指标的最大值和最小值；q_i为第i个评价指标归一化后的数据．

经过数据标准化，原始数据具有相同的数量级，结合权重计算结果，可综合叠加为煤矿地应力场复杂性指数，指数越高，对应地应力场条件越复杂．煤矿地应力场复杂性指数由下式计算：

$$\ell=\sum_i^n wiqi\quad i=1,2,\cdots,n,\tag{8}$$

式中：ℓ为煤矿地应力场复杂性指数；w_i为第i个评价指标的权重；n为评价指标的个数．

4.2　研究区地应力场复杂性评价

以宁正-彬长煤矿区煤矿为例，选取各矿煤层开采深度、最大水平主应力、围岩强度应力比和应力状态指数等相应指标，计算得到研究区煤矿地应力场复杂性指数见图13．

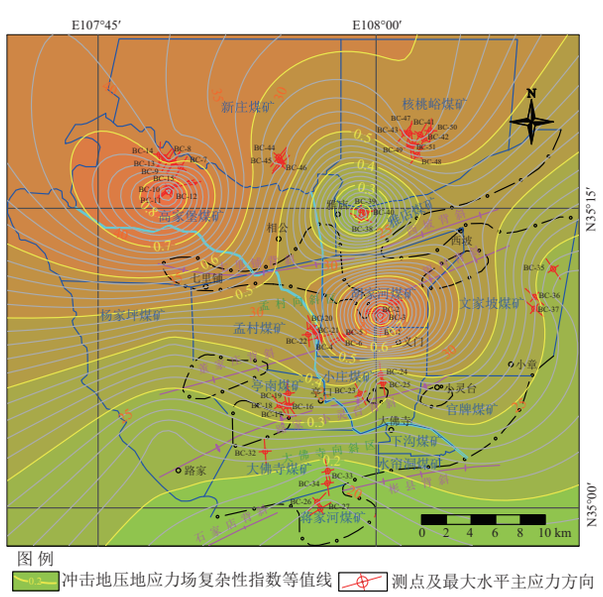


图13　研究区冲击地压地应力场复杂性指数分布

Fig. 13　Distribution of stress field complexity index in the study area

由图13可知，研究区地应力场复杂性指数在宁正-彬长煤矿区中部以及北部相对较高，局部复杂性指数在0.8以上．其中，高家堡煤矿、胡家河煤矿地应力场复杂性指数总体在0.6以上，两对矿井受冲击地压灾害威胁形势严峻．此外，曾发生过冲击地压显现的胡家河煤矿和孟村煤矿复杂性指数在0.5以上，而受冲击地压威胁程度较小的雅店煤矿和蒋家河煤矿地应力场复杂性指数总体在0.3以下．因此，采用以上4个评价指标按适合该矿区条件的权重进行叠加，所得煤矿地应力场复杂性与冲击地压显现情况具有较好的相关性，这意味着需要在煤矿地应力场复杂性指数较高的区域制定强有力的防冲卸压措施，避免冲击地压等动力灾害的发生．在煤矿地应力场复杂性指数较低的区域，适当减少防冲卸压工作，减少防冲卸压成本投入．因此，在上述评价结果的基础上，针对不同大小的煤矿地应力场复杂性指数制定不同强度的防冲卸压方案，实现精准卸压防控．

综上可知，模型评价结果与研究区地应力场复杂性的实际情况基本一致，能够用于煤矿地应力场复杂性评价．针对其他矿区的地应力场复杂性评价，应重新构建判断矩阵T进行赋权，选取相应指标进行煤矿地应力场复杂性评价．地应力是地下岩体的固有属性，其复杂性直接决定岩体的力学响应．未来地应力场复杂性评估应结合工程扰动效应，由静态描述向动态预测转变，以更好地服务矿产资源开发、井巷工程和深部碳储空间利用等地下工程建设．

5 结 论

1)由于印度板块与欧亚大陆发生陆-陆碰撞，青藏高原隆升，强烈的碰撞与造山运动使宁正-彬长煤矿区持续处于强烈的挤压应力场中，且受到渭河盆地NW向弱挤压作用，水平挤压应力方向以NE—SW方向为主，这与23个震源机制数据一阶应力场联合反演结果基本一致．

2)宁正-彬长煤矿区51个测点中有37个测点属$\sigma_H>\sigma_v>\sigma_h$型，表现为走滑型应力机制．由于研究区地应力场受构造、覆岩等因素复合叠加作用，其水平构造应力分布较不均匀．最大水平主应力随深度变化的斜率明显高于我国煤矿平均水平，表明研究区覆岩层中水平构造应力相对较高，反映了研究区处于强烈的区域板块挤压应力场中，与区域构造演化分析以及震源机制解析结果基本一致．

3)通过主应力分解，提出了用于表征岩体赋存应力环境差异的应力状态指数，研究区应力状态指数范围为1.51～4.65，平均为2.54．围岩应力环境的差异大以及构造应力高是导致宁正-彬长煤矿区冲击地压灾害频发的原因之一．胡家河煤矿、高家堡煤矿以及亭南煤矿部分测点应力状态指数在2.7以上，表明这些区域围岩应力差异性大，易破坏诱发矿井地质动力灾害．与地应力差异系数和水平应力差相比，应力状态指数对于表征围岩体地应力差异性具有较好的指示作用．

4)选取煤层开采深度、最大水平主应力、围岩强度应力比和应力状态指数4个指标，构建了煤矿地应力场复杂性评价模型，以宁正-彬长煤矿区煤矿为例进行了煤矿地应力场复杂性评价，结果表明：研究矿区中部以及北部相对较高，局部复杂性指数在0.8以上．发生过冲击地压显现和威胁煤矿复杂性指数在0.5以上，威胁程度较小的雅店煤矿和蒋家河煤矿冲击地压地应力场复杂性指数总体在0.3以下．评价结果与研究区地应力场复杂性的实际情况基本一致，评价结果准确性和有效性相对较高．由于采动条件下三维地应力场在空间上重新调整分布，目前研究尚未考虑采动条件下地应力演化和方向转换情况，未来应结合采动三维地应力场反演，进一步探究采动条件下地应力场复杂性评价方法．

参考文献：

[1] 袁 亮，马衍坤，黄勤豪，等．煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]．中国矿业大学学报，2024，53(5)：827-856.
YUAN Liang, MA Yankun, HUANG Qinhao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 827-856.

[2] 卢志国，高富强，杨 磊，等，深埋巷道动静载叠加诱冲物理模拟试验系统研制与应用[J]．中国矿业大学学报，2025，54(5)：959-970.
LU Zhiguo, GAO Fugiang, YANG Lei, et al. Development and application of a novel physical simulation test system for deep coal burst roadway with dynamic-static combined loading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 959-970.

[3] 沈荣喜，袁子晨，王恩元，等．煤岩三向应力监测系统研发及在冲击矿井中的应用[J]．采矿与安全工程学报，2023，40(1)：155-163.

SHEN Rongxi, YUAN Zichen, WANG Enyuan, et al. Research of three-dimensional stress monitoring system forcoal-rock and its application in rockburst mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 155-163.

[4] QI C, FOURIE A. A real-time back-analysis technique to infer rheological parameters from field monitoring [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, 51(10): 3029-3043.

[5] 王成虎. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. 地质论评. 2014, 60(5): 971-991.
WANG Chenghu. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. Geological Review. 2014, 60(5): 971-991.

[6] 赵　龙, 乔　伟, 程香港, 等. 基于Kaiser效应的地应力差应变测试及区域地应力分布研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(10): 91-99.
ZHAO Long, QIAO Wei, CHENG Xianggang, et al. In-situ stress measurement based on Kaiser effect and differential strain analysis method and regional in-situ stress distribution research[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(10): 91-99.

[7] 刘允芳, 罗超文, 景　锋. 水压致裂法三维地应力测量及其修正和工程应用[J]. 岩土工程学报. 1999(4): 465-470.
LIU Yunfang, LUO Chaowen, JING Feng. 3-D geostress measurement by hydro-fracturing technique and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, (4): 465-470.

[8] 姚强岭, 李学华, 朱　柳, 等. 煤岩体地质力学参数原位测试系统开发与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1169-1176.
YAO Qiangling, LI Xuehua, ZHU Liu, et al. Development and application of in-situ testing system for geomechanical parameters of coal and rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1169-1176.

[9] 王　超, 王益腾, 韩增强, 等. 垂直孔应力解除法地应力测试技术及工程应用[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1412-1421.
WANG Chao, WANG Yiteng, HAN Zengqiang, et al. In-situ stress measurement technology for vertical hole based on stress relief method and its application. Rock and Soil Mechanics[J]. 2022, 43(5): 1412-1421.

[10] 孟召平, 田永东, 李国富. 沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J]. 煤炭学报. 2010, 35(6): 975-981.
MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LI Guofu. Characteristics of in-situ stress field in Southern Qinshui Basin and its research significance [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 975-981.

[11] 张　剑, 康红普, 刘爱卿, 等. 山西西山矿区井下地应力场分布规律[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4006-4016.
ZHANG Jian, KANG Hongpu, LIU Aiqing, et al. Distribution law of underground in-situ stress field in Xishan coal mine field, Shanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4006-4016.

[12] 蔺亚兵, 申小龙, 刘　军, 等. 黄陇侏罗纪煤田地应力特征及其地质意义[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 819-827.
LIN Yabing, SHEN Xiaolong, LIU Jun, et al. Characteristics of in-situ stress and its geological significance in Huanglong Jurassic coalfield[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 819-827.

[13] 何　杰, 吴拥政, 程　蓬, 等. 阳泉矿区主采煤层地应力分布规律实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(6): 1191-1200.
HE Jie, WU Yongzheng, CHENG Peng, et al. Field measurement research on in-situ stress distribution law of main coal seams in Yangquan mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(6): 1191-1200.

[14] 郭德勇, 揣筱升, 张铁岗, 等. 首山一矿深部地应力分布规律及影响因素[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2360-2375.
GUO Deyong, CHUAI Xiaosheng, ZHANG Tiegang, et al. Distribution pattern and influencing factors of in-situ stress for deep levels in Shoushan No.1 Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2360-2375.

[15] ANDERSONE M. The dynamics of faulting and-dyke formation with applications to Britain (2nd edition) [M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951, 1-206.

[16] 彭向峰, 于双忠. 淮南矿区原岩应力场宏观类型工程地质研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(1): 62-65.
PENG Xiangfeng, YU Shuangzhong. General type of in-situ stress field in Huainan mine area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(1): 62-65.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
The Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Engineering rock mass classification standard: GB/T 50218—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水力发电工程地质勘察规范: GB 50287—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

The Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for geological investigation of hydroelectric power engineering: GB 50287—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.

[19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工隧洞设计规范: DL/T 5195—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Design code for hydraulic tunnels: DL/T 5195—2004 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[20] 高振鲲. 贵州高原现今应力场数值模拟及其工程地质意义[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
GAO Zhenkun. Mathematical simulation research on persent tectonic stress field and its engineering geology significance of Guizhou plateau [D]. Guiyang: Guizhou University, 2008.

[21] 中国矿业大学冲击矿压防治工程研究中心. 综合指数法使用说明[EB/OL]. [2020-08-18]. https://burst.cumt.edu.cn/__local/6/9A/DB/C2B010A7B227006F8D02C9D8A12_948B7320_5FAC2.pdf.
China University of Mining and Technology Research Center for Rock Pressure Prevention and Control Engineering. Instructions for using the composite index method [EB/OL]. [2020-08-18] https://burst.cumt.edu.cn/__local/6/9A/DB/C2B010A7B227006F8D02C9D8A12_948B7320_5FAC2.pdf.

[22] 郭小铭. 彬长矿区洛河组沉积控水及开采扰动流场响应特征研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
GUO Xiaoming. Sedimentary controlling groundwater in Luohe Formation and the water flow field response regularity after mining disturbance in Binchang Mining Area[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science 2022.

[23] 王双明. 鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 54-63.
WANG Shuangming. Ordos Basin superposed evolution and structural controls of coal forming activities [J]. Earth Science Frontiers. 2017, 24(2): 54-63.

[24] 郑文俊, 王庆良, 陈九辉, 等. 鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展[J]. 地震科学进展, 2020, 50(4), 1-21.
ZHENG Wenjun, WANG Qingliang, CHEN Jiuhui, et al. Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos active block [J]. Progress in Earthquake Sciences, 2020, 50(4): 1-21.

[25] 高春云, 周立发. 鄂尔多斯盆地西缘南段若干不整合面特征及其构造意义[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 121-132.
GAO Chunyun, ZHOU Lifa. Geological Characteristies of unconformities and their tectonic significance in the southern section of western ordos basin [J]. Geological Science Technology and Information, 2019, 38(6): 121-132.

[26] 任战利, 赵重远, 张 军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. 沉积学报, 1994, (1): 56-65.
REN Zhanli, ZHAO Zhongyuan, ZHANG Jun, et al. Research on Paleotemperature in the Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, (1): 56-65.

[27] 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等. 中国大陆中轴构造带地壳最新构造变动样式及其动力学内涵[J]. 地学前缘, 2003, 10(增1): 160-167.
XU Xiwei, YU Guihua, MA Wentao, et al. Model of latest crustal tectonic motion of the central tectonic zone on the mainland of China [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(Sup 1): 160-167.

[28] 徐伟进, 高孟潭. 中国大陆及周缘地震目录完整性统计分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 2802-2812.
XU Weijin, GAO Mengtan. Statistical analysis of the completeness of earthquake catalogs in China mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics. 2014, 57(9): 2802-2812.

[29] 戴盈磊, 万永革, 梁永朵, 等. 应用综合震源机制解法对辽宁及邻区现今构造应力场的初步分析[J]. 地震工程学报, 2021, 43(3): 523-533.
DAI Yinglei, WAN Yongge, LIANG Yongduo, et al. Present tectonic stress field in Liaoning and its adjacent areas composite focal mechanism method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 523-533.

[30] 王恩元, 王笑然, 刘晓斐, 等. 煤岩张剪破裂震源模型与动裂隙参数定量反演及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1058-1074.
WANG Enyuan, WANG Xiaoran, LIU Xiaofei, et al. Generalized tensile-shear fracturing representation and cracking source parameters quantitative inversion in loaded coal/ rock and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1058-1074.

[31] 郭祥云, 蒋长胜, 韩立波, 等, 中国大陆及邻区震源机制数据集(2009—2021年)[EB/OL]. https://data.earthquake.cn, 2022.
GUO X Y, JIANG C S, HAN L B, et al. Focal mechanism data set in Chinese mainland and its adjacent area (2009—2021) [EB/OL]. https://data.earthquake.cn, 2022.

[32] DELVAUX D, SPERNER B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: New Insights into Structural Interpretation and Modelling[J]. Geo-

logical Society, London, PublicationsSpecial, 2003, 212:75-100.

[33] DELVAUX D, KERVYN F, MACHEYEKI A S, et al. Geodynamic significance of the TRM segment in the East African Rift (W-Tanzania): Active tectonics and paleostress in the Ufipa plateau and Rukwa basin [J]. Journal of Structural Geology, 2012,37:161-180.

[34] 盛书中,万永革,黄骥超,等.应用综合震源机制解法推断鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果[J].地球物理学报,2015,58(2):436-452.
SHENG Shuzhong, WAN Yongge, HUANG Jichao, et al.Present tectonic stress field in the Circum-Ordos Region deduced from composite focal mechanism method[J].Chinese journal of geophysics,2015, 58(2):436-452.

[35] 赵耀中,张宁博,邓志刚,等.褶曲构造型矿区地应力场分布特征与冲击机制[J].煤矿安全,2019,50(5):23-26.
ZHAO Yaozhong, ZHANG Ningbo, DENG Zhigang, et al. Distribution characteristics and impact mechanism of in-situ stress field in fold tectonic mining area [J]. Safety in Coal Mines. 2019, 50(5): 23-26.

[36] 于可伟.煤矿井下巷道围岩地质力学测试试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12):62-67.
YU Kewei. Experimental study on geo-mechanics test of surrounding rock of underground roadway in coal mine[J]. Coal Science and Technology,2019,47(12):62-67.

[37] LIU H B, JIANG B, HE W Y. Characteristics of the in situ stress field in the Yadian Coal Mine, Central China: Implications for roadway differential deformation[J]. ACS OMEGA 2021,6:739-746.

[38] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报,2019,44(1):23-33.
KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(1):23-33.

[39] 窦林名,何　江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7) : 1469-1476.

[40] 谢学斌.硬岩矿床岩爆预测与控制的理论和技术及其应用研究[D].长沙:中南工业大学,1999.
XIE Xuebin. Theory and technology of rock burst prediction and control for hard rock mines and its application[D]. Changsha: Central South University of Technology,1999.

[41] 张培先,高全芳,何希鹏,等.南川地区龙马溪组页岩气地应力场特征及对产量影响分析[J].油气地质与采收率,2023,30(4):55-65.
ZHANG Peixian, GAO Quanfang, HE Xipeng, et al. Characteristics of in-situ stres field and its influence on shale gas production from Longmaxi Formation in Nanchuan area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2023,30(4):55-65.

[42] 李延河,翟　成,丁　熊.深部水平主应力方向对煤巷围岩稳定性影响规律研究[J].煤炭工程,2023,55(2):86-92.
LI Yanhe, ZHAI Cheng, DING Xiong. Influence of deep horizontal principal stress direction on surrounding rock stability of coal roadway[J]. Coal Engineering,2023,55(2):86-92.

[43] 郭延华,姜福兴,张常光.高地应力下圆形巷道临界冲击地压解析解[J].工程力学,2011,28(2):118-122.
GUO Yanhua, JIANG Fuxing, ZHANG Changguang. Analytical solution for critical rockburst of a circular chamber subjected to high in-situ stress[J]. Engineering Mechanics,2011,28(2):118-122.

[44] 徐芝纶.弹性力学 第5版[M].北京:高等教育出版社,2016.
XU Zhilun. Elasticity 5th edition [M]. Beijing: Higher Education Press,2016.

[45] 王云飞,郑晓娟,焦华喆,等.花岗岩破坏过程能量演化机制与能量屈服准则[J].爆炸与冲击,2016,36(6):876-882.
WANG Yunfei, ZHENG Xiaojuan, JIAO Huazhe, et al. Energy evolution mechanism and energy yield criterionin granite′s failure process [J]. Explosion and Shock Waves,2016,36(6):876-882.

[46] 崔　松,王晓南,丁　勇,等.深部开采下应力偏转对地应力场演化规律影响[J].中国矿业,2025,34(增1):402-407.
CUI Song, WANG Xiaonan, DING Yong. Influence of stress deflection on evolution law of in-situ stress field under deep mining[J]. China Mining Magazine, 2025,34(Sup 1):402-407.

[47] 赵红亮,仇　岩,梁海安,等.地应力环境对深埋硐室岩爆特性影响的数值模拟研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(6):53-62.
ZHAO Hongliang, QIU Yan, LIANG Haian, et al. Numerical study on the influence of in-situ stress environment on rock-burst characteristics in deep-buried chambers[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2023,5(6):53-62.

（责任编辑　仝　腾）