

华北型煤田不同覆岩类型下导水裂隙带高度分区预测研究

徐东晶 张瑞庆 高卫富 姜浩楠 朱海锋 李业 夏志村

引用本文:

徐东晶, 张瑞庆, 高卫富, 等. 华北型煤田不同覆岩类型下导水裂隙带高度分区预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 177–189.

XU Dongjing, ZHANG Ruiqing, GAO Weifu, et al. Zonal prediction of the heights of water-conducting fracture zones under varying overburden types in North China-type coalfields[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 177–189.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.10.0625>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[考虑覆岩原生裂隙的导水裂隙带模拟](#)

Numerical simulation of fractured water-conducting zone by considering native fractures in overlying rocks
煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 179–185, 194 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.024>

[基于PSO-BP神经网络的导水裂隙带高度预测](#)

Prediction of the height of water flowing fractured zone based on PSO-BP neural network
煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 198–204 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.024>

[基于覆岩结构效应的导水裂隙带发育特征](#)

Development characteristics of water conducted fracture zone based on overburden structural effect
煤田地质与勘探. 2020, 48(3): 145–151 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.021>

[SMOGN过采样下导水裂隙带高度的MPSO-BP预测模型](#)

A SMOGN-based MPSO-BP model to predict the height of a hydraulically conductive fracture zone
煤田地质与勘探. 2024, 52(11): 72–85 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0186>

[黄陇煤田典型特厚煤层综放开采涌水机理与导水裂隙带发育规律](#)

Water inrush mechanism and water-conducting fractured zone' developmental patterns of a typical ultra-thick coal seam in the Huanglong coalfield during fully mechanized mining

煤田地质与勘探. 2024, 52(5): 129–138 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.08.0480>

[华北型煤田水文地球化学勘探关键技术研究进展](#)

Progress of research on key technologies for hydrogeochemical prospecting in North China type coalfield
煤田地质与勘探. 2023, 51(2): 207–219 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.01.0025>



移动阅读

徐东晶, 张瑞庆, 高卫富, 等. 华北型煤田不同覆岩类型下导水裂隙带高度分区预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 177–189. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.10.0625
XU Dongjing, ZHANG Ruiqing, GAO Weifu, et al. Zonal prediction of the heights of water-conducting fracture zones under varying overburden types in North China-type coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 177–189. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.10.0625

华北型煤田不同覆岩类型下导水裂隙带高度分区 预测研究

徐东晶¹, 张瑞庆¹, 高卫富^{1,*}, 姜浩楠², 朱海峰³, 李业⁴, 夏志村⁴

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局), 山东 青岛 266100; 3. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250101; 4. 鲁西矿业集团鲁西煤矿, 山东 济宁 272000)

摘要: 【背景】我国华北型煤田煤炭资源开采深度及开采强度逐渐增加, 进而导致覆岩移动破坏及裂隙演化等热点问题, 引起极大关注。【方法】收集华北型煤田导水裂隙带高度实测数据共 117 组, 其中不同覆岩类型(坚硬、中硬和软弱)数据分别为 17、42 和 58 组。在此基础上探究不同覆岩类型控制下不同采高、不同采深以及不同工作面斜长对导水裂隙带发育高度的影响。根据华北型煤田含煤地层的沉积特点, 将其划分为北带、中带和南带 3 个区域, 分别采用卷积神经网络、贝叶斯公式及《“三下”规范》3 种方法, 分区域开展北带、中带和南带地区的导水裂隙带高度精细化研究。【结果和结论】结果表明: 随着采高、采深或工作面斜长等因素的改变, 不同覆岩类型条件下的导水裂隙带高度分布出现明显差异, 从坚硬、中硬到软弱覆岩, 裂采比依次降低, 其中坚硬覆岩的裂采比是中硬覆岩的 1.59 倍, 是软弱覆岩的 1.77 倍; 中硬覆岩的裂采比是软弱覆岩的 1.11 倍。预测结果显示, 3 个地区卷积神经网络和贝叶斯公式的 RMSE(E_{RMS}) 值分别为 6.62 和 21.84、2.20 和 8.09、2.60 和 6.12, 明显小于《“三下”规范》中的经验公式的 RMSE(E_{RMS}) 值(45.91、13.40 和 21.99), 说明卷积神经网络和贝叶斯公式的预测结果均优于经验公式, 其中卷积神经网络预测结果更为贴近实测结果, 具有良好的适用性, 可为华北型煤田不同覆岩类型下的导水裂隙带高度预测提供依据。

关 键 词: 华北型煤田; 导水裂隙带; 经验公式; 沉积环境; 覆岩结构; 主控因素

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)03-0177-13

Zonal prediction of the heights of water-conducting fracture zones under varying overburden types in North China-type coalfields

XU Dongjing¹, ZHANG Ruiqing¹, GAO Weifu^{1,*}, JIANG Haonan², ZHU Haifeng³, LI Ye⁴, XIA Zhicun⁴

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute, Qingdao Geological Exploration Development Bureau, Qingdao 266100, China; 3. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250101, China; 4. Luxi Coal Mine in Luxi Mining Group, Jining 272000, China)

Abstract: [Background] The gradual increase in the exploitation depth and intensity of coal resources in the North China-type coalfields has caused problems such as overburden movement and damage, as well as fracture evolution. These hot topics have attracted considerable attention. [Methods] A total of 117 sets of measured data on the heights of water-conducting fracture zones in the North China-type coalfields were collected, consisting of 17 sets from hard over-

收稿日期: 2024-10-11; 接收日期: 2025-02-25

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD101)

第一作者: 徐东晶, 1986 年生, 男, 山东烟台人, 博士, 副教授。E-mail: xudongjinggg@126.com

*通信作者: 高卫富, 1985 年生, 男, 山东淄博人, 博士, 副教授。E-mail: gaoweifu-2006@163.com

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

burden, 42 sets from moderately hard overburden, and 58 sets from soft overburden. Using these data, this study explored the effects of varying mining heights, mining depths, and lengths of the mining face along its dip direction on the heights of water-conducting fracture zones under varying overburden types. Given the sedimentary characteristics of their coal-bearing strata, the North China-type coalfields were divided into three regions: the northern, middle, and southern belts. This study thoroughly investigated the heights of water-conducting fracture zones in the three regions using the convolutional neural network, the Bayes' formula, and empirical formulas for coal mining under buildings, water bodies, and railways. [Results and Conclusions] The results indicate that as the mining height, mining depth, or the length of the mining face along its dip direction varied, the height distributions of water-conducting fracture zones differed significantly under different overburden types. From hard, to medium-hard, and then to soft overburden types, the ratio of the height of water-conducting fracture zones to the mining height (also referred to as the fracture-to-mining ratio) decreased sequentially. Specifically, the fracture-to-mining ratio of hard overburden was 1.59 times that of moderately hard overburden and 1.77 times that of soft overburden, while the fracture-to-mining ratio of moderately hard overburden was 1.11 times that of soft overburden. The prediction results indicate that the prediction results of the northern, middle, and southern belts calculated using the convolutional neural network yielded root mean square errors (RMSEs) of 6.62, 2.20, and 2.60, respectively, while those calculated using Bayes' formula yielded RMSEs of 21.84, 8.09, and 6.12, respectively. These values were much less than those derived using the empirical formulas for coal mining under buildings, water bodies, and railways (45.91, 13.40, and 21.99, respectively). This suggests that the convolutional neural network and Bayes' formula outperform the empirical formulas. Notably, the prediction results obtained using the convolutional neural network are closer to the measured results, suggesting the high suitability of the convolutional neural network. This study can provide a basis for predicting the heights of water-conducting fracture zones under different overburden types in the North China-type coalfields.

Keywords: North China-type coalfield; water-conducting fracture zone; empirical formula; sedimentary environment; overburden structure; main controlling factor

我国是世界最大的煤炭生产国和消费国,特别是在我国的华北地区,煤炭储量非常丰富^[1]。然而,由于煤炭开采深度增加、开采方式改变等原因,华北型煤田矿井水文地质问题日益凸显,其中导水裂隙带的发育高度对矿井安全和生产效率具有重要影响。导水裂隙带发育高度是顶板水防治工作中的重要参数^[2],其预测精准程度很大程度上影响着矿山突水灾害防控工作。目前矿山导水裂隙带发育高度计算公式仍沿用《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[3](简称《“三下”规范》)中提供的公式,然而,规范中经验公式依据的实测数据来源较为久远,仅适用于单层采高1~3 m,累计采高不超过15 m的分层开采,与现有的生产规律和开采方式已产生脱节。华北型煤田主要聚煤期为石炭-二叠纪,其煤层厚度大、储量丰富,且煤质较好,广泛分布于平原地区,由于其地质构造复杂,煤炭资源在沉积环境、分布、种类等方面具有较大的差异,因而没有针对华北型煤田导水裂隙带发育高度预测的经验公式或预测方法。因此,开展华北型煤田导水裂隙带发育规律分区研究,提出更为精准的导水裂隙带高度预测方法,对于指导矿井安全生产和煤炭资源合理开发具有重要意义。

目前,国内外学者在导水裂隙带发育规律方面已开展了大量研究,总结出许多影响导水裂隙带发育的主控因素^[4-7],如采高、煤层埋深、工作面斜长、煤层倾角等。

以往众多学者采用经验公式对不同采煤条件的工作面进行导水裂隙带发育高度预测^[8-11],但由于煤矿开采条件的复杂化和方法工艺的多样化,经验公式现已不能满足实际生产的要求,需要进行持续的理论研究和实践探索^[12]。随着科技的发展,现在许多学者通过钻孔冲洗液漏失量、钻孔成像观测等现场实测法对导水裂隙带发育规律进行研究^[13-17];基于计算机的发展,数值模拟和模型预测等方法被学者广泛运用^[18-22],通过运用3DEC、FLAC^{3D}等软件通过数值模拟研究覆岩破坏规律,揭示了导水裂隙带发育规律,并通过现场实测等方法进行了验证。同时,也有众多学者基于其他方法进行了覆岩破坏和导水裂隙带发育规律研究,如李浩等^[23]通过建立本构模型及开发相应的数值算法,进行了导水裂隙带演化数值模拟,并在山西大同矿区实践应用;徐东晶^[24]通过现场实测、数值模拟和实验室试验等方法,对采动条件下拱形裂隙类岩体的破坏机理进行了研究,构建三角拱形裂隙演化模型和“W”拱形裂隙演化模型;张玉军等^[25]通过回归分析法探究了覆岩坚硬程度对导水裂隙带高度的影响,发现坚硬系数增加的同时,垮落带和导水裂隙带(简称“两带”)发育高度也呈递增趋势;Guo Wenbing^[26]、谢道雷^[27]等学者通过回转下沉量、相关性分析等方法对矿井进行了导水裂隙带发育高度预测。

众多学者在导水裂隙带发育高度规律及预测研究

方面做了大量的研究,通过经验公式法、理论分析法、现场探测法、数值模拟法及机器学习法等方法,协同推动了导水裂隙带发育高度预测研究不断发展完善,并为我国导水裂隙带发育高度的精准识别与预测奠定了重要的理论基石。然而,现有成果在区域适用性和动态预测方面仍存在明显短板,尤其缺乏针对特定煤田地质条件的系统性分区研究;传统预测模型对覆岩结构差异及多因素动态耦合机制的研究尚不充分,难以满足不同矿区精准防控的需求。笔者在前人研究的基础上,通过系统梳理和分析华北型煤田导水裂隙带发育规律的研究成果,开展覆岩类型控制下的导水裂隙带发育规律分区研究,以期通过多种方法进行导水裂隙带发育高度分区预测。

1 导水裂隙带发育高度区域分布特征

煤层的覆岩类型对开采过程中围岩的稳定性和导水裂隙带的发育具有至关重要的影响,不仅决定了覆岩

的破坏方式和整体稳定性,还影响了导水裂隙带的发育规律和形态特征。因此,针对华北型煤田内各煤矿普遍采用的2种开采技术——综放和一次采全高,系统收集了关于导水裂隙带发育高度的实测数据,经整理后共计得到117组有效数据,见表1。数据来源主要分为以往项目研究实测数据和文献查阅^[28-35]两部分。其中不同覆岩类型包括坚硬、中硬和软弱3种,其数据分别为17、42和58组。

通过对华北型煤田含煤地层的研究,根据沉积特点,将含煤地层由北向南划分为3个沉积带(北带、中带、南带),并绘制相关沉积环境图(图1)和典型矿区地层柱状图(图2)^[36]。北带,主要沉积环境为滨海冲积平原和山前冲积平原,此区域内石炭系太原组岩性多样,粗中碎屑岩、灰岩、泥岩和粉砂岩均有分布,且煤层发育稳定;东部地区太原组碎屑岩占比较大;靠近古陆地区,砾岩含量多,灰岩含量少;西部晋北和内蒙古准格尔旗一

表1 各煤田导水裂隙带数据汇总
Table 1 Summary of data on water-conducting fracture zones in various coalfields

煤田	矿井	覆岩类型	采高/m	采深/m	工作面斜长/m	导水裂隙带实测高度/m	煤田	矿井	覆岩类型	采高/m	采深/m	工作面斜长/m	导水裂隙带实测高度/m
神府煤田	大柳塔	软弱	4	49	135	45	东胜煤田	乌兰木伦		2.2	101	158	63
	榆阳矿		3.5	126	212	96.3		乌兰木伦		3.2	56	158	63
	榆阳矿		3.5	105	200	85		补连塔	中硬	4.8	260	208	92
	杭来湾	中硬	4.5	122	215	93.87		上湾矿		8.8	102	300	94
	柠条塔		4.35	116	295	98.68		塔然高勒		4.5	76	279.5	58
	榆神矿		6	86	140	60		补连塔矿	坚硬	6	146	311	125
	金鸡滩		5.5	134	220	108.59		上湾矿		8.8	150	300	120.4
	榆树湾		5	156	240	130.5		赵固一矿		3.5	180	141	41.6
	榆树湾		5	153	242	137.3		常村矿		3.5	123	100	31.26
	榆树湾		5	161	246	138.9		赵屋矿	软弱	4.19	385	130	32.05
淮南煤田	榆树湾		5	145	238	117.8		七一矿		1.7	247	126	30.74
	杭来湾		4.5	129	226	108.32		晋城某矿		3.6	156	110	25.7
	杭来湾	坚硬	4.5	142	236	114.38		盖州矿		1.92	220	100	36
	杭来湾		4.5	126	220	107.83		古汉山	中硬	3	240	152	71
	曹家滩		6	330	350	167		鲁西矿		2.5	350	135	20
	曹家滩		6	260	280	207		鲁西矿		3.42	420	160	41.51
	柠条塔		4.8	150.91	110	158		大封矿	软弱	1.45	106	215	17.6
	柠条塔		5.8	171	286	148		太平矿		1.8	330	129	23.85
	柠条塔		5.46	186.1	269	144		太平矿		2.2	320	122	25.6
	柠条塔		5.46	188.91	273	140		东滩矿		4	400	30	35
济宁煤田	丁集矿		3.7	315	245	40.8		阳城矿	中硬	7.5	665	222	53.7
	丁集矿		2.6	420	253.4	50		新河矿	软弱	2.5	426	110	44.75
	新集矿	软弱	3.8	356	193	53.4		新河矿		5	450	160	55.3
	潘三矿		3	310	250	35		济三矿	中硬	6.1	475	170	64.6
	潘三矿		3.9	350	240	50		济二矿		2.94	568.4	180.4	57
	昌恒矿	中硬	9.2	450	200	80.4		济二矿		2.95	516	206.1	54.5

续表 1

煤田	矿井	覆岩类型	采高/m	采深/m	工作面斜长/m	导水裂隙带实测高度/m	煤田	矿井	覆岩类型	采高/m	采深/m	工作面斜长/m	导水裂隙带实测高度/m
兖州煤田	鲍店矿	软弱	6.9	482	135	64.5	淮北煤田	童亭矿	中硬	2	230	85	52.5
	鲍店矿		5.6	563	188	50.18		杨庄矿		1.7	320	65	27.5
	兴隆庄		2.8	264.5	156	44.34		五沟矿		4.48	360.7	180	38.65
	兴隆庄		2.6	265	147	43.34		五沟矿		5.17	335	135	44.3
	兴隆庄		2.8	264.5	148.5	40.35		五沟矿		3.94	330.91	180	42.8
	兴隆庄		2.6	290	168	46.22		五沟矿		4.07	321	175	35.6
	兴隆庄		2.6	290	168	38.41		五沟矿		4.53	310.21	180	47.5
	兴隆庄		2.6	290	168	39.14		五沟矿		3.2	335	182.8	41
	兴隆庄		2.5	265	192	40.21		五沟矿		3.1	226.2	137.5	44.3
	兴隆庄		2.7	265	192	42.81		谢桥矿		2.6	280	112	49
西山煤田	兴隆庄	中硬	2.6	295	185	40.5		祁东矿	软弱	3	410.5	125.2	37.3
	兴隆庄		5.3	312	145.7	44.2		祁东矿		1.7	422.3	182.7	39
	鲍店矿		7.53	357	170	61.9		祁东矿		1.9	441.7	173.8	45
	鲍店矿		7.52	367	190	61.77		祁东矿		2.7	441.8	56.3	54.9
	南屯矿		5	320	122	67.7		祁东矿		2.9	384.9	168.7	48.6
	南屯矿		4.8	485	175	62.5		桃园矿		3	336.1	158.6	53.4
	兴隆庄		2.8	269	156	50.34		祁南矿		2.8	310.5	173.8	32
	兴隆庄		7	433	168	70.3		祁南矿		1.3	357.3	195.8	27
	兴隆庄		7.4	331	160	64.25		孙疃矿		2.2	341.5	192.4	34
	兴隆庄		5.7	283.9	177.9	51.4		袁二矿		4.1	300.8	201.8	45.1
石嘴山煤田	鲍店矿		7.5	367	173.5	75.5		袁二矿		3.5	401.2	144.9	43
	官庄河	软弱	2.9	402	140	39.7		祁东矿		2.4	667	153.4	65
	曙光矿		3	408	120	41.3		祁东矿		2.7	457.2	181	72
	东曲矿	中硬	4.83	428	226	55.5		祁东矿	中硬	2.3	493.1	184	59
	官庄河		3.1	487	220	53.7		祁东矿		2.6	428.9	127.3	67
	恒昇矿		5	523	200	60.6		青东矿		6.5	360	200	92.5
	红柳矿	中硬	5.28	95	306	81.66		板集矿		4	255	262	73
	麦垛山		3.6	74	250	75.25		留庄矿	软弱	1.23	320	90	31.98
	红柳矿		5	82	302	62.53		高庄矿		4.6	400	170	55.9
准格尔煤田	宁夏某矿	软弱	5	73	306	62.53		高庄矿		4.6	86.1	170	53.9
	门克庆矿		4.35	64	106	46.8	平顶山煤田	云盖山二矿	软弱	4	322	133	50
	红庆河		6	85	246	62.7		平煤股份八矿		2	150	174	58.4
	母杜柴登		4.82	146	280	122.57							

带厚度较小,以泥岩、粉砂岩为主。山西组其沉积特征以陆相为主,煤层以中厚煤层为主,主要煤田有神府煤田、东胜煤田等。中带,主要沉积环境为滨海平原和滨海冲积平原等过渡地带,这一区域的太原组由海相和过渡相砂岩、粉砂岩、泥质岩、灰岩及煤层组成,而山西组沉积以陆相为主,同时夹杂着过渡相沉积,中、细粒碎屑岩占据主导地位,局部隆起区的边缘则呈现出较粗的岩性特征,其旋回结构清晰,一般包含3个由河床相至湖泊相的旋回,煤层主要以中厚煤层为主,但厚度变化较大,主要煤田有山东兖州煤田、宁汶煤田等。南带,

主要沉积环境为滨海环境,太原组主要由灰岩、粉砂岩及泥岩等组成,南部地区的旋回厚度较小但数目较多,以浅海相旋回为主,含煤性较差,煤层发育不稳定,山西组以粉砂岩、泥质岩为主,岩性、岩相表现稳定,大范围内的砂泥比均小于1/2,岩相带及地层的等厚线一般沿东西向展布,其旋回结构相对简单,通常包含2~3个旋回,煤层主要以薄煤层为主,厚度变化较大,主要煤田有安徽淮北煤田、淮南煤田等。

通过对实测数据的统计、分类和分析,以华北型煤田3个沉积带的13个主要煤田为研究区域,见表2。

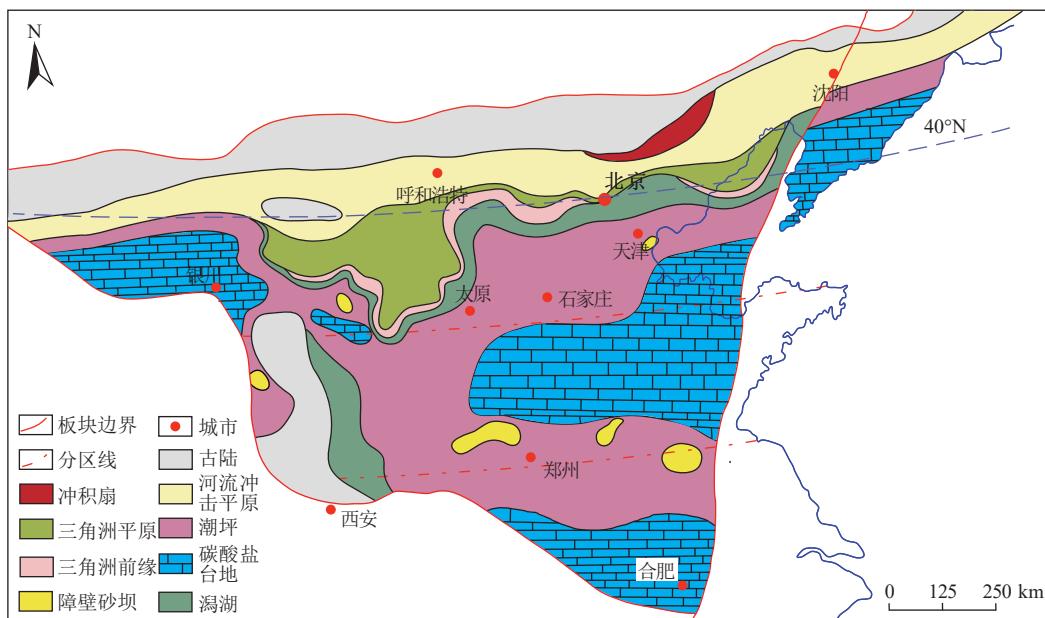


图1 华北地区聚煤期沉积环境(据文献[36]修改)

Fig.1 Sedimentary environment during coal accumulation in North China (modified after reference [36])

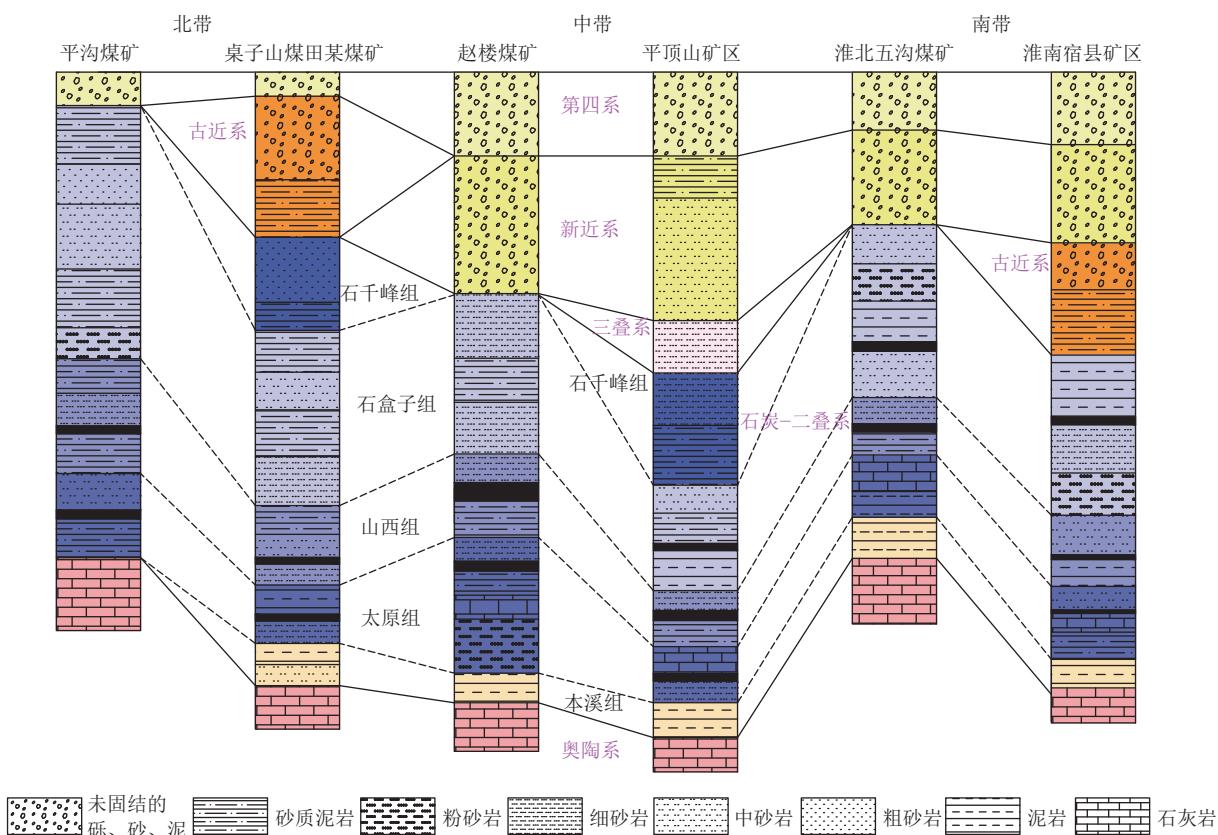


图2 华北地区典型矿区代表性地层综合柱状图

Fig.2 Composite stratigraphic column of representative strata in typical mining areas in North China

并结合覆岩类型绘制了各大煤田不同覆岩类型下的裂采比范围以及平均值分布图。根据不同覆岩类型条件下裂采比范围分布(图3),坚硬覆岩均出现在华北型煤田北带,平均裂采比为23.06;中硬及软弱覆岩则出现在整个华北型煤田区域,北带软弱覆岩类型平均裂采比为11.01,中硬覆岩类型平均裂采比为17.33;中带软弱

覆岩类型平均裂采比为16.51,中硬覆岩类型平均裂采比为13.71;南带软弱覆岩类型平均裂采比为14.51,中硬覆岩类型平均裂采比为15.84。

目前已统计的实测数据基本覆盖我国华北型煤田的主要分布区域,这对于华北型煤田导水裂隙带发育高度预测具有一定意义。

表 2 华北型煤田划分
Table 2 Division of North China-type coalfields

分区	煤田	沉积环境
北带	神府煤田、石嘴山煤田、东胜煤田、准格尔煤田	滨海冲积平原和山前冲积平原
中带	宁汶煤田、兗州煤田、济宁煤田、滕县煤田、平顶山煤田、晋城煤田、西山煤田	滨海平原和滨海冲积平原等过渡地带
南带	淮南煤田、淮北煤田	滨海环境

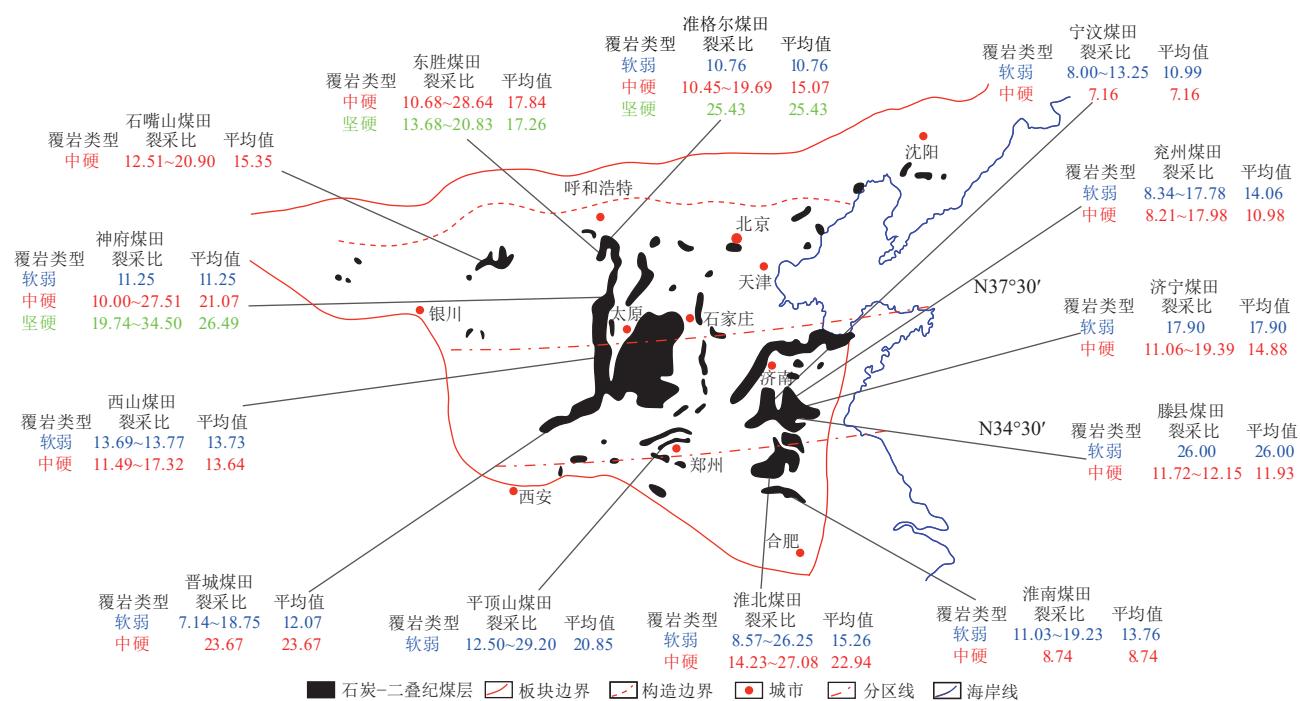


图 3 不同覆岩类型条件下裂采比范围分布
Fig.3 Distribution of the fracture-to-mining ratios under different overburden types

2 导水裂隙带发育高度主控因素分析

通过前人研究成果以及对不同地质因素和不同开采技术条件下导水裂隙带发育高度影响因素的分析与研究,最终根据数据的易采集性(如岩层的力学性质等数据较难采集)、易量化性(如地质构造、地应力和开采方法等难以量化)以及对于导水裂隙带发育的重要性等多方面考虑,确定了覆岩类型、煤层采高、煤层采深和工作面斜长 4 个因素作为导水裂隙带高度预测的主控因素,并综合研究不同覆岩类型下,各主控因素对导水裂隙带发育高度的影响。其中,通过总结前人的研究,含煤地层岩石单轴极限抗压强度(σ_c)与坚硬程度划分对应关系见表 3。

表 3 覆岩类型划分^[37]
Table 3 Classification of the overburden^[37]

覆岩类型	单轴极限抗压强度 σ_c / MPa
软弱	<20
中硬	20~70
坚硬	>70

依据统计数据,对比分析后可知,不同覆岩类型下导水裂隙带发育高度及裂采比具有明显差异,见表 4。其中坚硬覆岩的平均裂采比是中硬覆岩的 1.59 倍,是软弱覆岩的 1.77 倍; 中硬覆岩的平均裂采比是软弱覆岩的 1.11 倍,说明随着覆岩类型由坚硬、中硬到软弱,平均裂采比逐渐减低,裂采比的大小与覆岩类型具有较强的相关性。

表 4 不同覆岩类型下导水裂隙带高度和裂采比
Table 4 Heights and fracture-to-mining ratios of water-conducting fracture zones under varying overburden types

覆岩类型	采高/m	导水裂隙带高度/m	裂采比
坚硬	4.50~8.80	107.83~207.00	13.68~34.50
	5.42	135.03	25.34
中硬	2.20~9.20	50.34~98.68	7.16~28.64
	4.88	60.07	15.92
软弱	1.23~6.90	17.60~64.50	7.14~29.20
	3.11	40.77	14.34

注: 4.50~8.80 表示最小~最大值; 横线下侧数据 5.42 表示平均值, 其他同。

2.1 采高影响

一般来说,采高越大,导水裂隙带发育高度越高,这是由于采高的增大,上覆岩层失去支撑的区域更大,根

据岩梁理论,厚煤层开采导致岩梁跨度增加,岩梁所受的弯矩增大,弯矩超过岩层的极限抗弯强度时,岩层就会断裂,从而产生更多裂隙,使得导水裂隙带的高度增加。

依据实测及统计数据,绘制了不同覆岩类型下导水裂隙带发育与采高的关系,如图4和图5所示。

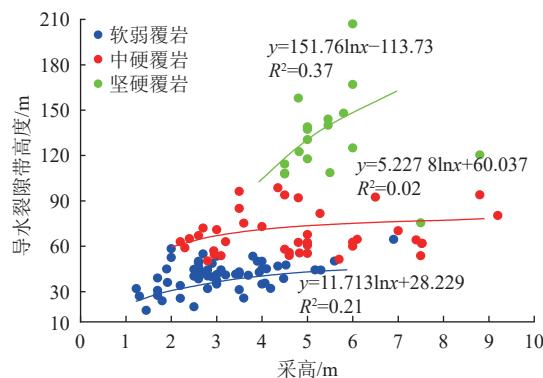


图4 导水裂隙带高度与采高关系

Fig.4 Height of water-conducting fracture zone vs. mining height

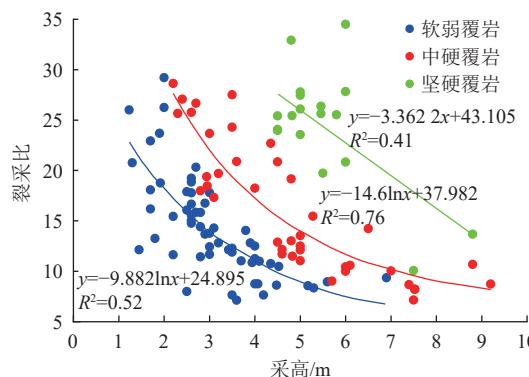


图5 裂采比与采高关系

Fig.5 Fracture-to-production ratio vs. mining height

根据导水裂隙带高度与采高关系(图4),随着采高的增加,软弱覆岩的导水裂隙带发育高度都在60 m以下,整体上导水裂隙带发育高度波动较小;中硬覆岩的导水裂隙带高度在45~105 m,导水裂隙带发育高度趋势相对平稳,其拟合曲线拟合程度最差;坚硬覆岩在采高4~6 m时,导水裂隙带高度数据分布比较分散,范围为115~210 m,整体发育高度变化趋势较大,其拟合曲线拟合程度最好,决定系数 R^2 为0.37。由此可得,坚硬覆岩采高和导水裂隙带发育高度呈现更强的相关性,而软弱覆岩和中硬覆岩的导水裂隙带发育高度与采高的相关性相对较弱。

由裂采比与采高关系(图5)可知,3种覆岩类型的裂采比在采高加大的情况下呈现减小的趋势,在相同采高的情况下,裂采比由大到小的类型依次是坚硬覆岩、中硬覆岩、软弱覆岩。软弱覆岩和中硬覆岩的裂采比相对略微分散,采高加大,裂采比变化较大;而坚硬覆岩

的裂采比在不同采高下波动较小。基于拟合情况分析,软弱覆岩情况下拟合曲线的决定系数 R^2 为0.52;中硬覆岩情况下拟合程度最好,决定系数 R^2 为0.76;坚硬覆岩情况下拟合程度最差,决定系数 R^2 为0.41。

2.2 工作面斜长影响

一般情况下,工作面斜长增加,导水裂隙带发育高度会有所增加。这是因为较长的工作面斜长会使采动影响范围在侧向得到扩展。从应力分布角度看,更长的工作面会使上覆岩层的应力重新分布的范围变大。但当斜长增加到一定程度后,这种影响可能会由于其他因素的作用逐渐减弱。

依据实测数据绘制了不同覆岩类型条件下导水裂隙带高度与工作面斜长的关系(图6)。从两者关系可得,坚硬、中硬和软弱覆岩条件下的导水裂隙带高度整体上呈现出随着工作面斜长的增加而增大的趋势,软弱和中硬覆岩条件下的增加速率较慢,且工作面斜长达到一定跨度后趋于稳定,坚硬覆岩条件下增加的速率相对于其余覆岩条件明显要快,其拟合曲线的决定系数最大, R^2 为0.46,说明坚硬覆岩下,工作面斜长和导水裂隙带高度相关性更强。

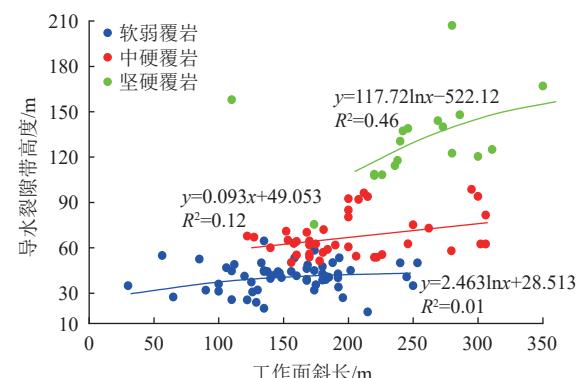


图6 导水裂隙带高度与工作面斜长关系

Fig.6 Height of water-conducting fracture zone vs. the length of the mining face along its dip direction

2.3 开采深度影响

采深对导水裂隙带发育高度有重要影响。随着采深的增加,上覆岩层的自重应力增大。在浅部开采时,由于上覆岩层围压较小,导水裂隙带发育高度较大,而在深部开采时,在高围压状态下,一定范围内导水裂隙带发育高度相对较低,但由于岩层突然失稳,可能产生导水裂隙带高度异常增加。

依据实测数据绘制了不同覆岩类型条件下导水裂隙带高度与采深的关系,如图7所示。根据导水裂隙带高度与采深关系(图7),中硬和软弱覆岩条件下的导水裂隙带高度整体上波动不大,坚硬覆岩条件下的导水裂隙带高度随着采深的增加而呈现小幅度减小的趋势。

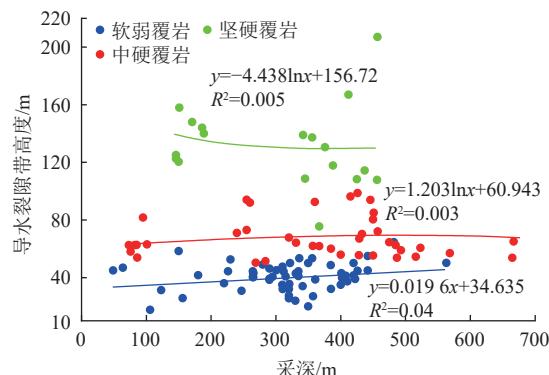


图 7 导水裂隙带高度与采深关系

Fig.7 Height of water-conducting fracture zone vs. mining depth

整体上来看,3类覆岩条件下采深的变化对导水裂隙带发育高度影响不大。

3 华北型煤田导水裂隙带发育高度分区差异性预测

华北型煤田分布虽相对集中,但成煤环境和赋煤条件差异性明显,《“三下”规范》中导水裂隙带发育高度计算公式较为简单且考虑的影响因素较为单一,这种计算方式往往没有考虑煤田的地域特点,难以全面反映煤层的赋存特点、地质构造以及岩性特征等。因此,根据采煤工作面的117组实测数据,综上所述,煤层采深对导水裂隙带发育高度的影响极其微弱,因此,本研究舍弃煤层采深这一因素,以覆岩类型(*b*)、煤层采高(*M*)和工作面斜长(*L*)3项主控因素为基础,构建了适用于华北赋煤区不同区域的导水裂隙带高度预测模型。在建立模型前,需对数据进行标准化处理,消除量纲影响。由于收集的数据样本有限,不一定包含数据样本特征的最大和最小值,因此,在量纲处理时,采用零-均值归一化对数据样本分区分别进行归一化处理。对覆岩类型的数值量化见表5^[38]。

表 5 覆岩类型数值量化
Table 5 Quantization of overburden types

变量类型	变量名称	变量取值
覆岩类型	坚硬	0.75
	中硬	0.50
	软弱	0.25

贝叶斯回归模型是一种基于贝叶斯定理的概率模型,它基于先验概率和观测数据,通过贝叶斯定理计算后验概率,从而对未知事件进行预测和推断。其优势在于在保证决策风险尽可能小的情况下,尽量应用所有可能的信息,不仅包括样本信息,还包括现场试验之前的信息,从而提高预测的准确性^[39]。

卷积神经网络主要由输入层、卷积层、激活函数层、池化层和全连接层等部分组成。相对于传统的机器学

习,卷积神经网络能够自动地从原始数据中学习到有效的特征表示。与传统的全连接神经网络相比,卷积神经网络通过特有的局部连接、权值共享以及池化等处理步骤大大降低了网络模型的复杂度,减少了模型参数的数量,提高了模型学习的鲁棒性^[40]。

基于卷积神经网络和贝叶斯模型的优势,在华北型煤田导水裂隙带相关影响数据基础上,选取卷积神经网络、贝叶斯公式以及《“三下”规范》经验公式3种方式预测导水裂隙带发育高度,对华北型煤田导水裂隙带发育高度进行预测研究,并将各区域数据中的若干个样本作为检验样本,结合3种模型的预测结果与实测结果进行对比。《“三下”规范》经验公式见表6。

表 6 《“三下”规范》经验公式

Table 6 Empirical formulas for coal mining under buildings, water bodies, and railways

岩性	公式一	公式二
坚硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2.0} \pm 8.9$	$H_{li} = 30 \sqrt{\sum M} + 10$
中硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6$	$H_{li} = 20 \sqrt{\sum M} + 10$
软弱	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} \pm 4.0$	$H_{li} = 10 \sqrt{\sum M} + 5$

本次卷积神经网络模型整体结构共分为10层,由上至下依次为:第1层是输入层,负责将样本数据传入模型中,考虑到模型大小,将输入层尺寸定为 $5 \times 1 \times 1$ 。第2层和第5层是卷积层,深度分别为16和32。卷积核(Kernel)大小为 3×1 ,移动步长为1。每个卷积层后连接一个批量归一化(batch normalization, BN)层,进行批量归一化工作。BN层后面紧跟的就是线性修正单元(rectified linear unit, ReLU)激活层,ReLU激活函数相对于Sigmoid函数与Tanh激活函数来讲,求导简单,当采用上述2种函数时,计算量大;反向传播求误差梯度时,求导涉及除法,计算量相对大,而采用ReLU激活函数,整个过程的计算量节省很多。第8层是随机失活(Dropout)层,将Dropout设置为0.2,以防止出现过拟合现象。第9层是全连接层,起到分类器的作用。第10层是回归层,以表明这是在对回归问题进行研究。

通过前期数据整理、分析,得到华北型煤田各地区若干个导水裂隙带实测样本数据,运用SPSS软件建立贝叶斯模型,导入研究所需的数据集,针对选择的数据集,进行模型的训练和数据建模。在训练模型的过程中,根据数据集和网络结构,对节点的概率分布进行学习和调整,最终得出更为精确且适用于华北型煤田的导水裂隙带预测公式。

3.1 北带预测结果对比

通过前期数据整理、分析,得到华北型煤田北带34个导水裂隙带实测样本数据,选取其中30个样本进行导水裂隙带发育高度预测研究,另外4个样本作为检验样本进行结果的对比。通过SPSS建立贝叶斯模型,华北型煤田北带的导水裂隙带预测公式如下:

表7 实测值与其他模型预测值对比

Table 7 Comparison of measured values with predicted values from different models

单位: m

样本序号	实测值	卷积神经网络		贝叶斯模型		《“三下”规范》经验公式	
		预测值	绝对误差	预测值	绝对误差	预测值	绝对误差
1	122.57	122.38	-0.19	139.88	17.31	70.82	-51.75
2	81.66	83.35	1.69	91.57	9.91	49.42	-32.24
3	46.80	43.04	-3.76	32.97	-13.83	27.53	-19.27
4	137.30	124.73	-12.57	139.19	1.89	71.40	-65.90
最小误差		0.19		1.89		19.27	
最大误差		12.57		17.31		65.90	
RMSE (E_{RMS})		6.62		21.84		45.91	
MAE (E_{MA})		4.55		17.57		42.29	
R^2		0.97		0.96			

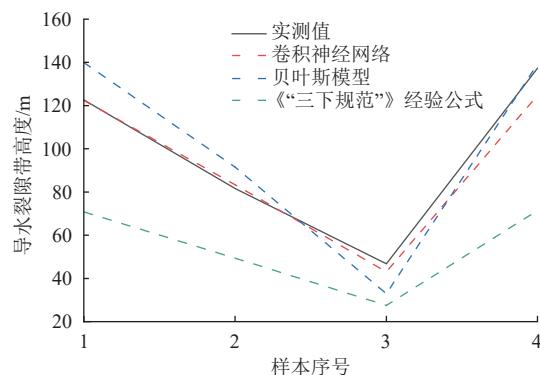


图8 卷积神经网络与其他模型预测结果对比

Fig.8 Comparison of the prediction results of the northern belt between the convolutional neural network and other models

通过分析华北型煤田北带卷积神经网络与其他模型评价指标对比结果可知,从模型的预测精度来看,卷积神经网络的误差范围在0.19~12.57,贝叶斯模型的误差范围在1.89~17.31,《“三下”规范》经验公式的误差范围在19.27~65.90。并且卷积神经网络的均方根误差(RMSE, E_{RMS})和平均绝对误差(MAE, E_{MA})分别为6.62和4.55,小于贝叶斯模型和《“三下”规范》经验公式的结果;从模型的决定系数 R^2 来看,卷积神经网络的拟合程度最好,达到了0.97,大于贝叶斯模型的决定系数0.96。说明在华北型煤田北带,卷积神经网络比贝叶斯模型的拟合效果更好。

3.2 中带预测结果对比

通过前期数据整理、分析,得到了华北型煤田中带

$$H_{\text{li}} = 200.99b + 2.53M + 0.03L - 31.46 \quad (1)$$

将预留的4个样本数据代入贝叶斯模型得出的公式和《“三下”规范》经验公式中,将其计算结果与卷积神经网络预测结果进行对比,对比结果见表7,具体如图8所示。

50个导水裂隙带样本数据,将数据中最后5个样本作为检验样本,结合3种模型的预测结果与实测结果进行对比。运用贝叶斯回归模型,得出适合华北型煤田中带的导水裂隙带预测公式:

$$H_{\text{li}} = 58.12b + 2.81M + 0.02L + 13.69 \quad (2)$$

运用贝叶斯回归模型和《“三下”规范》经验公式将预留的5个样本进行计算,并与卷积神经网络预测结果进行对比,对比结果见表8,具体趋势如图9所示。

通过分析华北型煤田中带卷积神经网络与其他模型评价指标对比结果可知,从模型的预测精度来看,卷积神经网络的误差范围在0.61~3.56,贝叶斯模型的误差范围在0.48~4.78,《“三下”规范》经验公式的误差范围在10.09~16.60。并且卷积神经网络的RMSE和MAE分别为2.20和1.92,远小于贝叶斯模型和《“三下”规范》经验公式的值;从模型的决定系数 R^2 来看,贝叶斯模型的拟合程度最好,达到了0.97。说明在华北型煤田中带,卷积神经网络和贝叶斯模型的拟合效果相近。

3.3 南带预测结果对比

通过前期数据整理、分析,得到了华北型煤田南带33个导水裂隙带实测样本数据,并将数据中的最后4个样本作为检验样本,将3种模型的预测结果与实测结果进行对比。

运用贝叶斯回归模型,得出适合华北型煤田南带的导水裂隙带预测公式:

表 8 实测值与其他模型预测值对比
Table 8 Comparison of measured values with predicted values from different models

单位: m

样本序号	实测值	卷积神经网络		贝叶斯模型		《“三下”规范》经验公式	
		预测值	绝对误差	预测值	绝对误差	预测值	绝对误差
1	62.50	60.07	-2.43	59.74	-2.76	48.15	-14.35
2	50.34	53.90	3.56	53.74	3.40	40.25	-10.09
3	38.41	37.80	-0.61	38.89	0.48	23.91	-14.50
4	30.74	31.65	0.91	35.52	4.78	20.55	-10.19
5	40.21	38.12	-2.09	39.09	-1.13	23.61	-16.60
最小误差			0.61		0.48		10.09
最大误差			3.56		4.78		16.60
RMSE(E_{RMS})		2.20		8.09		13.40	
MAE(E_{MA})		1.92		5.97		13.15	
R^2		0.93		0.97			

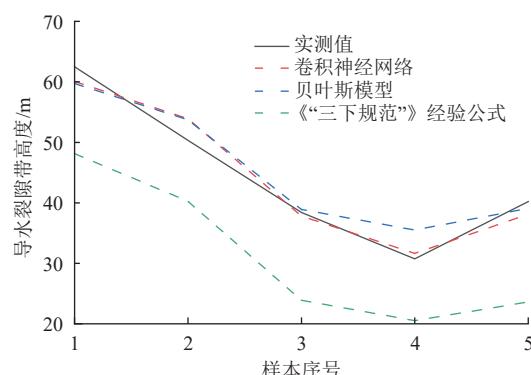


图 9 卷积神经网络与其他模型预测结果对比

Fig.9 Comparison of the prediction results of the middle belt between the convolutional neural network and other models

$$H_{\text{li}} = 107.68b + 2.95M - 0.02L + 10.55 \quad (3)$$

将预留的 4 个样本数据代入到贝叶斯模型得出的公式与《“三下”规范》经验公式中, 将其公式结果与卷积神经网络预测结果进行对比, 对比结果见表 9, 变化趋势如图 10 所示。

通过分析华北型煤田南带卷积神经网络与其他模

型评价指标对比表可知, 从模型的预测精度来看, 卷积神经网络的误差范围在 1.17~3.60。贝叶斯模型的误差范围在 2.05~3.40, 《“三下”规范》经验公式的误差范围在 14.33~27.40。卷积神经网络的 RMSE(E_{RMS}) 和 MAE(E_{MA}) 分别为 2.60 和 2.35, 远小于贝叶斯模型和《“三下”规范》经验公式的值; 从模型的决定系数 R^2 来看, 卷积神经网络和贝叶斯模型的拟合程度相同, 达到了 0.97。综上所述, 在华北型煤田南带, 卷积神经网络的拟合效果更好。

依据 RMSE(E_{RMS})、MAE(E_{MA}) 和 R^2 3 个模型评价指标对不同预测模型在不同地区华北型煤田的预测能力进行了全面评估, 发现卷积神经网络和贝叶斯公式在 3 个地区均具有较高的预测精度和拟合度, 两者的平均绝对误差较《“三下”规范》中经验公式精度平均提高了 87.8% 和 61.4%, 均比《“三下”规范》经验公式预测结果精准。

结合上述结果可知, 卷积神经网络预测结果更为精准, 拟合程度更好, 具有更可靠、更泛化的适用价值; 回

表 9 实测值与其他模型预测值对比
Table 9 Comparison of measured values with predicted values from different models

单位: m

样本序号	实测值	卷积神经网络		贝叶斯模型		《“三下”规范》经验公式	
		预测值	绝对误差	预测值	绝对误差	预测值	绝对误差
1	40.80	42.08	1.28	43.49	2.69	26.47	-14.33
2	41.00	42.17	1.17	43.25	2.25	25.45	-15.55
3	73.00	76.60	3.60	70.95	-2.05	45.60	-27.40
4	65.00	68.34	3.34	68.40	3.40	37.86	-27.14
最小误差			1.17		2.05		14.33
最大误差			3.60		3.40		27.40
RMSE(E_{RMS})		2.60		7.22		21.99	
MAE(E_{MA})		2.35		6.12		21.11	
R^2		0.97		0.97			

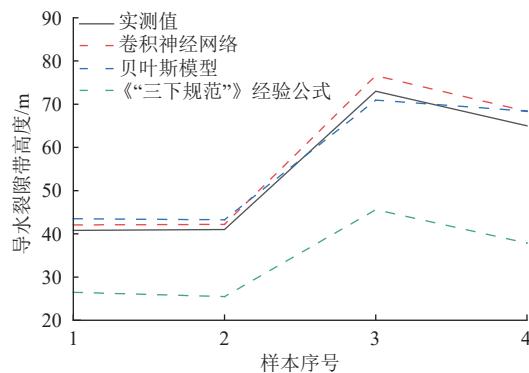


图 10 卷积神经网络与其他模型预测结果对比
Fig.10 Comparison of the prediction results of the southern belt between the convolutional neural network and other models

归公式预测则具有使用简单、方便的特点,因此,矿方可根据不同需求选择不同方式进行导水裂隙带发育高度预测,2种方法均可以应用于华北型煤田的导水裂隙带发育高度预测中。

4 结论

(1) 13个典型煤田不同覆岩类型下裂采比特征分析结果表明,随着覆岩类型硬度降低,平均裂采比也逐渐减小;基于3种覆岩类型下与采高、采深和工作面斜长的关系分析,发现相同覆岩条件下,随着采高或工作面斜长的增加,导水裂隙带发育高度均呈现出上升趋势,而采深的改变对导水裂隙带发育高度影响较小。研究结果对华北型煤田导水裂隙带发育高度的影响因素有了新的认识,为构建新型预测模型提供一定的理论指导。

(2) 根据华北型煤田石炭-二叠系含煤地层的沉积特征及沉积环境的空间分布规律,提出分区研究的方法,将研究区划分为滨海冲积平原和山前冲积平原环境的北带、滨海平原和滨海冲积平原等过渡地带沉积环境的中带和滨海沉积环境的南带3个区域。该方法对华北型煤田导水裂隙带发育高度预测,提供了更为精细、可靠的研究依据。

(3) 采用卷积神经网络、贝叶斯模型及《“三下”规范》公式3种方式,结合多种影响因素进行了各区域导水裂隙带高度预测,结果显示各区域卷积神经网络和贝叶斯模型的平均绝对误差较《“三下”规范》中经验公式精度平均提高了87.8%和61.4%,证明了模型在华北型煤田导水裂隙带发育高度预测工作中的可靠性和适用性。

(4) 下一步的研究目标为丰富数据集,提升模型的准确度。未来相关研究应聚焦在分区精细化、影响因素量化和算法模型优化等方向,并进行实际应用验证,通过实践验证模型的准确性和适用性,确保为导水裂隙

带发育高度预测发挥作用。

符号注释:

H_i 为导水裂隙带高度, m; b 为覆岩类型; M 为煤层采高, m; L 为工作面斜长, m。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 施龙青, 张荣遨, 徐东晶, 等. 基于 GWO-Elman 神经网络的底板突水预测[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2455–2463.
SHI Longqing, ZHANG Rongao, XU Dongjing, et al. Prediction of water inrush from floor based on GWO-Elman neural network[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2455–2463.
- [2] 施龙青, 辛恒奇, 翟培合, 等. 大采深条件下导水裂隙带高度计算研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 37–41.
SHI Longqing, XIN Hengqi, ZHAI Peihai, et al. Calculating the height of water flowing fracture zone in deep mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(1): 37–41.
- [3] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [4] 王永国, 王明, 许蓬. 巴彦高勒煤矿 3-1 煤层顶板垮落裂缝带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(增刊 1): 37–42.
WANG Yongguo, WANG Ming, XU Peng. Characteristics of collapsed fractured zone development of No.3-1 seam roof in Bayangaoler Coal Mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(Sup.1): 37–42.
- [5] 张云, 曹胜根, 郭帅, 等. 含水层下短壁块段式采煤导水裂隙带高度发育规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 106–111.
ZHANG Yun, CAO Shenggen, GUO Shuai, et al. Study on the height of fractured water-conducting zone under aquifer for short wall blocking mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 106–111.
- [6] 王玮, 郭玉, 方忠年. 综采导水裂隙带发育高度主控因素模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(10): 51–55.
WANG Wei, GUO Yu, FANG Zhongnian. Simulation on main controlling factors of development height of fully-mechanized water flowing fracture zone[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(10): 51–55.
- [7] 曹祖宝, 王庆涛. 基于覆岩结构效应的导水裂隙带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 145–151.
CAO Zubao, WANG Qingtao. Development characteristics of water conducted fracture zone based on overburden structural effect[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 145–151.
- [8] 李蕊瑞, 陈陆望, 欧庆华, 等. 考虑覆岩原生裂隙的导水裂隙带模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 179–185.

- LI Ruirui, CHEN Luwang, OU Qinghua, et al. Numerical simulation of fractured water-conducting zone by considering native fractures in overlying rocks[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(6): 179–185.
- [9] 郭小铭, 刘英锋, 谷占兴. 彬长矿区煤层开采导水裂隙带高度探测及计算[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 053526.
- GUO Xiaoming, LIU Yingfeng, GU Zhanxing. Detection and calculation of the height of water flowing fractured zone of coal roof in Binchang mining area[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(5): 053526.
- [10] 徐智敏, 韩宇航, 陈天赐, 等. 侏罗系弱胶结顶板采动破坏规律与发育高度预测[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1474–1485.
- XU Zhimin, HAN Yuhang, CHEN Tianci, et al. Mining-induced overburden failure and height prediction in Jurassic weakly cemented roof[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(4): 1474–1485.
- [11] 刘成勇, 宋伟, 盛奉天, 等. 强含水层下特厚煤层综放开采导水裂隙带发育高度[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 023524.
- LIU Chengyong, SONG Wei, SHENG Fengtian, et al. Development height of water-conducting fracture zone in fully-mechanized caving of extra-thick coal seam under strong aquifer[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(2): 023524.
- [12] 郭文兵, 马志宝, 白二虎. 我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 16–26.
- GUO Wenbing, MA Zhibao, BAI Erhu. Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and railways, and above confined water in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 16–26.
- [13] 耿耀强, 王苏健, 邓增社, 等. 神府矿区大型水库周边浅埋煤层开采水害防治技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1999–2006.
- GENG Yaoqiang, WANG Sujian, DENG Zengshe, et al. Water disaster prevention and control technology in shallow coal seam around the large reservoir in Shenhua coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1999–2006.
- [14] 同和平, 李文平, 段中会, 等. 黄陇煤田典型特厚煤层综放开采涌水机理与导水裂隙带发育规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(5): 129–138.
- YAN Heping, LI Wenping, DUAN Zhonghui, et al. Water inrush mechanism and water-conducting fractured zone' developmental patterns of a typical ultra-thick coal seam in the Huanglong coalfield during fully mechanized mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(5): 129–138.
- [15] 李友伟, 张玉军, 肖杰. 多煤层重复采动覆岩破坏高度发育规律研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(7): 97–103.
- LI Youwei, ZHANG Yujun, XIAO Jie. Development law of overburden failure height under repeated mining in multiple coal seams[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(7): 97–103.
- [16] 王毅, 周余, 张丁丁, 等. 综采工作面采动覆岩导水裂隙带发育高度综合研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(5): 132–141.
- WANG Yi, ZHOU Yu, ZHANG Dingding, et al. Comprehensive study on the development height of water-conducting fracture zone in overburden rock of fully mechanized mining face[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2024, 51(5): 132–141.
- [17] 余学义, 周杨, 赵兵朝, 等. 水体下特厚煤层分层综放开采技术研究[J]. 煤炭工程, 2011(12): 4–7.
- YU Xueyi, ZHOU Yang, ZHAO Bingchao, et al. Research on mining technology of super thick coal seam under water[J]. *Coal Engineering*, 2011(12): 4–7.
- [18] 尚慧, 柳思航, 甘智慧, 等. 浅埋煤层群开采覆岩垮落及导水裂隙带发育规律研究[J/OL]. 水文地质工程地质, 2024: 1–13 [2025-02-27]. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2023090-25>.
- SHANG Hui, LIU Sihang, GAN Zhihui, et al. Development of overlying strata collapse and water-conducting fractured zone in shallow coal seams mining[J/OL]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024: 1–13 [2025-02-27]. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309025>.
- [19] ZHOU Yang, YU Xueyi. Study of the evolution of water-conducting fracture zones in overlying rock of a fully mechanized caving face in gently inclined extra-thick coal seams[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 9057.
- [20] ZHANG Dingyang, SUI Wanghua, LIU Jiawei. Overburden failure associated with mining coal seams in close proximity in ascending and descending sequences under a large water body[J]. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37(2): 322–335.
- [21] 侯恩科, 张萌, 孙学阳, 等. 浅埋煤层开采覆岩破坏与导水裂隙带发育高度研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 102–107.
- HOU Enke, ZHANG Meng, SUN Xueyang, et al. Study on overburden failure and development height of water conducting fracture zone in shallow coal seam mining[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(11): 102–107.
- [22] FANG Han, ZHU Shuyun, ZHANG Shengjun. Height development characteristics of water-conducting fracture zone in a fully mechanized longwall face with a large panel width[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2024, 41(5): 2407–2420.
- [23] 李浩, 白海波, 马立强, 等. 双系煤层采动导水裂隙演化规律的FDEM耦合模拟研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4443–4454.
- LI Hao, BAI Haibo, MA Liqiang, et al. Research on the evolution law of water flowing fractures in the Jurassic and Carboniferous coal seams based on FDEM simulation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4443–4454.
- [24] 徐东晶. 采动条件下拱形裂隙类岩体破坏机理及模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- XU Dongjing. Research on failure mechanism of analogous rock mass having arched fractures and its model under mining conditions[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2017.
- [25] 张玉军, 申晨辉, 张志巍, 等. 我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂缝带发育高度区域分布规律[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 38–48.
- ZHANG Yujun, SHEN Chenhui, ZHANG Zhiwei, et al. Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 38–48.
- [26] GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, LOU Gaozhong, et al. A new method of predicting the height of the fractured water-conducting

- zone due to high-intensity longwall coal mining in China[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8): 2789–2802.
- [27] 谢道雷, 江兴洪, 韩承豪, 等. 基于回转下沉量的导水裂隙带发育高度预测[J]. 煤矿安全, 2024, 55(6): 176–183.
XIE Daolei, JIANG Xinghong, HAN Chenghao, et al. Prediction of development height of water-conducting fracture zone based on rotational subsidence[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(6): 176–183.
- [28] 谢晓峰, 李夕兵, 尚雪义, 等. PCA-BP 神经网络模型预测导水裂隙带高度[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 100–105.
XIE Xiaofeng, LI Xibing, SHANG Xueyi, et al. Prediction of height of water flowing fractured zone based on PCA-BP neural networks model[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 100–105.
- [29] 盛奉天, 段玉清. 彬长矿区巨厚砂岩含水层下综放开采导水裂隙带高度研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(3): 84–89.
SHENG Fengtian, DUAN Yuqing. Height of water-conducting fracture zone in fully mechanized caving mining under extra-thick sandstone aquifer in Binchang mining area[J]. Coal Engineering, 2022, 54(3): 84–89.
- [30] 薛建坤, 王皓, 赵春虎, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤田导水裂隙带高度预测及顶板充水模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1222–1230.
XUE Jiankun, WANG Hao, ZHAO Chunhu, et al. Prediction of the height of water-conducting fracture zone and water-filling model of roof aquifer in Jurassic coalfield in Ordos Basin[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1222–1230.
- [31] 郭维强. 大采高综采覆岩两带发育高度特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增刊2): 142–147.
GUO Weiqiang. Study on characteristics of height of two zones of overburden caused by fully mechanized mining with large mining height[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(Sup.2): 142–147.
- [32] 王振广, 李飞龙, 白志永, 等. “两软一硬”不稳定煤层工作面覆岩“两带”发育高度研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(1): 55–60.
WANG Zhenguang, LI Feilong, BAI Zhiyong, et al. Study on the height of overburden strata in two zones of “two soft and one hard” unstable coal seam working face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(1): 55–60.
- [33] 靳俊恒, 孟祥瑞, 高召宁, 等. 1262(1)工作面导水裂隙带发育高度的数值模拟研究[J]. 煤炭工程, 2010, 42(11): 68–70.
JIN Junheng, MENG Xiangrui, GAO Zhaojing, et al. Numerical simulation study on development height of water conducted crack zone in 1262(1) coal mining face[J]. Coal Engineering, 2010, 42(11): 68–70.
- [34] 吴云, 李运江, 孟昭河, 等. 薄基岩顶分层开采“两带”发育高度研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 61–63.
WU Yun, LI Yunjiang, MENG Zhaohe, et al. Study on development height of “two zones” in thin bedrock top slicing[J]. Coal Technology, 2017, 36(6): 61–63.
- [35] 王连国, 王占盛, 黄继辉, 等. 薄基岩厚风积沙浅埋煤层导水裂隙带高度预计[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 607–612.
WANG Lianguo, WANG Zhansheng, HUANG Jihui, et al. Prediction on the height of water-flowing fractured zone for shallow seam covered with thin bedrock and thick windblown sands[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 607–612.
- [36] 李明培, 邵龙义, 李智学, 等. 华北地区石炭-二叠纪下煤组聚煤期岩相古地理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2399–2410.
LI Mingpei, SHAO Longyi, LI Zhixue, et al. Lithofacies palaeogeography of lower coal group accumulation period of Carboniferous Permian in North China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2399–2410.
- [37] 马亚杰, 武强, 章之燕, 等. 煤层开采顶板导水裂隙带高度预测研究[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 59–62.
MA Yajie, WU Qiang, ZHANG Zhiyan, et al. Research on prediction of water conducted fissure height in roof of coal mining seam[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(5): 59–62.
- [38] ZHAI Peihe, LI Nianzheng. Predicting the height of the hydraulic fracture zone using a convolutional neural network[J]. *Mine Water and the Environment*, 2023, 42(3): 500–512.
- [39] 吕纯. 谢一矿地下水化学特征及突水水源判别 Elman 神经网络模型[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
LYU Chun. Chemical characteristics of groundwater and discriminant models of water bursting source based on Elman neural network: A case study on Xieyi coalmine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [40] 李明星. 基于 CNN 的地-孔 TEM 异常提取及 PSO-DLS 反演方法研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
LI Mingxing. Research on the anomaly extraction based on CNN and PSO-DLS inversion of the downhole TEM method[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.

(责任编辑 周建军)