

西安科技大学

硕士学位论文

下石节煤矿瓦斯地质规律与建模预测研究

Research on Gas Geology Regularity and Modeling

Prediction in Xia Shijie Coal Mine

研究生姓名： 冯海

导 师： 王生全 教授

专 业： 矿产普查与勘探

学 院： 地质与环境学院

2012 年 5 月 28 日

西安科技大学

学位论文诚信声明书

本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及其取得的研究成果。尽我所知，除了文中加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人或集体已经公开发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得西安科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：

日期：

学位论文知识产权声明书

本人完全了解学校有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间所做论文工作的知识产权单位属于西安科技大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版。本人允许论文被查阅和借阅。学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时本人保证，毕业后结合学位论文研究课题再撰写的文章一律注明作者单位为西安科技大学。

保密论文待解密后适用本声明。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

年 月 日

论文题目：下石节煤矿瓦斯地质规律与建模预测研究

专 业：矿产普查与勘探

硕 士 生：冯海

（签名）_____

指导老师：王生全

（签名）_____

摘 要

采煤工作面是煤矿井下作业最集中的生产场所，也是煤矿瓦斯涌出与事故频发的主要场所。采面瓦斯涌出量大小是设计矿井通风、制定瓦斯预防措施和矿井安全管理的主要依据。本文以铜川下石节高瓦斯矿井为研究对象，主要从三个方面对该矿采面瓦斯进行了预测探讨。

首先，通过对煤层瓦斯含量的分析，确定了影响 4⁻² 号煤层瓦斯含量高低的三个主控地质因素，分别是延安组煤系二、三段厚度，煤层顶板含油强度指数，4⁻² 号煤层老顶小街砂岩厚度。以此为依据，采用灰色系统建模理论，建立了 4⁻² 号煤层瓦斯含量预测数学模型，并运用该模型对下石节煤矿 4⁻² 号煤层的瓦斯含量进行了预测，总结出了煤层瓦斯含量的分布规律，预测结果与地面煤层气参数井实测数据基本吻合。

其次，在对下石节煤矿已采综采工作面瓦斯涌出规律总结分析基础上，确定出了影响采面瓦斯涌出量的五个主控因素，分别是煤层埋藏深度，采面日产量，煤层瓦斯含量，煤层顶板含油强度指数，日回采进度。利用逐步回归分析方法，建立了未采区采面瓦斯涌出量的静态预测模型，编制了采面瓦斯涌出量预测图。

最后，结合影响采面瓦斯涌出量的主控地质与生产因素，应用灰色系统理论，建立了采面瓦斯涌出量的动态预测 GM(1, 1) 模型，对正在回采的 219 综采面绝对瓦斯涌出量进行了超前预测，所得结论对于适时调整采面通风，加强“一通三防”，预防瓦斯超限具有重要意义。

关 键 词：高瓦斯矿井；瓦斯涌出量；综采工作面；数学模型

研究类型：应用研究

**Subject : Research on Gas Geology Regularity and Modeling Prediction
in Xia Shijie Coal Mine**

Specialty : Mineral Resource Prospecting and Exploration

Name : Feng Hai (Signature) _____

Instructor: Wang Shengquan (Signature) _____

ABSTRACT

Coal face is the most centralized production place, meanwhile the main place of gas emission and accident frequency. Gas emission quantity of the coal face is a main aspects in designing coal mine ventilation system, making gas prevention measures and mine safety management. The paper take Tong Chuan Xia Shijie coal mine as research object. Prediction gas emission quantity of coal face is discussed mainly from three aspects in the paper.

Firstly, By analyzing coal seam gas content, three factors of controlling gas content of the 4⁻² coal seam are determined: The thickness from second part to the third part of Yanan formation, Oil-abundance index of the seam roof, Main roof thickness (Xiaojie sandstone) of the 4⁻² coal seam. Comprehensive consideration of geological factors, based on Grey System Modeling Theory, coal seam gas content prediction model is established, The prediction gas content results are basically consistent with the measured data in the scene. by using this method in 4⁻² coal seam in Xia Shijie Through analyzing the results of gas content prediction, The distribution law of coal seam gas content is summarized.

Secondly, Based on analyzed and summarized gas emission data of fully-mechanized mining face that has been mined in Xia Shijie mine coal, five main controlling factors of coal face gas emission quantity are determined: embedding depth of coal seam, daily output, coal seam gas content, Oil-abundance of seam roof, daily advance. Using the method of stepwise regression, Gas emission prediction model in non-mining areas has been established. the coal face gas emission prediction contour map is drawn.

Finally, combined with the main geologic and productive factors which controlling gas emission quantity of mining face, Present a model GM(1.1) for the gas emission quantity of the coal face based on the Grey System Theory, the absolute gas emission quantity of 219 mining face is predicted. The conclusion has important significance in adjusting mining face ventilation timely, strengthening "one ventilation three prevention", preventing gas overrunning.

Key words: Hingh Gas Coal Mine; Gas Emission Quantity; Fully Mechanized Face;

Mathematical Model

Thesis: Application Research

目录

1 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义.....	1
1.1.1 选题背景	1
1.1.2 研究意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势.....	2
1.2.1 国外煤矿瓦斯预测研究的水平及现状	2
1.2.2 国内煤矿瓦斯预测研究的主要方法	3
1.3 下石节煤矿瓦斯涌出预测状况及存在问题.....	7
1.4 本文的研究内容、研究方法及技术路线.....	7
1.4.1 研究内容	7
1.4.2 研究方法	7
1.4.3 技术路线	8
2 矿井瓦斯地质条件概述	9
2.1 矿井概况.....	9
2.1.1 地理位置	9
2.1.2 生产情况	9
2.2 地层及煤系地层.....	10
2.3 地质构造.....	13
2.3.1 矿区构造	13
2.3.2 井田构造	13
2.4 主采煤层特征.....	14
2.4.1 煤层厚度特征	14
2.4.2 煤质特征	15
2.4.3 煤储层物性特征	16
2.4.4 煤储层封闭性特征	18
2.5 矿井瓦斯概况.....	20
3 矿井瓦斯赋存规律及定量预测	21
3.1 油气显示及赋存特征.....	21
3.1.1 油气显示特征	21
3.1.2 油气赋存规律	23
3.2 煤(岩)层瓦斯特征.....	24
3.2.1 煤层瓦斯含量及成分	24

3.2.2 煤层瓦斯压力	26
3.2.3 岩层瓦斯特征	26
3.3 煤层瓦斯含量影响因素分析.....	27
3.4 瓦斯含量主控因素筛选.....	30
3.5 煤层瓦斯含量建模预测.....	32
3.5.1 数学原理与模型	32
3.5.2 煤层瓦斯含量预测指标及预测结果	34
4 采面瓦斯涌出量建模预测	37
4.1 采面瓦斯涌出源分析.....	37
4.2 采面瓦斯涌出规律.....	37
4.3 采面瓦斯涌出量影响因素分析.....	38
4.4 采前采面瓦斯涌出量建模预测.....	41
4.4.1 逐步回归分析数学原理	41
4.4.2 预测结果	44
4.5 回采面瓦斯涌出量动态建模预测.....	47
4.5.1 GM(1, 1)模型数学原理.....	47
4.5.2 原始数据处理及模型建立	48
4.5.3 残差检验	49
4.5.4 瓦斯涌出量动态预测模型的建立及应用	50
5 结论及展望	51
5.1 结论.....	51
5.2 展望.....	51
致谢.....	52
参考文献.....	53
附录.....	56

1 绪论

1.1 选题背景及研究意义

1.1.1 选题背景

我国是煤矿安全生产形势最为严峻的国家之一，其中以煤矿瓦斯引起的灾害事故最为频繁，后果最为严重。瓦斯对煤矿安全的主要威胁有爆炸、突出、窒息三种形式^[1]。2004年11月28日陈家山煤矿因瓦斯爆炸造成166人死亡；2005年2月14日辽宁阜新孙家湾煤矿发生一次死亡214人的特大瓦斯爆炸事故；2009年2月22日，山西西山煤电集团屯兰煤矿南四盘区发生瓦斯爆炸事故，造成78人死亡，114人受伤，其中危重伤员5人。2012年2月3日，四川宜宾市筠连县钓鱼台煤矿发生瓦斯爆炸，造成13人死亡。据有关资料统计，近三年来，全国发生的重大煤矿瓦斯事故280多起，遍及全国15~16个省市、自治区，至少造成2200余人遇难，损失特别惨重，教训极为深刻，令国人及世界为之震惊^[2]。

随着采矿技术装备的快速发展，综合机械化采煤以高产高效、成本低、经济效益显著的特点在我国大面积普及^[3]，涌现出了一大批以综合机械化采煤为特征的高产高效集约化矿井。集约化生产是我国煤炭生产方式的一大飞跃，但由于开采强度大、生产集中、推进速度快，造成采面瓦斯涌出集中、涌出不均衡等特点^[4]，对安全生产构成了极大威胁，严重制约了高产高效工作面优势的发挥，重大恶性瓦斯事故也连续不断的出现。矿井生产能力由于瓦斯灾害的威胁而受到极大限制，为了将采掘工作面瓦斯浓度控制在安全限度以内而不得不减慢采、掘速度，这样使许多矿井的生产能力不得不一减再减，这不仅浪费了大量的生产投资，同时造成高产高效的采、掘、运机械化装备难以发挥效能，劳动生产率水平低下。由于矿井安全生产受到威胁，矿井经济负担重，效益差，致使矿井职工队伍难以稳定，科技开发能力减弱，不少高瓦斯突出矿井步入恶性循环，最终导致矿井关闭。大量事实证明，瓦斯事故影响面广、毁坏力强，一旦发生几乎没有人员生还，给国家和人民造成的损失难以想象。目前瓦斯灾害治理的好坏已成为高瓦斯矿井兴衰存亡的关键因素之一。而对矿井瓦斯涌出量的预测和采煤工作面瓦斯涌出规律的研究是煤矿瓦斯防治技术的一个重要内容。

1.1.2 研究意义

长期的生产实践证明，分析矿井瓦斯的赋存条件、总结瓦斯运移规律、实施瓦斯预

测是煤矿瓦斯防治必不可少的技术环节。采煤工作面是煤矿井下作业最集中的生产场所，也是煤矿瓦斯涌出与事故频发的主要场所。采面瓦斯涌出量大小是设计矿井通风、制定瓦斯预防措施和矿井安全管理的主要方面，它直接影响着矿井产量的确定、主要通风机能力的选择和瓦斯灾害防治技术的对策，是预防矿井瓦斯事故的重要依据^[5]。采面瓦斯涌出量预测精度的高低决定着矿井生产时的安全程度、经济效益的好坏。因此，针对不同类型采煤工作面特点，在其生产前，建立一种适应范围广且准确率高的瓦斯涌出量预测模型，并准确、快捷地对生产过程瓦斯涌出量大小做出预测，对制定行之有效的瓦斯治理措施，防止恶性瓦斯事故的发生具有重大的经济、社会效益和深远的现实意义。本文将运用地质学的方法研究与煤相伴生的瓦斯生成、储存、运移、富集及释放的机理与规律，从地质角度探索下石节煤矿采煤工作面瓦斯涌出量的超前预测预报技术。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 国外煤矿瓦斯预测研究的水平及现状

瓦斯涌出量是一个受时间、空间、煤层赋存地质条件及生产技术因素控制的复杂函数，瓦斯涌出量的大小既取决于自然因素，同时也受开采技术因素影响。根据某些已知数据，按照一定的方法与规律，预先估算出区域或矿井乃至采煤工作面瓦斯涌出量大小的工作一直受到世界各主要产煤国的高度重视^[6]。近年来，世界主要产煤大国高度重视煤矿瓦斯预测技术(包括含量预测和涌出量预测)。各采煤国投入了巨大的人力物力进行技术攻关，取得了大量可供参考与借鉴的经验和研究成果。据有关煤矿安全技术类期刊文献报道，国外在煤矿瓦斯预测技术研究方面的技术水平及现状概述如下^[7]：

(1) 预测技术方法化、规范化：二十世纪八十年代初俄罗斯针对不同类型矿井及煤层地质赋存条件与生产条件，制定了矿井瓦斯涌出量预测的方法规范，煤层在开采时的瓦斯预测工作以法规的形式得以确立；其它主要产煤国也根据各自国情研究建立了瓦斯预测方法，如：英国的艾黎(Airey)法，德国的文特(Winter)法，美国的匹茨堡矿业研究院法等。

(2) 预测方法动态化：瓦斯涌出是一个包含多因素的复变函数，受时间、空间及煤层赋存条件的影响很大，具有多变性^[5]，因此，瓦斯涌出的动态预测方法，是世界各产煤国的主要研究方向，例如：英国的艾黎法综合了时间和开采技术条件对瓦斯涌出的影响，德国的文特法从时空序列入手对采掘工作面瓦斯进行动态预测，这些方法可以根据煤层赋存条件和开采技术条件的变化对采掘工作面的瓦斯涌出量做超前的动态预测，并根据预测结果随时调整工作面的风量并采取合理的瓦斯处理技术措施，取得了良好的应用效果^[7]。

(3) 预测内容多元化、综合化：如俄罗斯在瓦斯预测时，不但预测煤层瓦斯含量、

涌出量,而且还预测煤层瓦斯分区分带特性、瓦斯储量丰度,并且对矿井中长期瓦斯涌出态势及防治对策作出评价。

1.2.2 国内煤矿瓦斯预测研究的主要方法

煤科总院抚顺分院在我国瓦斯涌出量预测方面的研究起步早、成果突出,从 20 世纪 50 年代初就开始进行这方面的研究^[5,8]。“七五”期间(1986-1990 年)抚顺分院开展了矿井瓦斯涌出量预测方法的研究,提出了矿井瓦斯涌出量分源预测方法,瓦斯涌出量预测技术有了较大的发展,并得到初步推广应用。“八五”期间(1991-1995 年)在分源预测基础上,提出了构造单元分源预测法,首次建立了全国统一的矿井瓦斯涌出量预测方法,将预测精度提高到 85%以上。“九五”期间(1995-1999 年)进一步研究了高产高效采煤工作面 and 综掘工作面的瓦斯涌出规律。经过 20 多年的生产实践应用和研究发展,分源预测法得到了广泛推广并已实现实用化。2006 年发布了行业标准《矿井瓦斯涌出量预测方法》(AQ1018-2006)。

生产实践资料表明,工作面瓦斯涌出量同时受自然因素的影响和开采技术因素的制约。因此涌出量的预测必然是涉及多因素的综合预测^[9]。随着数学方法和计算机技术的迅速发展,原有的预测方法和应用范围得到了拓展,出现了一些新的预测方法,如瓦斯地质数学模型法、速度预测法以及灰色系统理论预测法、神经网络预测法等。从目前国内研究现状来看,矿井瓦斯涌出量预测方法主要有如下 7 种^[10~13]:

(1) 矿山统计法

赵鹏伟利用矿山统计法以山西王庄煤矿为例对综放工作面瓦斯涌出量进行预测研究^[14]。

①基本原理:根据生产矿井不同开采深度已采水平的相对瓦斯涌出量的大量实测资料,通过统计分析,找出相对瓦斯涌出量随深度增长的规律,来预测延伸水平或相邻矿井的瓦斯涌出量。在瓦斯风化带以下的甲烷带内,当煤层瓦斯地质条件和开采条件变化不大时,相对瓦斯涌出量随采深呈近似线性关系:

$$q = q_1 + \frac{H - H_1}{a}$$

式中: q ——待求深度的相对瓦斯涌出量, m^3/t ;

q_1 ——对应于 H_1 的相对瓦斯涌出量, m^3/t 。

H ——对应于 q 的深度, m 。 $H > H_1$

H_1 ——瓦斯风化带以下测定涌出量的深度, m ;

a ——瓦斯梯度(即相对瓦斯涌出量每增加 $1\text{m}^3/\text{t}$ 时深度增加的米数), $\text{m}/\text{m}^3/\text{t}$

②适用条件及存在的不足:适用于生产矿井的延深水平、开采水平的新区、邻近的

新矿井。至少应积累 2 个开采水平的瓦斯涌出量资料, 应具备的开采技术条件如煤层开采顺序、采煤方法与顶板管理、地质构造、煤层赋存、煤质等应与生产区相同或类似。外推范围限定在垂深度不得超过 100~200m, 倾斜方向不超过 600m。当开采条件或地质条件发生改变时, 即使在同一矿井, 也不能对深部区域进行预测。

(2) 分源预测法

董化洲对矿井瓦斯涌出量进行分源预测探析。分源预测法预测矿井瓦斯涌出量已经在煤矿抽放瓦斯工程设计、通风安全设计和生产管理中取得较好的效果^[15]。

①基本原理: 分源法预测法实质是按照矿井生产过程中瓦斯涌出源的多少及各个涌出源瓦斯涌出量的大小来预测矿井、采区、回采面和掘进工作面等场所的瓦斯涌出量(图 1.1)。各个瓦斯源涌出瓦斯量的大小是以煤层瓦斯含量、瓦斯涌出规律及煤层开采技术条件为基础进行计算确定的。

②适用条件及存在的不足: 适用于新建矿井、生产矿井水平延深、新设计采区以及采掘工作面的瓦斯涌出量预测。分源预测法的缺陷是公式一些参数要根据矿区现场实测得到, 而取到这些参数常常有一定困难, 这使其推广应用受到一定限制。

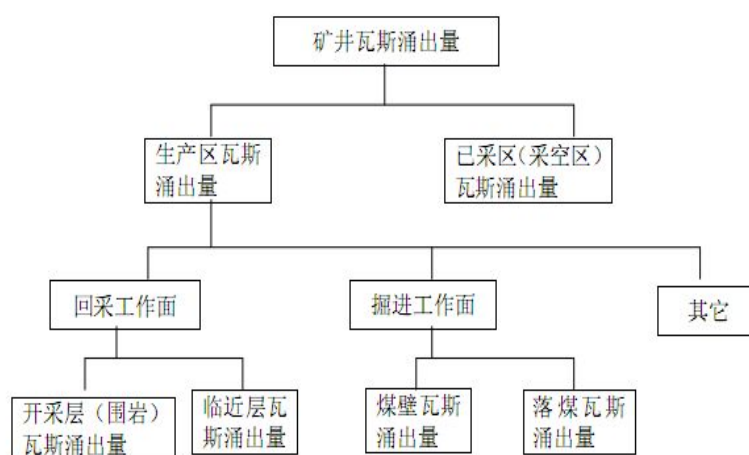


图 1.1 瓦斯分源预测法结构图

(3) 类比法

通过对部分矿井同采区同翼同煤层回采工作面瓦斯涌出量、产量及其开采深度的研究, 张国枢等人对高瓦斯高产工作面瓦斯涌出量利用类比法进行预测研究^[16]。

①基本原理: 瓦斯生成、赋存、排放条件是受地质构造因素控制的。在一个煤田或一个矿区范围内, 在地质条件相同或相似的情况下, 矿井瓦斯涌出量与钻孔煤层瓦斯含量之间存在一个自然比值。对于新建矿井可以通过邻近生产矿井已知的矿井瓦斯涌出量资料和钻孔煤层瓦斯含量资料的统计运算, 求得一个比值。然后将该比值与新建矿井已知的钻孔煤层瓦斯含量相乘, 即可得到新建矿井的瓦斯涌出量。

②适用条件及存在的不足: 适用于与邻近生产矿井具有相同或相似的地质、开采条

件的新建矿井瓦斯涌出量预测。类比法对矿井瓦斯涌出的预测精度很低,有时只能作定性的分析。

(4) 速度预测法

回采工作面的瓦斯涌出量,主要来源于开采层及临近层,煤层瓦斯涌出量的大小,除取决于煤体内外的瓦斯压力差及透气条件之外,还与其存在的时间及空间条件有关。因此,瓦斯涌出量预测指标的确定,应在研究煤层中瓦斯的涌出机理和涌出特性的基础上,从瓦斯涌出速度上着手解决。赵益芳等利用速度法预测矿井新盘(采)区瓦斯涌出量^[12]。

①基本原理:回采工作面的瓦斯涌出量,主要来源于开采层及邻近层,煤层瓦斯涌出量的大小,除取决于煤体内外的瓦斯压力差及透气条件之外,还与其存在的时间及空间条件有关。此方法是从瓦斯涌出速度上着手,是一种新的以瓦斯动力学为理论基础的瓦斯涌出量预测方法。

②适用条件及存在的不足:适用于矿井新盘(采)区瓦斯涌出量预测。预测时必须准确测定瓦斯涌出初速度与衰减系数这两个参数,以提高预测的精度,但现场测定这两个参数时难度较大,且即使测出来也只能代表一定区域,在全矿井推广应用也有一定的局限性。

(5) 瓦斯地质数学模型法

张子戌,袁崇孚应用瓦斯地质数学模型对矿井瓦斯涌出量开展预测研究,实现了对未采区瓦斯涌出量的静态预测^[10,17]。

①基本原理:通过瓦斯地质规律研究,分析瓦斯涌出量的变化规律,筛选影响瓦斯涌出量变化的主要地质因素,在此基础上,根据矿井已采地区的瓦斯涌出量实测资料和相关的地质资料,综合考虑包括开采深度在内的多种影响因素,采用一定的数学方法,建立预测瓦斯涌出量的多变量数学模型(预测方程),利用所建立的数学模型,对矿井未采区域的瓦斯涌出量进行预测。瓦斯地质数学模型法采用数量化理论^{I^[17]}作为建模工具,可以同时处理定性变量和定量变量的多元统计分析方法。

②适用条件及存在不足:瓦斯地质数学模型法适用于在矿井生产阶段对深部未采区域进行瓦斯涌出量预测。需要统计积累矿井生产期间大量的地质、开采及瓦斯涌出方面的资料。

(6) 灰色系统预测方法

一个系统具有层次结构关系的模糊性,动态变化的随机性,指标数据的不完备或不确定性,则称这些特为灰色性。具有灰色性的系统称为灰色系统。灰色系统理论由邓聚龙于1982年提出。刘新喜基于灰色系统理论建立了矿井瓦斯涌出量的测预模型^[18]。

①基本原理:灰色系统是指既含有已知的,又含未知的或非确知信息的系统。它是介于信息完全知道的白色系统和一无所知的黑色系统之间的中间系统。矿井瓦斯涌出是受多种因素影响的动态变化过程,各因素间的关系是动态的、模糊的。灰色模型正好能

反映瓦斯涌出量外延明确、内涵不明确的系统内在变化规律。通过历年矿井瓦斯鉴定资料采用灰色建模来预测深部矿井瓦斯涌出量。

②适用条件及存在的不足：不但可以预测不同采深的瓦斯涌出量，而且还可以预测工作面某一时间、同一水平不同区段瓦斯涌出量。灰色理论预测方法在短期预测精度较高，但在多因素情况下同样遇到精确建模与求解两方面的困难。

(7) 神经网络预测法

刘新喜提出了基于 BP 人工神经网络的矿井瓦斯涌出量预测方法^[18]，建立了煤层群开采矿井瓦斯涌出量预测模型，实现了对矿井瓦斯涌出量的预测。曾勇用模糊分形神经网络研究矿井瓦斯涌出量的预测^[12,19]

①基本原理。神经网络具有通过样本来“学习”的能力，一方面区别于传统的各种预测方法，实际应用时勿需做出因素与瓦斯涌出量相关的任何假设，只须将实际数据直接提供给网络来训练；另一方面训练完成后的网络能以任何精度逼近真值（只要训练数据足够多），能够抽提、捕捉到大量繁杂的历史数据中的规律，尤其是那些尚未被人类认识和揭示的规律，这些优点是传统方法无法比拟的。实际上，瓦斯涌出量与其影响因素之间存在着复杂的非线性关系。对于这类问题，神经网络具有较高的建模能力，能真实地刻画输出变量与输入变量之间的非线性关系。

②适用条件及存在的不足。适用于在矿井生产阶段对未采区域采区或工作面进行瓦斯涌出量预测。但该方法计算较复杂并需要进行编程。

(8) 基于 GIS 的瓦斯预测法

利用地理信息系统(GIS)软件和计算机技术实现瓦斯预测的快速化、自动化，及时更新生产数据资料并调整分析和设计^[20]，从而建立起瓦斯预测信息管理系统。对瓦斯预测进行信息化管理有助于及时、准确地提供矿用矢量图形系统，可生成采掘工程平面图、瓦斯含量等值线图、瓦斯压力等值线图、瓦斯地质图等重要图件，并能实现这些图形的快速更新、查询、打印等功能。通过各实测数据的输入，比较准确地预测出瓦斯涌出危险区^[21]。组织和管理与瓦斯预测有关的各类数据，建立数学模型，进行瓦斯涌出危险区域的预测预报。

20世纪九十年代以来，我国有关院校提出了瓦斯地质数学模型法，利用建立的多元线性数学模型开展采面瓦斯涌出量预测，得到了较好应用，但在如何合理选择工作面瓦斯涌出量影响的主控因素上，还没有一个有效的原则；近年来的大量研究表明，采面瓦斯涌出量与地质因素间并非完全线性关系，而且瓦斯涌出量的大小还取决若干生产因素，具有呈动态变化的特点^[22]，许多学者提出了利用神经网络及灰色系统理论开展瓦斯涌出量的预测技术，尽管这些非线性理论开辟了瓦斯涌出量预测的新途径，但也存在一定的不足与缺陷。不足表现在：一是大多数非线性模型是事先假定了工作面参数的情况下，用来预测工作面静态瓦斯涌出量的，针对工作面开采过程的瓦斯涌出量动态变化建

立的预测模型还很少；二是对样本数据如何筛选，没有一个有效的原则。

目前瓦斯预测主控因素的研究与筛选，地质、生产因素与瓦斯涌出量之间动态化的、线性或非线性的数值关系，预测结果与地质图件的完整结合是今后矿井瓦斯涌出量预测的仍需开展研究的难点课题。

1.3 下石节煤矿瓦斯涌出预测状况及存在问题

下石节煤矿属高瓦斯，煤、油、气共生矿井，除煤层含瓦斯外，煤层顶底部围岩均含有多层石油与天然气，因此，矿区瓦斯涌出量较大，除采掘面多次出现瓦斯超限，并偶有较大瓦斯涌出现象外，曾发生过多起瓦斯燃烧和喷出事故。矿井投入大批人力物力进行瓦斯灾害研究与治理，并取得了一定成就。但总结以往的研究工作，矿井在瓦斯治理方面工作做的多，而预测研究做的少。没有将煤层瓦斯作为一个地质体，运用地质学的方法研究与煤相伴生的瓦斯生成、储存、运移、富集及释放的机理与规律，从而进行超前的预测研究。

1.4 本文的研究内容、研究方法及技术路线

1.4.1 研究内容

- (1)下石节煤矿煤层瓦斯赋存地质条件研究。
- (2)下石节煤矿煤层瓦斯含量赋存规律及其定量建模预测。
- (3)下石节煤矿综采面瓦斯涌出规律及其控制因素确定。
- (4)下石节煤矿综采面瓦斯涌出量静态及其动态建模预测。

1.4.2 研究方法

以井上下大量实测和调查资料为依据，以室内外测试分析、统计、计算、成图为主要途径，以瓦斯地质观点为指导，综合运用煤田地质学、瓦斯地质学、数学地质及非线性数学理论等学科的理与方理论，引入计算机处理技术，走定性定量相结合的综合研究思路。具体包括以下几方面：

(1)资料收集：系统观测、收集与煤层瓦斯赋存、涌出有关的一系列地质资料及瓦斯资料，采集煤岩样品，并考察现有瓦斯防治措施与效果。

(2)室内测试分析：分析煤岩样品的瓦斯含量、煤体结构、煤层裂隙等，并对所得数据进行分析整理。

(3) 统计整理与制图分析：对收集的资料进行系统分析，并借助计算机制图技术，完成相关图件的绘制。

(4) 数理分析与建模预测：通过对影响煤层瓦斯含量主控因素及采面瓦斯涌出量主控因素的分析，选用合适数学方法与理论，分别建立煤层瓦斯含量、采面瓦斯涌出量静态与动态预测数学模型。

(5) 现场验证：对所建立的煤层瓦斯预测模型进行检验校正。

1.4.3 技术路线

本文研究采取技术路线如下（图 1.2）：

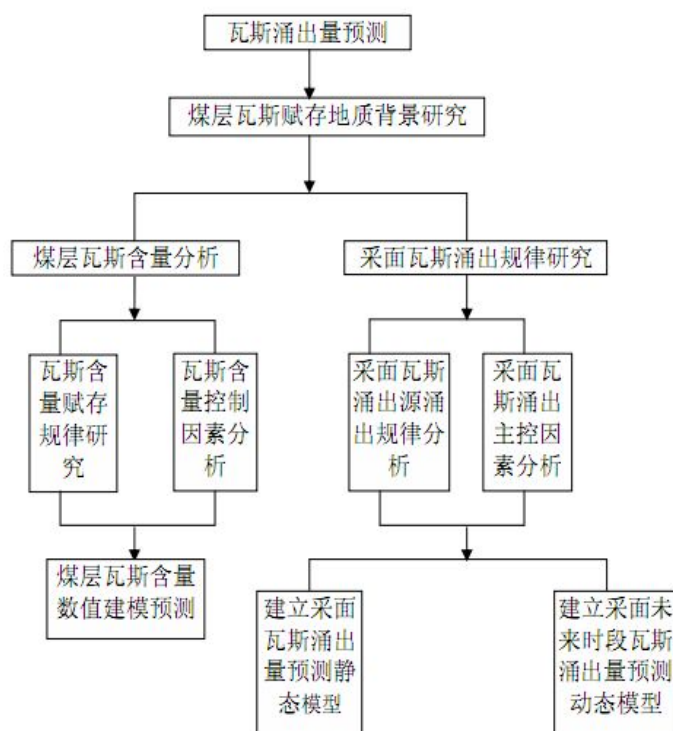


图 1.2 技术路线图

2 矿井瓦斯地质条件概述

2.1 矿井概况

2.1.1 地理位置

研究区下石节煤矿位于陕西省铜川市耀州区瑶曲镇，距耀州区约 45 公里，王益区约 54 公里，距铜川市 47 公里（图 2.1）。井田中心地理坐标东经 $108^{\circ} 51'$ ，北纬 $35^{\circ} 13'$ 。矿区范围东止荒草湾至上石节一线的煤层露头，西到断头川北侧的 4⁻² 号煤层零点边界线，南与陈家山煤矿毗连，北与崔家沟煤矿隔七木桥背斜相望，走向长约 3.5km，倾向宽约 3.5km，面积为 12.3156km²。

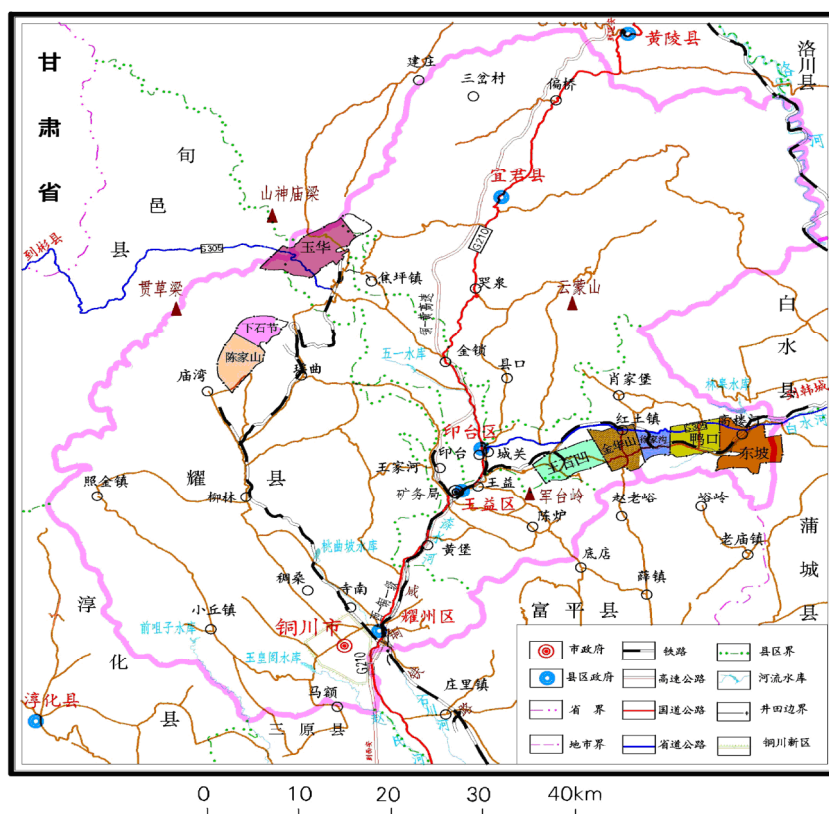


图 2.1 研究区地理位置图

2.1.2 生产情况

下石节煤矿以平峒、斜井综合开采方式开发全井田。区内矿种单一，无其他共、伴生矿产可采。开采煤种属中灰、低磷、低硫、高热量的不粘煤。煤层易自燃，其着火

温度 336℃, 发火期一般为 3~6 月, 最短 28 天, 发火等级为一级。经测定, 煤尘爆炸指数 44.37%, 具爆炸危险性。部分煤层和围岩含有石油和天然气, 开采条件较为复杂。历年瓦斯等级鉴定为高瓦斯矿井。2010 年矿井绝对瓦斯涌出量 $43.38\text{m}^3/\text{min}$ (含抽放), 相对瓦斯涌出量 $13.95\text{m}^3/\text{t}$ 。

目前主采中侏罗世延安组 4⁻² 号煤层, 2010 年矿井核定生产能力为 185 万吨/年。矿井分二个水平, 即: +1000m 水平和 +950m 辅助水平。目前, 一水平 (+1000m 水平) 已回采结束 (仅残存有呆滞煤量, 目前无法开采), 转入二水平 (+950m 辅助水平) 生产。二水平 (+950m 辅助水平) 采用暗斜井阶段式开拓方式, 开拓巷道均布置在 4⁻² 号煤层中, 划分为上、下二个阶段, 阶段内划分区段, 区段内布置回采工作面, 以三条暗井筒为中心, 东西两翼各布置一个回采工作面。采煤方法: 分阶段大走向长壁一次采全高采后灌浆采煤法。采煤工艺: 为综合机械化放顶煤一次采全高采煤法。现采面及接续面情况: 目前矿井在 950m 辅助水平上阶段正在开采 219 工作面, 该工作面位于井筒东翼, 走向长 2000m, 倾斜长度 150m。通风方式采用四进一回中央并列式通风。

2.2 地层及煤系地层

下石节煤矿属黄陇侏罗纪煤田焦坪矿区西南部一个独立的含煤块段, 为陆相半隐伏式煤田, 井田内及井田周边地层出露较好, 地层由老至新依次有上三叠统延长组(T_{3y}), 下侏罗统富县组(J_{1f}), 中侏罗统延安组(J_{2y}), 中侏罗统直罗组(J_{2z}), 下白垩统宜君组(K_{1y})、洛河组(K_{1l}) 和环河华池组(K_{1h}) 及第四系(Q)。三叠统延长组(T_{3y})与侏罗系地层出露在井田东南边浅部, 下白垩统地层在井田内沟谷两侧地区有出露, 第四系地层主要覆盖于山顶与沟谷地带 (图2.2)。

(1) 上三叠统延长组 (T_{3y})

为本区含煤地层基底。岩性以灰、深灰、灰绿色中细粒砂岩为主, 夹深灰、灰绿色砂质泥岩、泥岩及煤线。砂岩成分以石英为主, 含长石、云母碎片, 分选较好, 泥质或钙质胶结。一般呈中厚层状~厚层状, 波状及水平层理, 具裂隙, 被方解石充填。泥岩为块状构造或稍具水平层理, 贝壳状断口, 含植物化石及黄铁矿结核。由于本组地层生、储油条件较好, 已成为陕北延长油气田的重要产油层。

(2) 侏罗系(J)

假整合沉积于三叠系之上, 岩性由底部花斑泥岩, 中部煤系和上部砂岩所组成, 厚度 32.63~243.60m, 平均厚度 140m, 一般在 90~180m 之间。

①侏罗系下统富县组 (J_{1f})

假整合沉积于延长组之上, 俗称花斑泥岩, 厚度变化较大。岩性为紫杂色泥岩, 局部相变为灰绿色粉砂岩及砂质泥岩, 团块状, 具滑面, 遇水膨胀, 含铁铝质鲕状结核, 厚度变化较大, 但分布较普遍, 层位稳定。表现在向斜部位厚, 背斜部位薄。

②侏罗系中统延安组 (J_{2y})

为井田主要含煤地层，与下伏地层连续沉积。岩性由深黑色、灰黑色粉砂岩、砂岩、泥岩、煤层组成，含植物化石、黄铁矿结核和1号、2号、3号、4号四个煤层（组）。厚度12.97~172.06m，平均厚度89.80m，一般厚60~110m。地层沉积厚度受基底构造明显控制，具有向斜部位厚，背斜部位薄的特点。

按旋回结构、岩性组合与含煤性，可将煤系地层划分为上、中、下三段

下段：为本区的主要含煤段。岩性主要由泥岩、煤层及粉砂岩组成。主采 4^{-2} 号煤层位于本段中上部。

中段：具有二、三两个旋回结构，为本区次要含煤段。岩性主要为中细粒砂岩、粉砂岩、细砂岩与薄煤层组成。

上段：对应第三旋回，为本区次要含煤段。岩性由各种粒度的砂岩与砂质泥岩、1号煤层组成。

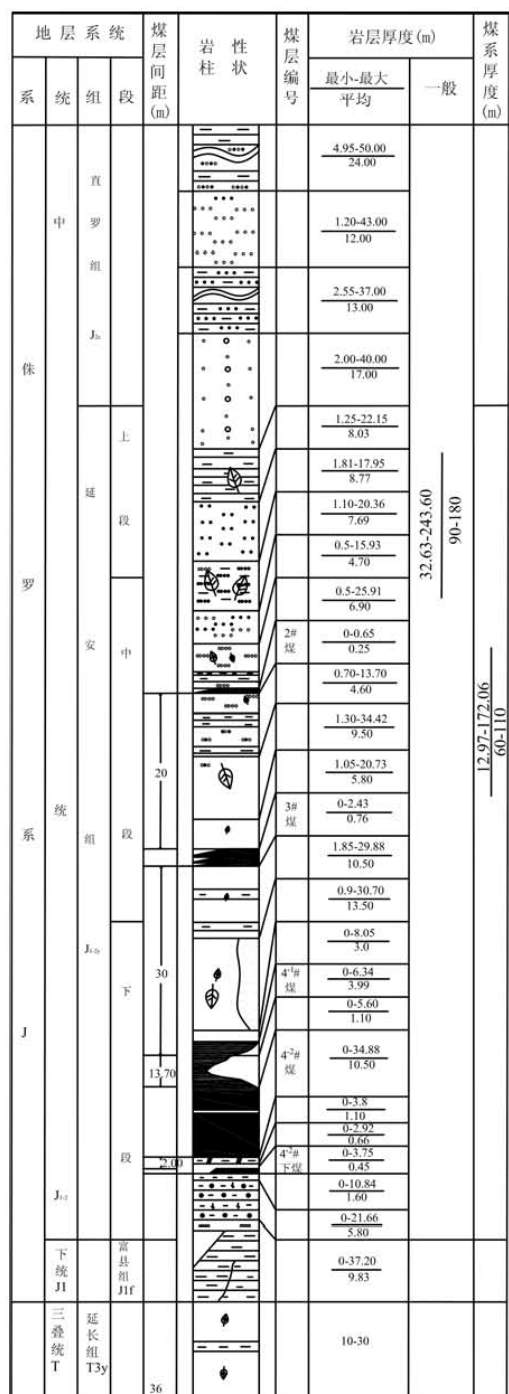
③侏罗系中统直罗组 (J_{2z})

假整合沉积于延安组之上，以紫杂色、灰绿色、斑状杂色为特点。由含砾粗砂岩、中细粒砂岩、粉砂岩及砂质泥岩组成。粒度自下而上由粗变细。具有向斜区厚，背斜区薄的规律。自下而上分为四层：

1) 浅灰色、蓝灰色带灰褐色含砾粗砂岩。以石英、长石、暗色岩屑为主，含少量砾石、燧石及砂质泥岩包体。颗粒棱角状，分选差，泥质胶结，较疏松。具韵律型斜层理，微含油及斑状含油。

2) 灰紫色、灰绿色、灰黄色块状泥质粉砂岩。有裂隙，具滑面，夹薄层细粒砂岩及紫红色泥岩。

3) 灰紫色、浅蓝色厚层状中、细粒砂岩。成分以石英、长石为主，次为暗色岩屑，棱角状，分选差，泥质胶结，夹薄层粉砂岩，局部相变为含砾粗砂岩，微含油及斑状含



油。

4) 紫红、灰绿、灰黄、暗紫色团块状砂质泥岩。含砂质绿色圆斑及豆状铁质结核，夹粉砂岩、细砂岩条带。疏松质软，有裂隙，滑面发育。

(3) 白垩系下统 (K_1)

井田内沟谷两侧广泛分布，与下伏地层呈假整合接触，仅保存有宜君组、洛河组和环河华池组。

① 宜君组 (K_{1y})

假整合于直罗组之上，为紫杂色砾岩夹含砾粗砂岩，砾石成分以石灰岩、石英岩为主，含少量岩浆岩、变质岩及沉积岩碎岩，砾径一般10~50mm，少量大于100mm，分选差，次圆状，砂质充填，泥、钙质胶结。一般厚10~20m。

② 洛河组 (K_{1l})

整合于宜君组之上，由紫杂色砾岩和砖红色砂岩组成，厚度一般200~300m。

③ 环河华池组 (K_{1h})

井田内出露不全，整合于洛河组之上，仅在山梁地段局部残存。岩性上部以灰黄色、暗紫色及蓝灰色薄层状粉砂岩、粉砂质泥岩、细粒砂岩互层为主，水平及波状层理。中下部以暗紫色、紫红色中厚层状细粒砂岩、中粒砂岩为主。成分以石英、长石为主，少量暗色矿物和白云母片。分选中等，钙泥质胶结。层面含石膏薄膜及薄层，夹薄层紫红色泥岩，底部局部相变为含砾砂岩。最大残存厚度211.65m，一般90m左右。

(4) 第四系 (Q)

为黄土状土，不整合覆盖于各不同时代地层之上。块状，大空隙，以含粉砂质亚粘土为主，含钙质结核。分布于山坡上部及梁顶部多为风积而成，厚度较大，分布河谷多为洪冲积层，含碎砾。

延安组为井田主要含煤地层，含煤系数平均16.6%。煤层自上而下编号为1号、2号、3号、4号四个煤层(组)。3号煤层(组)为复煤层，常见1~3个分层，分别称为 3^{-1} 号、 3^{-2} 号、 3^{-3} 号煤层，局部最长达5~6层；4号煤层(组)也为复煤层，分为 4^{-1} 号、 4^{-2} 号、 4^{-2} 号下三个分层。其中 4^{-2} 号煤层全区可采，为主要可采煤层。井田深部二水平 3^{-2} 号煤层经补勘

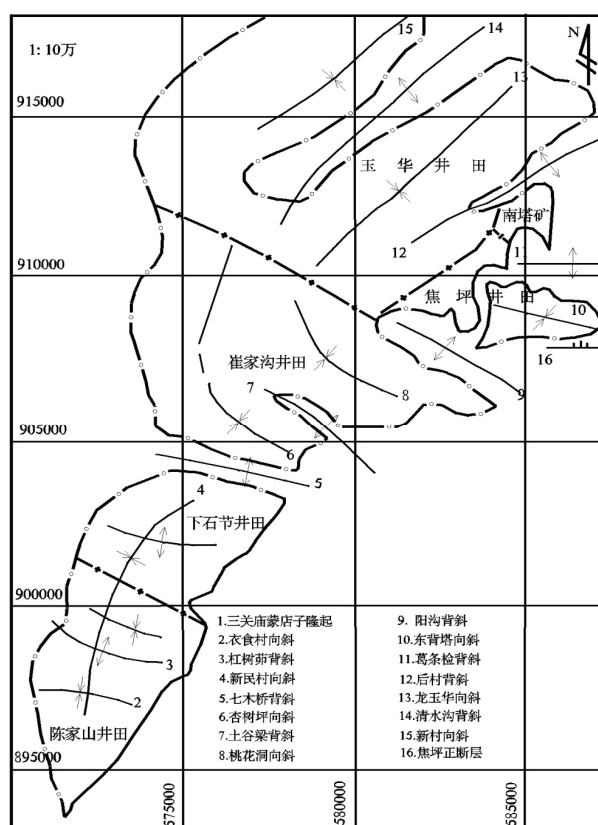


图 2.3 焦坪矿区构造纲要图

对比与原4⁻¹号煤层确定为现在的4⁻¹号煤层，一水平浅部3⁻²号煤层层位未变，中浅部可采区随着4⁻²号煤层的开采已全部遭到破坏，失去开采价值。井田其余煤层均为不可采煤层。

2.3 地质构造

2.3.1 矿区构造

研究区所属的焦坪矿区位于鄂尔多斯台向斜的东南缘，属自东北—西南向延展近300km 长的侏罗纪黄陇煤田的一部分。矿区向北隔建庄隆起与店头矿区相邻，向西与彬长矿区相邻；向南为渭北石炭二叠纪煤田，向北位于鄂尔多斯台向斜内。区内侏罗系及其上下地层，均呈倾向北西的单斜构造，延安组底面的标高，从矿区东南缘的1400 余米，向西北方向降低至700m 以下；浅部地层倾角较大，可达20° 以上，深部则减缓至10° 以下。总体构造形态为一波状起伏的单斜构造，其上发育了一系列北东和北西—北西西向的褶皱构造，二者相互交织，并具有明显的长期性与继承性发育特点，表现在海西—印支旋迴期阶段即均已存在。燕山旋迴早期，同沉积褶皱的性质十分明显，它们对富县组及延安组地层、煤层的形成与赋存均起到了重要的控制作用（图2.3）。

2.3.2 井田构造

下石节煤矿位于焦坪矿区西南部，井田构造受区域地质构造的控制总体为一向北西倾斜的单斜构造。据生产资料及勘探揭露，井田内共计发育幅度30m 以上的大型褶皱构造6 条，深部

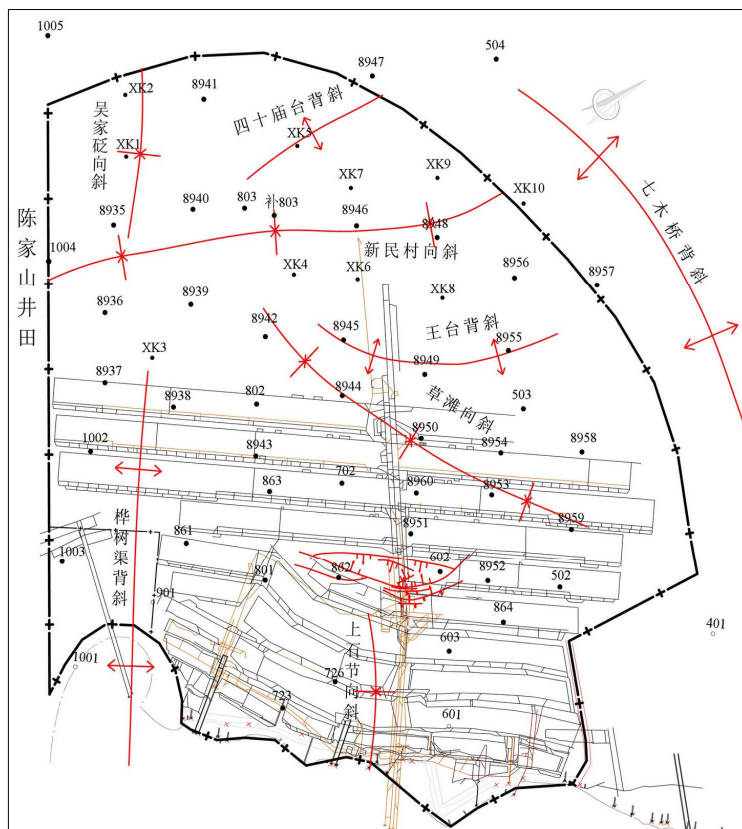


图2.4 下石节煤矿井田构造纲要图

以新民村向斜为主体呈一向斜构造。共揭露断层48 条，其中以发育张性及张扭性正断层为主，计40 条，占断层总数的83.3%，逆断层8 条，占断层总数的16.7%。断层的平均密度8.1 条/km²（含1.0m 以下断距断层），断裂构造不甚发育，仅在井田中部发育一组较大断裂构造并形成无煤区。在主体构造背景上发育有次级褶皱构造并伴随小型断裂

构造，煤层起伏变化现象较为普遍，煤层倾角平缓，浅部一般 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，深部 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ，井田构造总体较为简单（图 2.4）。

2.4 主采煤层特征

2.4.1 煤层厚度特征

下石节煤矿 4⁻² 号煤层为矿井主要可采煤层，下距富县组花斑泥岩一般 8m 左右。煤层厚度 0~34.28m，平均煤厚 10.50m，一般厚 8~12m（图 2.5），倾角 $4^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，富含黄铁矿结核。煤层结构复杂，夹矸层数一般为 2~5 层，局部含矸达 10 层以上，夹矸厚度一般 0.50~1.0m，夹矸岩性多为泥岩、粉砂岩或炭质泥岩。

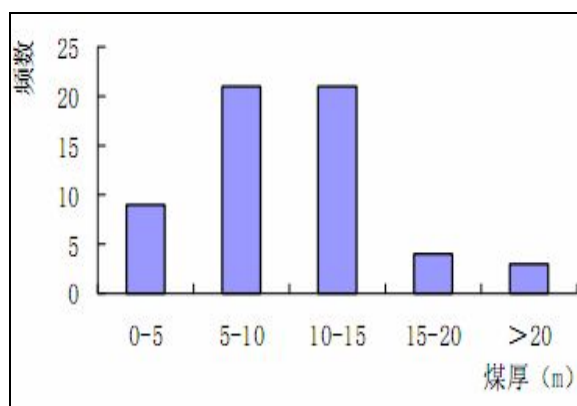


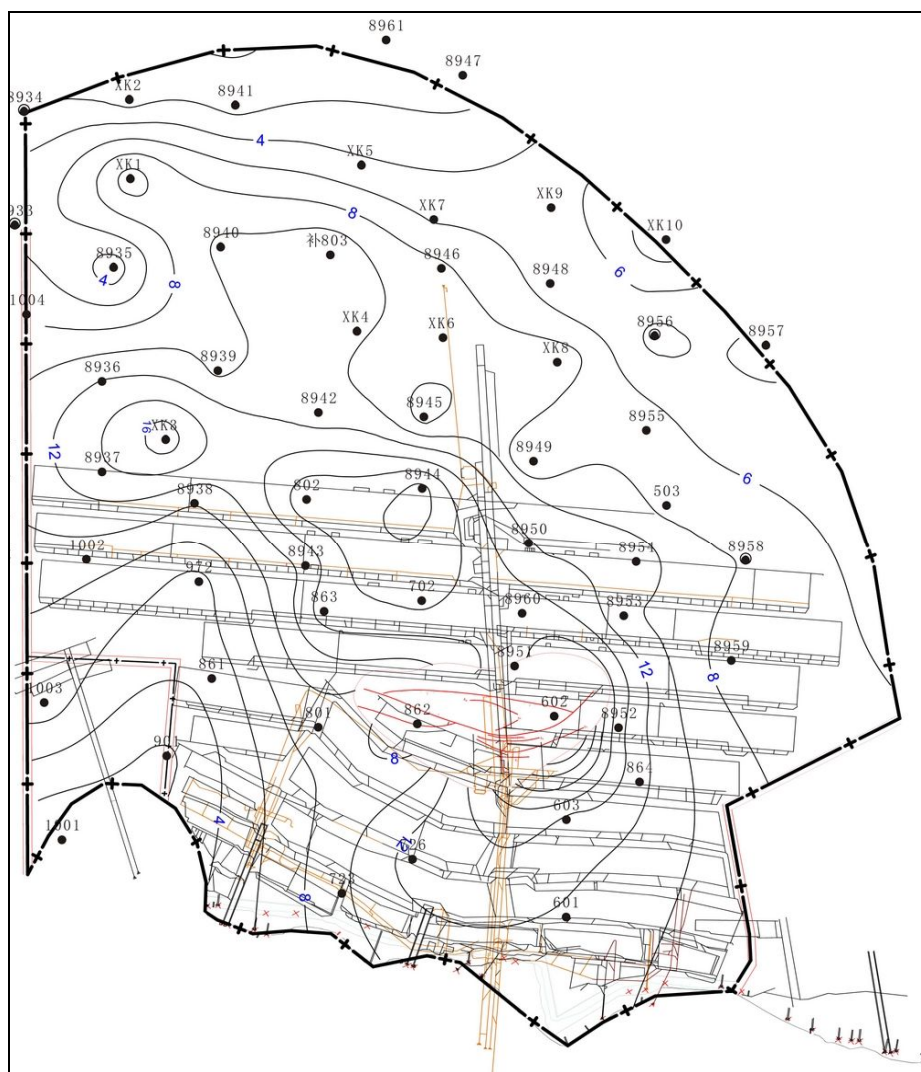
图 2.5 4⁻² 号煤层煤厚分布直方图

煤层厚度受同沉积构造的影响变化较大，但展布规律比较明显，表现在向斜轴部附近煤层沉积较厚，如新民村向斜及草滩向斜附近，一般厚在 10m 以上，最厚可达 34m，背斜轴部煤层沉积厚度较薄，以至尖灭，如桦树渠背斜轴部附近煤厚仅 5~7m，直至尖灭，七木桥背斜轴部形成无煤区。从煤层在井田展布位置来看，井田中部一带较厚，结构复杂，含矸一般在 5 层左右，最多可达 11 层（8935 孔），并沉积了 4⁻² 号下煤，向井田深部和东西部延展，煤层厚度逐渐变薄，以至尖灭，结构单一（图 2.6）。

井田内钻孔见煤率 100%，可采指数 0.98，煤厚变异系数 35%，属基本全区可采的较稳定巨厚煤层（表 2.1）。

表 2.1 下石节煤矿 4⁻² 号煤层稳定性评价表

统计 点数	见煤 点数	可采 点数	煤层厚度 最小-最大 一般(m)	钻孔 见煤率 %	可采 指数 Km	变异 系数 r%	稳定性	可采程度
59	58	57	0~34.28 10.50 (59)	100	0.98	35	较稳定	基本全区 可采

图 2.6 4⁻²号煤层厚度等值线图

2.4.2 煤质特征

大量煤岩鉴定和化学分析表明,研究区内煤以区域变质为主,煤质变化规律明显,其总体趋势为:沿煤层倾斜方向,由浅而深,煤变质程度逐渐增高,有清晰的水平分带性;沿纵深方向,下部煤层变质程度较上部煤层高,井田内煤层的变质程度均为烟煤初期变质阶段。

研究区4⁻²号煤层宏观特征为:黑色,沥青及玻璃光泽,阶梯或参差状断口,中宽条带状结构,质脆易碎,内生裂隙较为发育,裂隙中常有黄铁矿结核及方解石细脉充填,层面可见石膏薄膜,煤层呈块状。宏观煤岩类型为半光亮型,上部以光亮型为主,次为半亮型,半暗及暗淡型煤较少。显微煤岩组分以丝质组+半丝质组为主,次为镜质组,稳定组分含量最少。原煤矿物杂质以碳酸盐为主,粘土类次之,硫化物最少。碳酸盐矿

物主要是方解石细脉及石膏薄膜，硫化物主要是黄铁矿呈星点状及浸染状分布于基质体中（表2.2）。

表2.2 下石节煤矿4⁻²号煤层显微煤岩组分鉴定成果表（%）（据下石节煤矿）

镜质组	半镜质组	半丝质组 十丝质组	稳定组	有机总量	粘土类	硫化物	碳酸盐	镜质体反射率 R_0
16.9~60.2	0.9~6.0	23.1~66.9	0.8~5.5	86.7~98.6	0.4~1.9	0.2~0.8	0.4~12.7	0.51~0.59
40.67(7)	3.5(7)	48.30(7)	2.32(6)	94.77(7)	0.87(7)	0.47(3)	4.16(7)	0.55(7)

4⁻²号煤层原煤平均灰分产率 19.10%，硫分平均含量 1.17%，磷分平均值为 0.039%，挥发分 V_{daf} 平均值为 34.87%，收到基低位发热量 $Q_{net.ar}$ 平均为 25.36MJ/Kg，含油率 $T_{ar.ad}$ 平均值为 7.77%，原煤经洗选后，灰分有明显下降，硫分也有降低，精煤平均灰分 A_d 产率为 5.44%；全硫平均含量 0.56%；挥发分 V_{daf} 平均为 35.69%；煤质综合评价该层煤属中灰、中硫、低磷、高热量的不粘煤，富油，是较好的动力、气化和炼油用煤。

2.4.3 煤储层物性特征

（1）煤层孔隙特征

煤层中的孔隙分为生物成因和非生物成因两大类，生物成因孔隙源于植物胞腔，但大多数胞腔由于受各种成煤因素的影响，其形态均发生了不同程度的改变，焦坪矿区煤中的孔隙形态有以下几种：①基本未发生变化的筛状孔隙；②板状孔隙：指细胞壁发生破碎成针状或板状碎片之间的网络孔隙；③弧状孔隙：细胞壁都已破碎，并被挤压在一起；④植物组织孔隙：它的形态较完整，分布在胞腔侧壁上。

第二类是非生物成因的孔隙：①粒间孔：

它是各种植物残体经成煤作用而留下的，其形状不

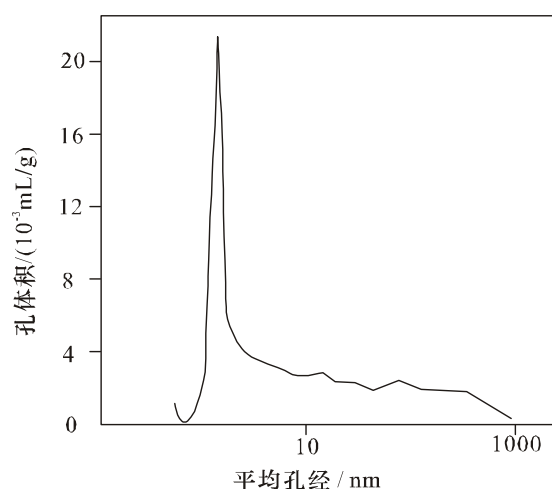


图2.7 孔径分布曲线图（据米敬奎，1991）

规则，大小差别悬殊。②小气孔：它是在成煤作用的过程中所生成的各种气体的排出孔，大小不一，形状一般为圆形，分布在较厚的胞腔壁上。霍多特的理论提出，煤中的孔隙可以分为以下几类：大孔（>1000nm），以管状和板状孔隙为主，是气体强烈层流渗透区域；中孔（1000~100nm）以板状、管状孔隙为主，间有不平行板状孔隙，是气体缓慢层流渗透区域；小孔（100~10nm）以不平行的板状孔隙为主，有一部分墨水瓶状孔隙，是气体毛细凝结和扩散的空间；微孔（<10nm）具有多的墨水瓶状孔隙，构成煤的吸附容

积。微孔发育的煤往往吸附能力比较强，大孔发育的煤则渗透性较好^[24]。

4⁻²号煤层的孔径测试显示，煤中的小孔、微孔隙占大多数，其平均孔径分布曲线（图2.7）所示，科学研究总院西安研究院与铜川矿务局煤研所1987年在邻矿陈家山煤矿210轨中向煤层打钻进行的瓦斯抽放工业性试验采样测试，4⁻²号煤层总孔隙度在10.67~11.18%间，连通孔隙度（用高压煤油饱和法测定）为6.03~6.24%，连通孔隙度与总孔隙度之比为56~57%。反映出煤层大部分孔隙是相互连通的，有利于瓦斯渗透运移。

（2）煤储层的吸附-解吸特征

①煤层吸附特征：煤层吸附/解吸性是煤储层的重要特征，煤的吸附性及煤储层压力、温度是影响煤层含气性的重要因素。2008年下石节煤矿施工了第一口JPC-01参数井，通过对JPC-01井煤储层基本参数进行分析，得到以下结论^[25]：

储层温度：从储气角度来看，温度越低，吸附量越大，温度的升高有利于瓦斯的解吸。4⁻²号煤层储层温度为22.21℃（埋深541.20~554.36m）。该井地温梯度变化正常，为地温正常区。

储层压力：储层压力直接决定着煤层对甲烷等气体的吸附和解吸^[30]，4⁻²号煤层储层压力3.78MPa，压力梯度每百米0.721MPa。属欠压储层。4⁻²号煤层以下大约6.4m处存在破碎带，可能是造成储层压力低于4⁻¹号煤层的原因。

煤的等温吸附特征：吸附特征用兰氏体积与兰氏压力表示。兰氏体积是衡量煤岩吸附能力的量度，其值反映了煤的最大吸附能力；兰氏压力值是影响吸附等温线形态的参数，是指吸附量达到1/2兰氏体积时所对应的压力值，该指标反映煤层气体解吸的难易程度，值越高，煤层中吸附态气体脱附就越容易。

测试结果表明：4⁻²号煤层空气干燥基兰氏体积（ V_L ）15.84~17.88m³/t，平均16.52m³/t，兰氏压力（ P_L ）4.68~5.53，平均4.99MPa。依据兰氏体积与兰氏压力进行评价（表2.3），4⁻²号煤层吸附性能均属Ⅱ类中等类型。

表2.3 煤岩层吸附性能级别划分表

级别	兰氏体积 V_L （m ³ /t）	兰氏压力 P_L (Mpa)	特征
I	>20	>3	好
II	10~20	1.5~3	中
III	<10	<1.5	差

②解吸特征

解吸率：一般将损失气量与解吸气量之和与总气量之百分比称为解吸率。经统计，4⁻²号煤层瓦斯样中损失气量平均为3.04m³/t，占总量的52.94%；现场两小时解吸量平均为0.86m³/t，占总量的14.96%；真空加热脱气量平均为0.68m³/t，占总量的11.87%；粉

碎脱气量平均为 $1.17\text{m}^3/\text{t}$ ，占总量的 20.32%。计算得 4^{-2} 号煤层平均解吸率为 67.9%。

临界解吸压力：煤层气临界解吸压力是指解吸与吸附达到平衡时，压力降低使吸附在煤微孔隙表面上的气体开始解吸时的压力，即等温吸附曲线上煤样实测含气量所对应的压力。综合实测含气量、等温吸附曲线计算的临界解吸压力： 4^{-2} 号煤层为 1.06MPa。

吸附时间：反映了瓦斯在基质中运移的快慢，也可体现瓦斯的扩散能力。实测吸附时间： 4^{-2} 号煤层介于 4.09~20.71d，平均 13.59d。煤储层的吸附时间变化极大，瓦斯扩散速度不均。

（3）煤储层的渗透特征

渗透率表现了流体在煤层中运移的难易程度，地质构造、地应力、煤层埋深、煤体结构、裂隙发育程度等都不同程度的影响着煤层渗透率。煤层渗透率的高低直接影响着瓦斯的聚集与放散的难易程度。从以下几个方面分析：

①煤体结构： 4^{-2} 号煤层煤体结构均以原生结构为主，煤体未遭受强烈构造破坏。反映了煤层渗透性较好。

②煤层裂隙：裂隙是煤层气体在煤储层中运移的主要通道，其发育程度和开合程度是控制煤储层渗透性的主要因素，关系到煤储层渗透率的大小和渗透方向。焦坪矿区 4^{-2} 号煤层发育着两类裂隙，一类为内生裂隙即割理，呈矩形网络状，有 NE 与 NW 向两组，其中以 NE 向占优势，为面割理，NW 向为辅，为端割理，NW 向一般不切穿 NE 向的割理，这种裂隙与主体构造方向一致。通过井下煤壁观测， 4^{-2} 号煤内生裂隙(割理)发育 2 组，近垂直层理。裂隙密度 1.2~2 条/cm，宽度约 0.1cm，高度 5~7cm，但因有碳酸盐矿物充填，裂隙连续性较差，呈中等或较差的状态，影响煤层渗透性。另一类为不规格的构造裂隙，方向混乱，无主次之分，切穿顶底板或夹矸层，延伸不远，密度 2~3 条/5cm，这种裂隙有矿物质充填，形成龟背石状，一般只发育在煤层的上部。

③煤层埋藏深度： 4^{-2} 号煤层埋藏深度 541.20~554.36m，初步判断煤层渗透率随埋藏深度增大而减小。

④地应力值：根据原地应力值（换算至煤层中部的闭合压力值 4^{-2} 号煤层 18.30MPa，梯度 $3.34 \times 10^{-2} \text{MPa/m}$ ），煤储层渗透率随原地应力增大而减小。

2.4.4 煤储层封闭性特征

煤层的封盖性能关系着煤层气体的保存条件对含气性具有重要的控制作用，主要从三个方面分析：

（1）围岩岩性与封闭性特性：围岩对瓦斯赋存的影响取决于它的隔气性或透气性。 4^{-2} 号煤层直接顶板以粉砂岩、砂质泥岩夹薄煤组合为主，局部相变为细砂岩，或中粗粒砂岩，厚度一般 2~4m，裂隙发育，老顶为中粒或粗粒砂岩（小街砂岩），局部相变为粉砂岩，平均厚度 8m。煤层直接底板为炭质泥岩、含铝质泥岩为主，次为粉砂岩、细砂岩

等，疏松、质软、易碎、遇水易膨胀。通过测定岩样气体渗透率、连通孔隙率，4⁻²号煤层围岩的封闭或渗透性能如（表 2.4）。

由下表可见，直接顶板砂质泥岩-细砂岩虽然具有很低的孔隙度，但却有高的渗透率，不利于甲烷的保存。直接底板虽多为泥岩，但泥岩裂隙发育、破碎，也不利于甲烷保存。对粉砂岩的取样测试，其渗透率高。

表 2.4 下石节煤矿 4⁻²号煤层围岩渗透性参数（据下石节煤矿）

层位	岩性	连通孔隙率 (%)	气体渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}$)	透气性系数 ($\text{m}^2/\text{at}^2 \cdot \text{d}$)
直接顶	砂质泥岩	3.06	0.21	0.088
直接顶	细砂岩	1.21	2.31	0.970
老 顶	粗砂岩	11.88~15.82	26.5~12.9	11.12~5.418
老 顶	中砂岩	11.57	8.75	3.675
直接底	粉砂岩	1.21~1.73	0.09~2.30	0.504~0.176

根据刘焕杰等人提出的以围岩岩性、厚度、裂隙发育程度及渗透率大小划分煤层顶底板封盖能力的方案（表 2.5），研究区 4⁻²号煤层围岩封闭性较差。位于煤层直接顶之上的老顶粗砂岩和中粒砂岩比起直接顶具有更高的连通孔隙度，即具有大量甲烷储集空间及较高的气体渗透率，易于气体流动。正是由于围岩较好的渗透性及老顶的储集性，使得煤层中的甲烷运移到了老顶砂岩中。

(2)地质构造与储层封闭性特征：地质构造是影响煤层瓦斯含量的最重要条件之一。下石节井田内断裂构造不甚发育，仅在井田中部有一组大的断裂构造并形成无煤区，在主体构造背景上发育有次级褶皱构造并伴随小型断裂构造，煤层起伏变化现象较为普遍，褶皱对煤层瓦斯含量的影响较为显著。

表 2.5 下石节煤矿 4⁻²号煤层顶底板封盖能力分类（据刘焕杰，1998）

岩性	厚度(m)	裂隙发育程度	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	封盖性能
泥质岩，砂质泥岩，灰岩	>5	差	$<10^{-3}$	好
砂质泥页岩，泥质粉砂岩，灰	>2	中等	$<10^{-2}$	中
粉砂岩，砂岩，灰岩		好	$<10^{-1}$	差

(3)顶板油气与储层封闭性：4⁻²号煤层老顶小街砂岩中含油气，降低了煤层顶板渗透率，不利于煤层瓦斯的逸散。焦坪矿区属典型的煤油气共生矿区，当油气涌入矿井时，石油蒸气和天然气迅速增大了矿井瓦斯涌出量。

2.5 矿井瓦斯概况

下石节煤矿地处陕甘宁盆地长庆油田的边缘地带，是以煤为主，煤、油、气共存的矿井，除煤层含瓦斯外，煤层顶底部围岩均含有多层石油与天然气，因此，矿井瓦斯涌出量较大，瓦斯已成为制约矿井安全生产与经济效益提高的主要影响因素。下石节煤矿始建于1970年3月，自1980年正式投产以来，矿井产量逐年增加，开采深度也由初期的110~144m增加到目前的600m，现生产水平为二水平，水平标高+950m，开采范围已达6.16m²。自1980年至2010年间，历年矿井瓦斯等级鉴定结果除1980、1988、1997、1999、2001五年外，其余年份均属高瓦斯矿井。其中绝对瓦斯涌出量最高值达84.47m³/min，相对瓦斯涌出量最高值达21.09m³/t。2010年瓦斯等级鉴定结果绝对瓦斯涌出量43.49m³/min，相对瓦斯涌出量13.79m³/t。

煤矿开采三十多年来，尽管尚未发生过瓦斯爆炸与煤与瓦斯突出事故，但瓦斯集中涌出较为多见。1987年矿井在掘进206中巷时，煤壁经常听到滋滋的瓦斯喷出声，瓦斯绝对涌出量达4m³/min以上；1990年在回采2061工作面时，回风巷瓦斯浓度持续在0.9~1.5%之间，采面瓦斯涌出量在4~5.5m³/min，相对涌出量为6~12m³/t·d；1991年在回采2051高档工作面时，上隅角瓦斯浓度高达4%以上，回风巷距顶板100mm内形成浓度1~3%的沼气层，不易吹散，该工作面瓦斯绝对涌出量保持在5m³/min以上，最高达10.5m³/min，相对瓦斯涌出量保持在10~14m³/t·d，工作面瓦斯还经常超限；1994年回采的2082工作面上隅角瓦斯浓度高达3%，工作面瓦斯绝对涌出量6m³/min，最高达12m³/min，该工作面上隅角还时有超限。

随着采深与产量的同步增加，瓦斯涌出量虽波动较大，但总体显示呈逐年增大的趋势（图2.8）。井田浅部瓦斯涌出量较小，深部瓦斯涌出量相对较大，即井田一水平埋深较浅，瓦斯涌出量相对较小，而深部（二水平）瓦斯涌出量逐步增大。

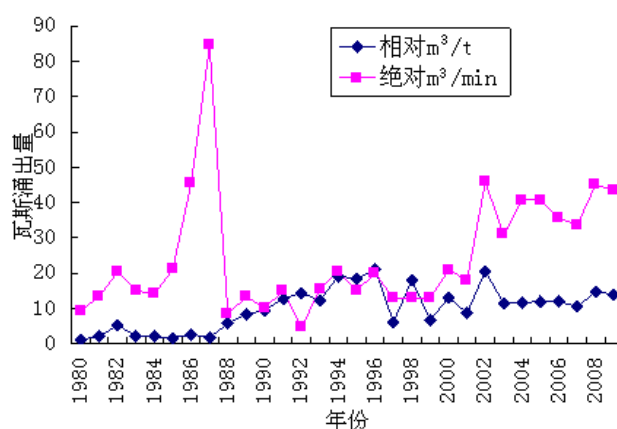


图 2.8 下石节煤矿历年绝对与相对瓦斯涌出量曲线图

3 矿井瓦斯赋存规律及定量预测

3.1 油气显示及赋存特征

3.1.1 油气显示特征

下石节井田油气分布范围较大（见图 3.1），井田内的 65 个钻孔中，见油气显示的钻孔达 45 个，占全部钻孔的 69%。根据钻孔岩芯含油特征，将油气显示分为 5 级（表 3.1）。有些钻孔岩芯显示大量含油或较多含油，而另一些钻孔岩芯显示少量含油或微量含油。

表 3.1 含油级别评定标准

含油级别	含油特征
微量级（Ⅰ级）	有油味，但可闻不可见
少量级（Ⅱ级）	岩芯含油呈斑状或条带状，但不渗出
含油级（Ⅲ级）	岩芯含油面积在 70%以上，不含油均匀，局部外渗
较多级（Ⅳ级）	岩芯全部均匀含油，较饱满，有少量油珠滴落
大量级（Ⅴ级）	岩芯全部含油，且均匀饱满，有大量油珠滴落

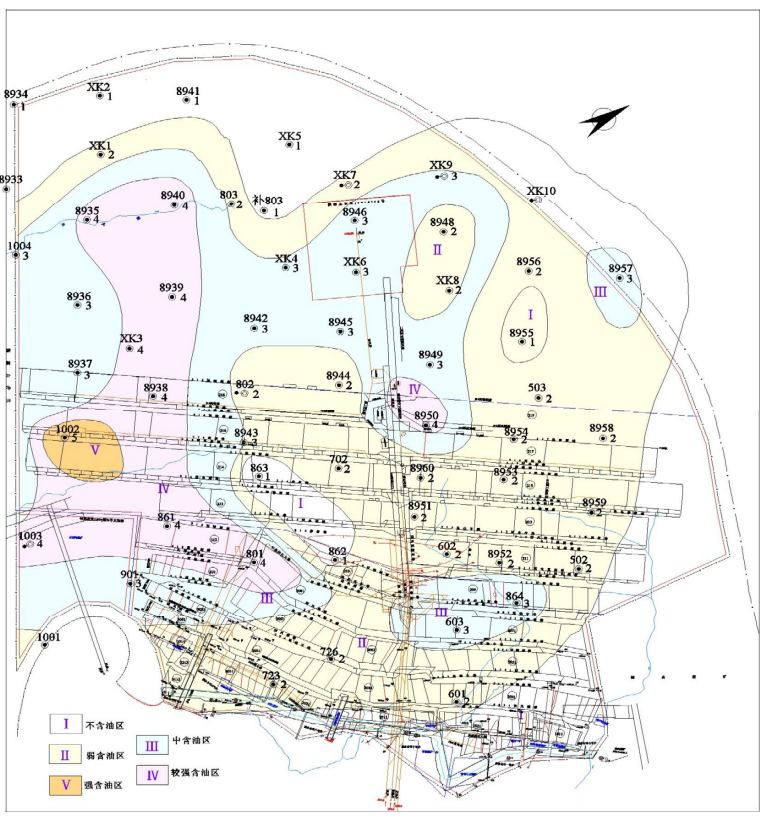


图 3.1 下石节煤矿油气分布略图

井田内储油气层赋存层位共有1~4层,其中主要为侏罗系直罗组、延安组和三叠系延长组^[40](见图3.2),此外侏罗系富县组也有油气发现。含油层位分述如下:

(1) 三叠系延长组含油层

在矿井内仅有2个钻孔见油气显示,含油岩层岩性多为中细粒砂岩,矿井平峒大巷和其他开拓巷道中,该层曾多次发生油气从裂隙中涌出。

(2) 侏罗系富县组含油层

井田内有3个钻孔见油气显示,含油层岩性多为花斑泥岩中的中细砂岩透镜体,属2~3级。

(3) 侏罗系延安组含油层

井田内有22个钻孔见油气显示,含油层主要为4号煤层老顶中粗粒砂岩(即小街砂岩)。其中小街砂岩见油气显示钻孔3个,均为斑状含油级。3号煤层顶板以上砂岩层见油气显示钻孔19个,占全部钻孔的33.8%,分布范围较为普遍。三采区曾发生油气沿顶板裂隙中滴、渗入工作面,造成瓦斯超限。

(4) 侏罗系直罗组含油层

含油层比较集中,主要分布在底部含砾粗砂岩和砂岩中,距主要开采4²号煤层顶板平均约60m。井田内共有26个钻孔见油气显示,占全部钻孔的40%,含油级一般为斑状~不均匀状,属2~3级,少量为微含油级。

煤矿在地质勘探阶段许多探煤钻孔中曾见有十分明显的油气显示,煤矿井下巷道掘进和采煤过程中也多次出现油气显示点。特别是开拓在基岩中的巷道,常遭受油气的危害,使瓦斯涌出量增大,并加重了井下空气的污染。自建矿以来,矿井曾发生明显油气滴渗涌出26处。油气的存在,致使工作面瓦斯涌出量呈直线上升趋势。如3111工作面在掘进和回采中均见油气显示。工作面开采初期甲烷绝对量为0.18m³/min,之后逐渐上升,当回采到26个月时,绝对量达0.8m³/min,其原因主要是随着工作面的推进,顶板垮落,裂隙沟通,油气渗出,使有害气体进入采面,导致瓦斯涌出量升高;305中巷掘进中,揭露出含油层位,日平均出油约10吨,测得甲烷绝对涌出量达4.5m³/min;在开

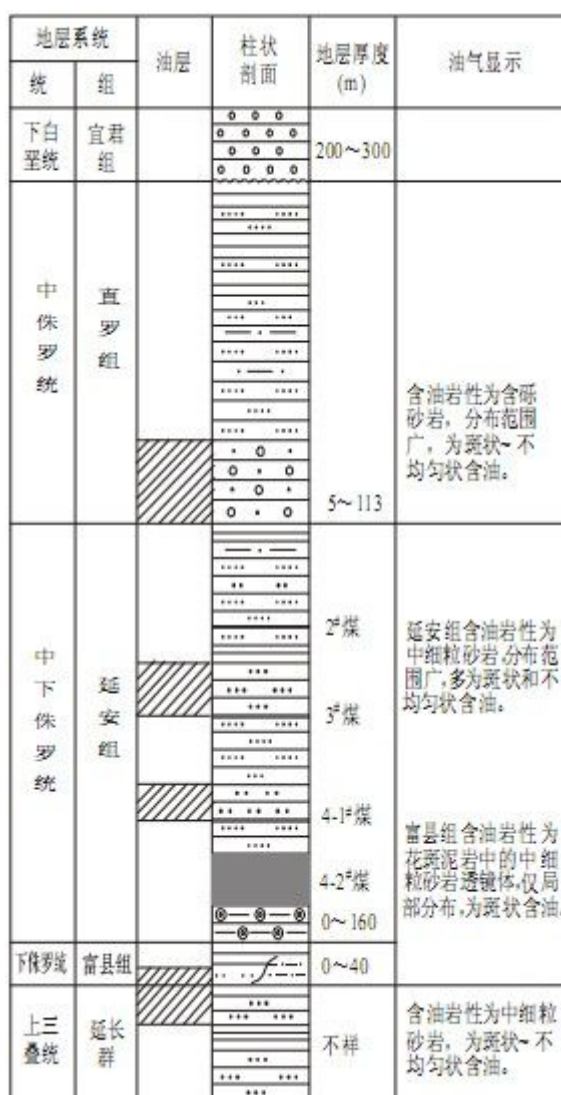


图 3.2 含油气地层综合柱状图

拓 208 车场时,当揭露到三叠系灰白色中粒砂岩时出现油气,瓦斯涌出量升高一倍多。穿过该层后,瓦斯涌出量又有所下降;1973 年 3 月 23 日西岩石大巷掘进,当天放炮后大量油气从三叠系砂岩裂隙中涌出,日产原油 $4\sim 5\text{m}^3$,4 月 20 日改为小断面掘进后,又从另一炮眼中出油,5 月 20 日打两碴窝孔,大量出油,打第三孔时发生油气喷出,第一周内产油 $100\sim 200\text{m}^3/\text{d}$ (微含水),至 6 月底,累计出油 1300m^3 ,以后出油量渐小,且含水量增大。

油及油气渗入井巷,给生产带来一系列严重影响。首先给矿井安全带来严重威胁。当油气大量涌入矿井时,石油蒸气和天然气不仅增大了矿井瓦斯涌出量,造成工作面落山角,井巷风流中气体超限,而且比矿井瓦斯更容易引发爆炸和燃烧事故,特别是延安组含油层对矿井开拓与工作面生产影响更大。第二,油气的渗出、涌出影响矿井空气成份。由于油气含有不饱和烃和饱和烃等成份,使整个空气中到处弥漫着强烈的油气味,不但影响了生产,而且对工人的身心健康带来了极大的危害。第三,油气能引发岩石突出等动力现象。第四,油对工作人员所穿胶鞋有严重腐蚀作用,对橡胶电缆也有一定的腐蚀作用,这样会给出油地区供电安全带来一定难题。开采过程中所见的油气显示具有以下特点:

(1) 油气滴渗或涌出进入采掘空间的形式是通过裂隙缓慢滴渗,或通过裂隙、钻孔或炮眼突然大量涌出。

(2) 当采用不留顶煤的分层开采或放顶煤采煤法时,开采第一分层时,在采面或采空区可见石油滴渗或油气涌出;当采用留顶煤的分层开采法采面未见石油滴渗。

(3) 在三叠系地层开掘岩巷时,油气的危害严重。

在井田二水平的补充勘探中,采集各含油层的含油砂岩样 23 个,进行了物性分析,结果表明均属低产低渗透性油层,含油饱和度为 $0\sim 37.2\%$,一般为 $10\sim 20\%$,含油极不均匀,达不到工业油层标准。

3.1.2 油气赋存规律

据钻孔及大量井巷资料分析,油气分布具有以下规律:

(1) 油气层平面分布上受岩性和构造的双重控制。其中以岩性控制为主,岩性多为中粗粒砂岩透镜体,展布面积小,连续性较差,在剖面上具有上倾消失的特点(图 3.3),特别是位于背向斜翼部,或局部隆起的上倾方向,属砂岩层上倾尖灭而形成油藏。储油层盖层以粉砂岩,泥岩,炭质泥岩及煤层为主。

(2) 油气层纵向分布上以侏罗系直罗组、延安组含油层为主,富县组和三叠系延长组次之。一般单个含油透镜体面积小,分布不连续,多层含油气层迭加后可连结成片。

(3) 含油层物性条件差,且分布不均匀,采样分析孔隙度 $3.08\sim 17.00\%$,一般在

10~14%之间，渗透率在 0.19~29.30%，属低渗透油层。

（4）按钻孔含油级别、层数、厚度及层位并考虑其对煤层开采的影响程度，将主采煤层顶板含油性分为强含油、较强含油、中等含油、弱含油和不含油等五个区，经分析井田东部以弱含油区为主，中部和南部以中含油区和较强含油区为主，西北边界处为不含油区。

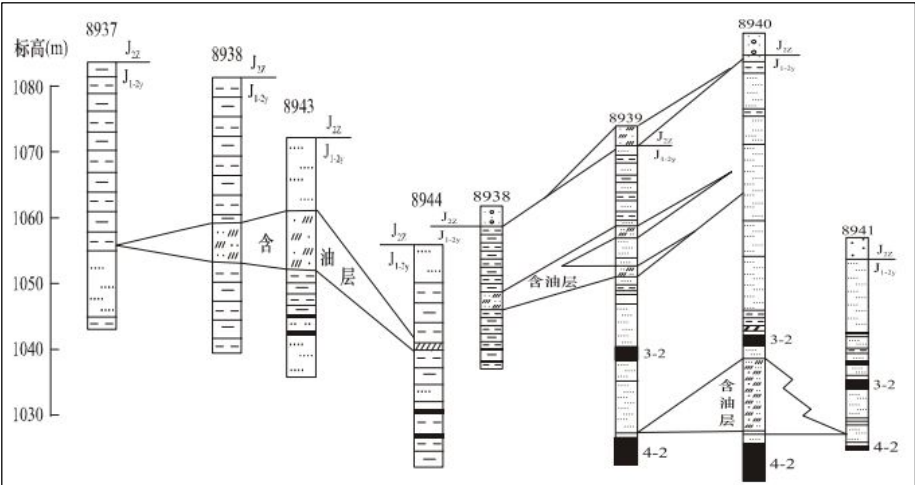


图 3.3 下石节煤层含油层位对比剖面图（据下石节煤矿）

3.2 煤(岩)层瓦斯特征

3.2.1 煤层瓦斯含量及成分

4⁻²号煤层瓦斯含量平均为1.89ml/g（可燃物）（表3.2），煤层瓦斯含量相对较低。

表3.2 下石节煤矿4⁻²号煤层瓦斯含量及瓦斯成分统计表（据下石节煤矿）

孔号	采煤深度(m)	瓦斯成分%			瓦斯含量 ml/g
		CH ₄	CO ₂	N ₂	
603	332.96-333.46	79.34	4.41	16.25	3.69
	333.46-333.96	92.73	4.20	3.06	2.30
801	486.20-487.24	33.00	1.96	45.10	1.44
8939	536.52-543.19	80.85	2.97	16.18	4.43
8940	544.90-545.19	78.54	0.85	20.61	5.29
8943	492.33-494.23	60.95	1.23	37.54	2.09
8944	632.39-634.38	71.00	0	29.00	1.93
	632.55-632.70	44.88	3.20	52.00	1.00
8945	596.95-602.00	78.69	15.37	5.80	3.33

续. 表3.2 下石节煤矿4⁻²号煤层瓦斯含量及瓦斯成分统计表(据下石节煤矿)

孔号	采煤深度(m)	瓦斯成分%			瓦斯含量 ml/g
		CH ₄	CO ₂	N ₂	
8946	543.50-543.70	74.92	10.13	14.04	3.58
8947	628.30-629.86	43.33	4.19	50.88	2.64
8952	524.44-533.73	42.92	5.37	50.73	1.24
8953	535.23-538.38	5.12	0.31	94.57	1.89
8954	625.24-628.50	37.10	1.30	61.60	1.92
8955	619.73-620.13	61.81	0.18	37.57	2.26
8956	619.50-619.64	65.33	5.91	28.76	4.77
XK1	572.99-574.00	9.14	1.07	89.79	0.31
XK2	661.23-661.43	31.65	1.06	67.29	1.04
XK3	605.90-625.70	37.58	1.42	61.9	0.89
XK4	541.20-542.05	31.02	0.46	68.92	0.52
XK5	522.99-524.00	9.65	1.56	88.79	0.17
XK6	548.50-558.60	39.72	12.95	47.33	0.6
XK7	565.17-569.47	6.31	7.35	86.34	0.27
XK8	544.90-545.20	37.41	1.02	61.57	0.62
XK9	556.4	20.74	0.48	78.78	1.00
XK10	550.70-550.80	32.13	0.79	67.08	0.58
8941	691.29-691.49	53.72	3.72	42.56	1.12
最小~最大		5.12~92.73	0.31~4.2	3.06~94.57	0.17~5.29
平均		46.65	3.46	49.04	1.89

造成本区煤层含气量低的原因,除与煤的热演化程度低($R^0=0.5\sim0.6\%$),导致煤的生气能力差有关外,主要与煤层顶底板岩层封闭性能较差,及白垩纪后燕山运动使含煤地层抬升到浅部,长期遭受风化剥蚀造成煤层瓦斯大部分逸散及风化作用有关。尽管如此,4⁻²号煤层瓦斯含量在井田仍有一定的分布规律,表现在瓦斯含量的高值区主要集中在井田中深部,呈带状展布,井田边部、浅部煤层瓦斯含量低,中深部含量高,向斜区域含量高。主要原因在于边、浅部煤层埋藏浅,瓦斯易于疏放,中深部向斜部位煤系沉积厚,埋深大,煤层瓦斯能得以比较好的保存。

据对来自煤层样的瓦斯成分分析,4⁻²号煤层瓦斯成分CH₄平均46.65%,N₂平均49.04%,CO₂平均3.46%,从瓦斯成分看,以氮气为主,次为甲烷,不含重烃成分,绝大部分区域属N₂-CH₄带(表3.2)。另据JPC-01参数井对4⁻²号煤层气成分的分析测试,4号煤层重烃浓度0~1.28,平均0.71%。

3.2.2 煤层瓦斯压力

2003年12月至2004年12月,煤炭科学总院重庆分院对下石节煤矿的瓦斯压力进行了实测(表3.3),4⁻²号煤层瓦斯压力在0.85~1.39MPa之间。

表 3.3 下石节煤矿煤层瓦斯压力实测数据表

标高 (m)	层位	瓦斯压力 (MPa)
+933.2	4 ⁻²	0.85~1.39
+933.2	4 ⁻²	1.15
+960.2	4 ⁻²	1.1

3.2.3 岩层瓦斯特征

(1) 岩层瓦斯含量:勘探钻孔取样测试结果表明,4号煤层老顶小街砂岩瓦斯含量较小,在0~0.02ml/g间。但实际生产过程中揭露,顶板砂岩瓦斯含量并不低。据煤炭科学总院西安研究院1987年在邻矿陈家山煤矿二采区4⁻²号煤层顶板测定,4⁻²号煤层顶板砂岩含气量为6m³/m³。同时已有钻探油气显示数据表明,3号煤层顶板砂岩含气量大于4⁻²号煤层顶板砂岩含气量,说明本区是煤层瓦斯含量较低,而煤层围岩瓦斯含量较高的矿区。

(2) 岩层瓦斯成分:4号煤层老顶小街砂岩瓦斯成分以N₂为主,约占80.24%,CH₄成分较低为3.72%,CO₂为2.29%。仅8936号钻孔例外,CO₂成分高达99.49%(表3.4)。施工在三叠系岩层中的巷道,掘进期间瓦斯成分以重烃为主不含氮气,甲烷含量较低。(表3.5),不仅说明岩层中有天然气存在,也含有重烃组分。

(3) 岩层瓦斯压力:煤层顶板砂岩的瓦斯压力在0.95~1.52MPa间,进一步证明了顶板砂岩含气的结论(表3.6)。

表 3.4 下石节煤矿小街砂岩瓦斯成分分析结果表(据下石节煤矿)

孔号	采样深度 (m)	瓦斯成分%					瓦斯含量 (ml/g)	备注
		CH ₄	CO ₂	N ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈		
8958	457.8-457.94	0	4.39	95.61			0	
8936	485.50-585.9		99.49	0.51			0	
	610.4-611.1	0	0.86	99.14	0			
8949	623.5-623.6	13.96	0	87.00				砂岩裂隙气体成分
8943	482.19-484.43	1.0	5.0	94.00				为游离瓦斯成分
8933	516.31	9.50	2.79	87.71			0	现场解析(界外孔)
8934	622.42	1.59	0.69	97.74			0.02	(界外孔)

表 3.5 下石节煤矿井下岩巷瓦斯成分分析 (据下石节煤矿)

采样地点	瓦斯成分(%)					
	CH ₄	CO ₂	N ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀ 其它重烃
+1000 水平岩巷	7.02			6.04	44.68	21.48 20.77
+1123 岩石大巷	13.82	9.91		6.03	24.80	11.54 33.22

表 3.6 下石节煤矿煤层顶板砂岩瓦斯压力实测数据表 (据下石节煤矿)

标高 (m)	层位	瓦斯压力 (MP a)
+933.2	砂岩	0.95
+960.2	砂岩	1.2
+973	砂岩	1.52

3.3 煤层瓦斯含量影响因素分析

煤层甲烷含量是矿井通风设计及矿井瓦斯抽放的重要依据之一。由于煤田地质勘探阶段对煤层瓦斯的取样测试钻孔很少,而且这些钻孔又大多分布在井田浅部,所以,整个井田的瓦斯分布情况并不是很清楚。因此,定量预测井田的甲烷含量就成为研究区急需解决的重要课题。

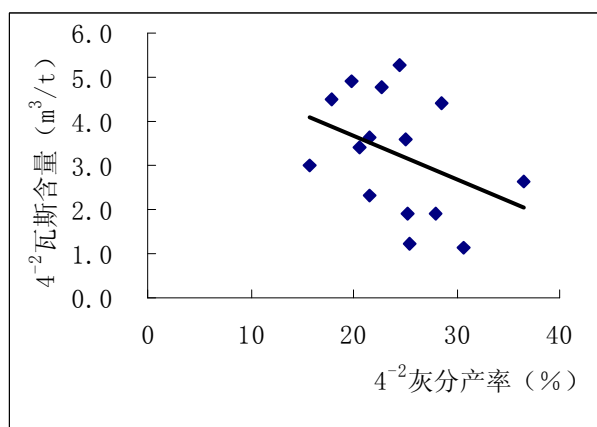
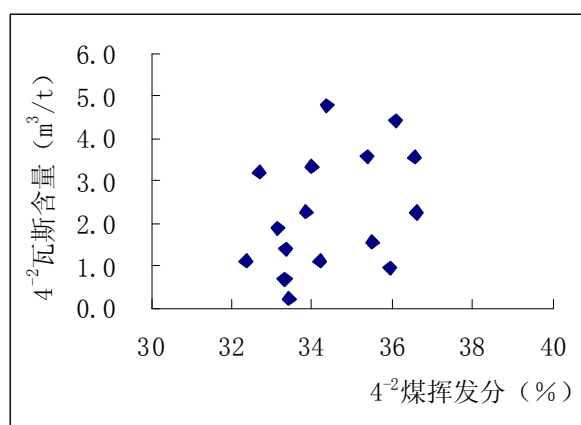
下石节煤矿 4⁻² 号煤层甲烷含量变化较大,不同地段和不同部位,甲烷含量有较大的差异。造成瓦斯含量分布不均衡的原因既与煤的形成条件密切相关,又与煤层形成后各种地质变化和构造密切相关。依据地质因素的性质可以分为煤系及煤层围岩的封闭性能、煤层煤质特征、地质构造条件、煤层埋藏深度等五个方面。其中每个方面可能包含若干子因素。在不同的区域或煤层,通常是几个地质因素不同数目的共同参与控制瓦斯含量。为了能分析确定出影响 4⁻² 号煤层甲烷含量大小的主控因素,以上述几个方面的因素为依据(本区煤系水文地质条件比较简单,几乎没有岩浆活动,因此不做考虑),选取 10 个子因素指标,分析与已知钻孔瓦斯含量的相关性。

(1) 煤层灰分: (x_1): 用原煤干基灰分(A_d)表示。

分析显示,灰分产率与瓦斯含量的关系呈负相关性,样本中 4⁻² 煤灰分 A_d 平均 22.39%,反映出瓦斯含量随灰分产率增加而减少(图 3.4)。

(2) 煤层变质程度(x_2): 用精煤可燃质挥发份表示(V_{daf})。

分析表明,4⁻² 煤挥发分与瓦斯含量具没有明显的相关性(图 3.5)。

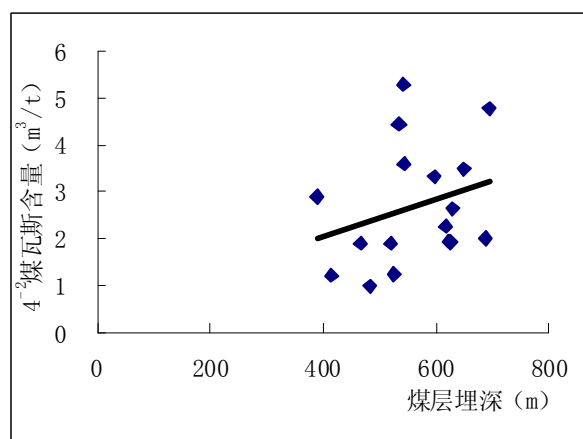
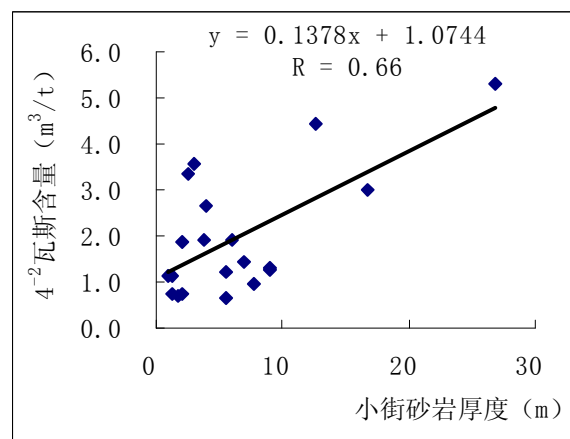
图 3.4 4^{-2} 煤瓦斯含量与灰分产率相关性图图 3.5 4^{-2} 煤瓦斯含量与挥发分相关性图

(3) 煤层埋藏深度(x_3): 指地面至煤层顶面的铅直深度。

从图中反映出瓦斯含量与煤层埋深之间正相关性不甚显著, 只有随煤层埋深增加而增大的趋势 (图 3.6)。

(4) 小街砂岩厚度(x_4): 指 4^{-2} 号煤层上部第一层老顶中粗粒砂岩的厚度。

相关系数为 0.66, 证明 4^{-2} 煤瓦斯含量与小街砂岩厚度之间相关性较好, 瓦斯含量随小街砂岩厚度的增加而增大的趋势明显 (图 3.7)。位于煤层直接顶之上的老顶粗砂岩和中粒砂岩虽然具有较高的连通孔隙度、大量瓦斯储集空间及较高的气体渗透率, 但由于小街砂岩含有油气, 含油率和水分含量较高, 水和油充填了孔隙空间, 对老顶砂岩孔隙造成流体压力封闭和毛细管压力封闭, 从而对下伏 4^{-2} 煤层产生的甲烷起到了良好的封闭作用 (表 3.7)。

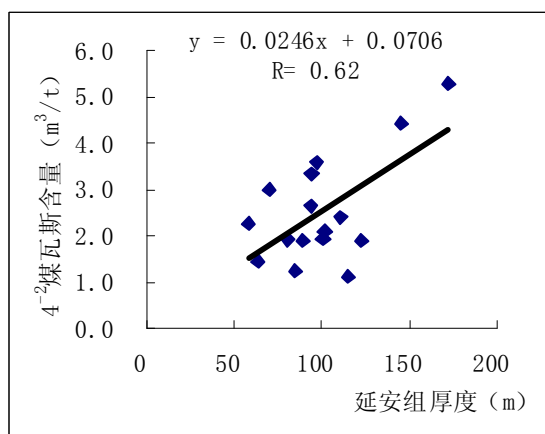
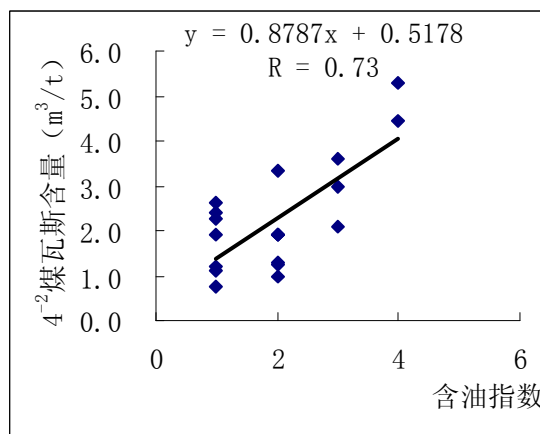
图 3.6 4^{-2} 煤瓦斯含量与煤层埋深相关性图图 3.7 4^{-2} 煤瓦斯含量与小街砂岩厚度相关性图

(5) 煤系地层厚度(x_5): 对 4^{-2} 号煤层采用所在煤系即延安组厚度。

相关系数 0.62, 证明延安组厚度与煤层瓦斯含量有较好的正相关性 (图 3.8), 即 4^{-2} 煤层瓦斯含量随着煤系地层厚度的增加而增大。

表 3.7 围岩的封闭类型 (据庞雄奇, 1993)

封盖类型	封盖机理	围岩类型
薄膜封闭	毛细管压力封闭	泥岩、油页岩、部分致密灰岩
水力封闭	孔隙流体压力和毛细管压力封闭	含水泥岩、含液态烃油页岩
压力封闭	厚层泥岩欠压实造成流体排出不畅, 导致地层压力异常增高	巨厚泥岩
浓度封闭	围岩本身的生烃强度能阻止煤层气的扩散作用	油页岩、炭质泥岩

图 3.8 4^{-2} 煤瓦斯含量与延安组厚度相关性图图 3.9 4^{-2} 煤瓦斯含量与顶板含油指数相关性图

(6) 含油强度指数(x_6): 指 4^{-2} 号煤层顶板之上砂岩层含油等级。分强含油、较强含油、中等含油、弱含油及不含油五个等级, 按照对瓦斯含量的影响依次赋值 4、3、2、1、0。经回归分析, 顶板含油性指数与 4^{-2} 号煤层瓦斯含量的相关系数为 0.73, 说明地层含油性对煤层瓦斯含量具有较强的控制作用 (图 3.9)。

(7) 煤层厚度(x_7): 指煤层顶底板之间的厚度。

经分析, 煤层厚度与煤层瓦斯含量之间没有显著正相关性 (图 3.10), 只是煤层瓦斯含量有随煤层厚度增加而增加的趋势。

(8) 顶板砂泥比(x_8): 指延安组 4^{-2} 号煤层顶板以上至直罗组底界范围内砂岩层总厚与泥岩层总厚的比值。

回归分析后, 煤层瓦斯含量与煤层顶板砂泥岩比为负相关性, 说明煤层顶板围岩中砂岩比重的增加有利于煤层瓦斯的扩散与渗流, 煤层瓦斯含量随顶板砂泥岩比的增大而减小 (图 3.11)。

(9) 延安组二三段 (中上段) 厚度(x_9): 指延安组 4^{-2} 号煤层顶面以上煤系厚度。

4^{-2} 煤层顶板煤系厚度即为延安组中上段地层厚度, 从图中可以看出, 延安组中上段地层厚度与煤层瓦斯含量有显著的正相关性 (图 3.12)。

(10) 直罗组底部砂岩厚度(x_{10}): 指直罗组最底部的一层砂岩, 常含油气。

经回归分析, 直罗组底部砂岩厚度与 4⁻² 号煤瓦斯含量没有相关性, 说明直罗组底部砂岩的厚度和其油气含量对 4⁻² 煤层瓦斯含量没有影响 (图 3.13)。

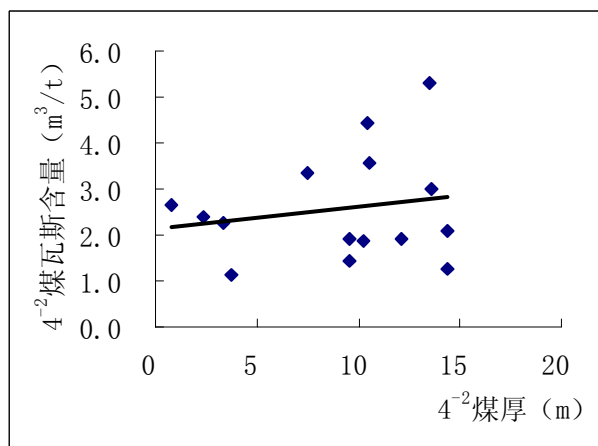


图 3.10 4⁻² 煤瓦斯含量与煤层厚度相关性图

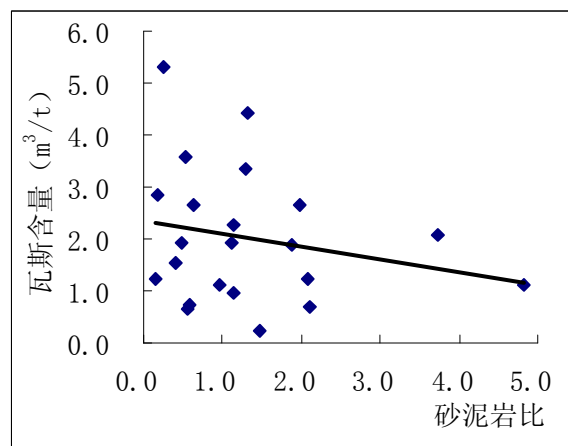


图 3.11 4⁻² 煤瓦斯含量与砂泥岩比相关性图

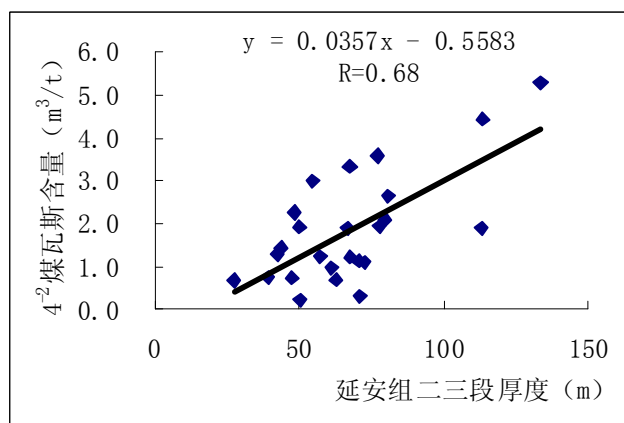


图 3.12 4⁻² 煤瓦斯含量与延安组二三段厚度相关性图

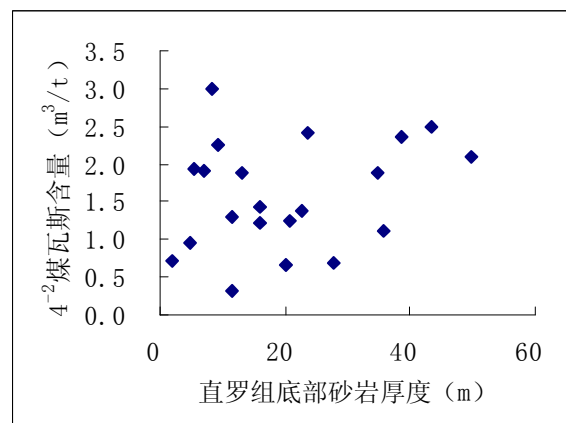


图 3.13 瓦斯含量与直罗组底部砂岩厚度相关性图

3.4 瓦斯含量主控因素筛选

影响煤层瓦斯含量的因素很多, 通过采用数学分析方法, 在众多因素中, 确定出控制煤层瓦斯含量的主要因素和次要因素, 这是开展瓦斯定量预测研究的前提^[27]。除了一些定性分析方法之外, 目前采用较为广泛的方法是数理统计中的回归分析、方差分析、主成分分析等方法。经过对比, 这些方法虽然解决了很多实际问题, 但存在着明显不足, 主要表现在^[28]: 一是要求数据量大, 数据少则难以找到统计规律。在统计数据十分有限的情况下很难满足应用条件; 二是要求样本服从某个典型的概率分布, 子因素与母因素之间关联度要求比较高, 在实际中很难达到。而由我国著名学者邓聚龙教授创立的灰色系统理论中的灰色关联分析方法, 则能弥补上述方法所导致的缺憾, 它对样本多少和样本有无规律都同样适用, 而且计算量少, 方法简单, 对于煤层瓦斯与采面瓦斯影响主控因素的分析十分理想。

(1) 基本思想

灰色关联分析是分析系统中各因素相关程度的方法。是将研究对象（母因素）及其影响因素（子因素）的因子值分别视为一组曲线上的点，然后按几何处理的思想，比较各影响因素与研究对象的相关程度^[28]。这种方法的核心是计算研究对象与其影响因素之间的关联度。关联度越大，表明相应子因素与母因素的关联程度越高。将关联度由大到小排列，构成关联序，由关联序可反映出各子因素对母因素的影响力大小排序。

（2）基本方法

以煤层瓦斯含量为母因素，各影响因素为子因素。

母因素观测值为 $\{x_i^{(0)}(0)=1,2,\dots,n\}$

子因素观测值为 $\{x_t^{(i)}(i)=1,2,\dots,m,t=1,2,\dots,n\}$

由母因素序列与子因素序列构成的原始数据矩阵为：

$$x^{(0)} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(0) & x_1^{(0)}(1) & \dots & x_1^{(0)}(m) \\ x_2^{(0)}(0) & x_2^{(0)}(1) & \dots & x_2^{(0)}(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n^{(0)}(0) & x_n^{(0)}(1) & \dots & x_n^{(0)}(m) \end{bmatrix}$$

其中 $i=0, 1, 2, \dots, m$ 是母因素 ($i=0$) 及子因素的标号； $t=0,1,2,\dots,n$ 为观测点号，上角标 (0) 表示该矩阵为原始数据未经任何变换。因此 $x_t^{(0)}(i)$ 是对第 i 个因素进行第 t 次观测（或在第 t 个观测点）得到的观测值。

对原始矩阵进行初值化变换：

$$x_t^{(1)}(i) = x_t^{(0)}(i) / x_1^{(0)}(i)$$

以消除各因素在量纲上的差异对计算结果产生的影响。然后计算同一观测点各子因素与母因素观测值之间的差值及其极值。

$$\Delta t(i,0) = |x_t^{(1)}(i) - x_t^{(1)}(0)|$$

$$\Delta \max = \max_t \{ \max_i |x_t^{(1)}(i) - x_t^{(1)}(0)| \}$$

$$\Delta \min = \min_t \{ \min_i |x_t^{(1)}(i) - x_t^{(1)}(0)| \}$$

式中： $i=1,2,\dots,m, \quad t=1,2,\dots,n$

至此按下列公式可计算出各子因素与母因素之间的关联度：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \{ (\Delta \min + k \Delta \max) / [\Delta t(i,0) + k \Delta \max] \}$$

式中 k 为分辨系数， $0 < k < 1$ 。

将关联度由大到小的顺序排列构成关联序，反映出各子因素对母因素的影响力依次

减弱，从而可筛选出主要指标，去掉作用不明显的指标。

(3) 主要控制因素定量分析

筛选出位于瓦斯正常带内的 21 个瓦斯钻孔做了 10 项地质因素量化指标值统计，然后将这些因素指标值与对应钻孔甲烷含量值(y)输入计算机，采用灰色关联分析程序运算，得到关联度大于 0.5 以上的各因素指标及关联序情况如(表 3.8)所示。

表 3.8 下石节煤矿 4⁻² 煤层瓦斯含量影响因素关联分析表

指标类型	X_{10}	X_7	X_5	Y
关联度	0.569	0.558	0.526	1.0
关联序	$Y > X_9 > X_6 > X_4$			

从表中看出，影响 4⁻² 煤层甲烷含量大小分布的主要因素有三个，它们分别是延安组二三段厚度 (X_9)，煤层顶板含油强度 (X_6)，4⁻² 号煤层老顶小街砂岩厚度 (X_4)。其它指标对 4⁻² 号煤层甲烷含量影响较小，这与定性散点图分析结果基本一致。

灰色关联分析可以计算出各个子因素与母因素的关联度，排出关联序，从而得确定出各子因素对母因素的影响程度。用一确定的、包含各子因素的线性方程来表达筛选出的主控因素对煤层瓦斯含量的综合影响程度，进而对煤层瓦斯含量进行定量预测。

3.5 煤层瓦斯含量建模预测

3.5.1 数学原理与模型

灰色系统理论以“部分信息已知，部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象，通过对“部分”已知信息的生成、开发，提取有价值的信息，实现对整体系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。灰色预测系统有多种模式和方法，每个模型的适用范围和方法不尽相同，其中 GM(0,N)模型不含导数，是基于 N 个变量生成函数 $X^{(1)}$ 的非微分方程，属于一种静态模型。适用于指标间的状态分析，其建模基础是原始数据的一次累加序列^[41]。

矿井瓦斯含量是进行矿井瓦斯涌出量预测、制定通风安全技术措施的一个重要参数。其大小取决于一系列复杂的地质条件。同一煤层瓦斯含量，在深埋藏度不同、顶底板围岩厚度、岩性差异、构造部位的不同等都会有较大差别，因此，矿井瓦斯含量是一个受多因素影响的参数^[29]。传统的预测方法虽然对某些影响参数进行了量化，但各对因素之间的关系进行精确地描述难度很大。由此可见，瓦斯含量预测是一个灰色系统，灰色模型正好能反映其外延明确、内涵不明确的系统的内在变化规律，也正能反映其动态变化过程^[44]。灰色系统所需数据样本量很少，在矿井瓦斯含量预测中，只需要较少的钻

孔瓦斯含量测定资料, 就可以对井田未采区的煤层瓦斯含量进行定量化的预测。

(1) 数学模型

假设原始数据序列即已知钻孔瓦斯含量为:

$$X_1^{(0)} = \{x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n)\}$$

相关因素序列即煤层瓦斯含量主要控制因素序列:

$$\begin{aligned} X_2^{(0)} &= \{x_2^{(0)}(1), x_2^{(0)}(2), \dots, x_2^{(0)}(n)\} \\ &\dots \quad \dots \quad \dots \\ X_n^{(0)} &= \{x_n^{(0)}(1), x_n^{(0)}(2), \dots, x_n^{(0)}(N)\} \end{aligned}$$

经过一次累加, 得到序列式:

$$x_i^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^n x_i^{(0)}(t) \quad (1)$$

其中: $i = 2, 3, \dots, n$; $t = 2, 3, \dots, n$ 。 $X_i^{(1)}(t)$ 是 $X_i^{(0)}(i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 的一次累加序列。

GM(0,N)模型以原始数据的累加序列为建模基础, 其表达式为:

$$x_1^{(1)} = \sum_{i=1}^{n-1} b_{i+1} x_{i+1}^{(1)} + a \quad (2)$$

(2) 计算方法

①数据处理

由原始数据列 $X_i^{(0)}(i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 进行一次相应的累加生成序列

$$X_i^{(1)}(t) (i = 1, 2, 3, \dots, n; t = 1, 2, 3, \dots, n)$$

②构造矩阵 X(B)

$$B = \begin{pmatrix} x_2^{(1)}(2) x_3^{(1)}(2) \cdots x_n^{(1)}(2) & 1 \\ x_2^{(1)}(3) x_3^{(1)}(3) \cdots x_n^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_2^{(1)}(n) x_3^{(1)}(n) \cdots x_n^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix}$$

构造向量 $Y = [x_1^{(1)}(2), x_1^{(1)}(3), \dots, x_1^{(1)}(n)]^T$

③求 (2) 式中的系数向量 \hat{b}

$$\hat{b} = [b_2, b_3, b_4, \dots, a]^T$$

用最小二乘法求得 $\hat{b} = (B^T B)^{-1} B^T Y$

④求 GM (0,N) 预测模型

将 \hat{b} 代入 (2) 式并作一次累减还原, 得到 GM (0,N) 的预测模型为:

$$\hat{x}_1^{(0)} = b_2 x_2^{(0)} + b_3 x_3^{(0)} + \cdots + b_n x_n^{(0)} + a$$

(3) 模型检验

灰色系统理论主要有三种方法用以检验模型的精度:

①残余大小检验: 是对模型值和实际值的误差进行逐点检验。

②关联度检验: 通过考察模型值曲线与建模序列曲线的相似程度进行检验。

③后验差检验: 是对残差分析的统计特征进行检验。一般情况下, 最常用的是相对误差检验指标。

(4) 残差值 $\varepsilon^{(0)}$ 及相对误差 q 的计算

根据原始数据序列 $X_1^{(0)} = \{x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n)\}$ 和相应的预测模型序列

$\hat{X}_1^{(0)} = \{\hat{x}_1^{(0)}(1), \hat{x}_1^{(0)}(2), \dots, \hat{x}_1^{(0)}(n)\}$ 之差即可求出残差序列 $\varepsilon^{(0)}$

$$\varepsilon^{(0)} = (\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(n)) = (x_1^{(0)}(1) - \hat{x}_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2) - \hat{x}_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n) - \hat{x}_1^{(0)}(n))$$

$$\text{相对误差序列 } q = \left(\left| \frac{\varepsilon(1)}{x_1^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\varepsilon(2)}{x_1^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\varepsilon(n)}{x_1^{(0)}(n)} \right| \right) = \{q_i\}_1^n$$

其中平均模拟相对误差 $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$ 。平均相对精度为 $1 - \bar{q}$ 。

(5) 模型精度等级评定

如果 \bar{q} 在允许范围内, 则模型可用于预测; 否则需要进行参与校正或改用其他模型。一般按如下 (表 3.9) 精度等级进行模型检验。

3.5.2 煤层瓦斯含量预测指标及预测结果

在原始数据的基础上, 借助计算机编程技术, 得到下石节煤矿 4⁻² 号煤层瓦斯含量预测数学模型: $Y = 0.0029x_5 + 1.1634x_7 + 0.0024x_{10} + 0.2508$

为了检验所建立的煤层瓦斯含量预测模型的精度, 通过对已知钻孔瓦斯含量进行预测, 以此计算各钻孔瓦斯相对误差及平均相对误差。经分析对比, 得到最小相对误差

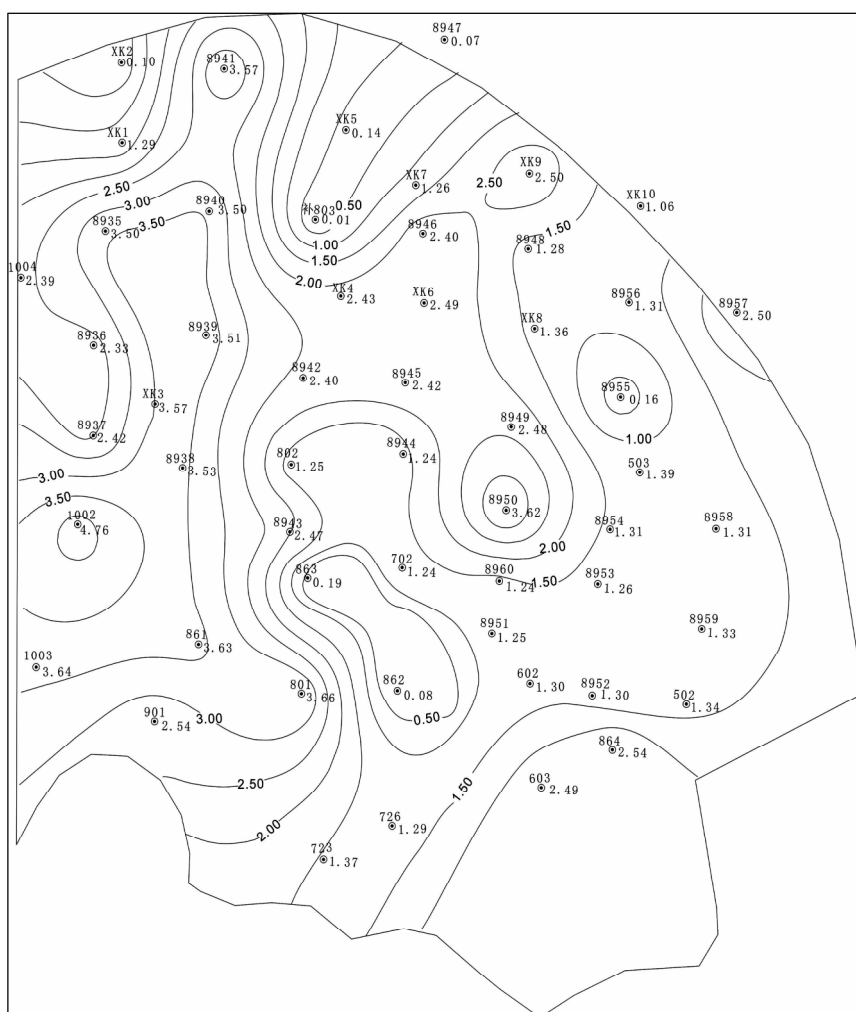
0.004%，最大相对误差 28%，平均相对误差 11.94%。总体精度达到三级，符合模型精度要求，能够用于研究区域内未采区钻孔瓦斯含量的预测。根据煤层瓦斯含量预测模型公式，可以对其它钻孔煤层甲烷含量计算出预测值（表 3.10），从而绘出矿区 4⁻² 号甲烷含量预测图（图 3.14）

表 3.9 模型精度检验等级参考表

精度等级	指标临界值相对误差 \bar{q}
一级（优）	<0.05
二级（好）	$0.05\sim0.10$
三级（合格）	$0.10\sim0.20$
四级（勉强）	$0.20\sim0.30$
五级（不合格）	>0.30

表 3.10 下石节煤矿 4⁻² 煤层钻孔瓦斯含量预测表

孔号	小街砂岩厚度（m）	顶板含油指数	延安组二三段厚度（m）	预测瓦斯含量（ml/g）
723	33.28	1	59.21	1.37
861	8.68	3	55.40	3.63
864	28.39	2	50.98	2.54
1003	1.40	3	43.24	3.64
1004	17.03	2	98.17	2.39
8935	19.70	3	125.02	3.50
8936	1.00	2	106.30	2.33
8937	8.70	2	78.13	2.42
8938	0.40	3	89.38	3.53
8949	10.10	2	51.50	2.48
8950	27.92	3	83.62	3.62
8957	1.40	2	35.50	2.50
8958	0.60	1	42.51	1.31
8959	11.10	1	47.20	1.33

图 3.14 下石节煤矿 4⁻²煤层钻孔瓦斯含量预测图

结合研究区 4⁻²煤层厚度等值线图与煤矿油气分布图分析,从煤层瓦斯含量预测图中可以看出,煤层瓦斯含量随煤层厚度增加而增大,表现在向斜区煤层较厚的地方,瓦斯含量大。原因在于向斜区煤系沉积厚度大,煤层埋藏较深,煤层不仅厚度大而且顶板封盖性较好;4⁻²煤层瓦斯含量的分布与油气强度的分布在平面展布上具有明显的一致性,由于 4⁻²号煤层顶板砂岩中油气对砂岩孔隙的填充封闭作用,增大了顶板砂岩的封闭性。使得煤层中的瓦斯难易扩散,得以较好的保存。

4 采面瓦斯涌出量建模预测

4.1 采面瓦斯涌出源分析

根据对下石节煤矿 2011 年 7 月矿井瓦斯等级鉴定资料的分析, 全矿井绝对瓦斯涌出量为 $43.49\text{m}^3/\text{min}$ 。其中回采面瓦斯涌出量为 $23.47\text{m}^3/\text{min}$, 占 53.97%, 掘进面瓦斯涌出量为 $7.35\text{m}^3/\text{min}$, 占 16.90%, 其它巷道瓦斯涌出量为 $12.67\text{m}^3/\text{min}$, 约占 29.13%。回采工作面是构成矿井瓦斯涌出的主要来源, 分析矿井瓦斯涌出量可以发现, 除回采和掘进工作面外瓦斯涌出来源还有以下四个方面^[37]:

(1) 煤壁瓦斯涌出

随着回采工作面的连续向前推进, 新鲜煤壁不断暴露, 在矿山压力的作用下, 工作面前方煤体的应力平衡状态受到破坏、出现了透气性大大增加的卸压带, 工作面的前方始终存在着一定的瓦斯压力梯度, 从而使煤层中的瓦斯沿着卸压带的裂隙大量涌向工作面, 瓦斯的涌出强度随着煤壁暴露时间的增加而降低^[32]。煤壁瓦斯涌出量主要取决于煤层原始瓦斯压力、透气性及工作面推进速度等因素。

(2) 落煤瓦斯涌出

由于回采工作面的推进, 工作面煤壁上的煤被不断采落、运出, 其所含有的瓦斯也源源不断地释放到回采空间。采落煤呈块粒状, 使得煤体的暴露面成倍增加, 提高了瓦斯解吸强度和速度, 并导致瓦斯涌出量的增加。不同块粒度采落煤的瓦斯放散速度是不同的, 粒度越小, 瓦斯放散速度越快; 粒度越大, 瓦斯放散速度越慢。综采面采落煤瓦斯涌出量主要取决于采落煤量、原始瓦斯压力、透气性等因素。采落煤瓦斯涌出强度与煤壁相似, 也随时间延长而降低^[33]。

(3) 采空区瓦斯涌出

采空区为残留煤及上覆煤岩层垮落形成的多孔介质充填体, 各处煤与矸石压实程度差异很大, 风压变化较大, 造成采空区各点的气体流动速度不同^[34]。采空区各涌出源瓦斯随着采场内煤层、岩层的变形或垮落而卸压, 按各自的规律涌入采空区, 混合在一起, 在浓度差和通风负压的作用下涌向工作面。

(4) 临近层瓦斯涌出

由于主采 4⁻² 号煤层顶板之上有多层含油气砂岩层, 随着工作面的持续推进, 老顶大面积垮落, 而瓦斯涌出随顶板垮落同步变化, 说明煤层顶板砂岩气也是影响 4⁻² 号煤层采面瓦斯涌出量一个重要方面。

4.2 采面瓦斯涌出规律

根据生产期间资料总结，采面瓦斯涌出具有以下几点规律：

(1) 接近地质构造发育地区，如向斜轴部、断层带、裂隙发育带、煤层受构造作用破坏挤压严重的地区瓦斯涌出量普遍增高。

(2) 煤层发育及埋藏深度大的地区，由于煤层储气量丰富，加之围岩封闭性相对变好，瓦斯涌出相对较高，而在埋藏浅的区域，瓦斯涌出及含量相对偏低。

(3) 采面瓦斯涌出量与产量关系密切，产量大，绝对瓦斯涌出量就高。

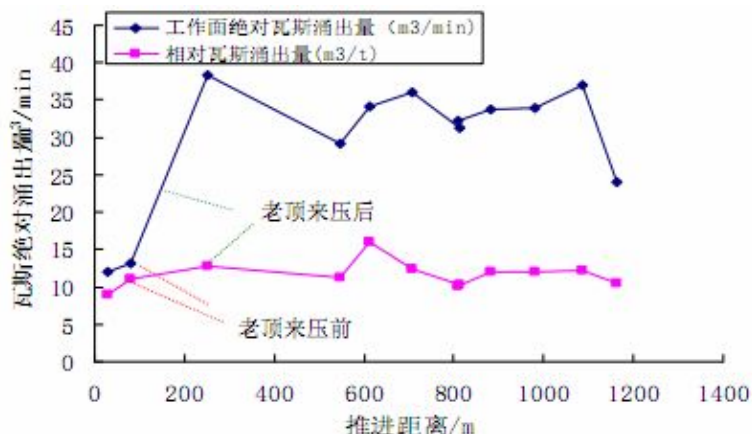


图 4.2 217 综放面老顶大面积跨落前后瓦斯涌出量变化曲线

(4) 采面瓦斯涌出来源的主渠道是老顶含油气砂岩，其涌出瓦斯量大约占采面瓦斯涌出总量的 60~65% 以上，次为煤层瓦斯。据 217 工作面统计，初采时综放面绝对瓦斯涌出量一般在 12~13 m³/min 左右，当推进 60~90m，老顶大面积垮落，绝对瓦斯涌出量达 35~38 m³/min 左右，超出正常涌出的近 3 倍（图 4.2），而瓦斯涌出量的变化同煤层顶板的垮落具有同步性的特点，其中顶板涌出瓦斯量占近 65%，煤层释放瓦斯占 35%，说明煤层顶板砂岩气是 4⁻² 号煤层采面瓦斯涌出量的主要来源。

4.3 采面瓦斯涌出量影响因素分析

主采 4⁻² 号煤层采面瓦斯涌出量不仅大，而且变化很大，既受地质条件的控制，又与开采因素紧密相关。经对多种资料系统分析后发现，影响 4⁻² 号煤层工作面瓦斯涌出量的地质因素及生产因素较多，分别从：煤层埋藏深度 (X_1)、瓦斯含量 (X_2)、日产量 (X_3)、煤层厚度 (X_4)、顶板含油气砂岩厚度 (X_5)、日推进距离 (X_6) 等六个方面进行分析^[43]。

(1) 瓦斯涌出量与煤层厚度的关系

在煤矿开采过程中发现，部分采面瓦斯涌出量与煤层厚度之间显示一定正相关性，表现在工作面煤层增厚的地方，瓦斯涌出量相应增大，如 215 采面（图 4.3），但在部分

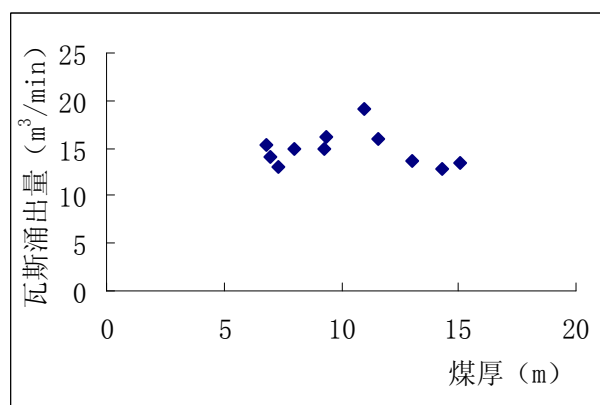
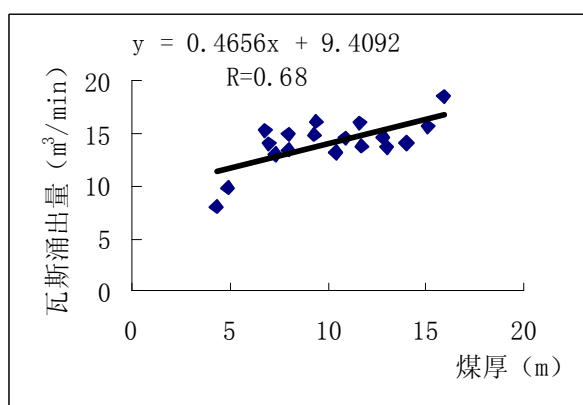


图 4.3 215 工作面煤厚与瓦斯涌出量相关性图

图 4.4 216 工作面煤厚与瓦斯涌出量相关性图

采面瓦斯涌出量与煤层厚度之间相关性不甚明显面，如 216 采面（图 4.4）。出现这一现象的主要原因在于 215 工作面煤层较厚且不含或少含夹矸，216 工作面随着推进距离增加，煤层逐渐变薄且煤层含有多层夹矸，工作面内 8943 钻孔夹矸多达 14 层，夹矸不含瓦斯，煤层夹矸比重的增加造成煤质变差，瓦斯含量减少。

（2）瓦斯涌出量与煤层埋深的关系

研究区煤层顶板封闭性较差，巨厚的覆盖层能够增加瓦斯向外运移渗透的难度，减少瓦斯向地表逸散，使煤层中的瓦斯得到较好保存。215 采面瓦斯绝对涌出量和煤层埋深关系图，两者显示正相关性关系显著（图 4.5）。历年矿井瓦斯鉴定月工作面埋深与瓦斯涌出量关系散点图，同样反映出随采面煤层埋深增加，瓦斯涌出量总体呈增大趋势（图 4.6）。

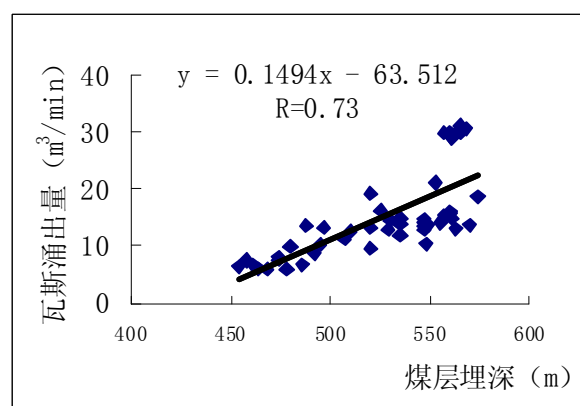
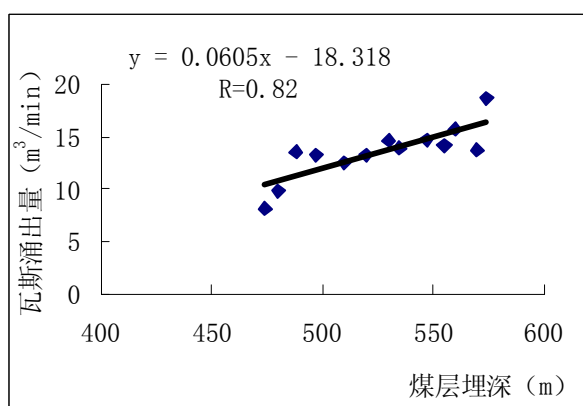


图 4.5 215 工作面埋深与瓦斯涌出量相关性图

图 4.6 工作面埋深与瓦斯涌出量相关性图

（3）瓦斯涌出量与瓦斯含量的关系

煤层瓦斯含量是决定瓦斯涌出量大小的因素。瓦斯含量与采面瓦斯涌出量呈正相关关系（图 4.7）。即煤层瓦斯含量高的地段，相应工作面瓦斯涌出量也高。由于影响瓦斯涌出量的因素众多，受其它因素的作用掩盖或较大影响，局部可能会出现相反的情况。

(4) 瓦斯涌出量与地质构造的关系

①与断裂构造

研究区井田内无较大断裂构造,后期构造以中、小型为主,裂隙比较发育,个别断层落差较大,但延伸较短,仅在井田中部发育了一组较大断裂构造,并形成无煤区。由于煤层与上、下地层物性差异较大,在构造应力和重力的综合作用下,易发生流变,产生了较发育的北东向和不甚发育的北西向断层和裂隙,这些断层和裂隙因与顶板含气砂岩的沟通作用,当采掘工程揭露时,造成瓦斯涌出量有明显增大现象。

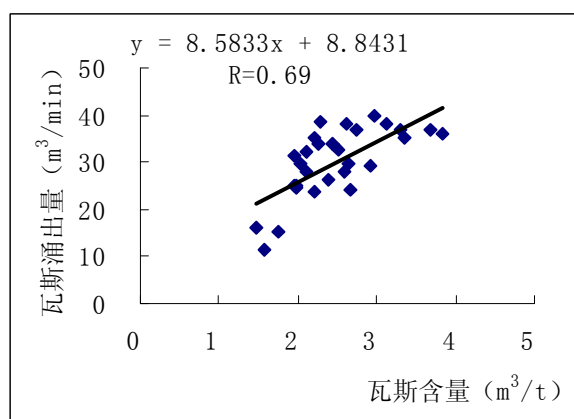


图 4.7 瓦斯含量与采面瓦斯涌出量相关性图

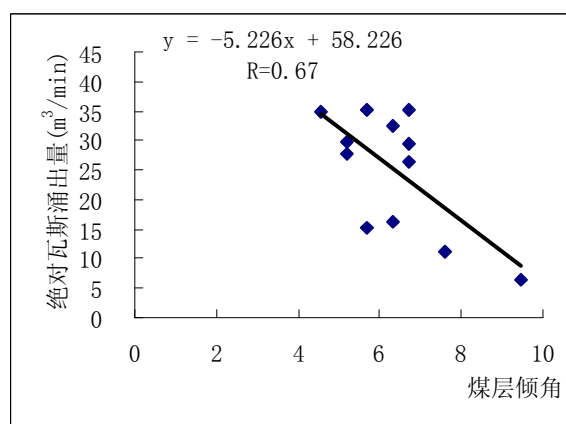


图 4.8 采面瓦斯涌出量与煤层倾角相关性图

②与褶皱构造

井下实际开采揭露资料显示,背斜轴部瓦斯涌出较小,向斜轴部涌出较大。这可能与背斜区和向斜区埋深、煤层厚度及瓦斯含量不同有关。

煤层倾角与瓦斯涌出量呈负相关关系,相关系数 66.75,证明随煤层倾角增大瓦斯涌出量减小的负相关关系显著,同时也说明构造对瓦斯涌出量具有一定的影响作用(图 4.8)。

(4) 瓦斯涌出量与油气的关系

矿井中煤、油、气共生的地质条件,在很大程度上加重了瓦斯涌量。在煤层开采后,因采动破坏,油气可以沿孔隙和裂隙直接渗入或渗透到采掘空间导致油气涌出或喷出。根据对 4 号煤层顶板之上含油气的小街砂岩厚度、延安组砂岩厚度、直罗组砂岩厚度等与采面瓦斯涌出量相关分析,得出 4 号煤层顶板含油气的小街砂岩厚度与采面瓦斯涌出量间显示微弱的相关关系。表现在小街砂岩厚的地方,采面瓦斯涌出量总体较高(图 4.9)。

(5) 瓦斯涌出量与日产量的关系

工作面日产量反映了煤层在单位时间内暴露的程度,与瓦斯涌出量的关系极为密切,呈现出正相关关系。即单位时间采落的煤炭数量越多,解吸、放散的瓦斯量就越多,绝对瓦斯涌出量就高。反之,释放的瓦斯涌出量减少。从历年矿井瓦斯鉴定月实测工作

面平均日产量与瓦斯涌出量关系散点图中看出(4.10)，瓦斯涌出量高低变化与采面平均

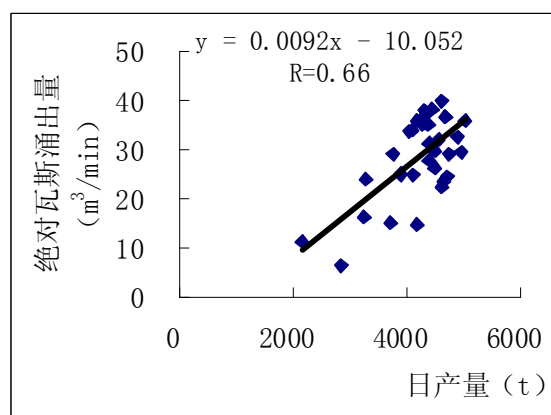
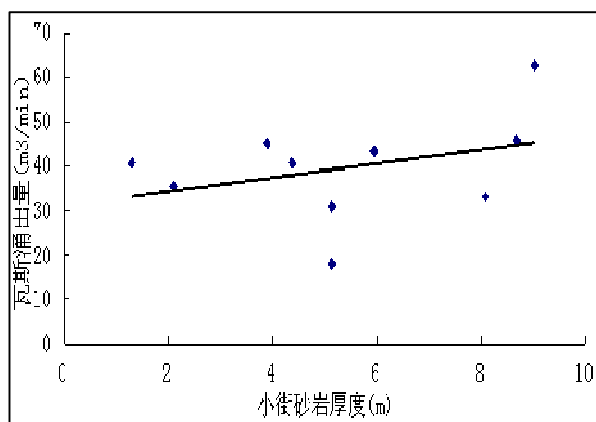


图 4.9 小街砂岩厚度与采面瓦斯涌出量相关性图 图 4.10 工作面日产量与采面瓦斯涌出量相关性图
日产量关系非常显著。

4.4 采前采面瓦斯涌出量建模预测

大量的生产实践总结及资料的定性分析表明，采面瓦斯涌出量不仅受自然条件的影响，还受开采因素的制约^[35]。因此，涌出量的预测是涉及多因素的综合预测。采前瓦斯涌出量的预测是宏观方面的。瓦斯涌出量影响因素地质条件确定，而且处于稳定状态，生产因素设定不变，是用确定已知的地质与生产条件进行预测，是一种静态的预测。

逐步回归分析是多元线性回归的发展，就是把对因变量有显著作用的自变量逐个地引入回归式。首先选出与因变量相关程度最大的自变量，通过统计检验，表明该自变量的作用显著时，则将其引入回归式。然后在剩下的自变量中再挑选与因变量最密切的自变量。当已引入的变量由于后来变量的引入使它对因变量的作用由显著变为不显著时（这是因为自变量间有相关性），则随时将它们从回归式中剔除。如此反复进行，直到再也没有一个自变量可以引入，没有一个自变量可以剔除为止。最终实现从众多自变量中挑选出最显著变量，建立一个优化回归方程的目的。

4.4.1 逐步回归分析数学原理

(1) 引入和剔除变量的依据

①引入变量的依据：假定已有 L 个自变量引入回归方程，即已知回归方程：

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n$$

相应的平方和分解公式为：

$$SS_T = SS_R + SS_S \quad (1)$$

式中 SS_T 为总的平方和， SS_R 为回归平方和， SS_S 为离差平方和。为表明 SS_R 和 SS_S 与引入的自变量有关，分别用 $SS_R(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 和 $SS_S(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 表示。添加一个自变量

$x_i (i = l+1, l+2, \dots, p)$ 后, 有了新的回归方程及其相应的平方和分解公式:

$$SS_T = SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i) + SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i) \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中左端 SS_T 一样, 当 x_i 引入后, 回归平方和从 $SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 增加到 $SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i)$, 而残差平方和从 $SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 减少到 $SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i)$ 并有:

$$\begin{aligned} & SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i) - SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &= SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n) - SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i) \end{aligned} \quad (3)$$

令 $V_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i) - SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。添加的自变量 x_i 对回归平方和的贡献 $V_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 是引入 x_i 之后又 x_i 带来的关于因变量 Y 的“信息”, 也就是 x_i 引入后在残差平方和中所减少的量, 称它为 x_i 对 Y 的方程贡献。因此, 将量 $V_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与剩余平方和进行比较, 看 x_i 的影响是否显著, 用:

$$F_{li} = V_i(x_1, x_2, \dots, x_n) / [SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i) / (n-l-2)] \quad (4)$$

来进行检验, 其中 n 是样本容量, l 是“已引入”的自变量个数。适当选取引入自变量的 F 检验临界值 F_{α} , 当 $F_{li} > F_{\alpha}$ 时, 表明自变量 x_i 是有意义的; 当 $F_{li} \leq F_{\alpha}$, 引入自变量 x_i 就没意义。实际上, 可能 $F_{li} > F_{\alpha}$ 的有好几个, 应选取最大的。因此, 在算法上先求: $\max_{1 \leq i \leq p} F_{li} = F_{ki}$; 将其与 F_{α} 比较, 如果 $F_{li} > F_{\alpha}$, 相应的 x_{ki} 入选, 如果 $F_{li} \leq F_{\alpha}$, 引入

的步骤到此为止。

②剔除变量的依据: 假定已有 l 个自变量引入回归方程, 设为 (x_1, x_2, \dots, x_n) 相应的平方和分解公式是:

$$SS_T = SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n) + SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

逐个去掉自变量 $x_i (i = l+1, l+2, \dots, p)$ 后相应的平方和分解式:

$$\begin{aligned} SS_T &= SS_R(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_l) \\ &\quad + SS_S(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_l) \end{aligned} \quad (6)$$

此时, 回归平方和从 $SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 降到 $SS_R(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_l)$, 而残差平方和从 $SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 增加到 $SS_S(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_l)$, 相应的 x_i 的“贡献”是:

$$\begin{aligned} V_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &= SS_R(x_1, x_2, \dots, x_n) - SS_R(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_l) \\ &= SS_S(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_l) - SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (7)$$

计算: $F_{2i} = V_i(x_1, x_2, \dots, x_n) / [SS_S(x_1, x_2, \dots, x_n, x_i) / (n-l-2)]$, 来进行检验, 其中 n 是样本容量, l 是已引入自变量的个数。适当选取剔除自变量的 F 检验临界值 F_{β} , 当 $F_{2i} \leq F_{\beta}$, 表明已引入的自变量 x_i 对因变量 Y 的作用已不再显著, 应当剔除; 当 $F_{2i} > F_{\beta}$ 时, 表明此时没有可剔除的自变量。实际上, 可能 $F_{2i} \leq F_{\beta}$ 的有好几个, 选取最小的。因此,

在算法上先求: $F_{ki} = \max_{1 \leq i \leq p} F_{2i}$, 然后, 将其与 $F_{剔}$ 比较, 如果 $F_{ki} \leq F_{剔}$, 相应的 x_{ki} 应剔除, 如果 $F_{ki} > F_{剔}$, 表明此时没有可剔除的变量, 在剔除相应的 x_{ki} 后, 再重复前述做法, 知道没有可剔除的变量为止。

(1) 矩阵变换的算法

逐步回归的计算过程主要是采用无回代的高斯—约当消去法求解正规方程组, 包括求系数矩阵的逆矩阵、在每一个中间步骤进行方差分析、作显著性 F 检验、决定变量的剔除或引入等。计算方法主要有:

设全部自变量为 x_1, x_2, \dots, x_n , 有其正规方程组:

$$\begin{aligned} s_{11}b_1 + s_{12}b_2 + \dots + s_{1p}b_p &= s_{1y} \\ s_{21}b_1 + s_{22}b_2 + \dots + s_{2p}b_p &= s_{2y} \\ \dots &\dots \dots \\ s_{p1}b_1 + s_{p2}b_2 + \dots + s_{pp}b_p &= s_{py} \end{aligned} \quad (1)$$

用:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1p} & s_{1y} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2p} & s_{2y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{p1} & s_{p2} & \dots & s_{pp} & s_{py} \end{bmatrix} \quad (2)$$

表示离差矩阵, 即在正规方程系数矩阵的基础上增加第 $p+1$ 行和 $p+1$ 列, 矩阵中:

$$\begin{aligned} S_{ij} &= \sum_{k=1}^n \sum (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j) \\ S_{iy} &= \sum_{k=1}^n \sum (x_{ki} - \bar{x}_i)(y_k - \bar{y}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $i, j = 1, 2, \dots, p$ 并有总离差平方和: $s_{yy} = \sum_{k=1}^n \sum (y_k - \bar{y})^2$, \bar{x}_i, \bar{y} 为各个自变量与因变量的均值, 由于相关系数:

$$r_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sqrt{s_{ii}} \cdot \sqrt{s_{jj}}} \quad (4)$$

式中 $i, j = 1, 2, \dots, p, y$, 故方程组 (1) 可改写为:

$$\begin{aligned} r_{11}b_1' + r_{12}b_2' + \dots + r_{1p}b_p' &= r_{1y} \\ r_{21}b_1' + r_{22}b_2' + \dots + r_{2p}b_p' &= r_{2y} \\ \dots &\dots \dots \\ r_{p1}b_1' + r_{p2}b_2' + \dots + r_{pp}b_p' &= r_{py} \end{aligned} \quad (5)$$

新方程组 (4) 的解 b_i' 与原方程 (1) 的解 b_i 有如下关系:

$$b_i = \frac{\sqrt{s_{yy}}}{\sqrt{s_{ii}}} b_i' \quad (6)$$

式中 $i=1, 2, \dots, p$, 相关矩阵 r_{ij} 的逆阵 r_{ij}^{-1} 与离差矩阵 S_{ij} 的逆阵 C_{ij} 之间的关系为:

$$c_{ij} = \frac{r_{ij}^{-1}}{\sqrt{s_{ii}} \cdot \sqrt{s_{jj}}} \quad (7)$$

在多元回归中还经常用到调整后的复相关系数, 设 R_α 为调整后的复相关系数, R 为未调整的复相关系数, N 为样本容量, P 为解释变量的个数, 那么

$$R_\alpha = 1 - \frac{(N-1)(1-r)}{N-P-1}。$$

显然 $R_\alpha < R$, R_α 并不一定随解释变量个数的增加而增大, 故一般选择较大的 R_α 来确定解释变量个数的多少。

4.4.2 预测结果

在矿井已采区域内, 统计了综采放顶煤 9 个回采工作面 (211 面、212 面、213 面、214 面、215 面、216 面、217 面、218 面、219 面) 36 个回采月份的实测瓦斯涌出量数据及其对应的因素指标值数据。在去掉异常值后, 经逐步回归分析程序运算, 建立了综采放顶煤工作面绝对瓦斯涌出量 (Y) 预测模型如下:

$$y = 0.09909x_1 + 3.5609x_2 + 0.00142x_3 - 40.67403$$

其中, 复相关系数 $R=0.80$; 标准差 $=0.91$; F -检验值 $=19.53$; 在 0.1 水平 F 检验显著, 关系式成立, 回归效果较好。

由逐步回归模型可以看出, 影响下石节煤矿工作面 4⁻² 号煤层绝对瓦斯涌出量的主要控制因素有 3 个, 分别是: 4⁻² 号煤层埋藏深度 (X_1), 4⁻² 号煤层瓦斯含量 (X_2) 及回采工作面日产量 (X_3)。绝对瓦斯涌出量与煤层埋深、煤层瓦斯含量和工作面日产量呈正相关关系。即随着 4⁻² 号煤层埋藏深度和煤层瓦斯含量增加、日产量增大, 采面绝对瓦斯涌出量增高。

以建立的下石节煤矿 4⁻² 号煤层采面绝对瓦斯涌出量预测模型为依据, 利用钻孔资料获取的 4⁻² 号煤层埋藏深度, 煤层厚度及工作面计划日产量 (按 4500t/d 考虑), 可以得出未采区钻孔绝对瓦斯涌出量 (表 4.1)。以已采区实测瓦斯涌出量值, 未采区应用模型预测值编制了 4⁻² 号煤层采面绝对瓦斯涌出量预测图 (图 4.11)。从图中看出, 4⁻² 号煤层采面绝对瓦斯涌出量总体均呈现出由井田浅部向深部迅速增大的趋势, 这种变化规律与煤系、煤层沉积规律及构造展布格局具有大体的一致性。预测未采区绝对瓦斯涌出量最高值为 48.22m³/min, 一般值介于 30~45m³/min 间。

表 4.1 下石节煤矿未采区钻孔绝对瓦斯涌出量预测表

埋深 (m)	日产量 (t)	瓦斯含 量 (m^3/t)	预测值 (m^3/min)	埋深 (m)	日产量 (t)	瓦斯含 量 (m^3/t)	预测值 (m^3/min)
504.00	4500	6.35	20.28	553.10	4500	1.58	28.31
530.75	4500	4.32	23.47	629.86	4500	3.76	45.27
622.75	4500	3.10	38.99	555.92	4500	2.73	33.23
558.05	4500	8.40	31.20	627.23	4500	2.07	43.48
544.42	4500	2.43	26.83	584.15	4500	1.76	32.11
555.43	4500	3.45	26.14	637.37	4500	2.13	42.59
687.25	4500	3.75	36.50	625.09	4500	1.11	43.95
661.72	4500	4.01	48.14	625.07	4500	1.40	48.22
641.45	4500	3.01	36.20	597.90	4500	2.05	42.57
604.43	4500	2.48	40.68	483.99	4500	1.06	17.72
590.04	4500	1.30	26.37	528.01	4500	1.35	28.38
551.40	4500	0.78	33.25	558.85	4500	2.20	29.72
663.58	4500	2.94	35.30	568.60	4500	2.90	34.53
625.15	4500	2.15	39.39	556.59	4500	2.30	33.75
549.38	4500	1.53	27.66	555.44	4500	1.18	32.73

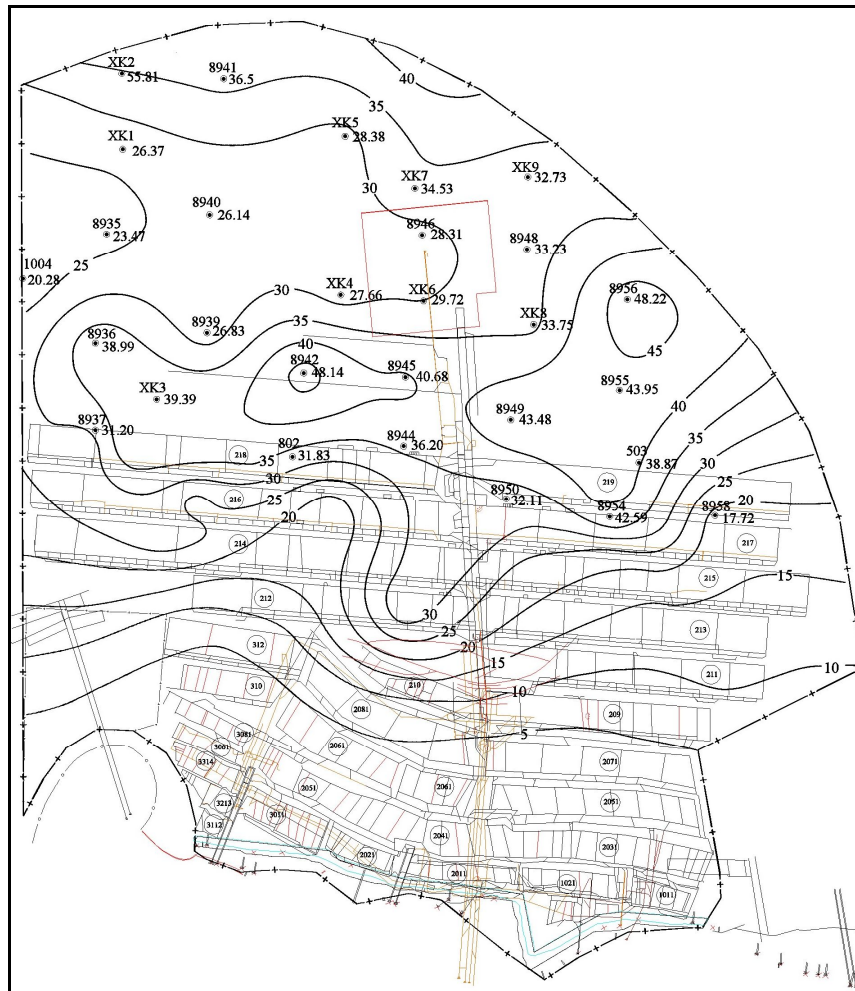


图 4.11 下石节煤矿 4⁻²煤层采面瓦斯涌出量预测图

4.5 回采面瓦斯涌出量动态建模预测

采煤工作面瓦斯涌出量是合理进行通风和瓦斯抽放设计的依据,其结果直接影响着工作面通风的合理性、瓦斯防治措施的有效性和高效生产的安全性。但工作面在回采过程中,瓦斯涌出量的变化受诸多因素的影响和制约,如煤层瓦斯含量、煤层厚度、工作面回采率、煤层厚度、煤层瓦斯抽放量、工作面推进速度以及采煤方法等。因此,工作面瓦斯涌出量是一个受多因素影响的参数,其中有些因素是已知的信息,有些是未知的信息,而且这些影响因素是动态变化的,且这些因素之间的非线性关系错综复杂,尽管我们可以用一定的解析式来定量描述回采工作面瓦斯涌出量与某些影响因素之间的关系。采用静态预测模型只能给出采前采面的瓦斯涌出量预测结果,这种结果是假定了一定地质与生产参数不变情况下的结果,生产过程随着煤层的开采,地质情况与生产情况随时都在变化,因此它无法确切反映某时某刻采面瓦斯涌出量变化的动态数据,基于生产过程中每日统计的瓦斯涌出资料,在既有已知信息又有未知信息的情况下,应用灰色系统理论独特的优势,可以建立灰色动态预测模型,超前掌握工作面前方瓦斯涌出的动态数值。

下石节煤矿矿井目前正在回采 219 工作面,拟通过建立 GM(1,1) 模型,实现对该工作面瓦斯涌出量的超前实动态时预测。

4.5.1 GM(1,1) 模型数学原理

(1) 对原始数据序列:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(N)\}$$

作一次累加生成,得到:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(N)\}$$

其中 $X^{(1)}(t) = \sum_{k=1}^t x^{(0)}(k)$, 建立白化形式微分方程及模型 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$

(2) 构造累加矩阵 B 与常数项向量 Y_N 即:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(N-1) + x^{(1)}(N)) & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_N = [x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3), \dots, x_1^{(0)}(N)]^T$$

(3) 用最小二乘法解灰参数 \hat{a}

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$$

(4) 将灰参数代入时间函数

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a}$$

(5) 对 $\hat{x}^{(1)}$ 求导还原得到

$$\hat{x}^{(0)}(t+1) = -a(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at}$$

(6) 计算 $x^{(0)}(t)$ 与 $\hat{x}^{(0)}(t)$ 之差 $\varepsilon^{(0)}(t)$ 及相对误差 $e(t)$

$$\varepsilon^{(1)}(t) = x^{(0)}(t) - \hat{x}^{(0)}(t), \quad e(t) = \varepsilon^{(0)}(t) / x^{(0)}(t)$$

(7) 模型诊断及应用模型进行预报

为了分析模型的可靠性, 必须对模型进行诊断。目前较为通用的诊断方法是对模型进行后验差检验, 即先计算观察数据离差 s_1 :

$$s_1^2 = \sum_{t=1}^m (x^{(0)}(t) - \bar{x}^{(0)}(t))^2$$

及残差的离差 s_2 :

$$s_2^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^{m-1} (q^{(0)}(t) - \bar{q}^{(0)}(t))^2$$

再计算后验比: $c = \frac{s_1}{s_2}$, 及小误差概率: $p = \{ |q^{(0)}(t) - \bar{q}^{(0)}| < 0.6745s_1 \}$ 。

根据后验比 c 和小误差概率 p 对模型进行诊断, 当 $p > 0.95$ 和 $c < 0.35$ 时, 模型可靠, 可以根据模型对系统进行预测。

4.5.2 原始数据处理及模型建立

以 219 综采放顶煤工作面 6 天回采的实测瓦斯涌出量数据为建模数据 (表 4.2)。则 $X^{(0)}, X^{(1)}$ 的序列为:

$$X^{(0)} = (35.15, 35.90, 36.78, 36.98, 38.14, 36.78)$$

$$X^{(1)} = (35.15, 71.05, 107.83, 144.81, 182.95, 219.73)$$

利用 GM(1, 1) 模型对工作面瓦斯涌出量进行超前预测, 经计算分析, 建立的 219 工作面绝对瓦斯涌出量动态预测模型为:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = 1087.86e^{0.025t} - 1062.85$$

表 4.2 219 工作面绝对瓦斯涌出量实测表 (m^3/min) (据下石节煤矿)

序号	时间	实测值	序号	时间	实测值
1	2011.3.5	35.15	5	2011.3.9	38.14
2	2011.3.6	35.90	6	2011.3.10	36.78
3	2011.3.7	36.78			
4	2011.3.8	36.98			

因为灰色理论所建立的模型是生成数据的模型,而不是原始数据的模型,所以必须在上式的基础上通过累减得到正确的预测数据序列:

$$\hat{x}^{(0)} = [\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \hat{x}^{(0)}(3), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)]$$

利用建立的采面动态预测模型,对 219 工作面的绝对瓦斯涌出量进行预测。预测结果见(表 4.3)。

表 4.3 模型预测结果与实测值分析对比表 (m^3/min)

时间	实测值	预测值	相对误差 (%)	时间	实测值	预测值	相对误差 (%)
2011.3.6	35.90	35.35	1.54	2011.3.9	38.14	37.42	1.89
2011.3.7	36.78	36.02	2.06	2011.3.10	36.78	38.14	3.69
2011.3.8	36.98	36.71	0.72				

4.5.3 残差检验

一般以实测值为基础计算其相对误差,当误差较大而且不能满足实际要求时,可以利用其残差系列来建立一个修正模型,消除误差。记 0 阶残差为:

$$\varepsilon_i^{(0)} = x_i^{(0)} - \hat{x}_i^{(0)}, i = 1, 2, \dots, n,$$

式中 $\hat{x}_i^{(0)}$ 是通过预测模型得到的预测值,则得到残差均值、残差方差、原始数据均值和方差、后验差检验比值 C 和小误差率 P 公式(见表 4.4)。经模型精度检验,预测结果与实测值数据基本吻合,证明模型精度可靠,能够用于采面未来瓦斯涌出量的动态预测。

4.4 残差检验计算公式

	残差	原始数据
均值	$\bar{\varepsilon}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{(0)}$	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^{(0)}$
方差	$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^{(0)} - \bar{\varepsilon})^2$	$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i^{(0)} - \bar{X})^2$
后验差检验比值	$C = S_1 / S_2$	
小误差率	$P = P\left\{ \left \varepsilon_i^{(0)} - \bar{\varepsilon}^{(0)} \right < 0.6745 S_2 \right\}$	

4.5.4 瓦斯涌出量动态预测模型的建立及应用

(1) 追加数据

煤矿在每天的生产过程中都会监测瓦斯浓度,根据风量计算出瓦斯涌出量,每天都会产生新的数据。如果每次都将新产生的数据追加在原始数据之后,那么随着时间的推移,原始数据就会十分庞大,导致模型计算复杂难度加大,甚至难以建立相应的模型。考虑到新数据能代表最新的趋势,因此,在追加新数据的同时舍去原始数据中的第一个数据,即建立的模型所采用的数据均是工作面一周内的瓦斯涌出量资料。追加的 219 工作面资料见表(4.5)。

表 4.5 219 工作面绝对瓦斯涌出量实测表 (m^3/min) (据下石节煤矿)

序号	时间	实测值	序号	时间	实测值
1	2011.3.6	35.90	5	2011.3.10	36.78
2	2011.3.7	36.78	6	2011.3.11	38.37
3	2011.3.8	36.98			
4	2011.3.9	38.14			

(2) 模型建立及检验

利用表(4.5)中数据建立 GM(1.1)模型,数据处理后建立的模型为:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = 99.4872e^{0.0025t} - 98.9209$$

根据所建模型可对 219 工作面未来 3 天的绝对瓦斯涌出量进行实时预测(表 4.6)。通过对预测结果与采面实测数据分析对比,经模型误差精度检验,证明模型精度合格,预测结果可靠。可以根据预测结果及时调整工作面风量和瓦斯抽放量,为工作面安全生产提供可靠数据。

表 4.6 下石节煤矿 219 工作面绝对瓦斯涌出量预测表 (m^3/min)

时间	GM(1.1)模型预 (m^3/min)	瓦斯涌出量实测值 (m^3/min)	误差率%
2011.3.12	40.06	39.57	1.22
2011.3.13	41.09	42.25	2.82
2011.3.14	42.15	43.78	3.87

5 结论及展望

5.1 结论

本文以瓦斯地质学理论为指导,通过分析瓦斯赋存条件,研究瓦斯地质规律,筛选影响瓦斯含量、涌出量变化的主要控制因素,结合多变量、非线性的数学模型,对下石节煤矿主采4号煤层瓦斯含量及其采面瓦斯涌出量进行了预测研究,得出以下结论:

(1) 通过绘制煤层厚度等值线图和矿区构造纲要图分析,得出煤层厚度变化规律受同沉积构造控制,表现在向斜轴部附近煤层沉积较厚,背斜轴部煤层沉积厚度较薄,以至尖灭;井田中部煤层较厚,向深部和东西部延展,煤层逐渐变薄。

(2) 根据对煤层瓦斯赋存地质背景的研究,分析了影响煤层瓦斯含量的地质因素指标,筛选出延安组二三段厚度、煤层顶板含油强度、4⁻²号煤层老顶小街砂岩厚度为影响4⁻²煤层瓦斯含量大小分布的三个主要因素,利用GM(0,N)灰色理论建立了瓦斯含量预测的数学模型,绘制出4⁻²号煤层瓦斯含量预测图。

(3) 根据对采面瓦斯涌出量影响因素相关分析,揭示出采面瓦斯涌出量大小的主要控制因素是4⁻²号煤层埋藏深度、4⁻²煤层瓦斯含量和回采工作面日产量,利用逐步回归分析方法建立了采面瓦斯涌出量静态预测数学模型,并绘制了采面瓦斯涌出量预测图。

(4) 在采面瓦斯涌出量静态建模基础上,进一步提出了采面瓦斯涌出量实时动态GM(1,1)预测模型,利用建立的GM(1,1)模型,对现采的219工作面未来3天的瓦斯涌出量做了预测。

5.2 展望

论文通过系统的研究与分析,在采煤工作面的瓦斯涌出量预测方面提出了一些观点和方法,对瓦斯涌出量的预测建立了未采区静态预测和采面未来时段的动态预测模型。由于能力不足和时间、条件的限制,许多问题需要改进和完善,主要有以下几个方面:

(1) 瓦斯涌出量的影响因素众多,国内外学者在瓦斯涌出量预测方法方面做了大量研究工作,提出了多种瓦斯涌出量的预测方法。包含多因子的非线性模型被广泛应用,但模型的选择、精度的设定、主控因素的确定、预测效果各环节都不尽完善,还有很多问题需解决。

(2) 采面动态瓦斯涌出量的预测,是个复杂的动态变化过程,包含的因素也是多方面的,理论的拓展和模型的深化与建立,都需要在大量生产实践的基础上做进一步的研究。

由于时间仓促,所以本文难免存在不少缺陷和错误,恳请各位专家批评指正。

致谢

本文是在王生全教授悉心指导下完成的。从资料收集分析、论文选题、研究方法的确定、论文的修改到最终定稿都倾注了导师大量的心血。在三年的研究生学习期间，导师在学术能力、科研方法与求学态度和个人生活上都给予了无私的指导与帮助。导师治学严谨求实，处事随和亲切，为人谦逊儒雅，给我的工作和生活以深远影响。在此，向我的导师王生全教授致以诚挚的谢意！

本文大量资料的收集得到了下石节煤矿领导和技术人员的帮助，在此对他们表示感谢！

感谢在学习期间给我指导和帮助的所有老师；感谢所有在学习、生活中关心和帮助过我的同学！

感谢我的父母和家人对我的支持与鼓励！

感谢各位专家、教授在百忙之中抽出时间审阅我的论文！

参考文献

- [1] 中国煤炭工业协会.中国煤炭工业年鉴[M]（2000）. 北京:煤炭工业出版社, 2001.
- [2] 宋元明,王涛.中国煤矿瓦斯治理现状与对策[J]. 中国煤层气, 2005, 2(4):3~6.
- [3] 《全国煤矿安全状况调查与安全规划》课题组. 全国煤矿安全状况调查与安全规划[R].2001.
- [4] Gwwuga J. Flow of gas through stressed carboniferouss trata[D]. Univ.of Nottingham Ph Nottingham. Ph. D. thesis, 1979.
- [5] 林柏泉.矿井瓦斯防治理论与技术[M].徐州: 中国矿业大学出版社, 1998
- [6] 于不凡, 王佑安. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2000.
- [7] 郭海东. 综采工作面瓦斯涌出量的预测及瓦斯运移规律的研究[D]. 山西太原: 太原理工大学; 2009.
- [8] 煤科总院抚顺分院. 矿井瓦斯涌出量预测方法的发展与贡献[J]. 煤矿安全, 2003(增刊).
- [9] 王生全. 采煤工作面瓦斯涌出量的建模预测[J]. 东北煤炭技术, 1997, (2): 38.
- [10]张子戌, 袁崇孚. 瓦斯地质数学模型方法[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4):8.
- [11]Harpalani, S. Gas flow through stressed coal[D]. Univ of California.Berkeley , Ph. D. thesis, 1985.
- [12]赵益芳, 张兆瑞, 李有忠. 利用速度法预测矿井新盘(采)区瓦斯涌出量的研究[J], 太原理工大学学报, 2002, 32(4):7.
- [13]谢万星, 孙惠民. 矿井瓦斯涌出量的灰色预测[J]. 煤矿安全, 2002, 33(4):4.
- [14]赵鹏伟. 矿山统计法预测综放工作面瓦斯涌出量[J]. 机械管理开发, 2006, (3):18.
- [15]董化洲. 矿井瓦斯涌出量分源预测法探析[J]. 煤矿开采, 2006, 15(6): 17.
- [16]张国枢, 杨应迪, 骆大勇等. 类比法预测高瓦斯高产工作面瓦斯涌出量研究[J]. 煤矿安全, 2008, (3): 1~2.
- [17]董文泉, 周光亚, 夏立显. 数量化理论及其应用 [M]. 长春: 吉林人民出版社, 1979. 1~48.
- [18]刘新喜, 木合塔尔扎日, 王鹏飞等. 基于 BP 人工神经网络的矿井瓦斯涌出量预测[J], 安全与环境工程, 2002, 9(1): 34~36.
- [19]曾勇, 吴财芳. 矿井瓦斯涌出量预测的模糊分形神经网络研究[J]. 煤炭科学技术, 2002, 2(2): 62~64.
- [20]李彬刚, 景兴鹏. 瓦斯涌出量预测研究进展和现状[J]. 陕西煤炭, 2007, 5: 21~22.

- [21]刘明举, 郝富昌. 基于 GIS 的瓦斯预测信息管理系统[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(6).
- [22]Donald L, Turcotte1 Fractals and Chaos in Geology and Geophysics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [23]焦作矿业学院瓦斯地质研究室. 瓦斯地质概论[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1990.
- [24]Somerton W. H. Effect of stress on permeability of coal.Int.J.RockMeck.MeckMin.SCI. &Geomech. Abstr. 1975, 12(2):151~158.
- [25]雷益龙. 焦坪矿区下石节煤矿 JPC-01 井煤储层基本参数分析[C]. 张子敏, 郭德勇, 张子戌. 瓦斯地质基础与应用研究.北京:中国矿业大学出版社, 2011:85~89.
- [26]王生全, 煤油气共生矿井的采面瓦斯涌出量预测[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 13~15.
- [27]王生全, 井田煤层甲烷含量的定量预测[J]. 煤炭工程师, 1997, (4):39.
- [28]DENG Julong. A Nove IGM (1,1) Model for Non-equigap Series[J]. The Journal of Grey System, 1993, 5: 105~114 .
- [29]俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1992.
- [30]Khdot,V. V. Role of methane in the stress state of a coal seam Fiziko-tekhnicheskie Problem Razrabotki poleznykh is kopaemykh, 1980, (5).
- [31]Harpalani, S. &Mopherson, M.J. The effect of gas evacuation on coal permeabilitytest peciments.Int.J.Rock.Meth.Min.Sci&Geomech.Abst,1975,12(2):151~158.
- [32]Noack K, Opahle M. Progress achieved in the prediction of gas emission[A].Technical Papers of the 5th International Mine Venti2lation Congress [C].Johannesburg:[s.n.],1992.
- [33]Lunarzewski, Leszek w. Gas emission prediction and recovery in underground coal mines. International Journal of Coal Geology. 1998, 35(1~4).
- [34]张兴华, 李德洋, 尚作铁等. 高产高效工作面的瓦斯涌出量预测方法及其应用[J]. 煤矿安全, 2001, 4:35~36.
- [35]马晨晓, 马新生, 李太明. 矿井瓦斯涌出量预测方法的研究[J]. 中州煤炭, 2000, 105(3):37~39.
- [36]朱川曲. 采煤工作面瓦斯涌出量预测的神经网络模型[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(2):42~45.
- [37]王忠奎. 工作面瓦斯涌出量预测及瓦斯来源分析[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(3): 54~56.
- [38]袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 清华大学出版社, 1999:66~121.
- [39]陈建平, 黄第藩. 鄂尔多斯盆地东南缘煤矿侏罗系原油油源[J]. 沉积学报, 1997(15)2:100~101.

- [40]赵一鸣. 渭北三叠系延长组和侏罗系延安组油源辨析[J]. 煤田地质与勘探, 1991, 18(1):11~12.
- [41]刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[M]. 开封:河南大学出版社, 1991.
- [42]王伟. 人工神经网络原理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1995.
- [43]王生全, 孔令义, 刘双民等. 煤油气共生矿井的瓦斯地质及安全开采技术[J]. 瓦斯地质专题研究, 1994, 103~106.
- [44]王生全, 薛喜成, 王晓刚等. 煤层甲烷含量的灰色建模预测[J]. 陕西煤炭技术, 1996, 3:10~12.

附录

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1]王生全, 冯海, 范琪. 陈家山煤矿采面瓦斯涌出量影响因素及建模预测[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(7):28~32