

基于五图双系数法改进的底板灰岩突水危险性评价

——以朱仙庄煤矿为例

刘文婷

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年6月18日; 录用日期: 2026年7月21日; 发布日期: 2026年7月30日

摘要

为克服传统五图双系数法将底板隔水层视为均质介质、忽略岩性空间非均质性对阻水能力影响的局限性, 实现煤层底板灰岩突水危险性的精细化评价, 研究提出了一种基于阻水系数赋权的改进五图双系数法。首先, 参照《煤炭矿井防治水设计规范》(GB 51070-2014)附录B.2.2中推荐的岩体阻水系数参考值, 并结合淮北矿区已有岩体力学参数测试成果, 确定不同岩性的绝对阻水系数, 选定基准阻水系数并计算相对阻水系数; 其次, 将各岩层厚度与相对阻水系数加权求和, 得到等效有效保护层厚度, 进而定义精细化带压系数; 最后, 以朱仙庄煤矿III1031工作面为工程背景, 系统计算底板破坏深度、保护层厚度、有效保护层厚度、太灰含水层水压、传统突水系数及改进带压系数, 并开展三级判别与双系数判别。结果表明: III1031工作面底板有效保护层厚度为30.77~52.94 m, 平均41.22 m; 太灰水压为3.0~5.7 MPa; 传统突水系数为0.057~0.177 MPa/m, 改进带压系数为0.355~0.451 MPa/m。工作面中部偏南区域为非直通式相对安全区, 南北两端为非直通式相对危险区, 全工作面不存在直通式突水危险区。改进方法能够更客观地反映底板隔水能力的岩性组合差异, 为类似地质条件下带压开采底板突水风险评价提供了新的技术途径。

关键词

底板突水, 五图双系数法, 阻水系数, 等效保护层厚度, 带压系数

Improved Five-Map Double-Coefficient Method for Risk Assessment of Floor Limestone Water Inrush

—A Case Study of Zhuxianzhuang Coal Mine

Wenting Liu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

文章引用: 刘文婷. 基于五图双系数法改进的底板灰岩突水危险性评价[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1146-1159.
DOI: 10.12677/me.2026.144113

Abstract

To overcome the limitation of the traditional Five-Chart Dual-Coefficient method, which treats the floor aquifuge as a homogeneous medium and neglects the influence of lithological spatial heterogeneity on water-resistance capacity, and to achieve a refined assessment of coal seam floor limestone water inrush risk, this study proposes an improved Five-Chart Dual-Coefficient method based on water-resistance coefficient weighting. First, referring to the recommended rock mass water-resistance coefficient values in Appendix B.2.2 of the *Code for Mine Water Prevention and Control Design* (GB 51070-2014), and incorporating existing rock mechanics parameter test results from the Huaibei mining area, the absolute water-resistance coefficients for different lithologies were determined. A benchmark water-resistance coefficient was selected, and relative water-resistance coefficients were calculated accordingly. Second, the thickness of each lithological layer was weighted and summed with its corresponding relative water-resistance coefficient to derive the equivalent effective protective layer thickness, based on which a refined pressurized coefficient was defined. The core innovation of this method lies in transforming the actual heterogeneous rock assemblage into a homogeneous virtual rock group of a single benchmark lithology, while preserving its total hydraulic resistance capacity. This approach enables a spatially continuous characterization of the floor's water-resistance capability, overcoming the homogenization assumption inherent in the conventional method. Third, taking the III1031 working face in Zhuxianzhuang Coal Mine as the engineering background, the floor failure depth, protective layer thickness, effective protective layer thickness, water pressure of the Taiyuan Formation limestone aquifer, traditional water inrush coefficient, and the improved pressurized coefficient were systematically computed. A three-level discrimination and dual-coefficient discrimination were subsequently conducted to evaluate the water inrush risk across the working face. The results indicate that the effective protective layer thickness of the floor at the III1031 working face ranges from 30.77 m to 52.94 m, with an average of 41.22 m. The Taiyuan limestone water pressure varies between 3.0 MPa and 5.7 MPa. The traditional water inrush coefficient ranges from 0.057 MPa/m to 0.177 MPa/m, while the improved pressurized coefficient ranges from 0.355 MPa/m to 0.451 MPa/m. The central-southern part of the working face is identified as a non-through type relatively safe zone, whereas the northern and southern ends are classified as non-through type relatively dangerous zones. No through-type water inrush dangerous zone exists across the entire working face. The refined method can more objectively reflect the lithological assemblage differences in floor water-resistance capacity, providing a novel technical approach for water inrush risk evaluation in pressurized mining under analogous geological conditions.

Keywords

Floor Water Inrush, Five-Chart Dual-Coefficient Method, Water-Resistance Coefficient, Equivalent Effective Protective Layer Thickness, Pressurized Coefficient

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矿底板灰岩突水是我国华北型石炭 - 二叠系煤田面临的主要安全风险之一。随着开采深度不断增加, 奥陶系和太原组灰岩含水层的承压水头显著上升, 致使底板突水事故频发[1]。统计资料显示, 在我

国重大煤矿水害事故中, 由底板灰岩水突出引起的事故占比超过 60%, 严重制约了矿井的安全生产。因此, 建立一套精确、可靠的底板突水危险性评估方法, 对于指导带压开采方案设计与水害防控具有重要意义。

当前用于煤层底板突水危险性评价的典型方法可归纳为三类: 传统突水系数法、脆弱性指数法以及五图双系数法[2]。传统突水系数法基于单位隔水层厚度所承担的水压进行判别, 计算简便、易于推广, 但该方法忽略了采动扰动对底板岩体的破坏效应, 也未区分隔水层内部不同岩性之间的阻水性能差异, 在复杂地质条件下容易产生误判。脆弱性指数法则尝试将含水层富水性、隔水层岩性、构造发育程度等多个控制因素, 通过信息融合技术集成于 GIS 平台中进行综合分析, 其优势在于信息容纳量大, 但各指标权重的赋值过程难以完全避免主观干扰, 且运算步骤相对繁杂。

五图双系数法作为带压开采工作面评价的成熟工具, 其技术框架主要由“五图”制作、“双系数”计算和“三级判别”逻辑三部分构成。该方法能够同时兼顾水压、隔水层厚度、岩性构成以及采动底板破坏深度等多项参数, 评价维度较为系统, 并以流程化和可视化的方式输出结果, 因此在我国煤矿水害识别与治理中获得了广泛应用[3]-[5]。然而, 该方法在传统应用中将某一点的带压系数视为沿垂直方向不变的均质指标, 即默认底板隔水岩组在物理力学性质上是均匀的。但事实上, 煤层底板有效保护层常由多种不同岩性与力学强度的岩层相互叠加而成, 各层抵抗水力劈裂的能力差别明显。若继续使用单一的带压系数代表整个隔水层厚度, 将难以刻画因岩性组合及层厚空间变化所导致的底板阻水能力非均质性, 从而可能使评价结果偏离实际。

针对上述不足, 本文提出一种基于阻水系数加权修正的改进型五图双系数法。阻水系数能够定量表征单位厚度岩层固有的抗水力破坏特性, 其数值主要受岩石抗拉强度、胶结程度及裂隙发育状况控制。本研究参照《煤炭矿井防治水设计规范》(GB 51070-2014)及淮北矿区底板岩体力学参数测试成果, 确定不同岩性的绝对阻水系数, 并在此基础上定义相对阻水系数与等效有效保护层厚度两个新参数, 将实际非均质岩组等效转换为由某一基准岩性构成的均质虚拟岩组, 进而推导出空间连续变化的精细化带压系数。以朱仙庄煤矿 III1031 工作面为具体案例, 依次计算底板破坏深度、保护层厚度、有效保护层厚度、太灰含水层水压、传统突水系数及改进后带压系数, 并运用三级判别与双系数判别完成突水危险性分区。本研究可为类似地质条件下的底板突水精细化评估提供一条新的技术路径。

2. 五图双系数法及其改进方法

2.1. 传统五图双系数法

针对煤层底板突水危险性, 当前学术界与工程界主要采纳三类评价手段: 常规突水系数法、脆弱性指数法以及五图双系数法。煤层底板突水现象的发生与地质构造环境、岩层物理力学性质、矿区水文地质条件以及采掘扰动强度等因素密切相关, 本质上属于一类非线性动力地质灾害。常规突水系数法以单位厚度隔水层所承受的水压作为核心判据, 因其计算过程简单而应用较广。然而, 该方法对于突水影响因素的考虑不够全面, 未能将采动过程对底板岩体的损伤破坏以及隔水层内部不同岩性之间的性能差异纳入分析体系, 因而在复杂地质环境下往往难以获得准确的评价结果[6]。脆弱性指数法则将含水层富水性特征、隔水层岩石类型、地质构造发育程度等诸多控制因素, 借助信息融合技术与具备强大空间信息处理功能的 GIS 平台相集成, 形成一套综合性的煤层底板水害评估方法。该方法综合程度高, 但由于各控制因素之间存在复杂的耦合关系, 权重赋值过程难免带有主观色彩, 且整体计算流程相对烦琐[7]-[11]。

五图双系数法作为专门适用于带压开采工作面的成熟评价技术, 其方法体系主要围绕“五图”绘制、“双系数”计算和“三级判别”逻辑三大核心环节展开[12]。该方法能够同时考量含水层水压、隔水层厚

度、岩石类型组合以及采动作用导致的底板破坏深度等多个关键参数，因评价要素更为系统全面，且以流程化和图形化方式呈现结果，使得评价结论直观易懂，在我国煤矿水害隐患识别与治理中得到广泛推广。五图双系数法的具体操作步骤与评价流程可参见图 1。

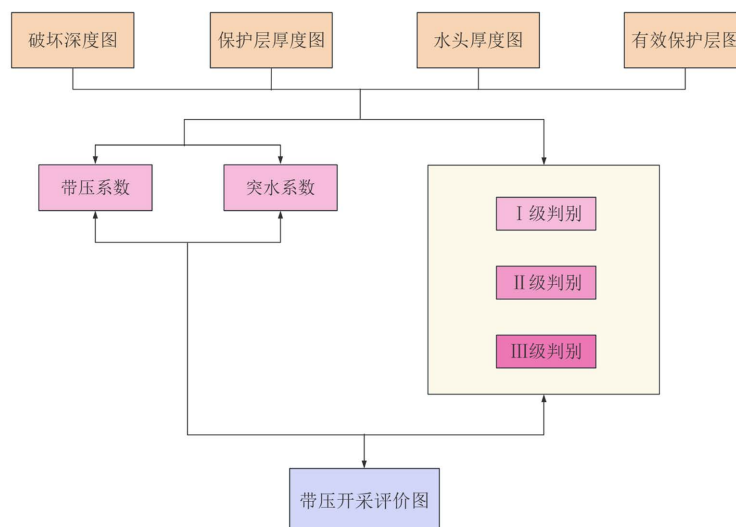


Figure 1. Calculation flowchart of the five-map double-coefficient method

图 1. 五图双系数法计算流程图

2.2. 阻水系数赋权下的五图双系数法改进

传统五图双系数法在工程应用中，通常将某一位置的带压系数 T_d 视为垂向上的恒定值，即默认底板隔水岩组在物理性质上是均匀的[13]-[15]。然而，实际煤层底板有效保护层往往由多种不同岩性、不同力学强度的岩层叠合而成，各层抵抗高压水渗透与水力劈裂的能力差异明显。若沿用单一的带压系数来表征整个隔水层厚度，将难以准确捕捉因岩性组合及其厚度空间变化所导致的底板阻水性能非均质性[16]。

针对这一缺陷，本研究引入“阻水系数” Z 作为核心参数，构建一套基于岩性组合的带压能力加权评价模型。阻水系数是反映单位厚度岩层固有抗水力破坏能力的物理量，其数值与岩石的抗拉强度、胶结致密程度及原生裂隙发育状况密切相关。

阻水系数(Z)是表征单位厚度岩层固有抗水力破坏能力的物理指标，通常可通过现场钻孔水力压裂试验或室内小尺寸水力压裂试验获取。淮北矿区下组煤隔水底板岩体力学参数测试结果表明，砂岩、粉砂岩和泥岩的力学性质存在显著差异，其阻水能力也相应不同。

本研究各岩性阻水系数主要依据《煤炭矿井防治水设计规范》(GB 51070-2014)附录 B.2.2 中推荐的岩体阻水系数参考值确定。该规范值是基于全国多个矿区大量现场钻孔压水试验和室内水力压裂试验数据统计得出，在国内煤矿水害防治领域具有广泛适用性。

该方法的核心思路是：以单孔实测或规范推荐的不同岩性阻水系数为基础，结合全工作面地质勘探资料所揭示的各岩层厚度空间分布，采用加权平均算法建立空间上连续变化的精细等效带压系数 T_{se} ，从而实现对底板隔水能力更加客观、精确的定量评估。

加权原理

基于阻水系数的加权模型理论基础在于：底板隔水层的整体抗压能力并非由某一薄弱层单独决定，

而是各隔水层协同作用的结果。各层贡献大小由阻水系数(Z)与其厚度(m)共同决定。

传统带压系数方法将保护层(H)视为均质介质,忽略了岩性、结构完整性及抗水力致裂能力的差异,无法准确反映隔水能力的空间异质性。为此,本文提出一种相对阻水系数的加权模型,保留带压系数的基本物理构型(压力/厚度),但对其厚度项进行加权修正,将非均质实际岩组等效为单一基准岩性的均质虚拟层。基于该等效厚度(H_{eq})计算精细带压系数(T_{se})。相关参数定义如下:

1) 阻水系数(Z_i): 表示第 i 类岩层单位厚度下的抗水力破坏能力,取决于岩石抗拉强度、胶结程度及裂隙发育状况,是隔水性能的基础指标,通过水力压裂试验获取。

2) 基准阻水系数(Z_{base}): 为标准化各岩性阻水能力,选取某一代表岩性,如强度最低或分布最广者作为基准,其阻水系数即为基准值。

3) 相对阻水系数(Z'_i): 定义为 Z_i 与 Z_{base} 之比,无量纲,反映第 i 类岩层单位厚度阻水能力相对于基准岩性的倍数,计算公式如下:

$$Z'_i = \frac{Z_i}{Z_{base}} \quad (1)$$

4) 等效有效保护层厚度(H_{eq}): 将实际保护层中各岩层的物理厚度 m_i 乘以其相对阻水系数 Z'_i 后求和,反映实际岩组抗水压能力的等效均质厚度:

$$H_{eq} = \sum_{i=1}^n (m_i * Z'_i) \quad (2)$$

其中,相对阻水系数的总和归一化为1。由此,精细带压系数 T_{se} 定义为总水压 P 与 H_{eq} 之比:

$$T_{se} = \frac{P}{H_{eq}} = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (m_i * Z'_i)} \quad (3)$$

该式物理意义为: 将水压作用于等效均质保护层时,单位等效厚度承受的压力梯度。

2.3. 研究步骤

为将上述加权模型应用于实际评价,需构建系统化、数据驱动的技术流程,主要包括以下步骤:

1) 基础参数标准化: 根据钻孔柱状图,识别煤层底板至主含水层之间的所有岩性层(如泥岩、粉砂岩、细砂岩等),通过水力压裂试验获取各岩层的阻水系数实测值,对未试验岩层参照规范或区域经验值赋值,建立标准参数库。

2) 岩层厚度空间建模: 利用GIS技术,以钻孔厚度数据为控制点,分别建立各岩性层在工作面范围内的连续厚度分布栅格图层,并通过叠加运算生成总保护层厚度分布图。

3) 等效带压系数计算: 基于上述图层,逐栅格计算 T_{se} ,并生成等值线图,直观反映因岩性组合与厚度变化导致的抗突水能力空间分布。

4) 三级判别融合: 将 T_{se} 等值线图替代传统 T_d ,纳入三级判别框架进行评价。

该方法将单孔阻水系数推广至整个工作面,显著提升了五图双系数法的评价精度与可靠性。

3. 突水风险评价指标体系构建与量化

为验证改进方法的适用性与准确性,以朱仙庄煤矿 III1031 工作面为对象开展实证研究。

3.1. 底板破坏深度

采动过程中,底板岩层受矿压作用产生裂隙,可能成为导水通道,增加突水风险。破坏深度定义为

采煤底板至采动裂隙带最远点的垂直距离。

计算底板破坏深度 h ，考虑工作面斜长 L (单位: m):

$$h = 0.7007 + 0.1079L$$

(4)

进一步考虑采深 H (m)与倾角 α ，则有:

$$h = 0.0085H + 0.1665\alpha + 0.1079L - 4.3579$$

(5)

根据 III1031 工作面各钻孔揭露的地质参数，逐孔计算底板破坏深度，结果见表 1。该工作面破坏深度介于 17.264~18.991 m，平均为 18.146 m。

Table 1. Calculation results of empirical formula for bottom plate damage depth in the working face III1031
表 1. III1031 工作面底板破坏深度经验公式计算结果表

位置	X	Y	底板破坏深度/m
DG1-1	3717608.767	39513191.003	18.430
DG1-2	3717070.629	39513342.704	18.991
DG1-3	3717319.099	39513284.815	17.860
DG1-4	3717237.435	39513322.231	18.532
DG1-5	3717155.339	39513363.192	18.166
DG1-6	3717070.629	39513370.295	18.723
DG1-7	3716932.522	39513422.554	17.576
DG1-8	3716823.437	39513476.159	17.669
DG1-9	3716724.625	39513500.656	17.675
DG1-10	3716643.434	39513528.259	17.767
DG1-11	3716523.801	39513540.620	17.264
DG1-12	3716754.639	39513456.85	18.212

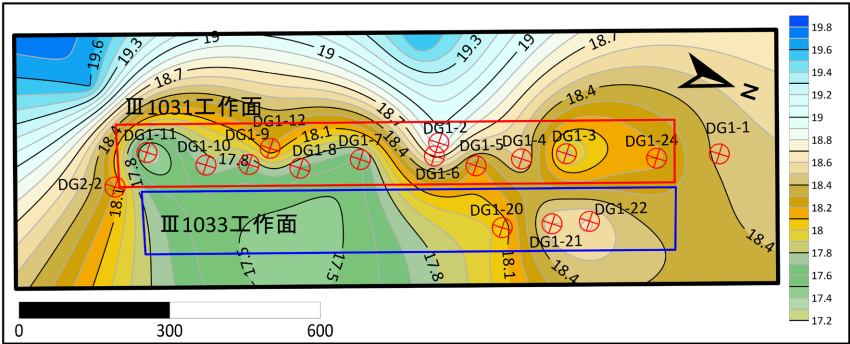


Figure 2. Contour map of the depth of damage to the bottom plate of coal seam 10 in the working face III1031
图 2. III1031 工作面 10 煤底板破坏深度等值线图

图 2 显示，底板破坏深度总体呈南低北高格局。南部 DG1-11 钻孔处破坏深度最小(17.264 m)，该孔泥岩厚度大(35.32 m)，泥岩的高塑性有效抑制了采动裂隙扩展；北部 DG1-2 钻孔处破坏深度最大(18.991

m)，该孔砂岩占比增高，脆性岩体更易破裂。由南向北破坏深度递增且等值线由密变疏，反映岩性组合由泥岩为主向砂岩过渡。

3.2. 底层保护层厚度与有效层保护厚度

根据 III1031 工作面内揭露太灰含水层钻孔资料的统计分析，确定了工作面内各钻孔处 10 煤层底板至一灰顶板的距离，即底板保护层厚度，其统计结果见表 2。III1031 工作面范围内 10 煤至一灰顶底板保护层厚度等值线图如图 3 所示。结果表明，底板保护层厚度介于 48.98~70.61 m 之间，平均厚度为 59.37 m。III1031 工作面南部保护层厚度相对较大，且变化较为密集，仅在少数区域受 DG1-12 钻孔控制，厚度小于 50 m；北部区域保护层厚度相对较小，变化较为平缓，仅在少数区域受 DG1-2 钻孔控制，厚度大于 69 m。总体来看，底板保护层厚度呈现由东南向西北逐渐减小的变化趋势。

扣除底板破坏带深度后，得到有效保护层厚度(表 2)，其等值线分布如图 4 所示。有效保护层厚度为 30.77~52.94 m，平均 41.22 m，空间趋势与保护层厚度基本一致。东南部厚度较大(40~52 m)，西北部较薄(36~44 m)，仅 DG1-12 钻孔附近小于 32 m、DG1-2 钻孔附近大于 50 m。

Table 2. Statistical table of protective layer thickness and effective protective layer thickness in the working face III1031
表 2. III1031 工作面保护层厚度与有效保护层厚度统计表

位置	底板保护层厚度(m)	有效保护层厚度(m)	是否位于 III1031 工作面内或距其距离/m
DG1-1	50.8	32.37	面外 140 m
DG1-2	69.85	50.86	面内
DG1-3	63.55	45.69	面内
DG1-4	55.02	36.49	面内
DG1-5	61.86	43.69	面内
DG1-6	56.62	37.90	面内
DG1-8	70.61	52.94	面内
DG1-9	63.96	46.28	面内
DG1-10	58.94	41.17	面内
DG1-11	59.95	42.69	面内
DG1-12	48.98	30.77	面内
DG1-20	56.61	38.58	面外 100 m
DG1-21	63.9	45.32	面外 100 m
DG1-22	57.1	38.49	面外 100 m
DG1-24	55.91	37.74	面内
DG2-2	59.75	41.54	面外 10 m

图 3 表明，保护层厚度总体由东南向西北递减。东南部 DG1-8 钻孔处厚度最大(70.61 m)，该孔泥岩厚达 47.56 m，为全区最大；西北部 DG1-12 钻孔处厚度最小(48.98 m)，该孔三层岩性均处于低值区。南部等值线密集，反映岩性组合空间变异性强；北部等值线稀疏，反映岩性组合相对稳定。

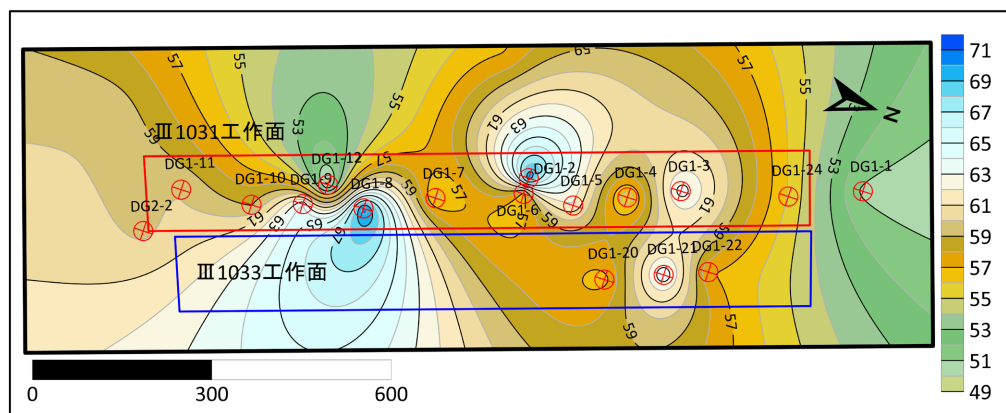


Figure 3. Contour map of the thickness of the protective layer on the 10 coal floor of the working face III1031

图 3. III1031 工作面 10 煤底板保护层厚度等值线图

图 4 显示,有效保护层厚度空间趋势与保护层厚度一致,东南厚、西北薄。DG1-8 处最大(52.94 m), DG1-12 处最小(30.77 m)。值得注意的是, DG1-11 钻孔保护层厚度中等(59.95 m),但因破坏深度最小(17.264 m),其有效保护层厚度(42.69 m)反高于保护层更大的 DG1-4 钻孔(55.02 m → 36.49 m),反映破坏深度对有效保护层厚度具有显著的修正作用。

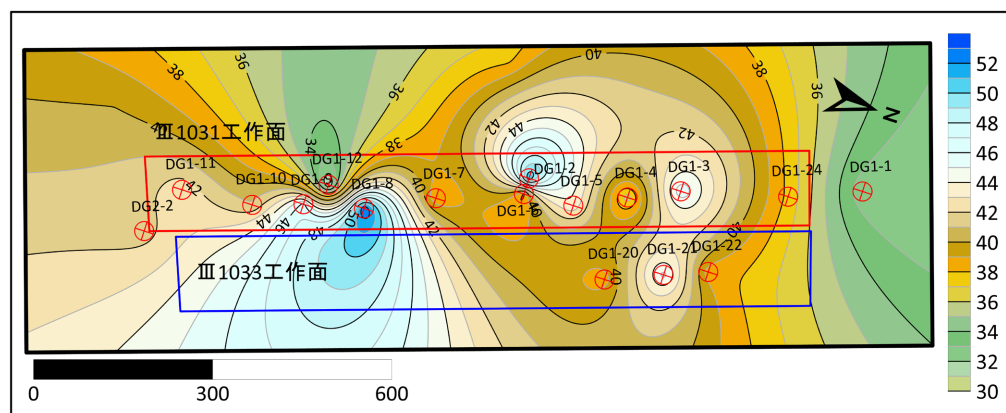


Figure 4. Contour map of effective protective layer thickness on the 10 coal floor of the working face III1031

图 4. III1031 工作面 10 煤底板有效保护层厚度等值线图

对比图 3 与图 4 可以看出,扣除破坏深度后,有效保护层厚度的空间分布趋势与保护层厚度基本一致,但极值区范围有所缩小: DG1-8 钻孔处保护层厚度最大(70.61 m),有效保护层厚度仍为最大(52.94 m); DG1-12 钻孔处保护层厚度最小(48.98 m),有效保护层厚度仍为最小(30.77 m),说明破坏深度对有效保护层厚度空间分布的影响在全区范围内是均匀的,未改变其总体格局。

3.3. 太灰含水层水压

选取采区内具有水位监测数据的钻孔资料,编制太灰含水层水位等值线图,如图 5 所示。

同时,采用插值方法推算 III1031 工作面及其附近区域的太灰含水层水位。结果表明, III1031 工作面范围内太灰含水层水位总体分布在-314~-545 m 之间,其中工作面中部水位相对较低,多为-450~-540 m;北部及南部区域水位相对较高,主要集中在-300~-400 m 之间。结合一灰顶标高,计算得到 III1031 工作面各区域太灰含水层水压,其结果见表 3 和图 6。

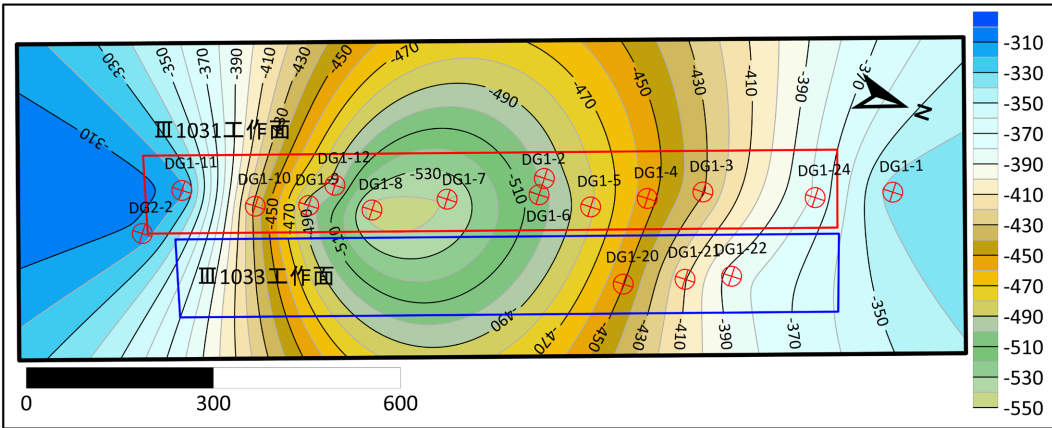


Figure 5. Contour map of Taiyuan limestone aquifer water level for the III1031 working face
图 5. III1031 工作面太灰含水层水位等值线图

Table 3. Statistical Values of Taiyuan limestone aquifer water pressure for the III1031 working face (calculated by interpolation method)
表 3. III1031 工作面太灰含水层水压统计值(插值法计算)

位置	太灰含水层水位标高/m	一灰顶板标高/m	底隔承受的太灰含水层水压/MPa
DG1-1	-335.04	-921.25	5.744
DG1-2	-497.21	-929.88	4.240
DG1-3	-431.11	-912.39	4.717
DG1-4	-454.37	-895.07	4.319
DG1-5	-482.00	-891.72	4.015
DG1-6	-504.88	-885.59	3.731
DG1-7	-539.38	-860.56	3.148
DG1-8	-545.63	-855.20	3.034
DG1-9	-495.12	-859.23	3.568
DG1-10	-433.78	-830.38	3.887
DG1-11	-315.29	-807.64	4.825
DG1-12	-493.49	-829.62	3.294
DG1-20	-450.78	-931.60	4.712
DG1-21	-411.03	-951.71	5.299
DG1-22	-384.71	-947.2	5.512
DG1-24	-378.57	-921.72	5.323
DG2-2	-314.32	-834.44	5.097

图 6 显示，水压呈中间高、四周低格局：中部及东北部水压 $> 3.9\text{ MPa}$ ，与太灰水位最低区重合；西南部水压 $< 3.5\text{ MPa}$ ，对应底板标高变浅区域。等值线走向与底板标高线基本平行，反映水压分布受底板标高控制。

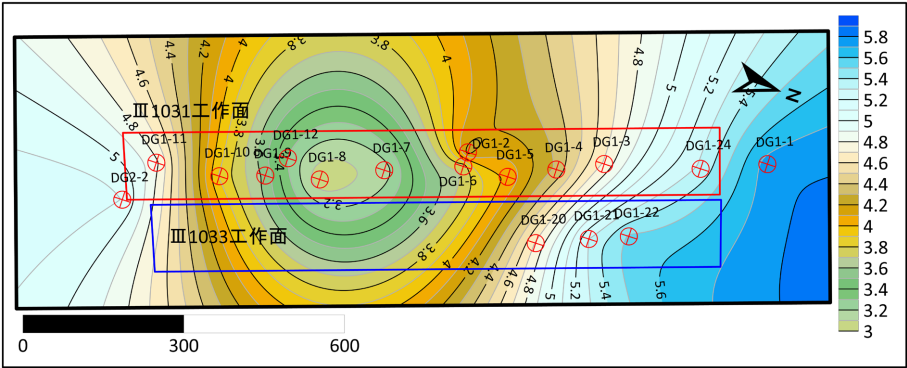


Figure 6. Contour map of Taiyuan limestone aquifer water pressure acting on the floor of seam 10 in the III1031 working face
图 6. III1031 工作面 10 煤底板承受的太灰含水层水压等值线图

3.4. 传统突水系数计算结果

依据《煤矿防治水细则》，突水系数定义为作用在底板上的水头值与有效保护层厚度之比，其公式为：

$$T = \frac{P}{M - C_p} \tag{6}$$

式中， T 为突水系数的数值(MPa/m)； M 为底板保护层的厚度(m)； C_p 为底板采动破坏带深度的数值(m)。
根据公式(6)对煤层底板有效突水系数进行计算与统计，得到研究区煤层底板有效突水系数统计结果(见表 4)，并据此绘制煤层底板太灰含水层有效突水系数等值线图(见图 7)。

Table 4. Effective water intrush coefficient of coal seam floor in the working face III1031
表 4. III1031 工作面煤层底板有效突水系数

孔号	有效保护层厚度/m	太灰含水层顶板以上水头值/MPa	底板太灰含水层有效突水系数 T (MPa/m)
DG1-1	32.37	5.744	0.177
DG1-2	50.86	4.240	0.083
DG1-3	45.69	4.717	0.103
DG1-4	36.49	4.319	0.118
DG1-5	43.69	4.015	0.092
DG1-6	37.90	3.731	0.098
DG1-7	38.22	3.148	0.082
DG1-8	52.94	3.034	0.057
DG1-9	46.28	3.568	0.077
DG1-10	41.17	3.887	0.094
DG1-11	42.69	4.825	0.113
DG1-12	30.77	3.294	0.107
DG1-20	38.58	4.712	0.122
DG1-21	45.32	5.299	0.117
DG1-22	38.49	5.512	0.143
DG1-24	37.74	5.323	0.141
DG2-2	41.54	5.097	0.123

图 7 表明, 突水系数为 0.057~0.177 MPa/m, 呈南低北高分布。南部 DG1-8 处最小(0.057 MPa/m), 该处有效保护层最厚(52.94 m)且水压最低(3.034 MPa); 北部 DG1-1 处最大(0.177 MPa/m), 该处有效保护层最薄(32.37 m)且水压最高(5.744 MPa)。突水系数高值区为有效保护层低值区与水压高值区空间重叠的结果。

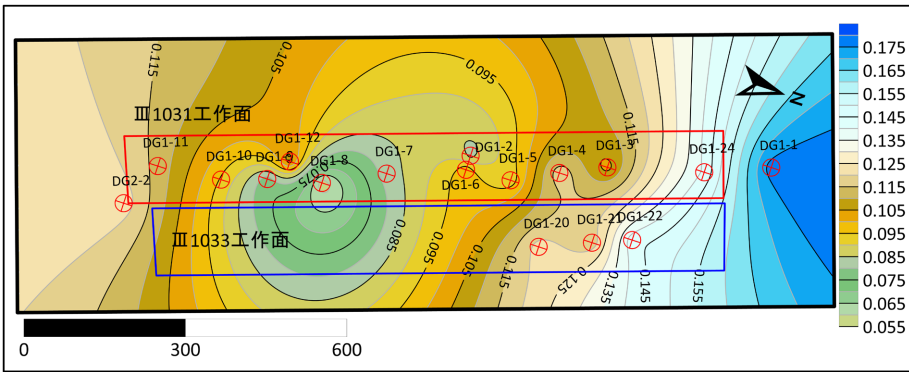


Figure 7. Contour map of effective water inrush coefficient of Taiyuan limestone aquifer in the III1031 working face floor
图 7. III1031 工作面底板太灰含水层有效突水系数等值线图

3.5. 基于阻水系数修正的带压系数(改进方法)

利用水力压裂试验获得的阻水强度参数, 计算等效有效保护层厚度和精细化带压系数, 结果见表 5。

Table 5. Coal seam floor pressure coefficient and water blocking capacity of the working face III1031
表 5. III1031 工作面煤层底板带压系数及阻水能力

位置	粉砂岩 厚度(m)	细砂岩 厚度(m)	泥岩 厚度(m)	底板 总厚度(m)	煤层底板阻水 能力(MPa)	煤层底板实际 承受水压(MPa)	煤层底板带压 系数(MPa/m)	去除水头后 带压系数(MPa/m)
DG1-1	14.85	6.7	29.25	50.8	20.9798	5.744	0.413	0.300
DG1-2	30.82	3.05	35.98	69.85	30.61984	4.24	0.438	0.378
DG1-3	22.7	3.7	37.15	63.55	27.35775	4.717	0.430	0.356
DG1-4	21.05	11.7	22.27	55.02	22.21738	4.319	0.404	0.325
DG1-5	24.2	5.55	32.11	61.86	26.40409	4.015	0.427	0.362
DG1-6	22.3	1	33.32	56.62	24.92338	3.731	0.440	0.374
DG1-7	16.2	5.85	33.75	55.8	23.31405	3.148	0.418	0.361
DG1-8	19.15	3.9	47.56	70.61	30.05919	3.034	0.426	0.383
DG1-9	7.82	7.83	48.31	63.96	25.85119	3.568	0.404	0.348
DG1-10	30.44	0	28.5	58.94	26.58314	3.887	0.451	0.385
DG1-11	22.78	1.85	35.32	59.95	26.19286	4.825	0.437	0.356
DG1-12	18.25	8.35	20.38	48.98	19.28807	3.294	0.394	0.327
DG1-20	25.7	1.45	29.46	56.61	25.04764	4.712	0.442	0.359
DG1-21	11.07	26.05	26.78	63.9	22.69329	5.299	0.355	0.272
DG1-22	27	3	27.1	57.1	25.0499	5.512	0.439	0.342
DG1-24	17.65	0	38.26	55.91	24.52059	5.323	0.439	0.343
DG2-2	10.36	4.9	44.49	59.75	24.78087	5.097	0.415	0.329

图 8 显示, 改进带压系数为 0.355~0.451 MPa/m, 呈南高北低格局。南部 DG1-10 处最高(0.451 MPa/m), 该处细砂岩缺失、粉砂岩厚达 30.44 m, 砂岩占比高导致等效厚度减小; 北部 DG1-21 处最低(0.355 MPa/m),

该处细砂岩厚 26.05 m，高阻水贡献增大等效厚度。改进带压系数与突水系数(图 7)空间趋势相反，反映两者从不同角度刻画风险。

图 9 为III1031 工作面底板去除太灰水压后带压系数等值线图，扣除太灰水压后的带压系数为 0.34~0.40 MPa/m，其空间分布特征与带压系数整体分布基本一致，东南部数值较高、变化梯度较大，北部数值较低且变化幅度较小。

由III1031 工作面底板阻水能力与水头压力对比图(图 10)可见，整个工作面范围内煤层底板阻水能力主要分布在 19.3~30.6 MPa 之间；而底隔所承受的太灰含水层水头压力为 3.0~5.7 MPa，明显小于底板阻水能力。

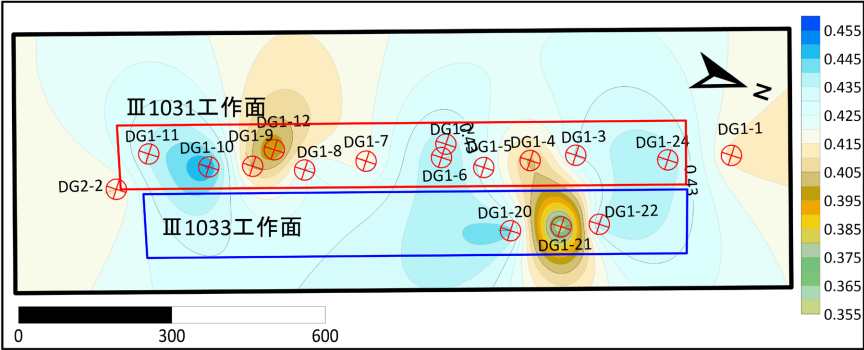


Figure 8. Contour map of pressure coefficient on the bottom plate of the working face III1031
图 8. III1031 工作面底板带压系数等值线图

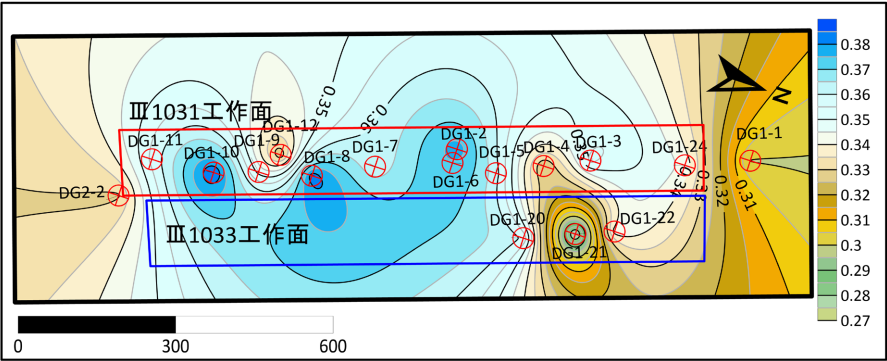


Figure 9. Contour map of the pressure coefficient of the working face III1031 bottom plate after removing the ash water pressure
图 9. III1031 工作面底板去除太灰水压后带压系数等值线图

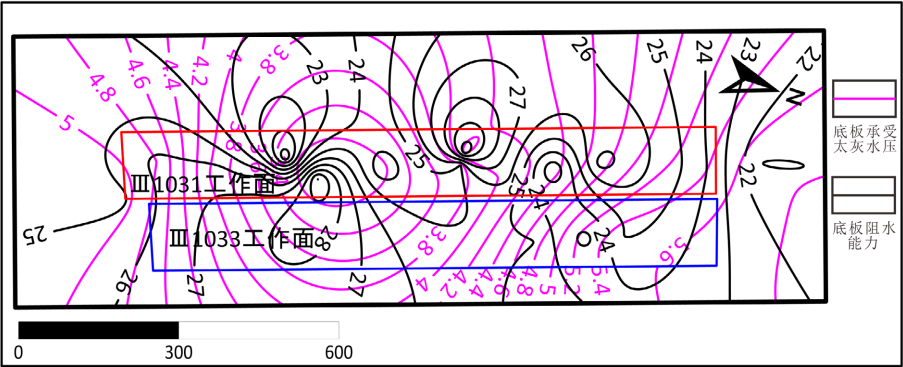


Figure 10. Comparison of bottom plate water blocking capacity and head pressure of the working face III1031
图 10. III1031 工作面底板阻水能力与水头压力对比图

3.6. 突水危险性分区评价

3.6.1. 三级判别结果

I级(非直通式相对安全区): 有效保护层厚度 30.77~52.94 m, 阻水能力远大于水压, 有效突水系数 < 0.1 MPa/m 的区域(主要为中部偏南)。判定为相对安全区。

II级(非直通式相对危险区): 南北两端局部突水系数 > 0.1 MPa/m, 虽无大型构造, 但采动可能活化裂隙引发非直通式突水。需疏水降压后开采。

III级(直通式危险区): 全区阻水能力均大于水压, III1031 工作面不存在直通式危险区。

3.6.2. 双系数判别

以 0.1 MPa/m 为界: 中部偏南为安全区, 南端和北部为相对危险区。改进的 T_{se} ($0.355\sim 0.451$ MPa/m) 显著高于突水系数, 说明底板岩性基础较好, 但部分区域仍需疏水降压。

3.6.3. 综合评价分区图

将带压系数与突水系数等值线图按 1:1 权重叠加, 得到综合分区图(图 11)。结果: 工作面中部偏南为非直通式相对安全区, 其余为非直通式相对危险区。高密度三维地震未发现陷落柱等异常体, 水压多低于 5.6 MPa, 有效保护层厚度 > 38 m, 阻水能力较强。安全区可直接回采, 危险区需充分疏水降压。

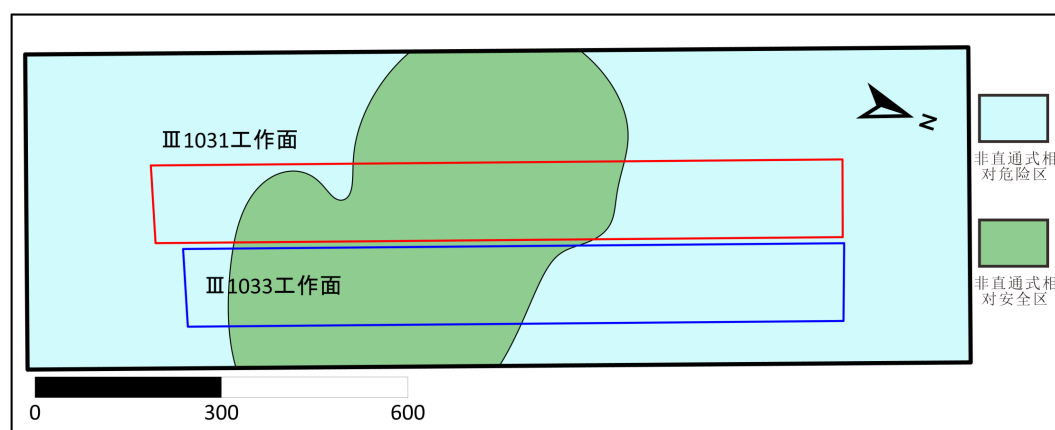


Figure 11. Evaluation of 10 coal seam under pressure mining in the working face III1031

图 11. III1031 工作面 10 煤带压开采评价图

4. 结论

1) 本研究提出了一种基于阻水系数加权的改进五图双系数法。该方法通过相对阻水系数对隔水层厚度进行加权, 建立了等效有效保护层厚度和精细化等效带压系数的计算公式, 能够反映岩性组合对底板隔水能力的空间非均质影响。

2) 在朱仙庄煤矿 III1031 工作面的应用中, 改进后的等效带压系数为 $0.355\sim 0.451$ MPa/m, 空间上南高北低、南陡北缓, 与传统均质假定结果有明显差异, 证明了方法的合理性。

3) 综合评价表明: III1031 工作面中部偏南为非直通式相对安全区, 南北两端为非直通式相对危险区, 无直通式危险区。底板阻水能力($19.3\sim 30.6$ MPa)显著大于水头压力($3.0\sim 5.7$ MPa)。建议对危险区实施疏水降压, 使突水系数降至 0.1 MPa/m 以下后再进行回采。

4) 该改进方法为类似地质条件下底板灰岩突水危险性精细化评价提供了有效工具, 可推广应用于其他带压开采矿井。

参考文献

- [1] 刘启蒙, 李文平, 曾先贵, 等. 室内水力压裂法测试岩体临界破裂压力及阻水系数[J]. 煤炭科学技术, 2007(1): 85-87.
- [2] 杨善安. “阻水系数”及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 1986(3): 41-46.
- [3] 王升, 韦芹, 李利平. 隧道突水突泥灾变机理研究现状及发展趋势[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(4): 15-25.
- [4] 郑秋爽, 王长峰. 基于多元集成分析的矿井突水风险预测优化模型及算法研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(7): 187-199.
- [5] 朱志岗, 侯克鹏, 孙华芬, 等. 某金属矿山深部辅助斜坡道的支护模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2026, 46(1): 19-30.
- [6] 王华辉, 刘再斌, 李利峰, 等. 煤岩层孔隙度空间属性模型构建技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(5): 363-377.
- [7] He, W. and Zhang, J. (2025) Stability and Convergence Analysis of Mixed Finite Element Approximations for a Biot-Brinkman Model. *Computers & Mathematics with Applications*, **200**, 22-37.
<https://doi.org/10.1016/j.camwa.2025.09.006>
- [8] 彭志涛, 王晓红, 张彦宾. 高承压水上开采底板突水危险评价及防治[J]. 中州煤炭, 2014(10): 34-37+40.
- [9] Zhang, Z., Shu, C., Khalid, M.S.U., Yuan, Z. and Liu, W. (2022) Investigations on the Hydroelastic Slamming of Deformable Wedges by Using the Smoothed Particle Element Method. *Journal of Fluids and Structures*, **114**, Article 103732. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103732>
- [10] Zhang, G., Yuan, Y., Gao, Y., Luo, Z. and Xie, L. (2025) Stability Analysis of Surface Facilities in Underground Mining and the Cumulative Impact of Adjacent Mining Activities. *Applied Sciences*, **15**, Article 12424. <https://doi.org/10.3390/app152312424>
- [11] 秦伟, 邓启锐, 丁湘, 等. 蒙陕接壤区深埋侏罗系煤层封闭不良钻孔出水特征研究[J]. 煤矿安全, 2025, 56(10): 181-191.
- [12] 王俊智. 基于多方法的煤层底板带压开采突水危险性评价[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
- [13] 张雪莲. 煤层底板突水危险性评价及突水防治措施[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(2): 65-69+99.
- [14] Li, A., Mu, Q., Ma, L., Liu, C., Wang, S., Wang, F., et al. (2021) Numerical Analysis of the Water-Blocking Performance of a Floor with a Composite Structure under Fluid-Solid Coupling. *Mine Water and the Environment*, **40**, 479-496. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00758-2>
- [15] Dong, F., Yin, H., Chen, S., Xie, D., Zhou, W., Han, C., et al. (2025) Innovative Groundwater Disaster Prevention and Control Systems for Ultrawide Working Face Mining in Deeply Buried Confined Aquifers. *Journal of Hydrology*, **663**, Article 134244. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134244>
- [16] Li, Z., Yang, Z., Wang, S., Ren, L. and Fang, J. (2024) The Effects of Coal Floor Brittleness on the Risk of Water Inrushes from Underlying Aquifers: A Numerical Study. *Sustainability*, **16**, Article 1489. <https://doi.org/10.3390/su16041489>