

赵春虎, 虎维岳, 靳德武. 西部干旱矿区采煤引起潜水损失量的定量评价方法 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 169-174. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.5001
Zhao Chunhu, Hu Weiyue, Jin Dewu. Method of quantitative evaluation on amount of groundwater loss from unconfined aquifer caused by mining disturbance in the arid area of Western China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 169-174. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.5001

西部干旱矿区采煤引起潜水损失量的定量评价方法

赵春虎^{1,2}, 虎维岳^{1,2}, 靳德武^{1,2}

(1. 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710177)

摘 要: 针对西部干旱矿区煤炭资源开发对地下水扰动的相关研究定量化程度不高问题, 通过地下水动力学分析方法, 得出采掘扰动形成的覆岩垮落带、裂隙带、弯曲带及地面沉陷区的空间尺度是控制地下水损失的主要因素, 其扰动面积越大、冒裂带高度越高、弯曲带保护层渗透能力越强则地下水渗漏量越大; 提出了覆岩导水裂缝带边界化、弯曲带渗透能力分区、地面沉陷区重新剖分的采掘扰动影响地下水系统数值评价模型的构建方法; 并通过构建案例矿井的评价模型, 计算得出神东矿区补连塔煤矿由于煤矿开采引起松散层潜水损失量为 $1.90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

关键词: 地下水; 松散含水层; 定量评价; 数值模拟; 导水裂缝带

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2017)01-0169-06

Method of quantitative evaluation on amount of groundwater loss from unconfined aquifer caused by mining disturbance in the arid area of Western China

ZHAO Chun-hu^{1,2}, HU Wei-yue^{1,2}, JIN De-wu^{1,2}

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)

Abstract: The quantitative degree of coal resources exploitation on water environment disturbance is insufficient in the coal mining area of western China. In this paper, it concludes that the spatial scale is the main factor to control the loss of groundwater by the method of groundwater dynamics analysis, which includes the caving zone, the fracture zone, the bending zone and the ground subsidence area. The method of numerical evaluation model of groundwater system is proposed, which is based on the boundary of the hydraulic conductivity of overlying rock, the partition of bending zone, and the re-subdivision of surface subsidence area. According to the quantitative evaluation of groundwater dynamic system disturbance in the Bulianta coal mine, the simulation results show that the loss of groundwater resources is about $1.90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ due to the mining disturbance.

Key words: groundwater; loose aquifer; quantitative evaluation; numerical simulation; fractured zone

地下水是西部干旱地区水资源主要组成部分, 具有极其重要的资源功能和生态功能。而随着煤炭资源开发西进战略的实施, 我国煤炭基地分布与水资源

丰富程度已呈逆向分布。尤其西部干旱矿区在规模化、现代化的煤炭资源开发过程中不可避免地造成了对地下水影响和破坏, 加剧了地区资源性缺水与生态

收稿日期: 2016-07-11 修回日期: 2016-11-09 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402220); 国家“十三五”重点研发计划资助项目(2016YFC0501102); 中煤科工西安研究院自筹基金资助项目(2014MS009)

作者简介: 赵春虎(1980—), 男, 陕西扶风人, 副研究员, 博士。E-mail: zhaochunhu@cctegxian.com

环境破坏,是西部煤炭工业可持续发展面临的主要问题之一。由于能源基础结构的不同,国外对地下水水动力扰动问题的研究极少,主要以矿区水污染风险评价、关闭矿井修复、复垦以及相关法规制定等为主要研究方向^[1-4]。国内众多学者采用不同技术方法针对西部地区煤炭开采造成的地下水位下降、地下水水量损失等水动力响应问题进行了研究^[5-6],但是尚未形成公认的评判方法,直到2011年2月,环保部第一次正式颁布了《环境影响评价技术导则-地下水环境》,对于指导我国开展地下水资源与环境保护工作具有重要的现实意义。

目前水文地质界常用大井法、降落漏斗法^[7-8],以及煤炭生产管理部门的吨煤排水量法等均以宏观分析为主,评价的定量程度不足。近年来数值法在水资源评价、预测和管理中得到迅速的发展,使地下水资源研究从传统的研究方法转到模型研究,大大提高了地下水资源评价定量化程度。如刘怀忠^[9]、张伟^[10]、李莹^[11]、白乐^[12]、吴喜军^[13]等基于数值模拟手段将矿井涌水量或围岩渗透性乘以一定的比例系数(如1.2、1.5倍等),通过变化该类比例系数来预测地下水动态变化,达到定量评价采煤对地下水影响程度的目的,其中涌水量系数和围岩渗透系数的给定具有较强的主观性,忽视了采煤导致地下水响应机制问题。本文将采动覆岩破坏与地下水系统模拟研究结合,通过分析采煤对地下水扰动的控制因素,探索数值化的处理方法,建立定量化程度高的地下水数值评价模型,为我国西部干旱矿区煤-水资源协调开发提供科学依据。

1 地下水环境扰动机理

1.1 采动覆岩的破坏规律

采煤活动导致围岩体含、导水能力的变异是地下水水动力变化的根本原因。目前,采矿与地下水研究的相关学者、技术人员对采动覆岩破坏有较为一致的认识,以经典的采矿“覆岩分带”^[14]理论为研究基础,认为煤层开采后采动覆岩由下至上依次分为垮落带、裂隙带和弯曲带,同时在地表形成地面沉陷区。因而,典型采动覆岩扰动(图1)可以总结为“三带一区”的变形损伤规律。

1.2 对地下水影响机制分析

陕北与神东煤炭基地位于我国西北干旱地区,松散层地下潜水是区域惟一具有供水意义和重要生态价值的水资源^[15]。而采矿扰动使赋存地下水的岩层发生“三带一区”损伤变形,由此产生的松散层地下水向采掘空间的渗漏流失。因此,须以采动覆岩破坏

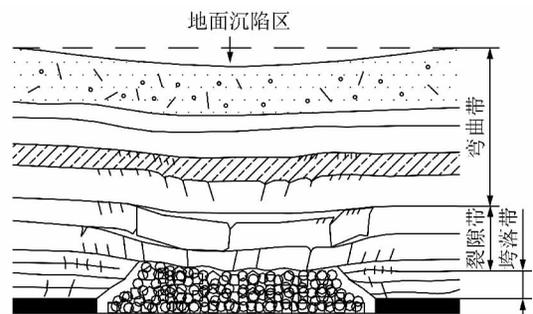


图1 采动覆岩影响示意

Fig. 1 Influence of mining overburden rock

为研究基础,分析采矿引起松散含水层地下水的渗漏损失问题。

煤层开采导致的地下水损失(渗漏)量主要是由松散层地下水从垂向上向采掘空间的渗漏量 Q_1 、冒裂带周边揭露含水层侧向排泄量 Q_2 和地面沉陷积水引起无效蒸发量 Q_3 三部分组成。

(1) 地下水渗漏量(Q_1)

深埋煤层开采冒裂带一般未发育至松散含水层底部,当余留一定的基岩保护层厚度时,为了便于分析扰动因素对地下水渗漏的影响,认为采掘扰动形成的导水裂缝为一倒梯形,如图2所示,定义覆岩体顶部截面积为 A (m^2);冒裂带(导水裂缝带)发育高度为 L_1 (m);松散孔隙含水层与煤层之间基岩厚度为 M (m);其渗透系数为 K (m/d);松散含水层与保护层界面地下水水压力为 P (MPa); u 为保护层中地下水的实际流速; r 为地下水容重(N/m^3)。

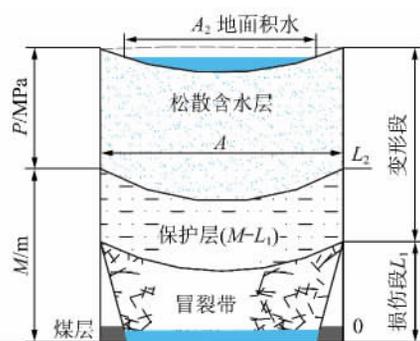


图2 地下水环境扰动示意

Fig. 2 Disturbance of groundwater system

定义煤层顶板为“0”基准面,根据经典地下水动力学分析方法,得导水裂缝带顶部(L_1 高度处)的水头值为

$$H_1 = L_1 + P/r + u^2/2g$$

由于井下排水,冒裂带内直接与大气联通,孔隙压力为大气压,即 $P \approx 0$,则

$$H_1 = L_1 + u^2/2g$$

保护层顶部(L_2 高度处)的水头值为

$$H_2 = L_2 + P/r + u^2/2g$$

则松散含水层向采掘空间渗漏量 Q_1 为

$$Q_1 = KA \frac{L_2 + P/r - L_1}{M - L_1} \quad (1)$$

由于 $L_2 - L_1 = M - L_1$, 则

$$Q_1 = KA \left[1 + \frac{P}{(M - L_1)r} \right] \quad (2)$$

根据式 (2) 可以看出, 渗漏量 Q_1 与采动导水裂缝带高度 L_1 、弯曲带渗透能力 K 、导水裂缝带揭露范围 A 以及含水层水压 P 呈正相关关系, 与余留的保护层厚度 $(M - L_1)$ 呈负相关。即扰动揭露的面积越大、冒裂带高度越高、弯曲带保护层渗透能力越强则地下水渗漏量越大。

(2) 侧向排泄量 (Q_2)

浅埋煤层开采冒裂带一般直接发育至松散含水层内或地表, 即保护层厚度为 0, 采掘空间顶部含水层地下水直接疏干。地下水资源流失以侧向排泄为主, 根据基于稳定流分析的“大井法”, 含水层地下水向采掘空间的侧向排量泄 Q_2 为

$$Q_2 = 1.366K \frac{(2H - S)S}{\lg R_0 - \lg r_0} \quad (3)$$

式中 K 为渗透系数, m/d; H 为水头高度, m; S 为由于矿井排水而产生的水位降深值, m; R_0 为引用影响半径, m; r_0 为假想“大井”的半径(即为导水裂缝揭露区域的引用半径), m。

假设采动裂缝揭露的松散含水层均质无限分布, 其天然水位近似水平, 因此引用影响半径 R_0 可采用下式计算 $R_0 = r_0 + R$, $R = 10S\sqrt{K}$, $r_0 = \sqrt{F/\pi}$, 其中 F 为导水裂缝影响的含水层面积, m^2 。从式 (3) 可以得出, 导水裂缝影响的含水层面积 F 越大, 地下水侧向排泄量 Q_2 越大。

(3) 地下水无效蒸发量 (Q_3)

深埋煤层开采一般在地面形成沉陷区, 当松散层地下水埋深较浅时可形成地面积水, 地下水由潜水蒸发转化成蒸发能力极强的水面蒸发, 则产生了地下水无效蒸发量 (Q_3)。定义松散层潜水的蒸发强度为 E_1 , 水面蒸发为 E_2 , 假设地面已形成地面沉陷积水, 积水面积为 A_2 (m^2) 则

$$Q_3 = (E_2 - E_1) A_2 \quad (4)$$

根据式 (4) 可以看出, 无效蒸发量 Q_3 与地区水面蒸发能力 E_2 和积水面积 A_2 正相关。从采掘扰动角度分析, 积水面积与采掘煤层具体地质条件、含水层水文地质条件相关, 即采煤厚度越大、面积越大、水位埋深越小则更易形成地面积水。

综上所述 3 种形式松散层地下水损失情况, 导水

裂缝带影响的高度、平面范围、弯曲带保护层厚度及渗透能力、地面沉陷范围等是控制地下水资源漏失的主要因素, 即采掘扰动形成的“三带一区”的空间尺度是地下水扰动程度的控制因素。

2 采煤对地下水扰动的评价模型构建

由前面分析可知, 采掘扰动形成的导水裂缝带、弯曲带、地面沉陷区的空间尺度是地下水损失的控制要素, 下面就“三带一区”在地下水系统数值模型数值化处理技术展开研究。

(1) 导水裂缝带数值化处理技术

从地下水系统角度分析, 当导水裂缝发育到某一高度(层位), 在冒裂带发育范围内的含水层会被直接沟通, 采空区顶部含水层地下水体沿垂向采动裂缝迅速涌入采空区, 在无垂向无越流或大气降水直接补给时顶部含水层被迅速疏干。

如图 3 所示, 在导水裂缝带外围边界处, 形成了切割含水层的地下水排泄“带”, 地下水沿排泄“带”涌入采空区形成了较为稳定的矿井正常涌水, 造成地下水水位在排泄“带”处下降至该含水层底板, 其水位高度等于该处的含水层底板标高。

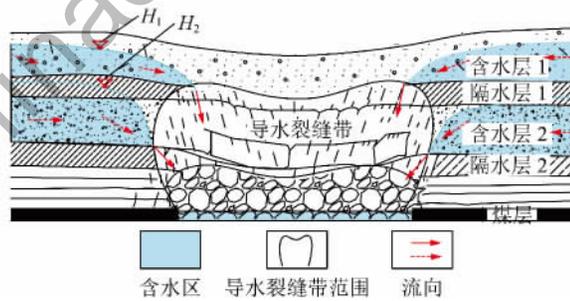


图 3 地下水与导水裂缝带关系示意

Fig. 3 Relationship between groundwater and water flowing fractured zone

在导水裂缝带上方外围边界处, 当导水裂缝未揭露上覆的含水层, 上部的含水层在垂向上可能形成稳定的越流补给, 由于导水裂缝直接与大气联通, 其孔隙水压力为大气压力, 即水头高度 H_c 近似等于该处的位置水头标高(冒裂带高程 H_m) 为

$$H_c = H_m$$

从水文地质条件概化的角度, 导水裂缝切割含水层的接触带构成了地下水系统的“内边界”, 可以概化为地下水运动的一类水头边界条件, 且水头边界水头值即为该处含水层底板标高。以此为约束条件, 在地下水系统数值模型中将导水裂缝切割含水层的接触带数值化处理成地下水系统的一类内部边界, 通过识别含水层底板标高, 来定义水头边界的水位值, 以

计算模拟含水层地下水的变化特征。

(2) “弯曲带”覆岩渗透能力分析数值化处理技术

浅埋煤层开采导水裂缝一般直接发育至地表,覆岩为垮落带与裂隙带“两带型”采动裂缝,深埋煤层开采易形成典型的“三带一区型”结构,弯曲带虽未形成具有较强导水能力的扰动裂缝,地应力状态变化使覆岩发生不同程度与形式变形。如图4所示,位于采掘空间上方弯曲带的压缩区其岩体渗透能力相对减小,两侧拉伸区岩体渗透能力相对减小。根据西部矿区相关研究成果,文献[16]在神东矿区利用地球物理手段探测出采前采后弯曲带覆岩含水性整体较为稳定,文献[17-18]利用原位钻孔压水试验得出位于采动拉伸区的离石组黄土渗透能力较采前增大了1~2个数量级,而同位于压缩区与拉伸区的保德组红土,其采前采后渗透能力相当的结论。可见弯曲带渗透能力变异对地下水漏失影响小。

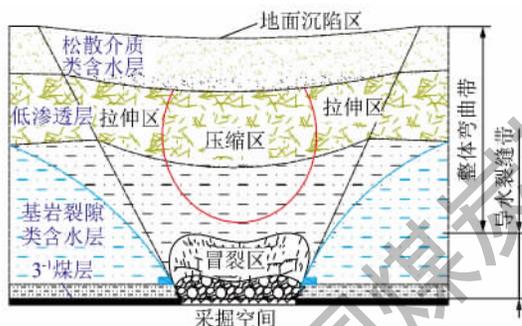


图4 弯曲带渗透能力分区

Fig. 4 Curve of the capacity of the bending zone

在地下水系统建模时,由于采掘扰动后弯曲带覆岩仍为连续介质,可以根据渗透能力在采掘前后的变化趋势,进行渗透能力参数分区,即划定渗透能力变化趋势一致的区段,进行参数分区,分区内的渗透能力参数进行重新赋值,达到采掘扰动下渗透能力变化的数值化处理目的。

(3) 地面沉降区数值化处理技术

地面沉降降低了潜水水位埋深,易形成地面积水,从而加大了地下水资源的无效蒸发,因而在建模过程中应予以考虑。如图5所示,根据地面沉降预测或实测结果,通过改变地面高程值,对模型的上边界进行重新剖分。

需要注意的是在重新改变了上边界条件后,须对模型进行试运行,分析沉降区最低点的地面标高 H_{\min} 与潜水位标高 H_w 的关系,当 $H_{\min} < H_w$,地下水出露于地表形成积水,此时需对地面进行蒸发能力的重新分区,积水区范围按照水面蒸发处理,其他区域仍按照潜水蒸发处理;当 $H_{\min} \geq H_w$,地下水未出露,全区仍为

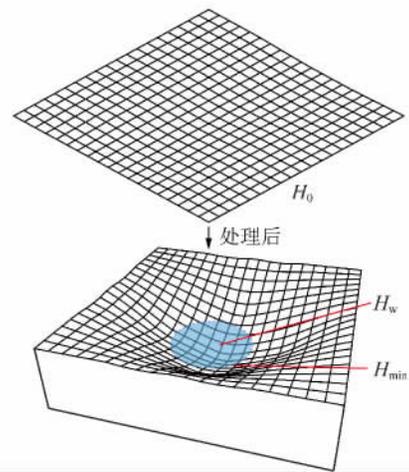


图5 地面沉降数值化处理示意

Fig. 5 Numerical treatment of ground subsidence

潜水蒸发,但是由于埋深的降低,潜水蒸发量可能增大。

综上,以地下水系统数值模拟为基础,通过将采煤扰动形成的覆岩导水裂缝边界化、弯曲带渗透能力分区,地面沉降区重新剖分的数值化处理手段是地下水系统数值评价模型构建的基本思路。

3 评价案例

3.1 案例矿井概况

补连塔井田位于西部神东矿区中部,主采煤层埋深小于150 m,地表松散层厚度约为30 m,采用综合机械化采煤工艺。如图1所示,井田内松散层类孔隙水主要接受大气降水的入渗补给,在沟谷地下水出露于地表,形成常年或季节性的地表水体(补连沟、活鸡兔等),乌兰木伦河是区内所有地表水的排泄区。

如图6所示,模型在垂向上按照岩性变化剖分为4层,研究区水文地质单元较为完整,分别以常年流水的乌兰木伦河、呼和乌苏沟、活鸡兔沟为模型的一类水头边界。

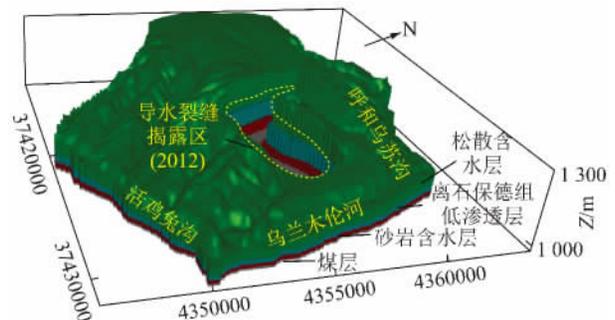


图6 研究区(补连塔井田)范围示意

Fig. 6 Sketch map of study area

3.2 采掘扰动影响地下水系统模拟

据矿井实测,补连塔井田采动覆岩为典型的“两

带”破坏形式,不存在弯曲带渗透能力变异与地面沉陷积水问题,因此在评价模型中定义导水裂缝接触带为模型的“内边界”,概化为含水层地下水运动的一类水头边界条件,松散含水层水头边界水头值为该处松散含水层底板标高,降雨补给以研究区平水年数据为准。

(1) 水位

由图 7(a) 分析可知(蓝色箭头为地下水流向,红色箭头为地下水转地表水流向),煤层未开采前,表现出大气降水和地下水补给地表水的三水转化特征,乌兰木伦河为井田的地下水排泄点。局部由于地形控制,以地表分水岭为界限地下水分别向两侧的补连沟、呼和乌素沟和活鸡兔沟等地表水体排泄。

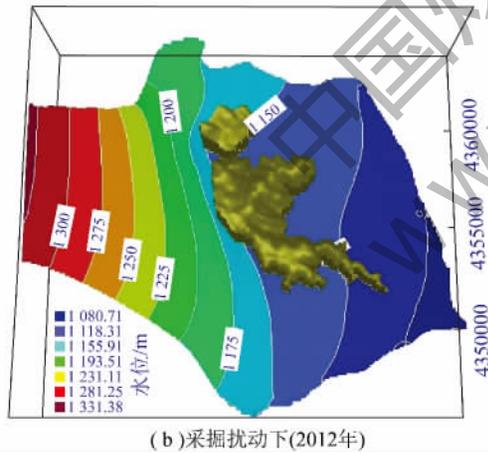
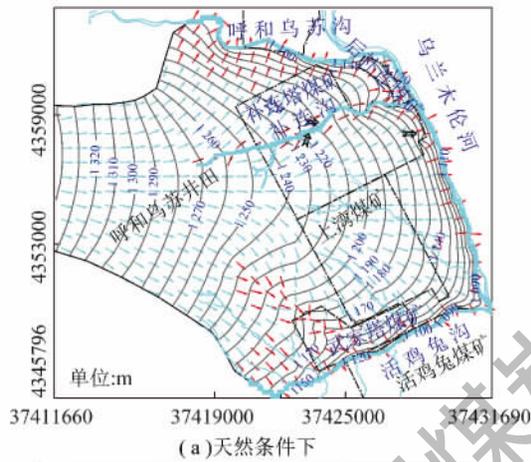


图 7 地下水流场变化特征

Fig. 7 Groundwater level contour map under mining disturbance

补连塔井田规模化开采开始于 2000 年左右,如图 7(b) 所示,2012 年井田基本以 1⁻² 煤回采完毕的三、四盘区为中心,形成较为明显的降落漏斗,水位下降了 20 m 以上,采空区顶部含水层直接被疏干(黄色区域)。

(2) 地下水均衡影响

表 1 中,未采掘前大气降水是地下水补给的主要来源,侧向补给次之,河流仅在局部地段补给地下水

存在补给。地下水向河流等地表水体的排泄是主要排泄形式,蒸发排泄次之,由于模拟区水文地质单元较为完整,地下水向区外侧向排泄量为 0。

表 1 天然条件下地下水均衡

Table 1 Groundwater balance under natural conditions

源汇项	数值	占比/%	合计
降雨补给量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	6.71	71.69	
河流补给量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	0.70	7.46	9.36
侧向补给量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	1.95	20.85	
蒸发排泄量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	3.07	32.82	9.36
向河流排泄量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	6.29	67.18	

如图 8 所示,随着井田采掘范围逐年增加,受采掘扰动范围扩大,散含水层向采掘区段排泄的地下水水量逐年增大,以 2012 年为例,地下水向采掘区段的侧向排泄量(即地下水的漏失量)为 1.9×10⁴m³/d,较之未采掘前,其排泄量主要是袭夺了河流排泄减量和潜水蒸发的减量。

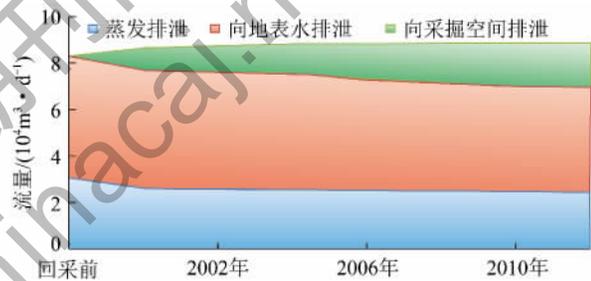


图 8 采掘影响下水均衡变化

Fig. 8 Water balance under mining disturbance

(3) 对比分析

2012 年补连塔井田四盘区的实测矿井正常排水量约为 0.852×10⁴m³/d(不含采空积水量),由于矿井排水量不包括补给至采空区积水和井下复用等水量,其结果相对偏小。根据井田水文地质特征,通过大井法计算地下水向采掘区的侧向排泄量,其中松散含水层 K 取 2.385 m/d,水头高度、水位降深均取含水层厚度值 30 m, F 取截止 2012 年已采掘的三四盘区面积约为 2.49×10⁷m²,计算可得松散含水层向采掘区的地下水排泄量为 4.4×10⁴m³/d,由于大井法为四面汇水条件,无限含水层,规则影响半径导致其计算结果明显偏大,因此数值评价模型计算结果(1.9×10⁴m³/d)能正确、定量地反映出采掘扰动引起地下水的损失量。

4 结 语

(1) “三带一区”是地下水赋存介质扰动的主要表现形式:由采动“覆岩分带”理论可知,采掘扰动形

成了覆岩的垮落带、裂隙带及弯曲带。

(2) “三带一区”空间尺度是控制地下水损失的主要因素: 通过地下水动力学分析可知, 扰动影响的面积越大、冒裂带高度越高、弯曲带保护层得到渗透能力越强则地下水渗漏量越大。

(3) 提出了“三带一区”模型化处理技术: 在地下水系统数值模型中将导水裂缝切割含水层的接触带数值化处理成地下水系统的一类内部边界; 根据弯曲带渗透能力在采掘前后的变化趋势, 进行渗透能力参数分区; 根据地面沉陷区预测或实测结果, 通过改变地面高程值, 对模型的上边界进行重新剖分。

(4) 通过构建神东矿区补连塔井田地下水扰动的计算机评价模型, 模拟得出由于采掘扰动使井田地下水水位下降 20 m 以上(至 2012 年), 地下水资源损失量可达 $1.90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

参考文献(References):

- [1] Chugh Y P, Behm P T. Coal waste management practices in the USA: An overview [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(2): 163-176.
- [2] Skousen J, Zipper C E. Post-mining policies and practices in the Eastern USA coal region [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(2): 135-151.
- [3] 胡振琪, 龙精华, 王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复 [J]. 煤炭学报 2014, 39(8): 1751-1757.
Hu Zhenqi, Long Jinghua, Wang Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(8): 1751-1757.
- [4] Manca P P, Desogus P, Orrù G. The reuse of abandoned Acquarisi mine voids for storage of the Masua flotation tailings [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(2): 213-220.
- [5] 范立民, 马雄德, 蒋辉, 等. 西部生态脆弱矿区矿井突水溃沙危险性分区 [J]. 煤炭学报 2016, 41(3): 531-536.
Fan Limin, Ma Xiongde, Jiang Hui, et al. Risk evaluation on water and sand inrush in ecologically fragile coal mine [J]. Journal of China Coal Society 2016, 41(3): 531-536.
- [6] 王力, 卫三平, 王全九. 榆神府煤田开采对地下水和植被的影响 [J]. 煤炭学报 2008, 33(12): 1408-1414.
Wang Li, Wei Sanping, Wang Quanjiu. Effect of coal exploitation on groundwater and vegetation in the Yushenfu Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(12): 1408-1414.
- [7] 潘天杭. 用降落漏斗体积法求潜水含水层中抽水时之影响半径 [J]. 水文地质工程地质, 1957(9): 41-42.
Pan Tianhang. The influence radius of the water pumping in the aquifer by the method of the volume of the descent funnel method [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1957(9): 41-42.
- [8] 张子文. 稳定降落漏斗中心最大下降及其体积计算方法探讨 [J]. 工程勘察, 1989(3): 34-36.
Zhang Ziwen. Discussion on the maximum descent and its volume calculation method of the stable descend funnel center in [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1989(3): 34-36.
- [9] 刘怀忠. 煤矿开采对矿区地下水系统扰动的定量评价研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
Liu Huaizhong. Quantitative evaluation of groundwater system disturbance in mining area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [10] 李杨. 浅埋煤层开采覆岩移动规律及对地下水影响研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
Li Yang. Study on the movement law of overlying strata in shallow coal seam mining and its influence on groundwater [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2012.
- [11] 李莹. 陕北煤炭分布区地下水资源与煤炭开采引起的水文生态效应 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
Li Ying. The hydrological and ecological effects caused by groundwater resources and coal mining in the coal distribution area of Northern Shaanxi Province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [12] 白乐, 李怀恩, 何宏谋, 等. 煤矿开采区地表水-地下水耦合模拟 [J]. 煤炭学报 2015, 40(4): 931-937.
Bai Le, Li Huaen, He Hongmou, et al. Integrated simulation of surface water and groundwater in a high intensive coal mining area [J]. Journal of China Coal Society 2015, 40(4): 931-937.
- [13] 吴喜军. 煤炭开采地区河道径流变化与生态基流研究-以陕北窟野河流域为例 [D]. 西安: 西安理工大学, 2013.
Wu Xijun. Study on river runoff change and ecological base flow in coal mining area [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [14] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 98-101.
Qian Minggao, Shi Pingwu, Xu Jialin. Mining pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010: 98-101.
- [15] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究 [J]. 煤炭学报 2010, 35(1): 7-14.
Wang Shuangming, Huang Qingxiang, Fan Limin, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionalization in the ecological fragile mining area [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(1): 7-14.
- [16] Du W, Peng S, Zhu G, et al. Time-lapse geophysical technology-based study on overburden strata changes induced by modern coal mining [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(2): 184-191.
- [17] 隋旺华. 开采沉陷土体变形工程地质研究 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
Sui Wanghua. The engineering geology of the soil deformation of mining subsidence [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.
- [18] 李涛. 陕北煤炭大规模开采含隔水层结构变异及水资源动态研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
Li Tao. Study on the structure variation and water resources of the large-scale mining of coal in the coal of Northern Shaanxi [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.