

文章编号: 1673-3363-(2014)01-0072-06

干旱矿区水资源迁移与“保水采煤”思路探讨

常金源^{1,2}, 李文平³, 李涛⁴, 乔伟³, 伍法权¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 工程地质力学重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国矿业大学资源与地球科学学院,

江苏 徐州 221116; 4. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710070)

摘要 为了解干旱矿区水资源迁移情况, 本文以位于陕北地区的神南矿区为例, 选择“十二五”末期为时间点, 开展了潜水漏失程度评价分区, 采后水资源量预测, 采空区水质分析对比等工作。结果显示: 煤炭开采使得矿区内水资源含蓄总量增加, 采空区水是增长的主体。继而提出以水资源含蓄总量作为干旱矿区煤炭开采“保水采煤”效果的评价标准: 如果采前矿区内可利用水资源总量($V_{\text{采前}}$)大于采后($V_{\text{采后}}$), 表明水资源量整体是流失的, 相反, 则认为煤炭开采相对提高了区域水资源含蓄能力, 煤炭开采有利于保护水资源。以此标准, 神南矿区开采后水资源环境得到了改善。

关键词 保水采煤; 评价分区; 水资源迁移; 水资源含蓄总量

中图分类号 TD 741

文献标志码 A

Water migration in arid mining area and thought of “water preserved mining”

CHANG Jinyuan^{1,2}, LI Wenping³, LI Tao⁴, QIAO Wei³, WU Faquan¹

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Resources and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

4. Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute Co Ltd, Xi'an, Shaanxi 710070, China)

Abstract Large-scale mining has produced great influence on local fragile eco-environment in Northern Shaanxi, such as leakage of aquifer and reduction of flows. Under this background, to acquire the migration situations of water resources in arid mining area, taking Shennan Mining Area in Northern Shaanxi as example, a series of works were carried out to study the division evaluation of water resources' leakage degree, water resources quantity forecasting after mining, and analysis and comparison of water quality in goaf. The results show that the gross quantity of water resources in the mining area increases after mining, and the water in goaf is the main source of the growth. Consequently, the gross amount of water resources is proposed as the evaluation standard of “water preserved mining”. If the gross amount of water resources before mining is greater than that after mining, the water resources are running off on the whole. On the contrary, it is considered that the mining process can improve the oc-

收稿日期: 2012-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172290); 国家“十二五”科研支撑计划项目(2012BAK10B06-02); 山东博士后创新项目专项资金项目(201203019)

作者简介: 常金源(1985-), 男, 河南省鹤壁市人, 博士研究生, 从事工程地质与水文地质方面的研究。

通信作者: 李文平

E-mail: wpli1688@126.com

Tel: 13852438788

风沙滩地区为 I 型,岩(土)层从上到下依次为砂层、土层、基岩和煤层;黄土梁峁区为 III 型,从上到下依次为土层、基岩和煤层;IV 型分布在部分河流沟谷,水系与基岩直接接触;V 型区烧变岩发育。与其他矿区相比,该区地貌特征迥异,水文地质、工程地质条件多样,“保水采煤”面临的问题复杂突出,因此该区可作为“保水采煤”研究的天然试验场。

2 研究区水资源赋存特征

砂层潜水是区内天然的水源地(砂层汇水成因的泉水占 75%)。上部风积砂层颗粒较大,透水性强,下部萨拉乌苏组砂层为湖相沉积,且下伏隔水土层,储集条件良好。砂层汇水构成了地表水系的主体,河流径流总量为 3 071 万 m³。泉水流量与煤矿建设前相比,衰减剧烈,有些甚至消失,被建筑物覆盖。

煤层露头大部自燃,形成特殊的烧变岩含水构造。基岩裂隙水具有成层性和承压性特征,由于富水性弱,以下计算时不予讨论。

为大致了解地下水量,在约 550 个前期勘探钻孔资料的基础上,计算砂层潜水量和烧变岩水量大致为 9 480 万 m³和 453 万 m³。根据水量大小排序:砂层含水层>地表水系>烧变岩含水层。由此,可以得到研究区内水量分配情况,如图 2 所示。

整体而言,煤矿开采以前,各含水层水力联系处于相对平衡的状态,大气降水是各含水层的最终补给源。然而,随着开采的进行,(导水)裂隙带有可能沟通各个含水层,促使各个含水层向位于高程最低点的采空区排泄。研究区内各水力联系如图 3。

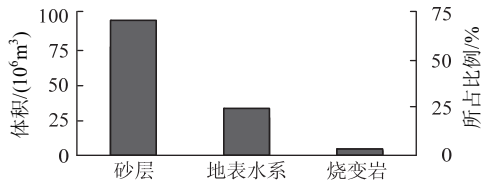


图 2 水资源量分配图

Fig.2 Proportion of water resources



图 3 水力联系示意图

Fig.3 Sketch map of hydraulic connection

3 水资源迁移分析

3.1 基于漏失程度的评价分区

导水裂隙带高度、基岩厚度以及土层厚度决定了煤层采动的破坏程度。本研究区开展“保水采煤”研究的较为有利的条件是广泛分布有土层,因此此次评价将土层厚度作为一个重要的指标。

结合野外观察现象,将砂层潜水的漏失程度分为 4 种:

- 1) 严重漏失: (导水)裂隙带到达含水层及以上,潜水完全漏失。
- 2) 一般漏失: (导水)裂隙带发育到土层,未完全贯穿,但渗漏影响了区域的渗流场,造成水系干涸。
- 3) 轻微漏失: (导水)裂隙带发育到土层但未完全贯穿时,渗漏对潜水、泉水排泄边界没有影响。
- 4) 无影响: (导水)裂隙带未发育到土层,潜水基本不受影响,短时可以恢复。

其中,一般漏失与轻微漏失的划分根据潜水的渗漏程度进行,认为,在一个水文地质单元内当潜水的渗漏量超出可开采量时,失水较严重,此时的土层厚度便作为划分一般漏失与轻微漏失的厚度阈值。在砂土基型区,如果预测的(导水)裂隙带未贯穿土层,砂层潜水在水力梯度的作用下将通过剩余、完整的土层发生渗漏,该区域的潜水渗透量可按式(1)计算。

W' = (K'/M') · ΔH · S · t (1)

式中: W' 为渗漏量, m³; K' 为黏土层的渗透系数, m/d; M' 为剩余土层的厚度, m; ΔH 为渗透水压力差,即天然排泄基准面至平均砂层底板距离, m; S 为渗透面积, m²; t 为渗透时间, d。

根据水均衡原理,将区内排泄量(由野外水文地质调查数据求得)代入式(1)中,即可求得划分轻微漏失与一般漏失的厚度阈值,从而确定分区标准如表 1。

表 1 分区标准
Table 1 Division criterion

分区名称	分区标准
无影响区	(导水)裂隙带未突破基岩顶面
轻微漏失区	(导水)裂隙带突破基岩顶面, 剩余土层厚度>40 m
一般漏失区	(导水)裂隙带突破基岩顶面, 剩余土层厚度 0~40 m
严重漏失区	(导水)裂隙带突破土层顶面

(导水)裂隙带高度可以通过统计、拟合邻近矿区生产工作面(导水)裂隙带实测、相似模型试验和

理论计算所得数据得到, 其线性规律^[9]为:

$$H = 9.59M + 13.55 \quad (2)$$

式中: H 为裂隙发育高度, m; M 为煤层采高, m。

分区结果如图 4, I 1, I 2 和 I 3 对应地貌类型为风沙滩地区, 采动破坏对砂层潜水影响的程度依次为严重、一般和轻微漏失。I 1 和 I 2 内砂层潜水位在煤层回采后会出现大幅度的降低, 直至疏干; I 3 内砂层潜水位在煤层回采后一段时间内可以恢复。II 1 范围内(导水)裂隙带发育到地表, 大气降水有可能顺着裂隙直接汇入井下。II 2 范围内(导水)裂隙带未发育至地表, 集水沿着冲沟迅速流失, 认为与采动前相比无变化。I 4 为不漏失区, 在采动盆地影响下, 潜水水位可能发生波动。在评价分区图的基础上可以对砂层潜水漏失量进行预测。

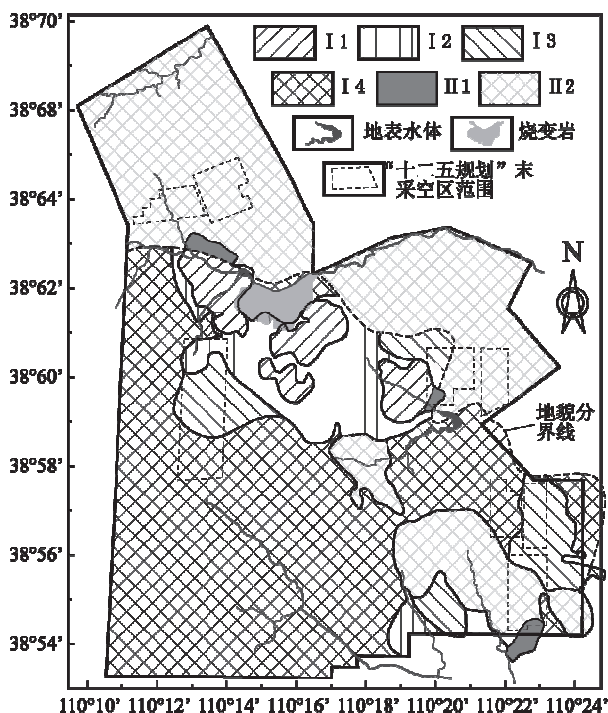


图 4 评价分区图

Fig.4 Evaluation division

3.2 水资源迁移分析

选取“十二五”末期为时间节点, 进行水资源迁移分析。开采前水资源主要分布在砂层潜水、烧变岩含水层和地表水系中。随着开采的进行, 受采矿扰动, 水资源结构和总量将发生变异, 表现在一方面以上 3 种水体渗漏, 蓄水量减少, 另一方面煤炭开采形成采空区储水和矿井排水。

3.2.1 水资源量预测^[10]

1) $V_{\text{地表水}}$

指未受影响的地表水系蓄水量, m^3 。水库在煤

矿设计时已留设防水煤柱, 因此煤炭开采对水库影响微弱。而采煤对河流影响较大, 如柠条塔煤矿 N1201 工作面的开采造成新民沟(位于 II 1 范围内)流量衰减较大, 部分河段已经断流。而肯铁令河也面临同样的危险, 因此两者均按最坏结果估计。采矿对其他河流的影响不大。

2) $V_{\text{地下水}}$

指煤炭开采结束后, 处于动态平衡的砂层含水层和烧变岩蓄水量, m^3 。“十二五”末期已回采的工作面基本上布置在不漏失区范围内(图 4), 与一般漏失区和严重漏失区叠加的面积分别为 129.5 万 m^2 和 59 万 m^2 。依照大井法^[11]计算潜水漏失量为 36.7 万 m^3 和 8.4 万 m^3 , 即由原来的 9480 万 m^3 减少到 9435 万 m^3 , 变化不显著。

由于矿井开采及附近工厂大量取用火烧岩水, 矿区中部烧变岩含水层水位逐年下降, 多处水井已干枯。预计至“十二五”末期, 烧变岩含水层将枯竭, 失去供水价值。

3) $V_{\text{采空区}}$

指采空区蓄水量, m^3 。一般认为只有在冒落带和裂隙带范围内的岩层产生碎胀, 因此, 可利用以下公式估算采空区储水空间:

$$V_{\text{采空区}} = S_{\text{工作面}} \times \sum_{i=1}^n [h_i \times (k_i - 1)] \quad (3)$$

式中: $S_{\text{工作面}}$ 为工作面水平面投影面积, m^2 ; h_i 为第 i 层岩层的厚度, m; k_i 为第 i 层岩石的残余碎胀系数。 n 的取值应根据导水裂隙带发育高度确定。由于该地区地层倾角为 $1^\circ \sim 3^\circ$, 应用式(3)估计合适。

依照生产布置计划, 截至 2015 年底, 预计研究区内已回采工作面共 50 个。由于采空区空间大小不一, 根据比拟法估计, 各封闭采空区积满水的时间最短 0.4 a, 最长 9.0 a。经估算, 截至 2015 年, 采空区储水量约为 2138 万 m^3 。

4) $Q_{\text{排}}$

指矿井年排水量, m^3 。根据现矿井排水量预计, 到 2015 年年排水量约为 490 万 m^3 。

3.2.2 对比分析

开采前、后水资源迁移情况如表 2 所示。“十二五”末期矿区范围内水资源量和组成均有不小的变化。总量由之前的 13229 万 m^3 变为 14687 万 m^3 , 相比增加了 1458 万 m^3 。砂层潜水量基本持平, 仍然为矿区内储量最大的水体; 烧变岩含水层由于过度开采, 水位骤减, 将失去利用的价值; 采空区水量增长明显, 超过砂层潜水量的 $1/5$ 。总体而言,

地下水总量增加了 1 640 万 m³，而采空区水量成为了增长的主体，约为 2 138 万 m³。

表 2 开采前后水资源量对比 万 m³
Table 2 The water resources before and after mining

	砂层 潜水	烧变 岩水	采空区	水库	河流	矿井排水
采前	9 480	453	0	225	3 071	
	9 933			3 296		0
采后	9 435	0	2 138	225	2 889	
	11 573			3 114		490

由于采矿对河流的扰动，有可能导致新民沟和肯铁令河的断流(图 4)。而区内渗流场的改变也会对其他河流产生一定的影响，因此，地表水系水量减少 182 万 m³也只是保守估计。

4 “保水采煤”思路探讨

当前“保水采煤”的思路主要分 2 个方向：1) 采取各种措施尽量防止水体渗漏，如限制采高、采用充填开采等技术方法。2) 疏导水，将含水层水直接疏放到采空区中，如“含水层再造”^[12]、“采空区储水”等。以防为主的思路无可厚非，但要付出高昂的代价；而后者将砂层含水层的水“疏”到采空区中是否对矿区水资源环境造成影响值得探讨。

表 3 水质分析结果

Table 3 Water quality analysis

取样位置	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Fe ²⁺ +Fe ³⁺ / (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ / (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	永久硬度 (德国度)	pH 值
流水濠砂层泉水	53.7	0	0.02	9.0	未检出	11.1	183.9	0	7.4
沙渠附近烧变岩泉水	50.4	未检出	未检出	16.0	0.13	8.6	180.4	0	7.7
流水濠村民用井水	51.2	0.02	0.06	9.0	未检出	15.2	168.7	0	7.3
矿井水(原社办柠条塔煤矿)	109.0	未检出	0.16	18.0	0.99	140.7	265.3	4.4	7.2
矿井水(原柠条塔露天矿)	120.2	0.04	未检出	未检出	未检出	120.2	323.3	1.9	7.4

由表 3 可知，除永久硬度和 SO₄²⁻外，采空区水在各项指标中均没有较大的变异，水质总体呈弱碱性，这与矿区内特低硫的煤质有关。从井下排出的矿井水主要受煤岩屑的污染，增加了水体悬浮物和 COD 的含量，经过简单处理是可以加以利用的。据此认为，采空区水质可以满足工业生产需求，经过处理，也可以满足生活用水需求。这是将采空区水作为可利用水资源的一个必要条件。

从以上的分析来看，“十二五”末期，煤炭的开采将使神南矿区水资源环境得到改善。

4.2 评价分区的讨论

表观上的缺水如烧变岩含水层丧失利用价值、河流断流等，主要是原先的动态平衡被打破，新系

4.1 “保水采煤”评价标准

从表 2 可看出，尽管地表水系和地下水有所流失，矿区内水资源总量相比采矿前仍增加了 1 458 万 m³；采空区水量成为了增长的主体，约为 2 138 万 m³。因此可以认为，“保水采煤”应从使矿区水资源总量增加的角度出发，把区域水资源总量作为“保水采煤”的评价标准。

将采前矿区内可利用水资源总量表示为 $V_{采前}=V_{地表水}+V_{地下水}$ ，而采后矿区内可利用水资源总量表示为 $V_{采后}=V_{地表水}+V_{地下水}+V_{采空区}+Q_{排}$ 。如果 $V_{采前}>V_{采后}$ ，即采空区增加的水资源量小于因采动造成砂层潜水、河流流失的水量，则认为整个系统内水资源量是流失的，不应一味追求“采空区储水”的方法，而应采取措施防止砂层等含水层的渗漏。如果 $V_{采前}<V_{采后}$ ，即采空区储水量大于原来处于平衡的水体的漏失量，认为煤炭开采相对改善了水资源赋存状况，水资源量总体呈上升状态。

但是水资源的评价必须包含“量”和“质”2 个方面，如果增加的采空区水像东部矿区酸性矿井水一样，需要花费高昂的代价进行处理，反而减少了矿区内可资利用的水量，对于“保水采煤”是不利的。为此，选取代表性的区域进行了水质分析，结果如表 3 所示。

统形成需要一定的调整时间。对于不漏失区，李涛等^[13-17]通过物理模型测得水位恢复天数约为 300 d，并应用修正的 Theis 公式建立了潜水位恢复的单井数学模型，结果显示水位恢复停采时降深的 95%需要 225 d，这表明在一个水文年之内水位可以恢复到原来状态。

对于轻微漏失区，一方面水位不会有大幅下降，另一方面轻微漏失使得垂向渗流增大，降水入渗补给增强，则排泄必然减少，内部滞留水量必将增大，促使这些区域向 $V_{采前}<V_{采后}$ 方向发展。对于“保水采煤”而言这种情况是最为有利的，其形成的上层潜水，下层采空区水的“双层”结构将会改善矿区内的水资源赋存环境。

严格控制严重漏失区和一般漏失区的范围是正确的,但如果这些区域对于生态和安全生产而言意义不大,而且经过计算表明 $V_{\text{采前}} < V_{\text{采后}}$, 则可以不加处理,从而改善经济效益。

进而对陕北地区煤炭开采提出建议: 1) 煤炭开采前应详细准确调查区内水资源分布情况,对总量和结构需要有清晰的认识。结合评价分区预测采后水资源环境状况,做出适合的开采规划。2) 对于轻微漏失区,采煤对砂层潜水的影响较弱,可不予处理。3) 梁峁漏失区(导水)裂隙带发育到地表,降水可能通过这些裂隙直接沟通采空区,在做好相应的安全措施后,可能成为 $V_{\text{采空区}}$ 的补给源,从而新增降雨与采空区之间的联系。4) 加大系统内部水资源循环利用力度,如矿井水复用技术等,使矿区内部水资源联系增强,减弱对外部输入水量的依赖。

5 结 论

1) 选择(导水)裂隙带高度、土层厚度、基岩厚度作为分区因子,依据水资源漏失程度大小对研究区进行评价分区,其中 I 1, I 2 区对保护砂层含水层极为不利,而 I 3 区内砂层潜水位在煤层回采后一段时间内可以恢复。

2) 在评价分区图的基础上,估算了“十二五”末期水资源迁移情况。结果显示,受采动影响,地下水 and 地表水均有流失,各自为 498 万 m^3 和 182 万 m^3 ; 总量则由之前的 13 229 万 m^3 变为 14 687 万 m^3 , 相比增加了 1 458 万 m^3 。采空区水量成为了增长的主体,约为 2 138 万 m^3 。

3) 对于干旱矿区而言,“保水采煤”应从使矿区水资源总量增加的角度出发,把区域水资源总量作为“保水采煤”的评价标准。如果 $V_{\text{采前}} > V_{\text{采后}}$, 表明水资源量整体是流失的,应该采取措施防止砂层等水体的渗漏;如果 $V_{\text{采前}} < V_{\text{采后}}$, 认为煤炭开采相对改善了水资源赋存状况,提高了区域水资源含蓄能力。依照以上标准,认为神南矿区水资源环境在开采后得到了改善。

参考文献:

- [1] 王双明, 范立民, 杨宏科. 陕北煤炭资源可持续发展之开发思路[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(5): 6-8, 11. WANG Shuangming, FAN Limin, YANG Hongke. Some thoughts on sustainable development of Northern Shaanxi coal resources[J]. Coal Geology of China, 2003, 15(5): 6-8, 11.
- [2] 范立民. 论保水采煤问题[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 5(33): 50-53.
- [3] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 529-534. QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529-534.
- [4] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 1-7. QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [5] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 1-14. MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Research on green mining of coal resources in China: current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14.
- [6] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1-4. MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 1-4.
- [7] 黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1174-1177. HUANG Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1174-1177.
- [8] 李文平, 叶贵钧, 张莱, 等. 陕北榆神府矿区保水采煤工程地质条件研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 449-454. LI Wenping, YE Guijun, ZHANG Lai, et al. Study on the engineering geological conditions of protected water resources during coal mining action in Yu-Shen-Fu mine area in the north Shaanxi province[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 449-454.
- [9] 马立强. 沙基型浅埋煤层采动覆岩导水通道分布特征[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- [10] 张康顺, 姚建明, 李文平, 等. 神南大型矿区煤炭开采水资源动态及保水技术研究[R]. 榆林: 陕西煤业化工集团神南矿业公司, 2010.
- [11] 庞渭舟, 刘维周. 煤矿水文地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986: 265-270.
- [12] 张发旺, 周骏业, 申保宏, 等. 干旱地区采煤条件下煤层顶板含水层再造与地下水资源保护[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 107-111.

(下转第 77 页)