

冀瑞君,彭苏萍,范立民,等.神府矿区采煤对地下水循环的影响——以窟野河中下游流域为例[J].煤炭学报,2015,40(4):938-943. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0471

Ji Ruijun, Peng Suping, Fan Limin, et al. Effect of coal exploitation on groundwater circulation in the Shenfu mine area: An example from middle and lower reaches of the Kuye River basin [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 938-943. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0471

## 神府矿区采煤对地下水循环的影响 ——以窟野河中下游流域为例

冀瑞君<sup>1</sup> 彭苏萍<sup>1</sup> 范立民<sup>2</sup> 赵雅楠<sup>3</sup> 李成<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;2. 陕西省地质环境监测总站,陕西 西安 710054;3. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

**摘要:**以窟野河中下游地区为例,通过野外调查和水化学特征分析,总结了神府矿区地下水循环模式:第四系潜水和侏罗系烧变岩潜水主要受地形控制;延安组碎屑岩含水层分5个含水层段,主要受地层倾向控制,沿河道相由东向西流动。进而提出了采煤对地下水影响机制:浅部煤层开采破坏了潜水含水层之下黏土层的隔水性,含水盆地汇水面积减小,泉流量减小或干枯;同时采矿造成的人为“溯源侵蚀”夺取了相邻水文地质单元的地下水,矿井水补给量增加,蒸发量减小;深部煤层开采进一步破坏黏土隔水层,导致潜水含水层消失,使得地表径流转换为地下径流,地下水完全依赖5<sup>-2</sup>号煤层底板径流。

**关键词:**神府矿区;保水采煤;地下水循环;含水层沉积学

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2015)04-0938-06

### Effect of coal exploitation on groundwater circulation in the Shenfu mine area: An example from middle and lower reaches of the Kuye River basin

Ji Rui-jun<sup>1</sup>, PENG Su-ping<sup>1</sup>, FAN Li-min<sup>2</sup>, ZHAO Ya-nan<sup>3</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, China; 3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Authors took the middle and lower reaches of Kuye River as an example, summarized the circulation patterns of groundwater at Shenfu mine area by the field investigation and analysis of hydrochemical characteristics: Quaternary phreatic and Jurassic burned metamorphic rocks phreatic are mainly controlled by topography. The clastic rock aquifer type of Yan'an formation is divided into five sections, and is mainly controlled by dip direction, along fluvial facies and flows from east to west. Also the paper describes how the mining activities affect the groundwater: Shallow coal mining destroys the water resisting property of clay aquifuge underlying the phreatic water aquifer, which results in the reduction of water basin area and spring discharge. "Headward erosion" caused by mining activities captures the groundwater from its adjacent hydrogeological unit. The mine water recharge increases and the evaporation decreases. The deep coal-seam mining further damages the clay aquifuge, which leads to the disappearance of unconfined aquifer. Surface runoff transfers into groundwater and groundwater flows along the No. 5<sup>-2</sup> coal-seam floor.

收稿日期:2014-04-09 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB227901);中国工程院重点咨询资助项目(2012-XZ-3-3);国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAC10B03)

作者简介:冀瑞君(1988—),男,山西晋中人,硕士研究生。E-mail:hexie\_189@126.com

**Key words:** Shenfu mine area; water preserved mining; the circulation of groundwater; aquifer sedimentology

神府矿区位于鄂尔多斯能源盆地北部,侏罗纪煤田,储量丰富,煤质优良,地质构造条件简单,开采条件优越;同时神府矿区也是毛乌苏沙地东缘,与黄土高原的过渡地带,多年平均降雨量 436 mm,且 65% 集中于 7—9 月份,生态环境脆弱。煤炭资源的开发要将生态环境承载容量限制放在首要位置。许多学者已经由矿山到矿区,由泉域到流域,从采矿工程、水文地质、工程地质到环境地质等多时空尺度和科学角度出发,对以神府矿区为代表的生态脆弱煤炭基地资源开采引起的生态问题进行了分析研究,形成了基于水资源承载力的科学采矿技术途径<sup>[1-3]</sup>。其中包括控制采煤对地下水循环影响的技术方法。

针对陕北采煤含水层破坏、地下水水位下降的问题,20 世纪 90 年代初到 21 世纪初,范立民等提出通过开采区域、采煤方法的合理选择实现保水采煤目的的新观点<sup>[4-5]</sup>;缪协兴等基于“关键层”理论,提出单一关键层结构是导致浅埋煤层特殊采动损害现象的地质根源<sup>[6-7]</sup>;张发旺等分析研究采动条件下煤层顶板裂隙的生成、含隔水性能的变化以及煤层顶板在采动应力状态,提出了通过“含水层再造”进行“保水采煤”的机理<sup>[8]</sup>;范立民等根据烧变岩的启示,研究了采空区侏罗系岩体破碎后形成含水层的机理,提出了采空区储水的问题<sup>[9]</sup>。

黄河中游一级支流窟野河中下游流域,煤层埋藏很浅,大部分地区属于煤层开采失水区,土地沙化、水资源贫乏以及水土流失的严重区<sup>[10]</sup>。笔者以该区为例分析采前地下水含水层类型以及补径排关系模式,提出了含水层循环分类,分析了采后地下水的变化。希望对采煤活动后地下水的保护和合理利用有指导意义。

## 1 主要含水层特征

研究区(图 1)内地下水含水层有第四系全新统冲、洪积潜水含水层,上更新统萨拉乌苏组含水层,侏罗系烧变岩含水层,延安组基岩风化裂隙和砂岩孔裂隙含水层。其中萨拉乌苏组和侏罗系烧变岩含水层,埋藏浅,均位于浅部主采煤层附近,是矿区内重要的生态水源和供水水源<sup>[11-12]</sup>。

### 1.1 萨拉乌苏组( $Q_3$ )含水层

萨拉乌苏组是华北地区晚更新世的标准层,属于河湖相沉积和古风成砂<sup>[13]</sup>,交错层理发育,岩性以细砂,粉砂岩为主,磨圆度和分选性较好,压实程

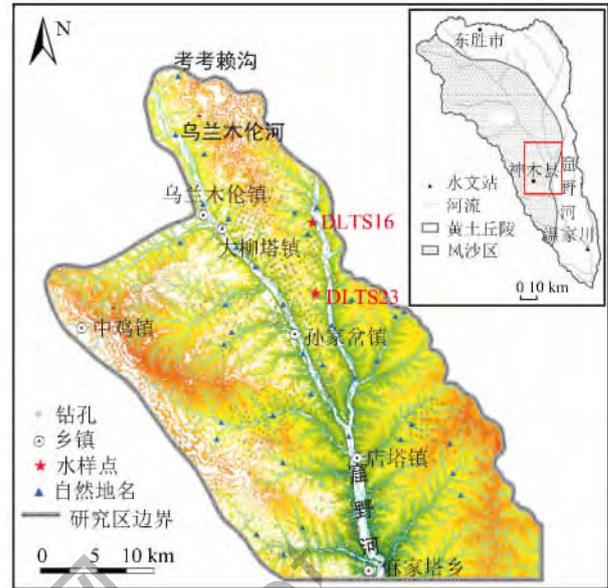


图 1 研究区地理位置

Fig. 1. Location of study area

度较低,弱胶结,大孔隙,渗透性良好(图 2)。萨拉乌苏组在研究区内广泛分布,厚度和距煤层顶板间距受控于沟壑起伏的侏罗系顶面古地形。凹凸不平的侏罗系顶面,造成了萨拉乌苏组含水层多以局部小型地下水盆地形式存在为主要特征。崔邦军等将神木北部窟野河中下游研究区的萨拉乌苏组含水层划分为 5 个地下水含水盆地,即柳根沟泉域、哈拉沟泉域、饮马泉泉域(图 3)、柠条塔泉群、红柳林井田的常家沟泉域<sup>[14]</sup>。其中饮马泉泉域萨拉乌苏组从 0 m 在 4 km<sup>2</sup>内增至 67.04 m,该泉域瓷窑湾煤矿 1990 年巷道掘进发生突水溃沙,也成为“保水采煤”观点的孕育处。



图 2 萨拉乌苏组露头

Fig. 2 Outcrop of Salawusu Formation

### 1.2 延安组含水层

沉积环境对砂体含水层空间分布起着控制作用,砂体既是油气资源聚集运移的良好储层和通道,同时也是地下水良好储层和循环通道。谢渊等在鄂尔

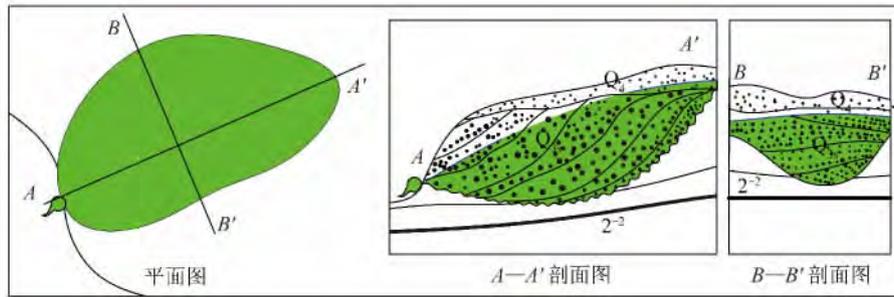


图 3 瓷窑湾地段萨拉乌苏组地下水盆地

Fig. 3 Groundwater basin of Salawusu Formation in Ciyaowan

多斯盆地白垩系地下水勘查中,基于沉积学、水文地质学、油气储层地质学等研究地下水赋存和循环条件时提出了“含水层沉积学”<sup>[15]</sup>。岩性的分布、岩石结构构造特征、孔隙的发育特征、孔吼道的连通性、储水性和导水能力都受到沉积环境的控制,沉积环境间接控制着含水层的发育、空间展布,地下水赋存条件以及地下水的形成和分布。

研究区地处鄂尔多斯盆地东北缘,位于盆地次级构造单元——陕北斜坡上,延安组为本区的侏罗系含煤地层。延安组的沉积环境主要包括曲流河、湖泊、湖泊三角洲三大组合。侏罗纪早期以河流环境为主,随着时间的推移河流影响的范围逐渐缩小,延安组沉积中期地壳沉降,积水而形成湖泊三角洲,河流作用减弱,延安组沉积晚期整体隆起,河流环境再度占据支配地位<sup>[16]</sup>。

延安组含水层,据其岩性组合和开采煤层,大致可划分为 5 个含水层段,属于碎屑岩孔-裂隙水含水层,主要受河道相控制,如图 4 所示,延安组第五段地下水含水层顺着河道相底界出露。延安组各含水层为弱含水层,水量较小,矿化度多为 0.2~0.5 g/L。

## 2 地下水补径排模式和循环特征

### 2.1 地下水补径排模式

延安组含水层多为弱富水性,水量较小,但是在研究区何家塔井田内发现民用机井 DLTS23(图 1)水



图 4 乌兰木伦河东岸延安组第 5 段河道相地下水出露

Fig. 4 Groundwater outcrop of fluvial facies in the section of Yan'an 5<sup>th</sup>

量较大,可供 3 个鱼塘以及 1 hm<sup>2</sup>地菜园用水,而相距 200 多米处相同层位取水的机井,涌水量小,水质也差。延安组含水层受沉积相控制,非均质性较强。DLTS16 水样,层位与 DLTS23 相同,但水质明显较差,是典型的延安组水质特征(表 1)。DLTS23 接近地表水、萨拉乌苏组地下水。从水量和水质角度推断河道相砂体形成了局部承压水。

表 1 水样信息

Table 1 Information of water sample

水样 编号	井口标 高/m	井深/m	层位	矿化度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	离子质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )				
					Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
DLTS16	1 093	53	5 <sup>-2</sup> 煤上	675	66.50	269	87.3	13.10	92.3
DLTS23	1 188	130	5 <sup>-2</sup> 煤上	314	3.97	181	58.8	9.34	7.9

图 5 为地下水补径排循环模式。研究区地下水补给来源主要为大气降水和风积沙凝结水。沙盖地

貌因沙地入渗系数高达 0.5,地下水资源较黄土地貌丰富。降雨除了部分直接补给地表水外,大部分补给

潜水含水层。潜水含水层如萨拉乌苏组等受地形控制,向河谷地区补给,在烧变岩发育地带,补给烧变岩含水层,最终形成泉流,补给地表水或直接被人工利用。

在萨拉乌苏组与延安组直接接触的“天窗”构造发育处或延安组露头一带,地下水发生越流补给,延安组含水层地下水得到大气降水补给。

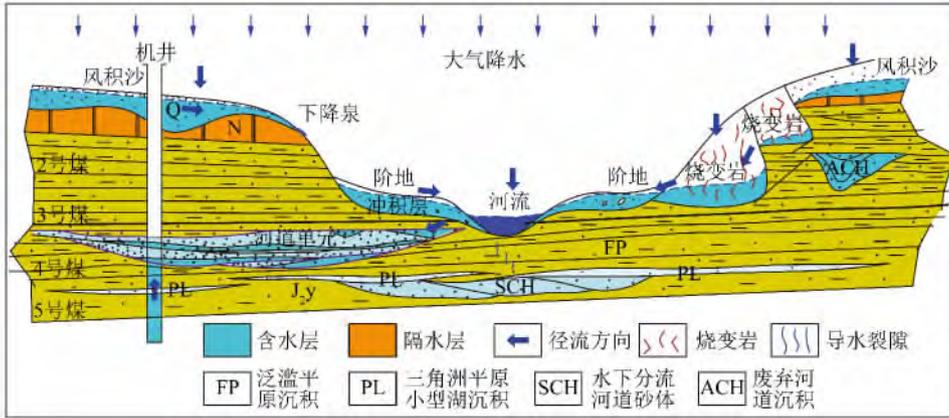


图 5 地下水补径排循环模式

Fig. 5 Groundwater circulation model

新构造运动不仅控制着地貌的发育,同时新构造运动形成的裂隙也是良好的导水通道。沟谷处发育的新构造裂隙沟通地表水体,与河道单元砂体,形成良好的承压含水层,研究区 3<sup>-1</sup>煤层以下延安组含水层均为承压水含水层。

2.2 采前地下水循环特征

延安组岩性非均质性较强,部分地区存在 5 个以上含水层段。由于沟壑地貌发育,沟谷地段延安组出露。煤炭开采主要影响所采煤层以上含水层结构。为此依据地貌与煤层赋存特征将地下水循环分为 3 类:山间地下水循环、区域地下水循环以及介于两者之间的过渡循环。随着开采煤层埋藏层位的加深,地下水也由山间地下水循环逐渐转换为区域地下水循环(图 6)。

浅部煤层开采导水裂隙带多数直接导通地表,随着部分基岩裂隙的闭合,黏土隔水层因其良好的塑性,隔水性部分恢复。因此,采煤后地下水水位初期下降明显,开采强度不大的情况下,采空区稳定后 10 a 内,地下水水位有所恢复,但是隔水层的破坏使得潜水含水盆地汇水面积减小,地下水短时间内无法恢复到采前状态。范立民等对双沟泉域长期跟踪调查发现,经过 10 a 时间恢复,2006 年 7 月该泉域地下水恢复到煤炭开采前的 20% 左右<sup>[17]</sup>,但由于 2006 年之后的高强度开采区域扩大,2011 年 8 月、2013 年 7 月实地调查,该泉域已经完全干涸。

原始分水岭下压煤层开采后形成的采空区形成人工“溯源侵蚀”,袭夺了相邻水文地质单元地下水,使相邻水地质单元汇水面积减小。袭夺来的水源顺着开采裂缝渗入井下,形成矿井水<sup>[18]</sup>。从某种角度说,煤层开采的裂缝发育区,地下水补给量增加,蒸发量减少。窟野河东岸采空区地下水最终出露补给地表水,西岸形成“类烧变岩”单斜孔隙裂隙含水层,当储存体(含水层)的水位达到侵蚀基准面时,地下水溢出,形成泉,补给窟野河,转换为地表水。

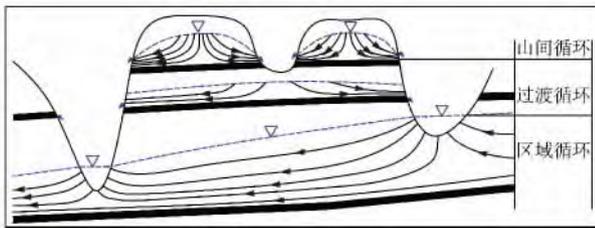


图 6 地下水循环划分示意

Fig. 6 Partition of groundwater circulation

3 采后地下水循环特征

3.1 浅部煤层开采对地下水的影响分析

浅部煤层开采是指所开采区的煤层露头较多,发育有火烧区的煤层,开采活动主要发生在局部侵蚀基准面以上。这些煤层上覆含水层地下水为山间循环以及部分过渡循环。

3.2 深部煤层开采对地下水循环的影响分析

深部煤层即地下水区域循环以及部分过渡循环含水层岩组下伏煤层。采矿活动主要发生在局部侵蚀基准面之下,如 4 号和 5 号煤层。延安组第 1 段 5 号煤层全区分布,调查的 95 个矿山 90% 以上可采,平均厚度 5.11 m,4 号煤层平均厚度 3.09 m,76% 以上矿山全区可采。

研究区孙家岔等地区,部分矿区煤层开采层数达到 9 层,如龙华煤矿,可采煤层 1<sup>-2</sup> (3.08 m),2<sup>-2±</sup>

(3.78 m)  $2^{-2}$  (4.32 m)  $3^{-1}$  (2.88 m)  $4^{-2\pm}$  (1.12 m)  $4^{-2}$  (0.76 m)  $4^{-3}$  (0.86 m)  $5^{-1}$  (1.69 m)  $5^{-2}$  (2.86 m)。多煤层开采区上潜水层含水盆地底部黏土隔水层多次受采煤扰动,黏土隔水区不断缩小,尽管部分地区仍形成含水盆地,但其蓄水性能大幅减弱,稳定性逐渐变差,部分遗存潜水盆地消亡。

深部煤层开采,导致上覆含水层仅小范围内存在侧向径流,大部分垂向渗透、漏失,  $5^{-2}$  煤层底板将成为区内最终隔水层。

煤层底板高程主要受构造控制,研究区位于鄂尔多斯台向斜宽缓的东翼陕北斜坡上,倾角小于  $3^\circ$ ,大致走向为 NE—SW 向;区内断层数量较少,以正断层为主,断距多小于 20 m,导通性较差。此外煤炭从泥炭堆积到成煤变质其沉积底界面、沉积环境以及成煤期间的构造运动,对煤层底板高程的影响也是不可忽视的。笔者统计了近 400 个钻孔资料利用 SURFER 绘制了  $5^{-2}$  煤层底板等高线(图 7)。

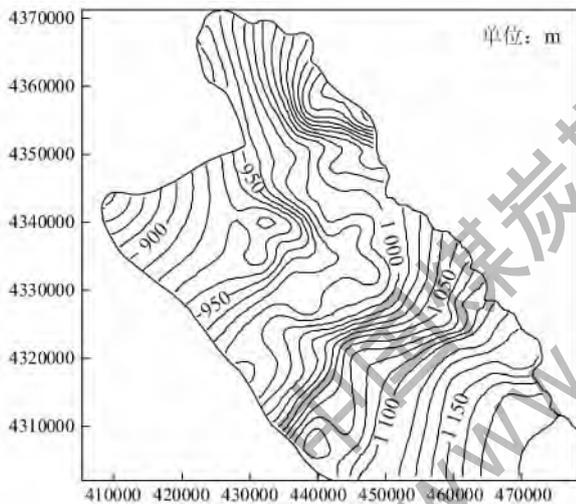


图 7  $5^{-2}$  煤层底板等高线

Fig. 7 Contour map of  $5^{-2}$  coal-seam floor

煤层底板高程大致从 SE 向 NW 由 1 180 m 降至 860 m 左右。研究区中部底板高程小凹,局部地区存在约 20 m 的小型封闭凹陷,总体趋势平缓。

图 8 为地表与  $5^{-2}$  煤层底板关系,从图 8 可以看出,仅仅在南部地区可能存在地下水出露形成局部地表水以外,地表径流基本消失,溪流干涸,影响矿区植被生长<sup>[18-19]</sup>。

潜水含水层由原来主要受地形控制的侧向径流转变为顺着导水裂隙垂直渗透补给延安组第 4 段含水层段。地表水得不到潜水和部分延安组含水层段补给,并且大部分转化为地下水。地下水径流方向顺着  $5^{-2}$  煤层底板,自东向西,由南部两端向中部汇聚。

窟野河在该段径流量大幅减小,水土流失加剧,

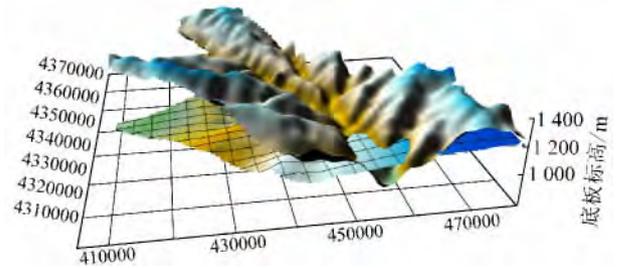


图 8 地表与  $5^{-2}$  煤层底板相对位置

Fig. 8 Relative location of ground and  $5^{-2}$  coal-seam floor

这也是 2002 年以来神木县城以上窟野河断流的原因。

## 4 结 论

(1) 2001 年以来,陕北开始禁牧,降雨量也处于高峰期,以及煤矿企业对环境治理力度加大,陕北矿山植被得到了改善。部分学者提出陕北植被与大气降水关系密切,但这并不能掩盖采煤对地下水循环的影响。

(2) 采煤前,萨拉乌苏组含水层为主要潜水含水层,分水岭与地表水基本一致,径流方向受地形控制,多以孤立地下水盆地形式存在,沟谷处形成泉流补给地表水。延安组含水层富水性明显受沉积相控制,变化较大。在延安组地层出露地区或“天窗”发育区,延安组含水层段接受补给顺着地层倾角,由东向西沿着河道砂体径流。局部地区,河道相砂体导通地表水形成局部承压水。

(3) 浅部开采活动主要扰动了潜水含水层,黏土隔水层部分破坏,潜水含水层盆地汇水面积减小。含水盆地边缘,煤层开采造成人为“溯源侵蚀”,袭夺了其他水文地质单元的地下水资源。浅部煤层的开采破坏了浅部含水层,增加了地下水的补给来源。

(4) 深部煤层,分布广、煤厚大,对上覆煤层多次扰动后,潜水盆地几乎消失,延安组各含水层段地下水漏失,最终顺着  $5^{-2}$  煤层底板流动。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 彭苏萍. 中国煤炭资源开发与环境保护[J]. 科技导报, 2009(17): 3.  
Peng Suping. China coal resource exploitation and environment protection[J]. Science and Technology Review, 2009(17): 3.
- [3] 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 sus-

- tainable development of northern Shaanxi coal resources [J]. *Coal Geology of China* 2003, 15(5):6-8, 11.
- [4] 范立民. 论保水采煤问题[J]. *煤田地质与勘探* 2005, 33(5):50-53.  
Fan Limin. Discussing on coal mining under water-containing condition [J]. *Coal Geology & Exploration* 2005, 33(5):50-53.
- [5] 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.
- [6] 缪协兴, 王安, 孙亚军, 等. 干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究[J]. *岩石力学与工程学报* 2009, 28(2):217-227.  
Miao Xiexing, Wang An, Sun Yajun, et al. Research on basic theory of mining with water resources protection and its application to arid and semi-arid mining areas [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2009, 28(2):217-227.
- [7] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J]. *煤炭学报* 2007, 32(6):561-564.  
Miao Xiexing, Chen Ronghua, Bai Haibo. Fundamental concepts and mechanical analysis of water-resisting key strata in water-preserved mining [J]. *Journal of China Coal Society* 2007, 32(6):561-564.
- [8] 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.
- [9] 范立民, 蒋泽泉. 烧变岩地下水的形成及保水采煤新思路[J]. *煤炭工程* 2006(4):40-41.  
Fan Limin, Jiang Zequan. Groundwater formation and new ideas for water coal mining of burnt rocks [J]. *Coal Engineering* 2006(4):40-41.
- [10] 叶贵钧, 张莱, 李文平, 等. 陕北榆神府矿区煤炭资源开发主要水环问题及防治对策[J]. *工程地质学报* 2000(4):446-455.  
Ye Guijun, Zhang Lai, Li Wenping, et al. The main hydro-engineering-environmental-geological problems arose from the exploitation of coal resource in Yu-Shen-Fu mine area of Northern Shaanxi and their prevention measures [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000(4):446-455.
- [11] 李文平, 叶贵钧, 张莱, 等. 陕北榆神府矿区保水采煤工程的地质条件研究[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.
- [12] 范立民, 牛建国, 蒋泽泉, 等. 神府煤田浅层地下水的开发与利用[J]. *中国煤田地质* 1996, 8(1):32-36.  
Fan Limin, Niu Jianguo, Jiang Zequan, et al. The development and utilization of shallow groundwater in Shenfu coal field [J]. *Coal Geology of China* 1996, 8(1):32-36.
- [13] 刘显娇, 李宝生, 靳 Heling, 等. 沉积特征及成因的萨拉乌苏组白垩系含煤岩系沉积学初探[J]. *地质通报* 2003, 22(10):818-828.  
Ou Xianjiao, Li Baosheng, Jin Heling, et al. Sedimentary characteristics of paleo-aeolian dune sands of Salawusu Formation in the Salawusu River Valley [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006(9):965-975.
- [14] 崔邦军, 王西泉, 蒋泽泉. 榆神府矿区萨拉乌苏组的水文地质条件分析[J]. *地下水* 2011, 33(4):93-95.  
Cui Bangjun, Wang Xiquan, Jiang Zequan. Analysis of hydro-geologic conditions of Salawusu Formation in Yushenfu coal area [J]. *Groundwater* 2011, 33(4):93-95.
- [15] 谢渊, 王剑, 殷跃平, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系含水层沉积学初探[J]. *地质通报* 2003, 22(10):818-828.  
Xie Yuan, Wang Jian, Yin Yueping, et al. Sedimentology of cretaceous aquifers in the Ordos Basin [J]. *Geology Bulletin of China*, 2003, 22(10):818-828.
- [16] 钱丽君, 白清昭, 熊存卫, 等. 陕西北部侏罗纪含煤地层及聚煤特征[M]. 西安:西北大学出版社, 1987.
- [17] 范立民, 王双明, 马雄德. 保水采煤新思路的典型实例[J]. *矿业安全与环保* 2009, 36(1):61-62, 65.  
Fan Limin, Wang Shuangming, Ma Xiongde. A typical example of new thinking for water conservation and coal mining [J]. *Mining Safety and Environmental Protection* 2009, 36(1):61-62, 65.
- [18] 常金源, 李文平, 李涛, 等. 干旱矿区水资源迁移与“保水采煤”思路探讨[J]. *采矿与安全工程学报* 2014, 31(1):72-77, 83.  
Chang Jinyuan, Li Wenping, Li Tao, et al. Water migration in arid mining area and thought of “water preserved mining” [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering* 2014, 31(1):72-77, 83.
- [19] 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.