邯邢矿区岩溶水资源优化配置研究

尹尚先[1,2],韩 永[1,2],常浩宇[1,2],郭均中[1,2],张祥维[1,2]
(1. 华北科技学院 河北省矿井灾害防治重点实验室,北京 101601; 2. 华北科技学院 安全工程学院,北京 101601)

摘 要: 为改变邯邢矿区岩溶水位持续下降、降落漏斗不断扩大的现状,实现泉水复涌,首先通过区域岩溶水资源的调查与供需平衡分析,得出泉水断流的主要原因是开采量大于补给量;其次,以岩溶地下水系统模型为基础,通过模拟预测表明:如果保持现有系统补给量与开采量不变,岩溶水水位仍将不断下降、达活泉及百泉断流、水生态环境持续恶化。为此,应用水资源区域配置的理念,建立了以百泉泉域水环境持续好转为目标的水资源管理模型,在邢台市区生活用水、农业用水基本保持不变,以及百泉泉域总开采量小于总补给量等约束条件下,解算得到了总用水量减少 0.591 m^3/s、泉域总补给量减去总开采量盈余 0.29 m^3/s 的优化供水方案。通过模型模拟预测,按照此优化方案,泉域水位逐步恢复,10 年后百泉和达活泉泉水重新复涌。

关键词: 邯邢矿区;岩溶水资源;优化配置;水环境;水资源保护利用
中图分类号: TD745;TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)08-0029-06

Study on optimal allocation of karst water resources in Hanxing Mining Area

Yin Shangxian[1,2],Han Yong[1,2],Chang Haoyu[1,2],Guo Junzhong[1,2],Zhang Xiangwei[1,2]
(1. *Hebei Provincial Key Lab of Mine Disaster Prevention and Control,North China Institute of Science and Technology,Beijing* 101601,*China*;
2. *School of Safety Engineering,North China Institute of Science and Technology,Beijing* 101601,*China*)

Abstract: In order to change the karst water table continuous drop and the drop hopper continuously expanded status in Hanxing Mining Area and to realize the spring re-gushing,firstly with the investigation and the supply and demand balance analysis on the regional karst water resources,the main causes of the spring no-flow were the water mining value higher than the refilling volume. Secondary,based on the karst underground water system model as the basis,the simulation prediction showed that if the refilling volume of the available system retained and the mining volume unchanged,the karst water table would be continuously dropped,the Huo spring and the Bai Spring would be no water flow and the water ecologic environment would be continuously worst. Therefore,with the idea of the water resource regional allocation,a water resources management model was established to keep the water environment of Baiquan spring region continuously getting better as the target. The domestic water in Xingtai downtown and the agriculture water would be kept no change. As well as the total mining volume of the water in Baiquan Area was less than the total refilling volume and other restriction conditions,the calculation showed that the optimized water supply plan was obtained with the total water consumption volume reduced by 0.591 m^3/s and the total refilling volume of Baiquan Area with a surplus of 0.29 m^3/s and with the minus of the total mining volume. With the model simulation prediction,according to the optimized plan,the underground water table in the spring area would be steadily recovered and after 10 years,Baiquan and Dahuoquan spring water would be re-inflow.

Key words: Hanxing Mining Area; karst water resources; optimal allocation; water environment; water resource protection and utilization

0 引 言

我国水资源匮乏,而矿产开发又不得不排放水资源,全国煤矿每年排水达 71.7 亿 m^3,即每生产 1 t 煤需要排水 2.04 m^3,使矿区水资源短缺与经济社会发展的矛盾日益突出[1],水资源短缺危机已经成

收稿日期: 2016-06-10;**责任编辑:** 杨正凯 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.08.005
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B04);中央高校科研业务专项资金资助项目(3142015019)
作者简介: 尹尚先(1964—),男,山西朔州人,教授。Tel:010-61590331,E-mail:yinshx03@126.com
引用格式: 尹尚先,韩 永,常浩宇,等.邯邢矿区岩溶水资源优化配置研究[J].煤炭科学技术,2016,44(8):29-34.
Yin Shangxian,Han Yong,Chang Haoyu,*et al*.Study on optimal allocation of karst water resources in Hanxing Mining Area[J].Coal Science and Technology,2016,44(8):29-34.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

为我国矿区可持续发展的重要制约因素。同世界各国发展历程相似[2-4]，我国矿井水资源化走过了漫长而艰辛的探索之路。早期矿井水直排; 迫于环境压力或为缓解矿区缺水，水处理技术被引入并不断发展[5-8]; 为合理利用矿井水，提出了排供结合[9-10]; 目前，矿井水资源化已经从矿区拓展到泉域[11-13]，从资源综合利用发展到优化配置与管理[14-16]，从理论到实践均有所探索。20 世纪 80 年代以后，随着邯邢地区社会经济的迅速发展和城市化程度的提高，铁矿及煤矿排水、农业生产生活用水、城市生活用水和工业用水等日益增多[17]; 而同时期降雨减少，水库截流，导致泉域接受降雨补给量明显减少，最终导致岩溶水严重超采。百泉涌水量则逐年减少，达活泉、百泉分别于 1981 年和 1986 年相继断流，之后的 20 年间基本处于停喷状态，伴随的环境水文地质问题日益突出，主要包括: 泉水断流、地下水位下降与漏斗扩展、浅层取水困难、地面下沉、地下水水质恶化和地下水污染等。因此，如何实现矿区开发与水生态协调发展是亟待解决的重大问题。

1　矿区水资源量供需平衡分析

矿区水资源供需平衡计算与分析是指在矿区一定区域范围内，就水资源的供给与需求，以及它们之间的余缺关系进行计算与分析的过程。依据矿区条件，建立以下均衡关系:

$$Q_b - Q_k = \Delta Q$$

$$Q_b = Q_{jb} + Q_{hb} + Q_{ks}$$

式中: Q_b为计算时段内均衡区岩溶水补给量，m^3/s; Q_k为计算时段内均衡区岩溶水开采量，m^3/s; ΔQ 为岩溶水计算时段的变化量，m^3/s; Q_{jb}为降水入渗补给量，m^3/s; Q_{hb}为河谷渗漏补给量，m^3/s; Q_{ks}为矿山排水回渗补给量，m^3/s。

1.1　泉域岩溶水资源补给量

百泉泉域面积约为 3 843 km^2，受构造和地层岩性所控制，天然条件下地下水径流总的趋势由北西、西、西南向百泉泉群和达活泉泉群汇集，自北而南形成了白马河、七里河、沙河、北洺河 4 个强径流带(图 1)。

百泉泉域岩溶水的天然水资源主要由两部分组成: 西部灰岩裸露区大气降水直接入渗补给以及河流渗漏补给。采用大气降水综合入渗系数法计算，百泉泉域年平均补给量为 3.82 m^3/s。

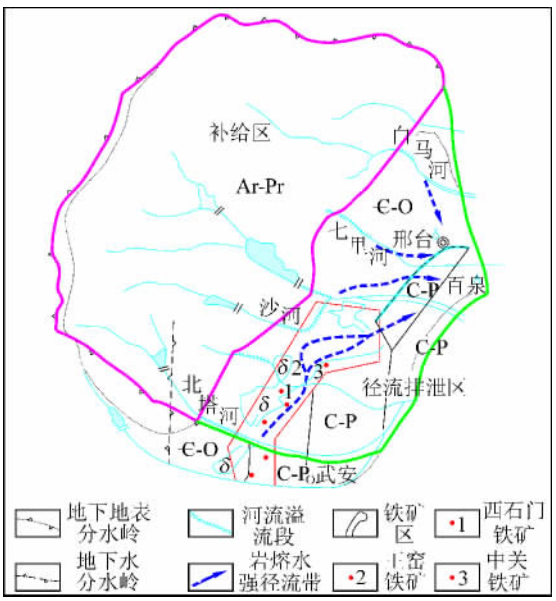


图 1　百泉泉域岩溶水系统示意

Fig. 1　Ordovician karstified limestone groundwater in Xingtai region

在河流渗漏段，除雨季外，其他季节无表流。因此河流渗漏补给量主要为水库放水渗漏，采用实测的渗漏系数计算河流渗漏补给量为 1.45 m^3/s。采用调查实测方法，得到矿山排水回渗补给量为 0.59 m^3/s。因此，岩溶水总补给量为 5.86 m^3/s。

1.2　泉域岩溶水资源开采量

据调查统计，百泉泉域岩溶水总的开采量为 6.17 m^3/s，其中铁矿开采排水 2.56 m^3/s(邢台沙河铁矿区为 1.46 m^3/s，邯郸武安矿区为 1.10 m^3/s); 煤矿开采下组煤排水 0.99 m^3/s(邢台煤矿区为 0.03 m^3/s，邯郸煤矿区为 0.069 m^3/s); 矿区生活用水 0.224 m^3/s; 邢台市区用水为 2.485 m^3/s; 百泉泉域农村生产生活用水 0.793 m^3/s。

1.3　泉域水生态现状

上述统计分析表明，百泉泉域岩溶水总的开采量为 6.17 m^3/s，而平均补给量为 5.86 m^3/s，开采量大于补给量，泉域整体处于长期入不敷出的状态，岩溶水水位不断下降、达活泉及百泉断流、水生态环境持续恶化在所难免。近年来，由于开采强度不均匀，采矿和城市的集中排、供水，形成了大小不等的 11 个岩溶水漏斗区(图 2)。

2　泉域岩溶水系统动态趋势分析

百泉流域径流区和排泄区为研究范围，依据实际条件进行岩溶水系统概化，建立系统的水文地质

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

概念模型。将补给区的降水补给量转化为径流区和排泄区的流量补给边界的流量(图 3) 。为解决岩溶区域的不均一性,依据水动力条件将模拟区划分为 7 个近似均质的分区,记作 1—7。

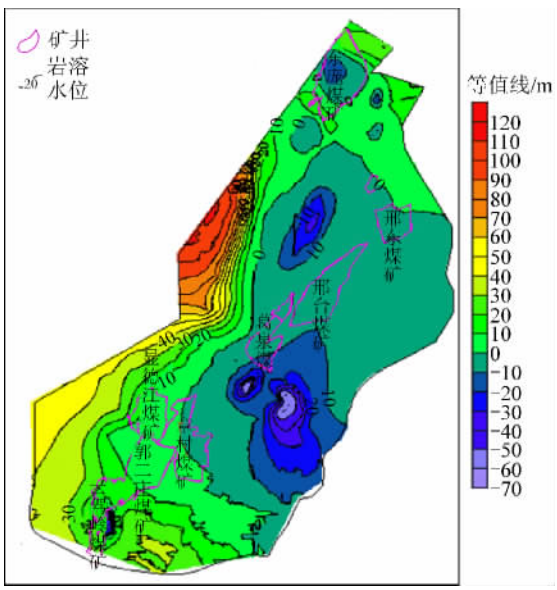


图 2　百泉径流排泄区岩溶水水位等值线

Fig. 2　Contour map of piezometric levels in the Ordovician karstified aquifer at Baiquan area

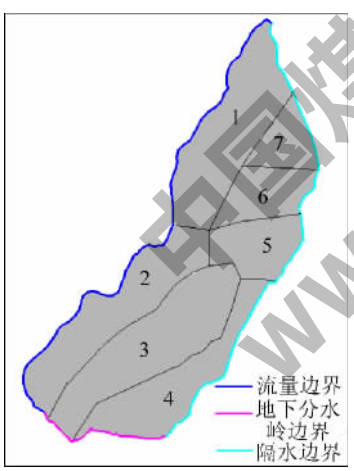


图 3　研究区奥灰含水层边界条件和分区

Fig. 3　Hydrogeological boundaries and zonation of the Ordovician limestone aquifer in the numerical modeling

2.1　泉域岩溶水系统模型

依据上述水文地质概念模型,即得二维非均质、各向异性、承压、非稳定地下水流的数学模型,可用下列方程式来描述,即:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T\frac{\partial H}{\partial y}\right)+W=S\frac{\partial H}{\partial t}$$

$$(x,y)\in D,t>0 \qquad (1)$$

$$H(x,y,t)=H_0(x,y) \quad (x,y)\in\overline{D},t=0 \qquad (2)$$

$$T\frac{\partial H}{\partial x}\cos(n,x)+T\frac{\partial H}{\partial y}\cos(n,y)\mid_{\Gamma_2}=q_2(x,y,t)$$

$$(x,y)\in\Gamma_2,t>0 \qquad (3)$$

其中: H 为地下水水头,m; T 为导水系数,m^2/d; x,y 均为直角坐标系的坐标; t 为时间,d; S 为贮水系数; D 为研究区域; Γ_2 为第二类边界; $\overline{D}=D\cap\Gamma$ 为包含边界的研究区域; $H_0(x,y)$ 为初始水头,m; $q(x,y,t)$ 为第二类边界单位宽度上的流量分布,$m^3/d\cdot m$; W 为源汇项,包括从井中抽水、越流补给、蒸发、降雨入渗、人工回灌等,它一般是位置和时间的函数。

2.2　参数识别结果

利用研究区内 2007 年 1 月至 2012 年 7 月(划分为 23 个时间段) 5 个地下水动态观测点(分布在东庞矿、葛泉矿、显德汪矿、邢台矿、章村矿,基本上控制了区域地下水水位) 的数据,进行拟合反演参数。

根据研究区水文地质条件和抽水试验给出各区参数的初值和变化范围,不断对 7 个分区的 T 和 S 调整,重点拟合 4 个奥灰观测孔水位,确定拟合参数的合理区间。经过反复多次的调参运行,直至得到比较满意的拟合效果(图 4) ,确定各分区参数(表 1) 。

不同分区的导水系数有较大区别,变化范围为 169.71 ~ 929.23 m^2/d,体现了岩溶介质的非均质性。受断裂和构造发育的影响,3、5 和 6 区的导水系数较大。不同分区贮水系数也不同,6 区贮水系数最大,为 7.53×10^{-4}; 5 区贮水系数最小,为 4.26×10^{-8}。总体上看,模拟得出的水文地质参数与抽水试验得到的参数具有一致性,导水系数和贮水系数较为合理。

表 1　模型参数分区拟合结果

Table 1　Fitting results of parameters in the model

参数分区	T/ ($m^2\cdot d^{-1}$)	贮水系数
1	210.43	4.03×10^{-6}
2	169.71	1.91×10^{-5}
3	667.95	1.84×10^{-5}
4	410.47	7.73×10^{-7}
5	829.23	4.26×10^{-8}
6	516.45	7.53×10^{-4}
7	186.97	4.62×10^{-6}

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

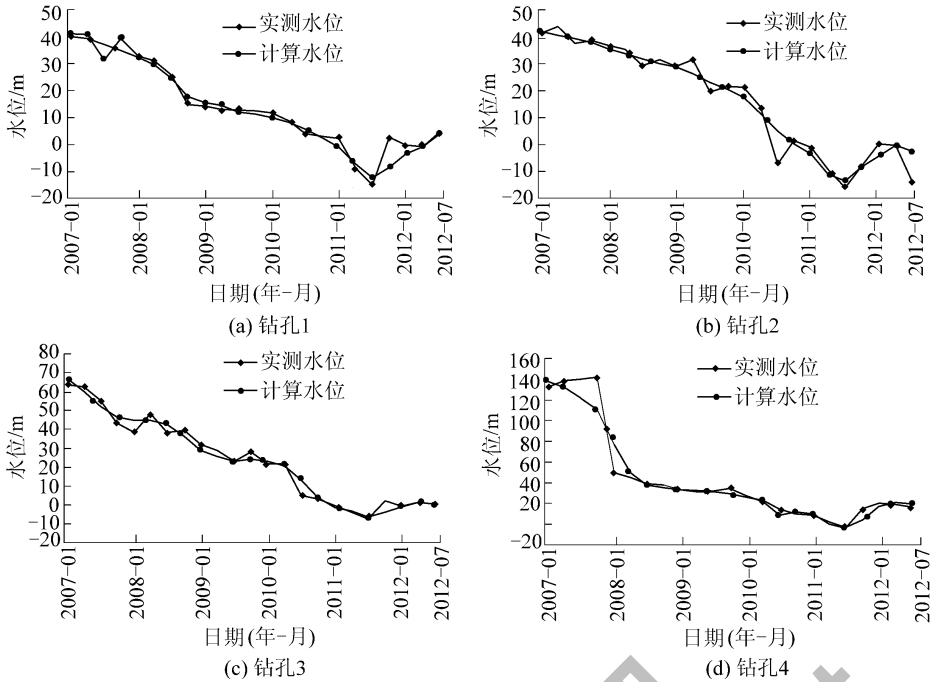


图 4　模拟水位和实测水位拟合曲线

Fig. 4　Curves fitting between the simulated and measured piezometric levels

2.3　泉域水系统趋势预测

若不采取积极的措施，即维持目前的开采量与补给量现状，运行经过反演校正的模型，预测十年后煤矿区、铁矿区以及邢台市大型企业的集中供水区域内的地下水降落漏斗持续扩大，泉域内岩溶水环境将持续恶化(图 5)。

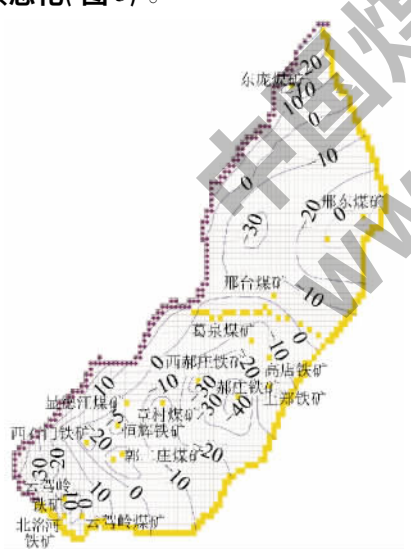


图 5　维持现状 10 年后岩溶水等水位线

Fig. 5　Phreatic water contour of Ordovician limestone aquifer after a decade maintain the status quo

3　泉域水资源优化配置

针对百泉岩溶水环境现状及发展趋势，拟通过泉域水资源综合利用及优化配置，并采取相应恢复治理措施，达到百泉泉域岩溶地下水位不断上升、水环境持续好转的目标。

3.1　矿区水资源优化配置总体思路

为实现百泉泉域水环境持续好转的总目标，拟定总体水资源优化配置的思路是，在未来十年内，邢台市区生活用水、农业用水基本保持不变，控制铁矿区排水总量[18]，减少邢台市区取用岩溶水的量，减少部分由铁矿区调水补充邢台市区供水，减少煤矿区总排水量，控制煤矿区集中排水点(陷落柱等特大突水)[19-20]，达到百泉泉域总用水量小于总补给量，使泉域水位逐步恢复，百泉、达活泉泉水重新复涌。

3.2　泉域水资源优化配置模型及优化方案

依据上述总体优化思路，总体发展目标是综合效益最大，建立岩溶水资源优化配置管理模型：

$$\max\ [f_1(X), f_2(X), f_3(X)]$$

$$G_i(X) \leqslant 0 (i = 1, 2, \cdots, m)$$

$$X \geqslant 0$$

式中：$f_1(X)$，$f_2(X)$，$f_3(X)$ 为效益函数；X 为决策函数，决策变量向量；$G_i(X)$ 为约束条件集。

用单纯形方法求解上述管理模型，得到优化方案(表 2)：泉域总用水量消减到总补给量 $\sum Q$ 的 95%为总目标，$\sum Q = 5.57\ \mathrm{m^3/s}$，铁矿区减少排水

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

10%左右,此外沙河铁矿区调水 0.335 m^3/s 满足邢台市区供水 $Q_3=2.485$ m^3/s 的总量不变; 煤矿排水量 $Q_4=0.32$ m^3/s、农业用水量 $Q_5=0.8$ m^3/s,基本保持不变。优化后总用水量减少 0.591 m^3/s。

表 2　泉域水资源优化方案

Table 2　Optimization scheme of water resources in spring region

用水户	现状用水量/($m^3\cdot s^{-1}$)	优化用水量/($m^3\cdot s^{-1}$)	减少用水量/($m^3\cdot s^{-1}$)
邢台沙河铁矿区	1.460	1.30	0.160
邯郸武安铁矿区	1.100	1.00	0.100
邢台城市生活	2.485	2.15	0.335
煤矿区	0.323	0.32	0.003
农业	0.793	0.80	−0.007
合计	6.161	5.57	0.591

按照优化后的供水方案,运行数值模型,十年后的水位如图 6 所示,水位全面恢复到标高 0 以上,高于百泉达活泉地面标高,表明泉水复涌; 虽然还有 5 个大的漏斗区域,但漏斗比较平缓,漏斗中心水位大幅抬升; 水环境明显改善。

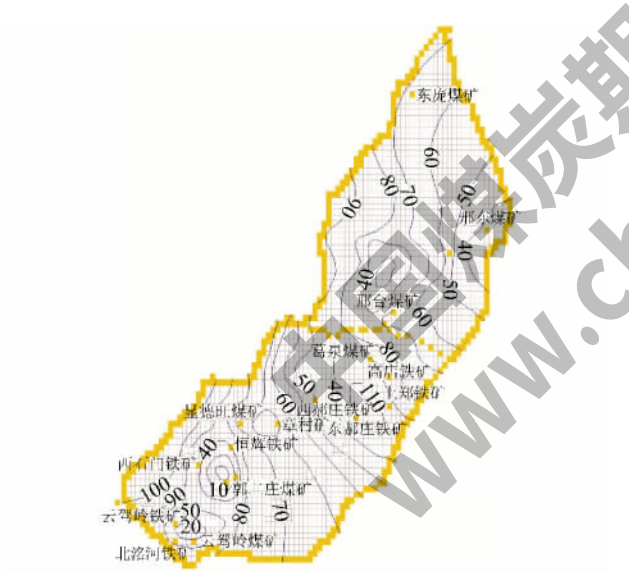


图 6　优化方案 10 年后岩溶水等水位线

Fig. 6　Phreatic water contour of the Ordovician limestone aquifer after a decade with scheme optimization

4　结　　论

1) 通过区域岩溶水资源的调查与供需平衡分析,百泉泉域水资源总开采量大于总补给量; 通过建立岩溶地下水系统模型模拟预测,如果保持现有系统补给量与开采量不变,岩溶水水位仍将不断下降、降落漏斗持续扩大、水生态环境继续恶化。

2) 针对百泉岩溶水环境现状及发展趋势,应用水资源区域配置的理念,建立了以百泉泉域水环境持续好转为目标的水资源管理模型,在邢台市区生活用水、农业用水基本保持不变,以及百泉泉域总用水量小于总补给量等约束条件下,解算得到了总用水量减少 0.591 m^3/s、泉域总补给量减去总用水量盈余 0.29 m^3/s 的优化供水方案。

3) 按照此优化方案运行,即,铁矿区共排水 2.3 m^3/s,沙河铁矿区调水 0.335 m^3/s 满足邢台市区供水 2.485 m^3/s 的总量不变,煤矿排水量和农业用水量基本维持不变,通过模型模拟预测,泉域水位将逐步恢复,十年后百泉和达活泉泉水重新复涌。

参考文献(References) :

[1] 华北科技学院.全国煤矿水文地质类型划分结果统计分析报告[R].廊坊: 华北科技学院,2012.

[2] Bums N.水资源科学分配[M].戴国瑞,冯尚友,译.北京: 水利水电出版社,1983.

[3] Warren Viessman. Water management: challenge and opportunity [J].Journal of Water Resources Planning and Management,1990,116(2): 557-571.

[4] Bernhard L,Beroggi G E G,Moens M R.Sustainable water management through flexible method management [J].Water Resources Management,2000(14):473-495.

[5] 何绪文,肖宝清,王　平.废水处理与矿井水资源化[M].北京: 煤炭工业出版社,2002.

[6] 武　强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
Wu Qiang.Progress,problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China [J].Journal of China Coal Society,2014,39(5):795-805.

[7] 何绪文,杨　静,邵立南.我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J].煤炭学报,2008,33(1):225-230.
He Xuwen,Yang Jing,Shao Linan.Problem and countermeasure of mine water resource regeneration in China [J].Journal of China Coal Society,2008,33(1):225-230.

[8] 姬亚东.陕北煤矿区矿井水资源化及综合利用研究[J].地下水,2009,31(1): 84-90.
Ji Yadong.Study on Comprehensive Utilization of Coal Mine Water Resources in the Coal Mine area of North Shaanxi [J].Underground Water,2009,31(1): 84-90.

[9] 王梦玉.矿井防治水和水资源管理研究论文选集[M].北京: 煤炭工业出版社,2011.

[10] 尹尚先.试论矿井水资源化与矿区水资源优化配置[J].华北科技学院学报,2012(1):6-10.
Yin Shangxian.on mine water resources and the optimal allocation of water in mining area [J].Journal of North China Institute of

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

Science and Technology,2012(1):6-10

[11] Yin Shangxian,Zhang Jincai.Impacts of karst paleo-sinkholes on mining and environment in northern China [J].Environmental Geology,2005,48: 1077-1083

[12] 范立民,马雄德,冀瑞君.西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J].煤炭学报,2015,40(8): 1711-1717.
Fan Limin,Ma Xiongde,Ji Ruijun.Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area [J].Journal of China Coal Society,2015,40(8): 1711-1717.

[13] 尹尚先,徐　斌,徐　慧,等.综采条件下煤层顶板导水裂缝带发育高度研究[J].煤炭科学技术,2013,41(9):138-142.
Yin Shangxian,Xu Bin,Xu Hui,*et al*.Study on location prediction of paleo-karst sinkholes in Northern China Coalfields [J].Coal Science and Technology,2013,41(9):138-142.

[14] 方创琳.区域可持续发展与水资源优化配置研究[J].自然资源学报,2001,4(7):341-347.
Fang Chuanglin.A study on sustainable development and water resources optimization of Qaidam Basin in China [J].Journal of Natural Resources,2001,4(7):341-347.

[15] 尤祥瑜,谢新民,孙仕军,等.我国水资源配置模型研究现状与展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2004,2(2):131-140.
You Xiangyu,Xie Xinmin,Sun Shijun,*et al*.Review on the present situation and future prospect of water resources deployment models in China [J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2004,2(2): 131-140.

[16] 黄　优,桂祥友.贵州响水矿水资源优化配置模型研究[J].环境科学与技术,2008,31(12):40-43.
Huang You,Gui Xiangyou.Optimal allocation model of water resource in a mine of guizhou [J].Environmental Science and Technology,2008,31(12):40-43.

[17] 郭金印,陈峨印.邢台市西部矿区矿坑排水现状和综合利用分析[J].地下水,2013,35(4):45-46.
Guo Jinyin,Chen Eyin.The mine drainage present situation and the analysis of comprehensive utilization in western Xingtai [J].Groundwater,2013,35(4):45-46

[18] 王建国.邯邢地区大水铁矿田开采对地下水环境的影响及防治[J].水资源保护,2005,25(5):98-102.
Wang Jianguo.Influence of water-rich iron ore mining field exploration on the groundwater environment in Hanxing district and prevention [J].Water Resources Protection,2005,25(5):98-102.

[19] 尹尚先,徐　斌,刘德民,等.我国华北煤田岩溶陷落柱预测研究[J].煤炭科学技术,2016,44(1):172-177
Yin Shangxian,Xu Bin,Liu Demin,*et al*.Study on location prediction of paleo-karst sinkholes in Northern China Coalfields [J].Coal Science and Technology,2016,44(1):172-177

[20] Yin Shangxian,Zhang Jincai,Liu Demin.A study of mine water inrushes by measurements of in situ stress and rock failures [J].Natural Hazards,2015,79: 1961-1979.

(上接第 13 页)

[32] 吴晓锁,蒋斌松,平树江.防水闸墙隐患探地雷达探测分析[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1):20-24.
Wu Xiaosuo,Jiang Binsong,Ping Shujiang.Analysis of Detecting Potential Risk of Water Proof Gate Using Ground Penetrating Radar [J].Journal of Mining and Safety Engineering,2009,26(1): 20-24.

[33] 张周权,汪善好,郑　永,等.大体积特高压水闸墙施工组织设计[J].煤炭科技,2004(1):45-46.
Zhang Zhouquan,Wang Shanghao,Zheng Yong,*et al*.Construction organization design of mass water retention bulkhead with high water pressure [J].Coal Science and Technology Magazine,2004(1): 45-46.

[34] 侯　丹.科技之"剑"降水魔[J].中国煤炭工业,2013(2): 43-45.
Hou Dan.The blade of science and technology control mine water disaster [J].China Coal Industry,2013(2):43-45.

[35] 陆家河.综合治理矿山采空区(利用废旧矿井采空区)建地下水库初步探讨[J].华北国土资源,2005(5):28-30.
Lu Jiahe.Preliminary discussion on underground reservoir construction using of mined-out area [J].Huabei National Land Resources,2005(5):28-30.

[36] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
Gu Dazhao.Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir [J].Journal of China Coal Society,2015,40(2): 239-246.

[37] 顾大钊,张　勇,曹志国.我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1): 1-7.
Gu Dazhao,Zhang Yong,Cao Zhiguo.Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China [J].Coal Science and Technology,2016,44(1): 1-7.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net