



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\)在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

秦红正.浅埋薄基岩煤层开采对潜水含水层的影响及定量评价[J].能源环境保护,2020,34(3):85-91.

QIN Hongzheng. Influence of coal mining with shallow buried and thin bedrock on unconfined aquifer and quantitative evaluation[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(3): 85-91.

浅埋薄基岩煤层开采对潜水含水层的影响及定量评价

秦红正

(中煤科工集团北京华宇工程有限公司,北京 100120)

摘要:为研究干旱矿区浅埋薄基岩煤层开采对潜水含水层的影响程度,选择凉水井煤矿为研究对象,在资料收集、野外调查、室内测试的基础上,采用数值模拟的手段分析潜水含水层对煤层开采的响应规律。研究结果表明:研究区风积沙降水入渗系数高达0.53,降水是地下水补给的主要来源(约95%),地下水总量受大气降水控制明显;开采前地下水向河流的排泄约占78%,蒸发排泄约占22%;受采掘矿井水排泄量(34.09%)影响,河流与蒸发排泄量占比分别减少至53.07%和12.84%;利用潜水含水层地下水漏失量 Q_1 与开采前地下水排泄总量 Q_d 的比值来表征地下水量的扰动程度 $E_q(E_q=Q_1/Q_d)$,扰动程度高达27%。

关键词:浅埋薄基岩;煤层开采;地下水;数值模拟

中图分类号:X820.3

文献标志码:A

文章编号:1006-8759(2020)03-0085-07

Influence of coal mining with shallow buried and thin bedrock on unconfined aquifer and quantitative evaluation

QIN Hongzheng

(Beijing Huayu Engineering Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100120, China)

Abstract: Taking Liangshuijing Coal Mine as the research object, data collection, field investigation, laboratory test and numerical simulation were used to numerically simulate the response law of unconfined aquifer to coal mining in order to study the influence of coal mining with shallow buried and thin bedrock on unconfined aquifer. The results show that the precipitation infiltration coefficient of aeolian sand in the study area is as high as 0.53. Groundwater recharge mainly comes from infiltration of precipitation, accounting for about 95%, therefore the total amount of groundwater is obviously controlled by atmospheric precipitation. Before mining, about 78% of groundwater is drained to rivers, and the remaining 22% is lost by evaporation. Affected by the water yield of mine (34.09%), the proportion of drainage of the rivers and evaporation is decreased to 53.07% and 12.84%, respectively. It is proposed to use the ratio of the groundwater leakage of unconfined aquifer (Q_1) and the total groundwater discharge before mining (Q_d) to characterize the disturbance degree of groundwater (E_q) ($E_q=Q_1/Q_d$), which was as high as 27%.

Key Words: Shallow buried and thin bedrock; Coal mining; Groundwater; Numerical simulation

0 引言

榆神府矿区主要开采侏罗纪煤层,其厚度大、

埋藏浅、开采强度高,表土层下普遍存在以非胶结沙土、砂砾为骨架组成的松散含水层,开采导水裂缝带发育至上部松散含水层对该含水层地下水的

运移及赋存特征产生较大影响,甚至会引发严重后果的突水溃砂灾害^[1-3]。同时,该含水层是研究区唯一具有供水意义和重要生态价值的含水层,地下水与表生植被生态联系紧密^[4-5],开采导致地下水水位下降,进而加剧了矿区脆弱的生态环境现状^[6]。因此,开展浅埋薄基岩煤层开采对潜水含水层的影响规律研究对区域煤炭资源开发与地下水资源保护具有重要意义。

在研究内容上,周进生等^[7]认为受煤炭开采影响,地下水由采煤前的横向运动变为矿坑排水的垂向运动;顾大钊等^[8]分析了超大工作面开采对地下水的影响,认为基岩越薄开采对地下水的影响越大;范立民等^[9]认为榆神府矿区 71.5% 的地下水位明显下降区(下降幅度大于 8 m)是由高强度煤炭开采导致。在研究方法上,目前被普遍接受的地下水量评价方法主要包括解析法^[10]、数值法^[11]、水均衡法^[12]、开采试验法^[13]和相关分析法^[14]。其中,由于数值法可以评估复杂的地质和边界条件下的地下水资源量,并能预测不同开采时段的地下水流动变化特征,故目前得到广泛应用^[7,11,15]。本文以榆神矿区的凉水井煤矿为例,利用 Visual Modflow 模拟软件分析浅埋薄基岩煤层开采对潜水含水层的影响规律,以期为煤矿的地下水资源与生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

凉水井煤矿位于榆神矿区二期规划区的北部,为典型的半干旱大陆性气候,多年平均降水量

423.3 mm,多年平均蒸发量 1 694.7 mm,平均蒸发量约是降水量的 4 倍。井田西部为风积沙丘地貌,东部为黄土沟壑梁峁地貌,地形标高在 1 100~1 326.40 m 之间。煤矿中部东西向分水岭将地表水划分为南北流域,南部边界西沟流量 256.80 L/s,北部边界麻家塔河流量 528.75 L/s,均为长年性河流。目前该矿开采 4⁻²煤层,可采厚度 0.8~4.65 m,平均厚度 3.25 m,煤层埋藏较浅(平均 100 m),基岩薄(约 28 m),具有浅埋薄基岩煤层的典型特征。4⁻²煤层上部含水层自上而下分别为萨拉乌苏组松散含水层、直罗组风化基岩含水层和延安组基岩裂隙含水层,隔水层为离石组黄土层和保德组红土层。目前矿井正常涌水量维持在 520 m³/h 左右,期间最大涌水量 678.38 m³/h。

2 模型构建

2.1 非饱和带地下水流模型

研究区的主要地貌类型为风积沙,透水性好,降雨入渗补给量占地下水总补给量的 78.5%^[16],因此准确的估算研究区降水入渗系数对评估矿井地下水资源量具有重要的意义。本文采集了井田范围内平均分布的 10 个剖面的风积沙样品(每个剖面采集深度为 150 cm,采集间隔为 30 cm,单个剖面采集 5 个样品),并在室内进行颗粒分析。由于室内颗粒分析结果差别不大,因此对颗粒分析结果取平均值并利用 ROSSTA 软件根据砂、粉、黏粒含量生成风积沙所对应的土壤水力参数,详见表 1。

表 1 风积沙的颗粒组成及水力参数

颗粒组成				干容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度
0.50~0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.05 mm	<0.05 mm	1.50	0.40
5%	88%	3%	4%		
θ_r	θ_s	$\alpha/(1\cdot\text{cm}^{-1})$	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$	n	l
0.03	0.36	0.045	24.32	2.3	0.5

裸土条件下,一维非饱和土壤水运动的控制方程为:

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}\right]+\frac{\partial K(h)}{\partial z}$$

式中: $C(h)$ 为容水度,cm⁻¹; h 为土壤水压力水头,cm; t 为时间,d; z 为垂向坐标,cm,向上为正; $K(h)$ 为非饱和渗透系数,cm/d。

文中采用 van-Genuchten-Mualem 模型描述土壤水分特征曲线和渗透系数曲线^[17]:

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+|\alpha h|^n]^m} & h<0 \\ \theta_s & h\geq 0\end{cases}$$

$$K(h)=K_s S_e^l (1-(1-S_e^{1/m})^m)^{-2}$$

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\frac{1}{[1+|\alpha h|^n]^m}$$

式中: θ_s 为饱和含水量,cm³/cm³; θ_r 为残余含水量,cm³/cm³; K_s 为饱和渗透系数,cm/d; m 、 n 及 α 为相关土壤参数,其中 $m=1-1/n$, $n>1$; l 为弯曲

度参数,通常取 0.5。

在此基础上,利用 HYDRUS 模拟技术分析长时间尺度的降水-土壤水-地下水转化关系,并提出利用采用土壤水流通量估算降水入渗系数^[18],定义为:

$$\alpha = F_s / P$$

式中: α 为降水入渗系数; F_s 为平均土壤水通量,mm; P 为平均降水量,mm。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^m Q_i \delta_i = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y, z) \in D, t > 0 \\ H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in D \\ K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_j} = q_j(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_j, t > 0, j = 2, 3, 4 \\ H(x, y, z) \Big|_{\Gamma_1} = H(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ \left\{ \begin{array}{l} H = z \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} = - (K + W) \frac{\partial H}{\partial z} + W \end{array} \right. \quad \text{潜水面} \quad t > 0 \end{array} \right.$$

式中: D 为渗流区域; H 为含水层水位标高,m; K 为含水层的渗透系数,m/d; S_s 为自由水面以下含水层储水率,1/d; μ 为潜水含水层在潜水面上的重力给水度; W 为潜水面的降水补给量、河流渗漏补给量、田间水补给量、蒸发排泄量等强度的综合(补给为正,排泄为负), $m^2/(d \cdot m^2)$; $H_0(x, y, z)$ 为含水层的初始水位分布,m; Γ_1 为研究区第一类边界(含模型内部边界:指井田导水裂缝带发育的边界范围); Γ_j 为研究区第二类边界; $q_j(x, y, z, t)$ 为二类边界的单宽流量, $m^2/(d \cdot m^2)$; n 为渗

2.2 饱和带地下水流模型

由于岩性空间分布、构造条件和水动力条件存在差异性,致使研究区风积沙、萨拉乌苏组孔隙含水层与下伏基岩裂隙含水层及层间相对隔水层在空间表现出明显的非均质特征,因此将其概化为非均质各向异性含水层,充分体现了模型三维刻画优点^[19]。依据上述水文地质概念模型,建立研究区地下水非稳定流数学模型为:

流区边界的法线方向; Q_i 为第 i 口井的抽水量, m^3/d ; δ_i 为第 i 口井的狄拉克函数; $\delta_i = \delta(x - x_i, y - y_i)$, (x_i, y_i) 为第 i 口井的坐标;

如图 1 所示,凉水煤矿位于相对独立的麻家塔河流域和西沟流域分水岭上,根据煤矿地形地貌与流域特征,模型以煤矿南部的西沟和北部的麻家塔河为河流边界(常年性河流),煤矿地下水系统受地形地貌控制,地下水沿分水岭向南北两侧流动,东西两侧地下水径流微弱,模型定义为零通量边界,稳定流模拟的流场为其初始流场。

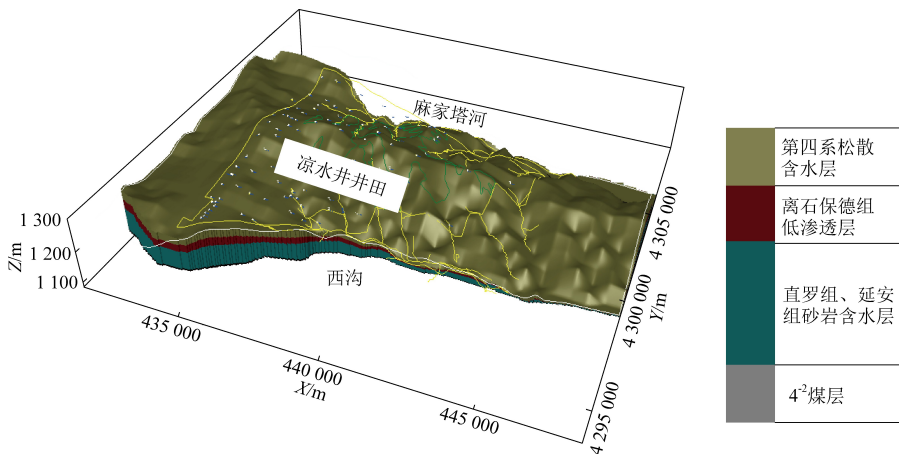


图 1 凉水井煤矿水文地质概念模型

在垂向上按含水层岩性剖分为第四系松散孔隙含水层组(含全新统风积沙、萨拉乌苏组松散地层)、相对隔水层(离石组、保德组红土地层)、砂岩裂隙含水层(直罗组、延安组基岩裂隙含水层与

最上可采 4^{-2} 煤层共 4 个模拟分层,其中顶部孔隙含水层(Q)接受大气降水的补给,其中井田的水文地质参数如表 2 所示。

表 2 井田水文地质参数一览表

含水岩组	分区编号	渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$		给水度 μ	弹性释水率 S_s/m^{-1}
		$K_x = K_y$	K_z		
第四系松散含水层	1	3.230	0.323 0	0.20	1×10^{-6}
	2	0.060	0.006 0	0.05	1×10^{-6}
	3	1.470	0.147 0	0.05	1×10^{-6}
	4	2.350	0.235 0	0.05	1×10^{-6}
砂岩裂隙含水层	5	0.650	0.065 0	0.05	1×10^{-6}
	6	0.008	0.000 8	0.05	1×10^{-6}
	7	0.340	0.034 0	0.05	1×10^{-6}
	8	0.063	0.006 3	0.05	1×10^{-6}

3 结果分析

3.1 降水入渗系数获取

研究区地下水埋深和土壤水流通量的关系如图 2 所示,可以看出土壤水流通量随着埋深的增大呈现出先减小,后保持稳定的指数变化趋势。当地下水埋深由 50 cm 增加到 250 cm 时,土壤水流通量由 0.16 cm 显著减小到 0.11 cm,当地下水埋深大于 300 cm 时,土壤水流通量随地下水位埋深的增大基本不发生变化。因此在西部风沙区,利用 300 cm 处土壤水的水流通量估算降水入渗系数具有可行性,计算结果显示风积沙的降水入渗系数高达 0.53。

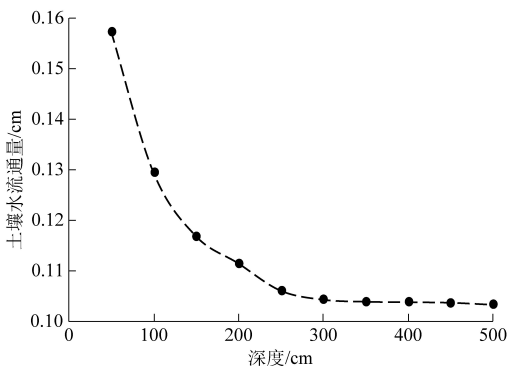
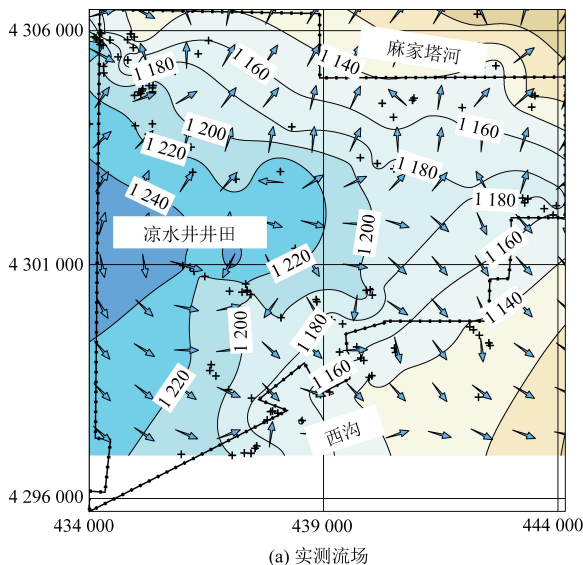


图 2 地下水埋深对土壤水流通量的影响

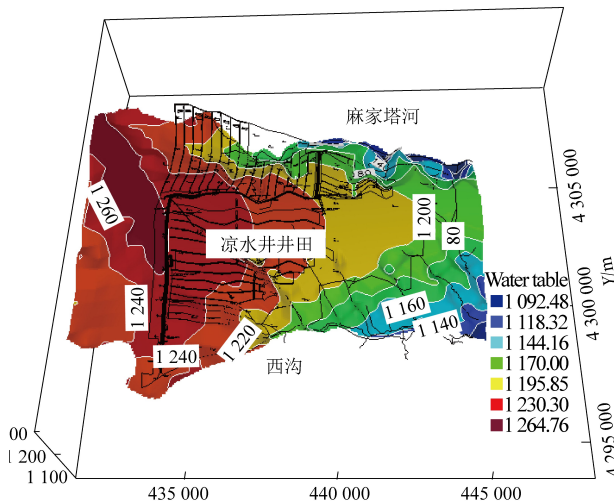
3.2 采煤对地下水均衡和流场的影响

图 3 反映了实测流场与稳定流计算流场的宏观形态基本一致。从图 4 可以看出,实测涌水量和模拟涌水量的变化趋势也基本一致,反映出本次所构建的水文地质模型与实际水文地质条件相符,具有较高的模拟精度,可用来预测煤炭开采条件下的地下水运移特征。4⁻²煤层未开采前,研究范围内表现出大气降水和地下水补给地表水的三水转化特征,地下水流场与地形保持一致,东西向

地下水水力坡度约为 0.4%,南北向水力坡度约为 2.5%,地下水流动特征受地形地貌控制明显,地下水整体沿地表分水岭向两侧的麻家塔河和西沟流动,麻家塔河和西沟分别为井田的地下水主要排泄点。



(a) 实测流场



(b) 模拟流场

图 3 实测流场和模拟流场对比图

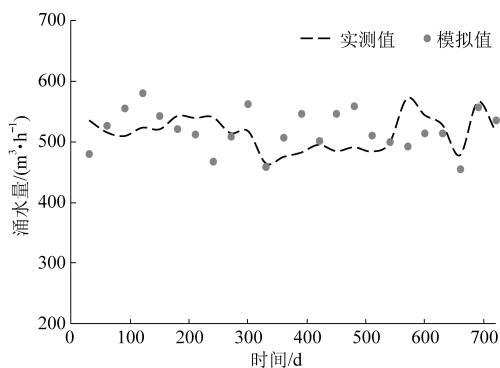
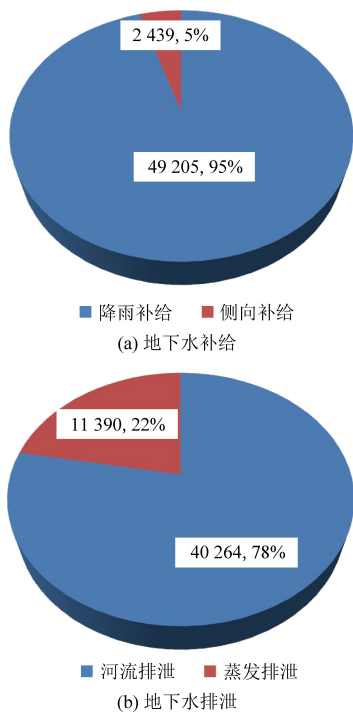


图4 实测涌水量和模拟涌水量对比图

如图5所示,4⁻²煤层未开采前,研究范围内地下水资源总量为 $5.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (平水年)。其中降水补给为 $4.29 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 约占 95%, 侧向补给为 $0.24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 占比仅为 5%, 可见大气降水是研究区地下水补给的主要来源。同时, 地下水向河流的排泄是主要的排泄形式 ($4.03 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 约占 78%, 蒸发排泄次之 ($1.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 约占 22%, 由于模拟区水文地质单元较为完整、独立, 地下水向区外侧向排泄量基本为 0。

图5 天然条件下地下水均衡特征 (m^3/d)

凉水井煤矿主要开采 4⁻²煤层, 由于研究区煤层埋深较浅, 采掘扰动形成的导水裂隙带直接发育至松散含水层底部, 松散含水层地下水沿导水裂隙直接进入采掘空间, 导致含水层被迅速疏干, 基本形成以采掘范围为中心的干涸区域。以 2016

年为例, 已回采区段顶部的含水层均被疏干, 但是由于井田位于西沟与麻家塔河流域分水岭处, 已采掘的 421 盘区位于西沟流域内, 因此以已采掘的范围为边界, 在井田南部形成最大为 170 m 左右的水位降深, 而在井田北部麻家塔河流域的水位变化不明显, 详见图 6。

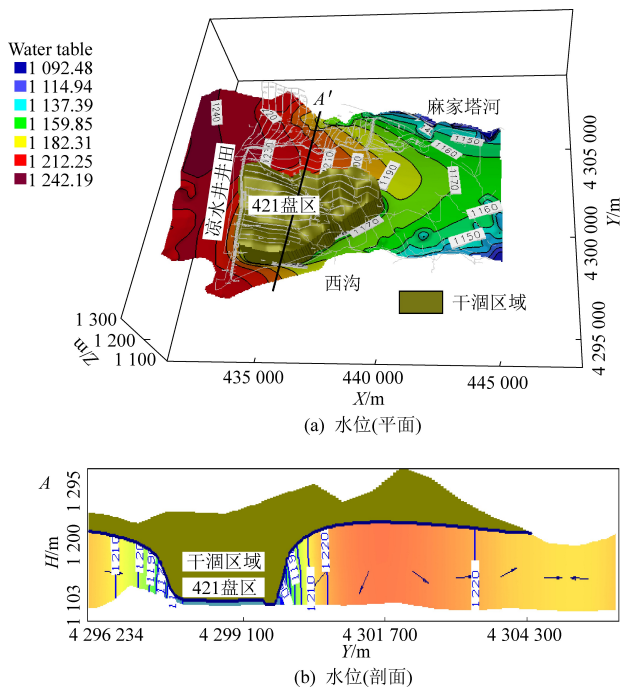


图6 采掘扰动地下水水流场(2016年)

研究区大气降水是地下水补给的主要来源 (约为 95%), 图 7a 反映出模拟期井田地下水水均衡总量受大气降水控制明显, 随着年降雨量动态变化, 地下水补给与排泄量协同变化。以 2015、2016 年为例, 2015 年降雨量为 410 mm, 井田地下水补给量为 $5.39 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 2016 年降雨量达到 583 mm, 井田地下水补给量增加至 $7.49 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。如图 7b 所示, 未采掘前地下水向河流等地表水体的排泄是主要排泄形式, 约占 78%, 蒸发排泄次之, 约占 22%; 由于矿井开采, 地下水形成新的排泄形式—矿井水, 以 2016 年为例, 矿井水占比为 34.09%, 河流排泄、蒸发排泄占比减少至 53.07% (原 78%)、12.84% (原 22%), 由此可见, 矿井水主要袭夺了地下水向地表水体排泄量和蒸发排泄量。

3.3 采煤地下水量的损失程度分析

赵春虎等^[20]提出近地表松散含水层 (风积沙、萨拉乌苏组含水层) 地下水漏失量 (Q_l) 与采掘前地下水排泄总量 (Q_d) 的比值来表征采煤地下水量的损失程度指标 E_q , 如下式:

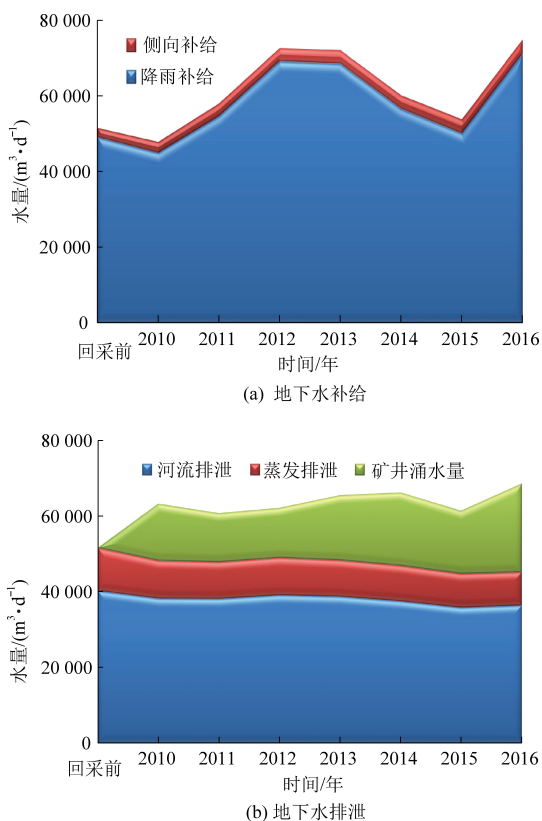


图7 采掘扰动下地下水均衡变化(2010~2016年)

$$E_q = Q_l / Q_d$$

式中 Q_l 为矿井水中松散层的漏失水量; Q_d 为采掘前地下水排泄总量; E_q 为地下水损失指标。 E_q 一般小于 1, 其值越大表征矿井水对松散层地下水资源袭夺量越大, 采掘破坏程度越强烈。基于数值模拟结果, 凉水井煤矿采煤对潜水含水层损伤的扰动程度高达 27%。

4 结论

(1) 研究区土壤水流通量随着埋深的增大呈现出先减小, 后保持稳定的指数变化趋势。当埋深大于 3 m 时, 土壤水流通量随地下水位埋深的增大基本不发生变化, 因此在西部风沙区可利用 3 m 处土壤水的水流通量估算降水入渗系数, 计算结果显示风积沙的降水入渗系数高达 0.53。

(2) 研究区地下水资源总量约为 $5.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中大气降水补给为 $4.29 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 约占 95%, 是研究区地下水补给的主要来源。同时, 地下水向河流的排泄是主要的排泄形式 ($4.03 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 约占 78%。

(3) 受煤炭开采影响, 矿井水成为地下水排泄的重要组成部分。以 2016 年为例, 矿井水占比为

34.09%, 河流排泄和蒸发占比分别减少至 53.07% (原 78%)、12.84% (原 22%)。提出利用潜水含水层地下水漏失量 Q_l 与采前地下水排泄总量 Q_d 的比值来表征地下水量的损失程度 E_q ($E_q = Q_l / Q_d$), 认为采煤对潜水含水层的扰动程度高达 27%。

参考文献

- [1] 王建利. 浅埋薄基岩窄煤柱巷道覆岩层破断规律与稳定控制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 1-2.
- [2] 侯忠杰, 黄庆享. 松散层下浅埋薄基岩煤层开采的模拟 [J]. 陕西煤炭技术, 1994 (2): 38-41.
- [3] 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 (1): 173-178.
- [4] 王强民, 靳德武, 王文科, 等. 榆神矿区地下水和干旱指数对植被耗水的联合影响 [J]. 煤炭学报, 2019, 44 (3): 840-846.
- [5] 马雄德, 范立民, 严戈, 等. 植被对矿区地下水位变化响应研究 [J]. 煤炭学报, 2017, 42 (1): 44-49.
- [6] 王强民, 赵明. 干旱半干旱区煤炭资源开采对水资源及植被生态影响综述 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28 (3): 77-81.
- [7] 周进生, 王剑辉, 党学亚. 矿产开发对地下水失衡影响及其控制对策—以陕北煤炭资源开发为例 [J]. 中国矿业, 2009, 18 (12): 52-55.
- [8] 顾大钊, 张健民, 王振荣, 等. 神东矿区地下水变化观测与分析研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41 (4): 35-39.
- [9] 范立民, 向茂西, 彭捷, 等. 西部生态脆弱矿区地下水对高强度采煤的响应 [J]. 煤炭学报, 2016, 41 (11): 2672-2678.
- [10] 楚敬龙. 解析法在山区地下水环境影响评价中的应用 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2011, 63 (5): 71-74.
- [11] 任洪雨, 冯斌, 郭新体. 数值法在地下水资源评价中的应用 [J]. 西部探矿工程, 2003, 15 (3): 81-84.
- [12] 李晓英, 顾文钰. 水均衡法在区域地下水资源量评价中的应用研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25 (1): 87-90.
- [13] 李爱平, 张国飞, 苗建军, 等. 利用开采性抽水试验评价地下水允许开采量 [J]. 地下水, 2012, 34 (6): 59-60.
- [14] 赵秀云, 刘琦, 刘铁银, 等. 相关分析在地下水资源评价中的应用 [J]. 黑龙江大学工程学报, 2000, 27 (1): 39-41.
- [15] 武强, 董东林, 石占华, 等. 可视化地下水模拟评价新型软件系统 (Visual Modflow) 与矿井防治水 [J]. 煤炭科学技术, 2000, 28 (2): 18-20.
- [16] 黄金廷. 鄂尔多斯盆地沙漠高原区降雨入渗补给地下水研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006: 1-2.

[17] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (44): 892 – 898.

[18] 李娜, 任理, 唐泽军. 降雨入渗条件下厚包气带土壤水流通量的模拟与分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (12): 94–100.

[19] 刘基, 王强民, 杨建. 基于 Visual Modflow 的矿井涌水量模拟和动态预测研究 [J]. 煤矿安全, 2018, 49 (3): 190–193.

[20] Zhao C, Jin D, Geng J, et al. Numerical simulation of the groundwater system for mining shallow buried coal seams in the ecologically fragile areas of Western China [J]. Mine Water and the Environment, 2018, 38 (1): 158–165.