

矿井涌水量预测及其对沙漠植被的影响

刘 谋, 王俊杰, 吴广涛, 周 杰, 罗奇斌, 康卫东

Prediction of mine water inflow and analyses of its influence on desert vegetation

LIU Mou, WANG Junjie, WU Guangtao, ZHOU Jie, LUO Qibin, and KANG Weidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China

周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

典型内陆湖区地下水数值模拟及其主控因子识别

Controlling factors identification of groundwater system evolution based on numerical simulation in the typical arid-inland basin

于晓露, 宋健, 林锦, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 24-33

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu

曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104015

刘谋, 王俊杰, 吴广涛, 等. 矿井涌水量预测及其对沙漠植被的影响[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 65-75.
LIU Mou, WANG Junjie, WU Guangtao, *et al.* Prediction of mine water inflow and analyses of its influence on desert vegetation[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 65-75.

矿井涌水量预测及其对沙漠植被的影响

刘 谋¹, 王俊杰², 吴广涛², 周 杰², 罗奇斌¹, 康卫东¹

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

2. 陕西地矿九〇八环境地质有限公司, 陕西 西安 710600)

摘要: 矿井涌水对井下安全生产存在潜在威胁, 同时可能引发因矿区地下水位下降造成的地表植被难以逆转的演替退化。针对涌水量数值模型构建时边界条件概化不准确和水文地质参数选用不可靠等关键问题, 以准确预测矿井涌水量保障煤层安全开采为目标, 并为研究区沙漠植被的保护提供理论和数据支撑, 选择以天然边界作为研究区周界, 在充分收集与分析钻探、物探、抽水试验、地下水长观和矿井采空区范围及其涌水量等资料的基础上反复修正模型, 构建了较为逼真的地下水三维非稳定流数值模型。此外依据矿井采空区拓展进程及其涌水量和地下水监测数据等进行模型模拟识别, 论证了该模型的合理性和可靠性。利用所建立的数值模型预测了煤层开采条件下的矿井涌水量和潜水位降深场, 进而基于潜水位埋深与沙漠植被关系分析了潜水位下降对沙漠植被的影响。结果表明: 根据矿区先期煤层开采预测矿井涌水量为 $3.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 引起矿区内潜水位下降 2.08 ~ 2.35 m, 将导致矿区内代表性植被沙柳和小叶杨的长势变差、甚至部分枯萎, 呈现由中生植被类型向旱生植被方向的演替趋势。研究结果为研究区提供了较准确的涌水量预测值, 可以为制定科学有效的矿区沙漠植被保护措施以及为类似地下水流数值模型的构建提供可靠的思路。

关键词: 矿井涌水; 数值模拟; 沙漠植被; 潜水位; 天然边界

中图分类号: P641; TD742

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0065-11

Prediction of mine water inflow and analyses of its influence on desert vegetation

LIU Mou¹, WANG Junjie², WU Guangtao², ZHOU Jie², LUO Qibin¹, KANG Weidong¹

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Shaanxi Geology Mining
908 Environmental Geology Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710600, China)

Abstract: Mine inflow threatens mine safety production underground, and may trigger a decline in the groundwater level in the mine area, causing irreversible successional degradation of surface vegetation. In view of the key problems such as inaccurate generalization of boundary conditions and unreliable selection of hydrogeological parameters when constructing numerical models of water inflow, this study aims to accurately predict mine water inflow, ensure the safe mining of coal seams, and provide theoretical and data support for the protection of desert vegetation in the study area. The natural boundary is selected as the perimeter of the research area, and the model is repeatedly revised on the basis of fully collecting and analyzing the data of drilling, geophysical prospecting,

收稿日期: 2021-04-07; 修订日期: 2021-08-31

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190331); 陕西省教育厅专项科研计划项目(2013JK0944)

第一作者: 刘谋(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质与工程地质方面的研究工作。E-mail: 609409326@qq.com

通讯作者: 康卫东(1960-), 男, 博士, 教授, 主要从事水资源与水环境方面的教学和研究工作。E-mail: 570312645@qq.com

pumping test, groundwater long-term monitoring, and the scope of the mine goaf and its water inflow, and thus a more realistic three-dimensional unstable flow numerical model of groundwater is constructed. In addition, the model simulation and identification are carried out according to the expansion process of the mine goaf and its water inflow and groundwater monitoring data, which demonstrates the rationality and reliability of the model. The established numerical model is used to predict the mine inflow and submersible level depth drop under coal seam mining conditions, and then the influence of diving level decline on desert vegetation is analyzed based on the relationship between diving depth and desert vegetation. The results show that the predicted water inflow in the mine is $3.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, resulting in a decrease of 2.08–2.35 m in the diving level in the mine area, which will lead to the deterioration or even partial withering of the representative vegetation sand willow and poplar in the mine area, showing a succession trend from mesophytic vegetation type to xerophytic vegetation. The results can provide more accurate water inflow prediction in the study area, scientific and effective measures for the protection of desert vegetation in mining areas, and reliable treatment ideas for the construction of similar numerical models of groundwater flow.

Keywords: mine inflow; numerical simulation; desert vegetation; phreatic water level; natural border

煤层开采过程中极易出现煤层顶底板涌(突)水的危险,矿井涌水一方面对人民生命和经济财产产生较大威胁,另一方面对矿区的地下水资源与地表植被造成很大程度的破坏,进而引发一系列突出的生态环境问题。因此,准确预测矿井涌水量并揭示矿井涌水对植被的影响规律的研究亟需开展。

矿井涌水量预测方法研究一直受到专业领域众多学者的关注。目前,矿井涌水量预测方法主要分为非确定性和确定性分析方法,非确定性分析方法存在受限于相似条件类比、需要大量实测统计数据、未考虑到开采条件影响下的动态变化等问题,确定性分析方法存在水文地质参数不可靠、水文地质条件不够清楚或条件较为复杂概化时不够准确等问题^[1-3]。其中,确定性分析方法中的数值法更适用于条件复杂、影响因素较多及精度要求更高的计算,但在应用过程中存在一些影响计算精度的关键问题。日常涉及到的矿区是一个范围较小的计算域,边界条件不易确定,使得其概化成为主要障碍,可将计算区边界尽可能采用天然边界以解决不易或易错概化问题^[4],从而减少在模拟或预报期间边界附近的水头或流量受到抽水影响。在建立可靠的水文地质参数方面,可通过实测资料结合模型试算进行推断或反演,并根据经验确定,使模拟和实测流场在各计算节点处的误差平方和最小^[5]。在建立仿真性更高的数值模型方面,通过模型拟合反复地改正错误认识和修正模型,将客观认识的地下水流进行贴切地概化描述且逼真地表达^[6],以提高数值模型的质量。近年来,许多学者在矿井涌水引起地下水流场、水位、水量变化及植被与地下水

位埋深关系等研究方面已进行了深入的研究,包括运用数值法预测煤矿开采影响下地下水流场的变化趋势^[7],分析塔里木河下游地下水位埋深对天然植被组成、分布和长势的影响等^[8]。总体而言,开展矿井涌水对沙漠植被的影响尚不充分。

本文以陕西榆林某矿区矿井涌水为研究对象,依据矿区地质和水文地质条件,构建包含矿区的相对独立完整的地下水系统。运用实测资料、模型试算反演、并结合多年经验的方式确定水文地质参数,建立仿真性更高的地下水三维非稳定流数值模型,根据煤层开采进程预测矿井涌水量和地下水流场,深入探讨潜水位下降对沙漠植被的影响,并提出对矿区沙漠植被的保护措施。

1 研究区概况

本次研究目标矿区位于陕西省榆林市北部,属于沙漠与黄土高原的过渡地带。研究区中部地势较高,零星出露黄土地层;北部和南部地势较低,主要为风积沙覆盖。区域内地层由老至新依次为:三叠系上统瓦窑堡组(T_3w)、侏罗系下统富县组(J_1f)、侏罗系中统延安组(J_2y)和直罗组(J_2z)及第四系(Q),其中第四系(Q)主要包含下更新统午城组(Q_{p1w})、中更新统离石组(Q_{p2l})、上更新统萨拉乌苏组(Q_{p3s})和全新统风积沙层(Qh^{2col})。3号煤层位于 J_2y 第三段顶部,全区可采,可采煤厚度4.85~11.90 m,煤层平均厚度8.36 m。

研究区地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水与孔隙裂隙水、侏罗系碎屑岩类裂隙潜水与承压水,其水文地质平面图和剖面图如图1、图2所示。研

究区矿坑的直接充水水源是侏罗系碎屑岩类风化壳裂隙潜水及裂隙承压水,间接充水水源有大气降水、地表水、第四系松散层潜水。

2 研究方法

2.1 水文地质概念模型

综合分析研究区水文地质条件、煤田开采范围和周围水环境特征等因素,确定模型区范围:西南侧的榆溪河河段为变流量边界及定水头边界,东北侧为定流量边界,其余周界的地下水分水岭为隔水边界,有效面积为 598.10 km²,如图 3 所示。综合研究区水文地质条件、导水冒裂带位置和便于预测煤层开采条件下的涌水量预测等多方面因素,本次模拟的地层结构自上而下划分为 5 层:①第四系萨拉乌素组(Qp_{3s})砂层,②第四系离石组(Qp_{2l})黄土层,③导水裂隙带之上侏罗系(J)原基岩,④导水冒裂带及两侧原岩层,⑤3

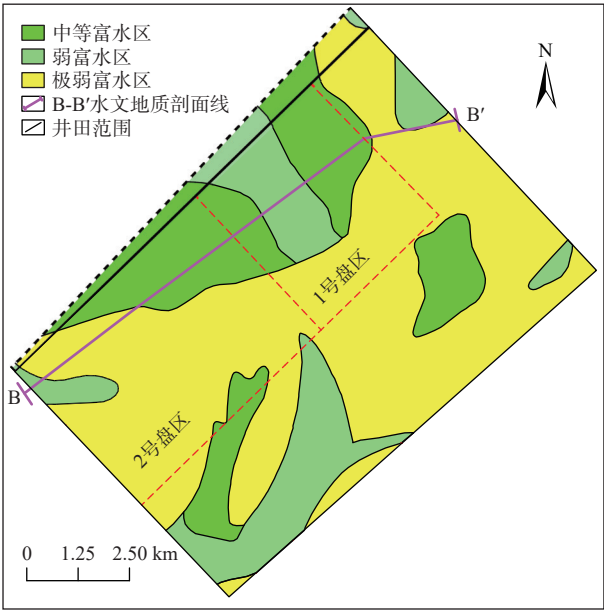


图 1 研究区水文地质平面图
Fig. 1 Hydrogeological plan of the study area

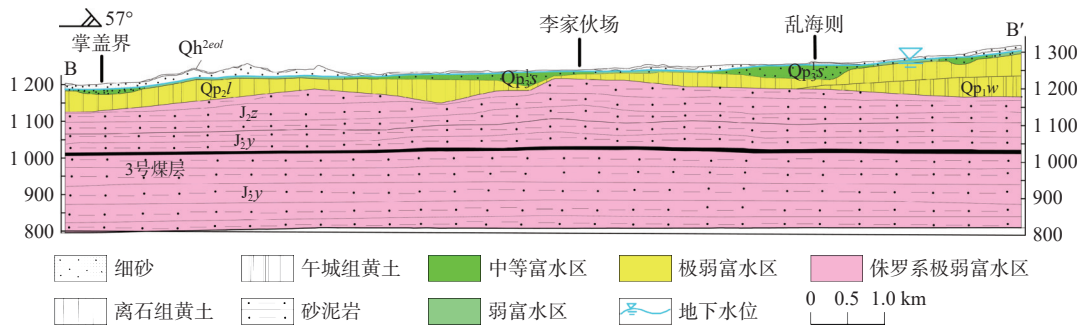


图 2 研究区水文地质剖面图
Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

号煤层采空区及两侧煤层。依据模型区水文地质条件,将模型区概化为非均质各向异性含水层与弱含水层,地下水运动为三维非稳定流。

模型区第四系潜水含水层(第 1 层)的顶界为潜水面;潜水含水层(第 1 层)四周的西南边角概化为定水头边界,西南侧南段的榆溪河河段概化为变流量边界,东北侧概化为定流量边界,其余周界的地下水分水岭为天然的零流量边界。模型区弱含水的碎屑岩层(第 2~5 层)的东北侧为定流量边界,其余周界及第 5 层底界均概化为零流量边界。大气降水入渗是系统补给的主要来源,潜水蒸发蒸腾、泉集河溢出、矿坑排水等是其排泄的主要方式。

2.2 地下水流数学描述

依据模型区水文地质概念模型,其地下水流数学模型可描述为:

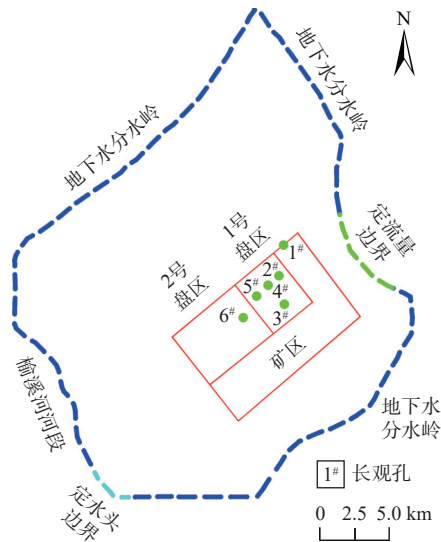


图 3 模型区范围及地下水位长观孔分布图
Fig. 3 Model area and distribution of the long-term monitoring holes of groundwater level

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q\delta + W\delta = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, (x, y, z) \in \Omega, t > 0 \quad (1)$$

初始条件:

$$H(x, y, z, 0) = h_0, (x, y, z) \in \Omega \quad (2)$$

定水头边界:

$$H(x, y, z)_{\Gamma_1} = h_1, t > 0 \quad (3)$$

零流量边界:

$$-\left[K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) \right]_{\Gamma_2} = 0, t > 0 \quad (4)$$

变(定)流量边界:

$$-\left[K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) \right]_{\Gamma_2} = q(t), t > 0 \quad (5)$$

泉集河流边界:

$$\frac{K_r A}{M_r} (H_r - H) = Q_r \quad (6)$$

潜水面边界:

$$H = z$$

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = K_{xx} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_{zz} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - (K_{zz} + \varepsilon) \frac{\partial H}{\partial z} + \varepsilon \quad (7)$$

式中: H ——地下水位/m;

H_r ——泉集河水位标高/m;

K_{xx} ——含水层的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$), K_{yy} 与 K_{zz} 同 K_{xx} ;

μ ——潜水含水层给水度;

S_s ——承压含水层弹性释水率/ m^{-1} ;

Q ——水井开采量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

W ——矿坑涌水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

δ —— δ 函数(分别对应水井、坑道位置坐标);

h_0 ——初始水位/m;

h_1 ——定水头边界水位标高/m;

$q(t)$ ——变(定)流量边界流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

Q_r ——泉集河流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

$\cos(n, x)$ ——边界法向 n 与 x 轴的夹角余弦, $\cos(n, y)$ 同 $\cos(n, x)$;

A ——泉集河计算面积/ m^2 ;

K_r ——河床淤积层垂向渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

M_r ——河床淤积层厚度/m;

ε ——潜水面垂向交换量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), 入为正、出为负;

Γ_1 ——一类边界, Γ_2 同 Γ_1 ;

n ——二类边界外法线方向;

Ω ——计算区范围。

模型区西南侧南段的变流量边界按三类边界处理, 即 $q(t) = q_0 + \beta \cdot \Delta h$, 其中 q_0 为边界初始流量, Δh 为 t 时刻水头与初始水头的水头差, β 为系数; 东北侧为定流量边界, 该定流量数值取边界至分水岭圈闭区的多年平均降水入渗量。

2.3 地下水流数值模型

2.3.1 模型结构

本次计算根据有限差分方法, 采用 Visual Modflow 对模型区进行规则网格剖分。模型区水平方向上, 东西长约 30 km, 南北长约 37 km, 面积 1 110 km^2 , 模型区有效面积 598.1 km^2 ; 模型区平面上采用 200 m $\times$ 200 m 的网格, 将其沿南北向剖分为 185 行, 沿东西向剖分为 150 列; 垂向上按前述地层结构层, 自上向下剖分为 5 层。

2.3.2 模型识别与验证

根据研究区开采实测涌水量资料、地下水长观资料及野外地质勘探成果, 绘制 2012 年的潜水和承压水等水位线图, 并将其作为模型识别的初始流场, 如图 4 所示。将各沟域的降水入渗补给量和含水层抽水试验获取的水文地质参数作为初值代入地下水流数值模型中, 通过对水文地质参数的反复调试, 计算并拟合矿井涌水量、地下水动态、地下水流场及各泉集河流量。

矿井涌水量按照在采空区设置地下水溢出边界来处理与计算, 模型通过反复调试导水冒裂带的渗透系数, 模拟不同采空区面积的计算涌水量与相应采空区面积的实测涌水量进行拟合和分析, 并获取与确定其拟合程度较好的导水冒裂带渗透系数。模型模拟涌水量时段为 2014 年 1 月至 2020 年 9 月。如图 5 所示, 矿井涌水量的计算值与实测值拟合总体趋势一致, 拟合误差较小。

模型模拟长观孔地下水位时段为 2015 年 3 月至 2018 年 10 月, 模型区代表性地下水长观孔 2#、4#潜水位计算值能够较好地反映出真实状态下水位随时间变化的平均状态及其趋势。各长观孔水位计算值与实测值拟合总体趋势一致, 拟合效果较好(图 6)。

将模型计算的第四系潜水流场与绘制的实测流场进行拟合, 得到图 7。模型区计算流场与实测流场基本吻合, 潜水等水位线偏离程度较小, 由此反映出

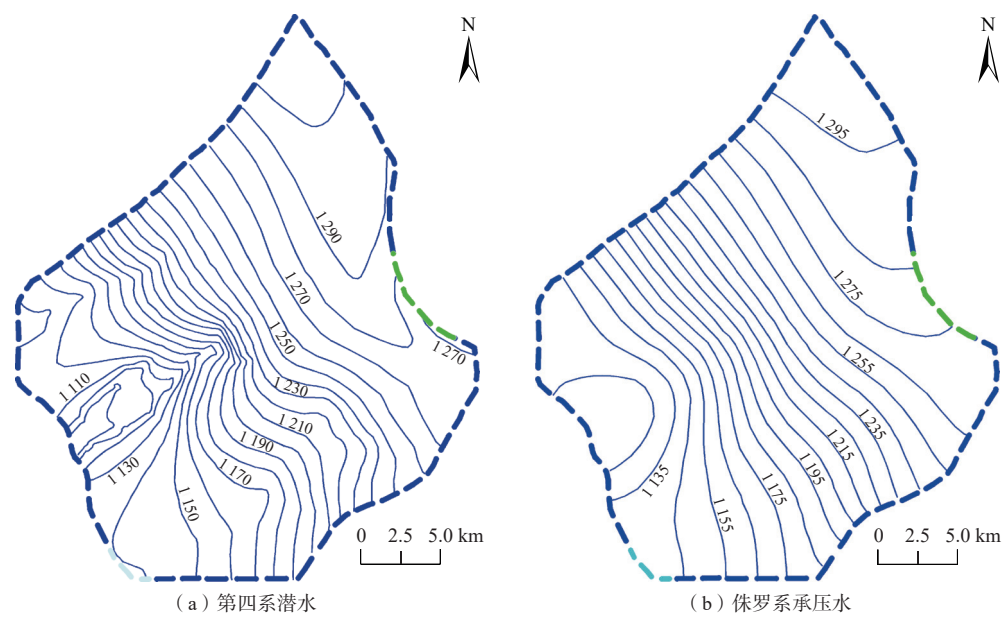


图 4 模型区拟合期地下水初始流场图

Fig. 4 The initial groundwater flow field diagram of the model area in the simulation period

潜水水位拟合效果良好。

模型区地表广布风积砂层, 识别的大气降水入渗系数为 0.24。模型区识别的含水层水文地质参数, 如图 8、表 1 所示: 模型第 1 层第四系砂土层分为 2 个区, I 区、II 区的渗透系数分别为 4.5、3.7 m/d, 给水度分别为 0.17、0.15; 模型第 2 层更新统黄土层水平渗透系数 6.5×10^{-2} m/d、垂向渗透系数 8.5×10^{-2} m/d, 弹性释水率 1×10^{-6} m⁻¹; 模型第 3 层冒裂带之上的侏罗系原岩层, 模型第 4 层、第 5 层分别为导水冒裂带和采空区及其两侧的侏罗系原岩层, 原岩层水平渗透系数 3.6×10^{-2} m/d, 垂直渗透系数 9.0×10^{-5} m/d, 弹性释水率 1×10^{-5} m⁻¹; 模型第 4 层的导水冒裂带厚度变化在 15 ~ 30 m 之间, 模型反复调试识别的导水裂隙带水平渗透

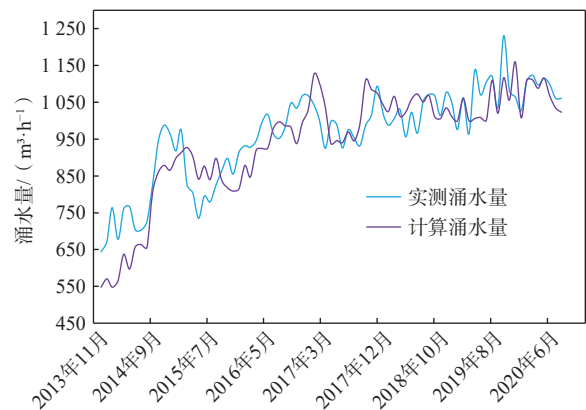


图 5 矿区实测与计算涌水量拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of measured and calculated water inflow in mining area

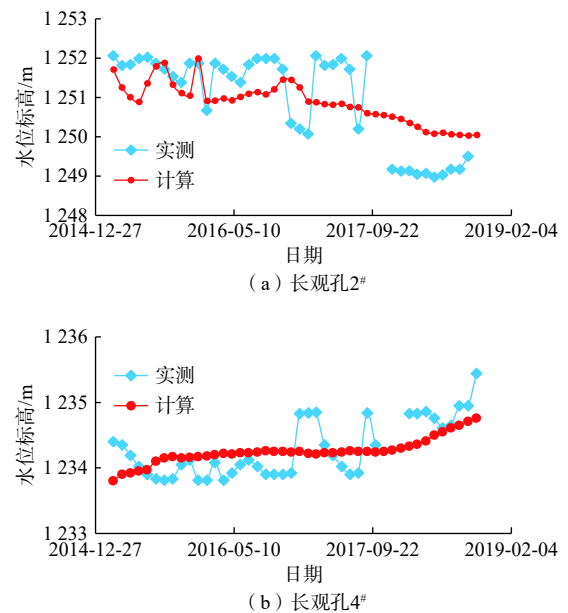


图 6 模型区代表性地下水长观孔潜水位动态拟合曲线

Fig. 6 Dynamic fitting curve of representative groundwater level in long observation hole in model area

系数为 20 m/d、垂向渗透系数为 85 m/d; 模型第 5 层的采空区内无地层介质, 为完全导水的集水区。

通过计算矿井涌水量、地下水长观孔潜水位、地下水流场及各泉集河流量, 并将其与对应实测值进行拟合, 可以看出各类计算值与实测值拟合总体趋势一致, 拟合效果较好。因此, 由上述所建立与识别的数值模型具有较高仿真性, 可以用于预测研究区先期开采区(1 号和 2 号盘区)的涌水量。

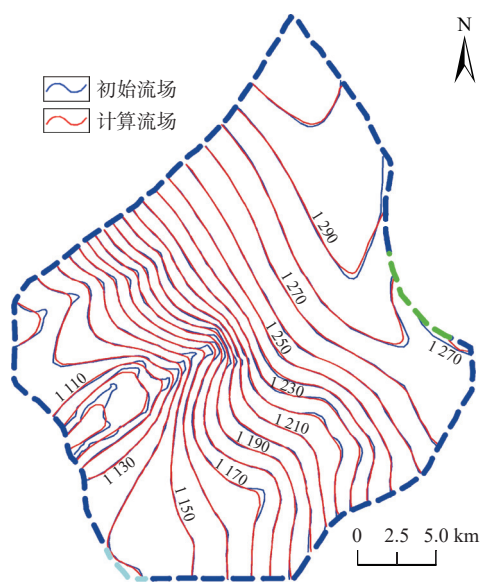


图7 模型区第四系潜水流场拟合图

Fig. 7 Fitting of the Quaternary phreatic flow field in the model area

3 结果

3.1 涌水量预测

利用上述建立的数值模型对矿区3号煤层先期开采区(1号和2号盘区)进行矿井涌水量预测。基于矿区现有开采方式为分层开采煤层,依据冒采比和裂采比计算结果,全层开采煤层(综采)时矿区大部分地段的导水裂隙带将会与第四系潜水沟通,故确定煤矿预测开采方案为分层开采煤层,平均分层开采厚度为4.8 m。矿区先期开采区3号煤层矿坑涌水量共设置8个地下水位计算点(g1—g8),详见图9。

3.2 预测结果

将降水入渗补给量按面源加入模型,以模型识别的末流场作为预测期的初始流场。根据数值模型预测结果,矿区先期开采区(1号和2号盘区)3号煤层的矿井涌水量为 $3.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,如表2所示。该方案下煤层开采影响模型区(计算点g1—g8)的第四系潜水

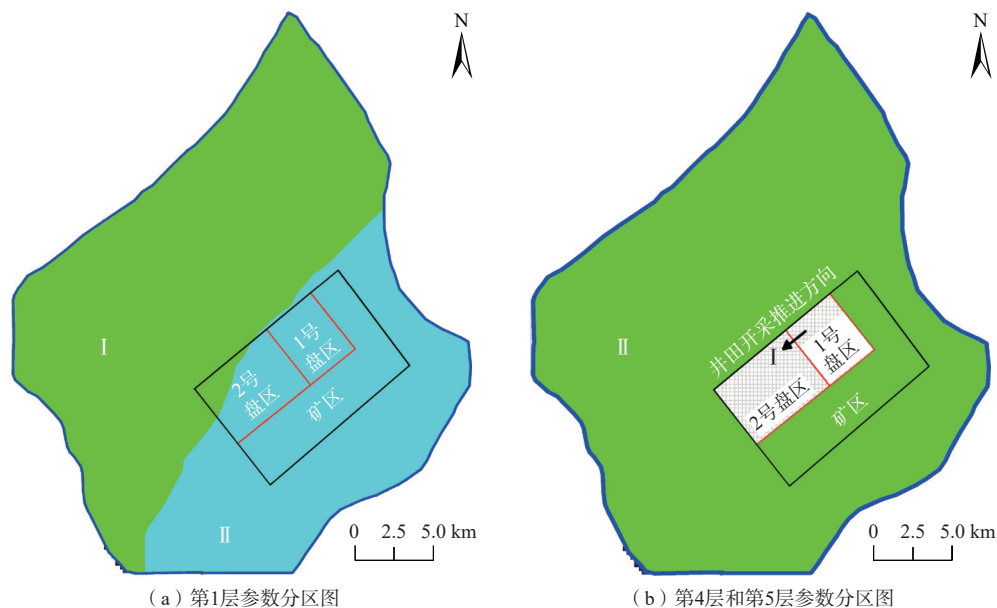


图8 模型区水文地质参数分区图

Fig. 8 Subdivision of hydrogeological parameters in the model area

位降深值在0.89~2.35 m之间、侏罗系承压水头降深值在1.22~28.65 m之间,如图10所示。

矿井总涌水量较现状涌水量的增加量,主要来自袭夺的地下水蒸发量、溢流量和含水层储量3部分。矿区开采煤层的总涌水量较现状增加了 $0.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中第四系潜水蒸发减少量为 $0.42 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,泉集河溢出减少量为 $0.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,第四系与侏罗系含水层储量减少量为 $0.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分别占矿井涌水增量的62.7%、10.4%、26.9%,如表2所示。

4 讨论

4.1 煤层开采对矿区内沙漠植被的影响

4.1.1 地表植被与潜水位关系

(1) 植物类型与潜埋深关系

依据植物对水的依赖强弱将其分为水生与陆生植物,其中陆生植物可细分为湿生植物、中生植物及旱生植物。研究区湿生植物以草本及农作物为主,中生植物以乔木为主,旱生植物以灌木为主。

表 1 模型区水文地质参数分区与参数值成果表

Table 1 Hydrogeological parameter division and values in the model area

分层	分区号	地层	渗透系数 /(m·d ⁻¹)		给水度	弹性释水率/m ⁻¹	备注
			水平	垂直			
第1层	I	第四系砂土层	4.5	4.5	0.17	—	二道河则沟域
	II	第四系砂土层	3.7	3.7	0.15	—	头道河则沟域
第2层	全区	更新统黄土层	6.5×10 ⁻²	8.5×10 ⁻²	—	1×10 ⁻⁶	
第3层	全区	侏罗系岩层	3.6×10 ⁻²	9.0×10 ⁻⁵	—	1×10 ⁻⁵	导水裂隙带之上原岩层
第4层	I	侏罗系岩层	20.0	85.0	—	1×10 ⁻⁵	导水冒裂带
	II	侏罗系岩层	3.6×10 ⁻²	9.0×10 ⁻⁵	—	1×10 ⁻⁵	冒裂带的两侧原岩层
第5层	I	侏罗系煤层	—	—	—	1×10 ⁻⁵	采空区
	II	侏罗系煤层	3.6×10 ⁻²	9.0×10 ⁻⁵	—	1×10 ⁻⁵	采空区的两侧原煤层

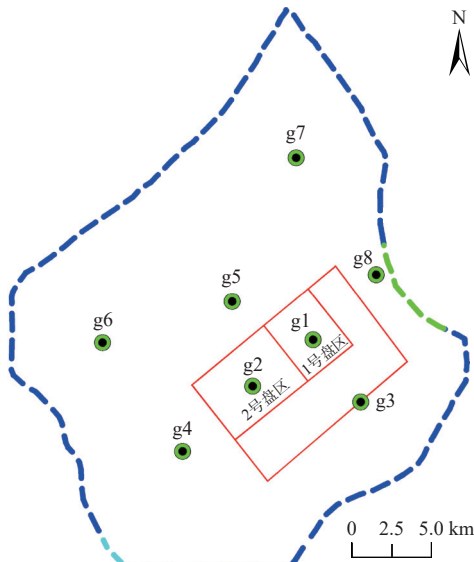


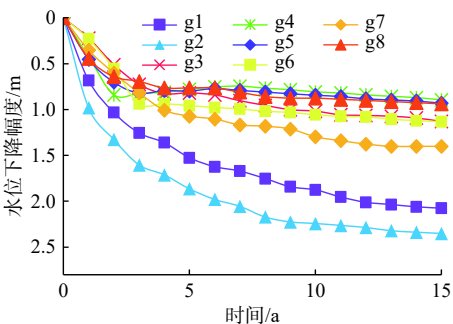
图 9 模型区地下水位计算点位置图

Fig. 9 Location of the groundwater level calculation points in the model area

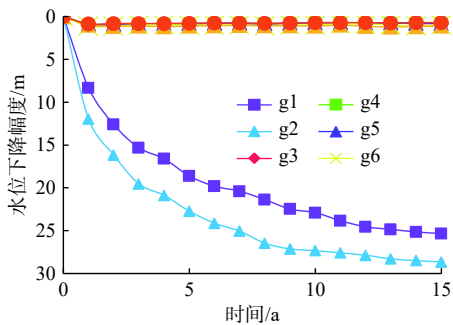
在潜水埋深较小的区域中心,如河谷和滩地的区域中心,主要以湿生、中生植物为主,且长势较为旺盛。当潜水埋深逐渐增大但植物根系仍可吸收时,湿生、中生植物长势会随之变差,但还可生存。其中,湿生植物对地下水的依赖性较强,抗旱性较差,随着潜水埋深增大,湿生植物逐渐死亡,发生与中生植物间的演替;当潜水埋深增大至植物根系无法吸收时,湿生、中生植物都将无法生存,风沙滩地区植被将从沙柳灌丛向沙蒿灌丛变迁,小叶杨向旱柳变迁。在潜水埋深较大区域,主要生长旱生灌木,中生乔木较少。其中,旱生植物对地下水的依赖性微弱,耐旱性强,其生长过程中所需水分主要来源于降水以及土壤水^[9-11]。

(2)植物生长与潜水埋深关系

植物吸收水分主要依靠根系,其根系的发育直接影响着植物本身的长势。当植物根系到达潜水面或



(a) 第四系松散层潜水



(b) 侏罗系碎屑岩层承压水

图 10 预测期末的地下水降深曲线图

Fig. 10 Groundwater level drawdown at the end of the prediction period

者毛细带时,其根系可以正常吸收地下水;但当植物根系不能到达毛细带(即根系深度小于潜水埋深减去毛细水上升高度)时,其根系将无法吸收地下水^[12]。根据前人对榆神矿区的相关研究可知,不同潜水埋深矿区沙柳、沙蒿、小叶杨和旱柳等 4 种代表性植物的长势和覆盖度有所不同,矿区代表性植物长势与潜水位埋深关系^[13-15],如表 3 所示。

结合矿区的实际调查和有关资料,确定煤层开采影响区内沙柳和小叶杨生长的潜水位临界埋深:潜水埋深小于 5 m 时,沙柳和小叶杨正常生长;超过 5 m 后,沙柳和小叶杨长势开始变差,其中部分甚至枯萎;

表 2 研究区的地下水补排量预测结果表

Table 2 Groundwater recharge and discharge prediction results in the study area

补排项		补排量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)		
		现状	预测 期末	差值(预测 期末-现状)
补给项	降水入渗	16.38	16.38	0
	二类边界	1.11	1.11	0
	合计	17.49	17.49	0
排泄项	潜水蒸发	6.18	5.76	-0.42
	潜水溢出	8.64	8.57	-0.07
	一、二类边界	0.42	0.42	0
	矿坑涌水	2.41	3.08	0.67
	合计	17.65	17.83	0.18
	均衡差	-0.16	-0.34	-0.18

表 3 研究区植物长势与潜水位埋深关系表

Table 3 Relationship between plant growth and depth to the water table in the study area

植物 名称	潜水位 埋深/m	生长 情况	植物 名称	潜水位 埋深/m	生长 情况
沙柳	0.5 ~ 1.5	生长旺盛	小叶杨	0.5 ~ 1.5	生长旺盛
	>1.5 ~ 3.0	生长良好		>1.5 ~ 3.0	生长良好
	>3.0 ~ 5.0	生长正常		>3.0 ~ 5.0	生长正常
	>5.0 ~ 8.0	生长较差		>5.0 ~ 8.0	生长较差, 其中部分枯萎
	>8.0	生长差		>8.0	生长差, 其中大都枯死
沙蒿	0.5 ~ 1.5	生长旺盛	旱柳	0.5 ~ 3.0	生长旺盛
	>1.5 ~ 3.0	生长良好		>3.0 ~ 5.0	生长良好
	>3.0 ~ 7.0	生长正常		>5.0 ~ 8.0	生长正常
	>7.0 ~ 12.0	生长较差		>8.0 ~ 12.0	生长较差, 其中部分枯萎
	>12.0	生长差		>12.0	生长差, 其中大都枯死

潜水位埋深超过 8 m 后,沙柳和小叶杨长势较差,大都枯死。影响沙蒿和旱柳生长的潜水位临界埋深:潜水位埋深小于 7 m 时,沙蒿和旱柳正常生长;超过 7 m 后,沙蒿和旱柳长势开始变差,其中部分枯萎;潜水位埋深超过 12 m 后,沙蒿和旱柳长势较差,大都枯死。

(3)研究区植被生长现状

矿区以风沙地貌为主,其中流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘的植被覆盖度分别为<15%、15%~40%、>40%,其面积分别为 6.97, 37.47, 31.58 km²,占比分别为 9.17%、49.29%、41.54%。矿区位于干旱半干旱区,现状地下水位埋深在 2~6 m(图 11)。矿区内以旱生地带性植被为主,仅在潜水位埋深较小的局部区域生长中生植物。

结合模型区现状潜水位埋深和沙漠植被类型分布情况,统计矿区 4 种代表性植被现状生长状态和分布

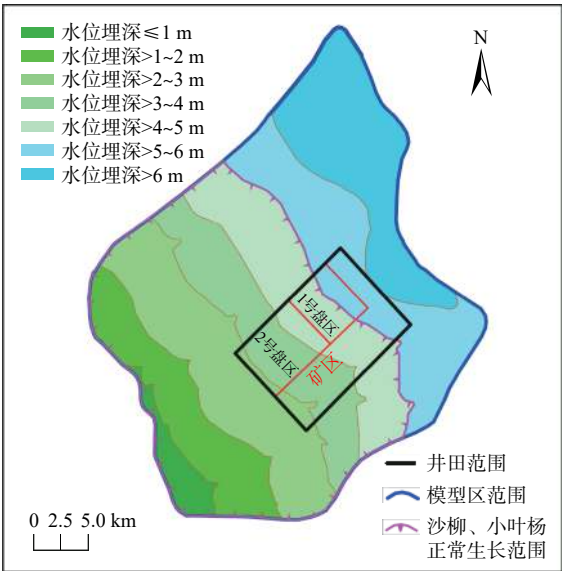


图 11 模型区现状地下水位埋深图

Fig. 11 Current depth to the water table in the model area

面积,如表 4 所示。矿区内现状潜水位埋深 2~5 m 的面积为 69.64 km²,沙柳和小叶杨能维持正常生长;矿区内现状潜水位埋深 5~6 m 的面积为 20.72 km²,沙柳和小叶杨长势较差、部分枯萎。在矿区内现状潜水位埋深小于 6 m,沙蒿和沙柳在整个矿区内均能正常生长。

表 4 研究区现状植物生长情况分布面积

Table 4 The distribution area of current plant growth in the study area

植物	生长状态	分布面积 /km ²	
		模型区(含矿区)	矿区内
沙柳、小叶杨	正常生长	399.25	69.64
	生长较差、部分枯萎	198.85	20.72
沙蒿、旱柳	正常生长	507.74	90.36

4.1.2 煤层开采对沙漠植被影响分析

在煤层开采过程中,导水裂隙带最大高度虽然不会与第四系潜水含水层直接沟通,但由于采空区顶板上覆岩层变薄以及冒裂带水头降低导致水力坡度加大,引起上部第四系潜水下渗及其水位下降,从而对矿区内地表沙漠植被生长造成不同程度的影响。因此,利用 Visual Modflow 软件输出煤层开采影响下的预测期末潜水位降深场图,并将其与模型区现状潜水位埋深图叠加后得到预测期末的潜水位埋深图,如图 12 所示。

由图 12 可知,矿区开采煤层时,矿区内潜水位降深值在 2.08~2.35 m 之间,潜水位埋深将从 2.00~6.00 m 下降至 4.08~8.35 m,中生植被正常生长受到抑制,中

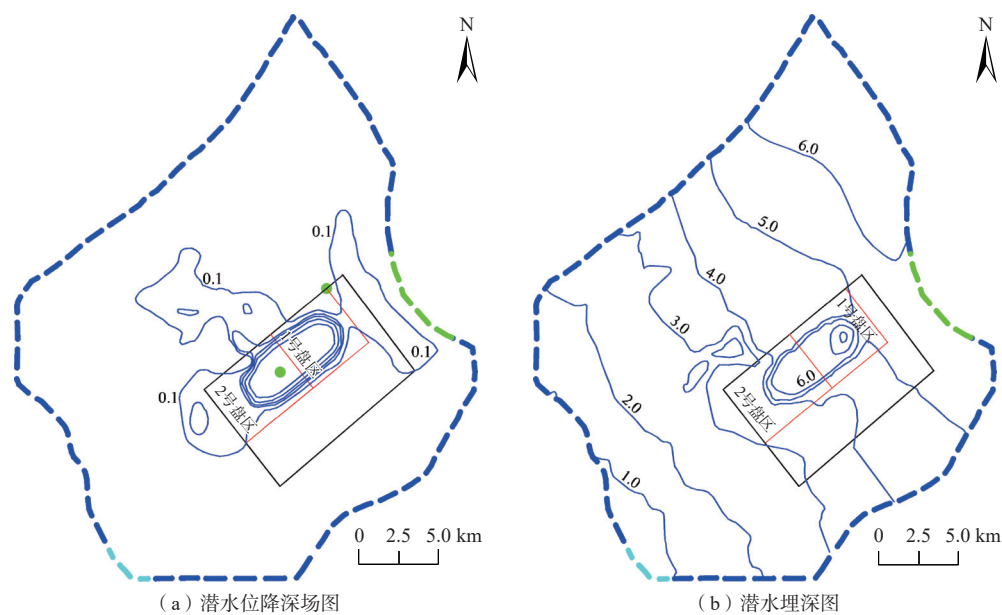


图 12 模型区预测期末潜水位降深场和潜水埋深图

Fig. 12 The model area predicts the final diving level drawdown field and diving depth map

生植被类型将向旱生植被类型方向发展。代表性植物沙柳和小叶杨在煤层开采过程中潜水埋深降至 5.0 m 的局部地段出现长势较差和部分枯萎的情况,少数沙嵩和旱柳将出现生长较差和少量枯萎的情况。

在模型区预测期末潜水埋深图基础上,统计矿区先期开采预测期末的 4 种代表性植被生长状态和分布面积(表 5)。预测期末潜水埋深在 2~5 m 之间的面积为 50.83 km²,沙柳和小叶杨能正常生长;预测期末潜水埋深 5~6 m 之间的面积为 39.53 km²,沙柳和小叶杨长势较差、部分枯萎。预测期末潜水埋深超过 7 m 的面积为 0.22 km²,沙嵩长势变差、部分枯萎。潜水埋深超过 8 m 的区域,旱柳长势开始变差,且有部分枯萎。

表 5 研究区预测期末植物生长情况分布面积表

Table 5 Distribution area of plant growth in the study area at the end of the prediction period			
植物	生长状态	分布面积 /km ²	
		模型区(含井田)	井田内
沙柳、小叶杨	正常生长	373.64	50.83
	生长较差、部分枯萎	224.46	39.53
沙嵩、旱柳	正常生长	597.88	90.14
	生长较差、部分枯萎	0.22	0.22

综上所述,研究区煤层开采涌水量数值模拟预测期末,由于第四系潜水位埋深增大,在矿区内潜水埋深超过 5 m 的区域较现状将增加 18.81 km²,原本在区域能维持正常生长的沙柳和小叶杨将出现长势变差、

部分甚至枯萎,中生植被类型将向旱生植被方向演替。煤层开采造成的第四系潜水埋深超过 7 m 的面积仅为 0.22 km²,因此对沙嵩和旱柳的影响很小。由于矿区所处毛乌素沙漠南缘,矿区内的沙漠植被具有一定的防沙固土作用,矿区内植被多样性的破坏和覆盖度的减少将会导致矿区局部地段半固定沙丘转为流动沙丘^[16]。

4.2 矿区沙漠植被的保护措施

矿区开采过程中由于矿井涌水引发其域内潜水位下降,从而威胁沙漠植被的正常生长与沙漠植被破坏。因此,需有效防控潜水位下降深度以减轻对地表沙漠植被的影响。

(1)在选择矿区开采方案时,应计算不同采高对应发育的导水裂隙带高度,尽可能通过限制开采冒裂高度(如分层开采)的方式,抑制导水裂隙带在矿区未来开采过程中的向上延伸;此外,还可以通过减小矿区开采的工作面宽度,遏制矿区开采时导水裂隙带充分发育的程度,以达到“保水采煤”的目的^[17-19],从而减轻潜水位下降对沙漠植被生长的影响。

(2)矿区直罗组和延安组岩层主要为泥岩、粉砂质泥岩及粉细砂岩,在含水层之间有较好的隔水作用,但在煤层开采后形成的导水裂隙带将减弱其隔水性能,甚至形成强导水通道,从而导致地下水渗漏。因此,可确定一些关键隔水层及其位置,人为制造成弱透水层结构层^[20],该结构层既可防止上部第四系潜水大量下渗,保护含水层结构不受破坏,实现对沙漠

植被生态水位的保护,又能保证下部各含水层一定能力的补给来源。

(3)采用煤矿充填开采技术及时对采空区上覆岩层进行充填支撑,使上部岩体具有稳定的岩板支撑结构,更加有效地抵制矿区导水裂隙带的发育高度,以减少第四系潜水下渗量以及潜水位下降,从而减轻对地表沙漠植被的影响;在矿区开采时,还可以采用帷幕注浆隔水、灌浆堵漏防渗墙和留设煤柱等方式减少矿井涌水。

(4)依靠生态的自我修复和人为干预保护矿区沙漠植被^[21]。研究区地处干旱半干旱气候区,多年平均降水量在 380~420 mm。可在矿区内设置地下水位监测孔,以监测开采期间潜水埋深是否在矿区临界生态水位以内^[22]。在地下水位下降区,除自然降水外,也可以利用矿井涌水进行人工灌溉,以确保沙漠植被的正常需水,维持矿区地表的原始生态沙漠植被正常生长。

5 结论

(1)本研究刻画了符合实际的模型区边界条件,并运用实测资料、模型试算反演、多年经验相结合的方式确定水文地质参数,反复改正错误认识和修正模型,提高了模型预测精度,预测了矿区先期开采区的矿井涌水量为 $3.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2)煤层开采涌水引起矿区内潜水埋深超过 5 m 的区域较现状增加 18.81 km²,使原本正常生长的沙柳和小叶杨长势变差,甚至部分枯萎,中生植被类型向旱生植被方向发生演替,严重可能导致沙漠活化。在矿区内,潜水埋深超过 7 m 的分布面积较小,对沙蒿和沙柳的影响很小。

(3)针对煤层开采涌水引起潜水位下降、影响矿区沙漠植被正常生长的问题,提出了通过改变煤层开采方式、监测矿区临界生态水位、利用矿井涌水进行人工灌溉沙漠植被等措施,实现对矿区原始沙漠植被的有效保护,以遏制沙漠植被退化。

参考文献 (References):

- [1] 王晓蕾. 煤矿开采矿井涌水量预测方法现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(30): 12255 - 12267. [WANG Xiaolei. Present situation and development trend of coal mine discharge forecast method[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(30): 12255 - 12267. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄欢. 矿井涌水量预测方法及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(增刊1): 127 - 130. [HUANG Huan. Prediction method of mine inflow and its development[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(Sup 1): 127 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈酪知, 刘树才, 杨国勇. 矿井涌水量预测方法的发展[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(1): 68 - 72. [CHEN Mingzhi, LIU Shucai, YANG Guoyong. The development of mining water inflow predict method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(1): 68 - 72. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 薛禹群, 吴吉春. 地下水数值模拟在我国回顾与展望——为《水文地质工程地质》创刊40年而作[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(4): 23 - 26. [XUE Yuqun, WU Jichun. Numerical simulation of groundwater in China: Retrospect and prospect: Written for the 40th anniversary of hydrogeology engineering geology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1997, 24(4): 23 - 26. (in Chinese)]
- [5] 薛禹群, 吴吉春. 数值模拟是反映客观规律和定量评价的重要手段: 兼评几种流行看法和有关问题[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(2): 2 - 4. [XUE Yuqun, WU Jichun. Numerical simulation is an important means to reflect objective laws and quantitative evaluation—Also comment on several popular views and related issues[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(2): 2 - 4. (in Chinese)]
- [6] 王浩, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 1 - 12. [WANG Hao, LU Chuiyu, QIN Dayong, et al. Advances in method and application of groundwater numerical simulation[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 1 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 武强, 董东林, 傅耀军, 等. 煤矿开采诱发的水环境问题研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(1): 22 - 25. [WU Qiang, DONG Donglin, FU Yaojun, et al. Research on water pollution induced by coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(1): 22 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水对植被的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 542 - 549. [CHEN Yaning, LI Weihong, XU Hailiang, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 542 - 549. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 郑丹, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 干旱区地下水与天然植被关系研究综述[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 160 - 167.

- [ZHENG Dan, LI Weihong, CHEN Yapeng, et al. Relations between groundwater and natural vegetation in the arid zone[J]. Resources Science, 2005, 27(4): 160 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 25 – 33. [CAO Le, NIE Zhenlong, LIU Min, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 25 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王雅梅, 张青青, 李骊, 等. 新疆克里雅河下游植被与地下水埋深关系初探[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 562 – 569. [WANG Yamei, ZHANG Qingqing, LI Li, et al. Preliminary study on the relationship between vegetation and groundwater depth in the lower reaches of the Keriya River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 562 – 569. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 邢恩德, 何京丽, 张铁钢, 等. 煤矿开采对矿坑周边植被覆盖度、生物量、土壤水分和地下水水位的影响[J]. 草原与草坪, 2019, 39(4): 53 – 57. [XING Ende, HE Jingli, ZHANG Tiegang, et al. Grassland ecological factors on industrial disturbance response law research[J]. Grassland and Turf, 2019, 39(4): 53 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张晨招. 曹家滩煤矿采动裂隙带与矿井涌水数值模拟研究[D]. 西安: 西北大学, 2013. [ZHANG Chenzhao. The numerical simulation research of Caojiatan mining-induced fracture zoning and swallet[D]. Xi'an: Northwest University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨泽元. 地下水引起的表生生态效应及其评价研究——以秃尾河流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2004. [YANG Zeyuan. Study on supergene ecological effect excited by groundwater and its evaluation: Take Tuwei River drainage as an example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 67 – 74. [YANG Zeyuan, WANG Wenke, HUANG Jinting, et al. Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, 34(8): 67 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 钱者东, 秦卫华, 沈明霞, 等. 毛乌素沙地煤矿开采对植被景观的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 299 – 303. [QIAN Zhedong, QIN Weihua, SHEN Mingxia, et al. Impacts of coal mining on vegetation landscape in Muus sandland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 299 – 303. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 马雄德, 范立民. 榆神矿区地下水与生态环境演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 245 – 252. [MA Xiongde, FAN Limin. Evolution characteristics of groundwater and eco-environment in Yulin – Shenmu mining area[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 245 – 252. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究30年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 1 – 30. [FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 1 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 27 – 35. [FAN Limin. Scientific connotation of water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 27 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 侯恩科, 车晓阳, 冯洁, 等. 榆神府矿区含水层富水特征及保水采煤途径[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 813 – 820. [HOU Enke, CHE Xiaoyang, FENG Jie, et al. Abundance of aquifers in Yushenfu coal field and the measures for water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 813 – 820. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 杨志. 陕北榆神矿区生态地质环境特征及煤炭开采影响机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. [YANG Zhi. Study on the characteristics of eco-geological environment and the mining effect mechanism in Yushen coal mine district of Northern Shaanxi[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真