



辽宁抚顺西露天煤矿涌水研究

石旭飞, 江山, 崔健, 郭常来

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 利用水文地质钻探、同位素技术、水位统测等方法, 分析西露天矿涌水来源, 评价各来源对西露天矿涌水的补给量, 为西露天矿地质灾害评估和矿坑规划利用提供科学依据。结果表明: 西露天矿坑是区域地下水汇集区, 周边地下水向矿坑内径流。周边地区进入西露天矿的总水量为 $2477.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 来源主要为浑河通过北帮第四系含水层的侧向补给和大气降水补给。其中北帮浑河侧向补给的涌水量约 $1115.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 45.0%, 大气降水直接降入矿坑水量约 $997.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 40.3%。古城子河通过西露天矿西帮侧向补给矿坑的水量约 $177.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; 地下水通过西露天矿南帮杨柏河、刘山河古河道等地段侧向径流补给的水量约 $186.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; 东帮在东露天矿影响下接近疏干。

关键词: 西露天矿; 矿坑涌水; 同位素; 地下水; 补给量; 辽宁省

STUDY ON THE WATER INRUSH OF WEST OPEN-PIT COAL MINE IN FUSHUN, LIAONING PROVINCE

SHI Xu-fei, JIANG Shan, CUI Jian, GUO Chang-lai

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: Through the methods of hydrogeological drilling, isotope technology and water level measurement, the paper analyzes the sources of water inrush in the West Open-Pit Coal Mine and evaluates the water recharge from each source, which provides scientific basis for geological hazard assessment and pit planning and utilization of the mine. The results show that the west open-pit is a regional groundwater gathering area, with runoff from the surrounding groundwater. The total amount of water flowing to open-pit from surrounding areas is $2477.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, mainly from the lateral recharge of Hunhe River through the Quaternary aquifer in the north slope of the open-pit, and atmospheric precipitation recharge, among which the water inflow from Hunhe River is about $1115.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, accounting for 45.0%, and the water amount of atmospheric precipitation directly falling into the mine is about $997.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, taking up about 40.3%. The water supply of Guchengzi River through the west slope of the open-pit is about $177.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, while that of groundwater supplied by lateral runoff from the paleochannels of Yangbai River and Liushan River in the south slope of the open-pit is about $186.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. The east slope is close to draining under the influence of East Open-Pit Mine.

Key words: West Open-Pit Mine; mine water inrush; isotope; groundwater; recharge; Liaoning Province

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-07-06. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“辽西凌河地区综合地质调查”(DD20189711).

作者简介: 石旭飞(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事环境地质调查与研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//shixufei1986@163.com

通信作者: 江山(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事遥感地质研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//396767787@qq.com

0 引言

辽宁抚顺西露天煤矿有近百年的开采历史, 为国家的经济发展做出了巨大贡献. 由于西露天矿边坡地质灾害频发^[1-6], 且位于抚顺中心城区, 对城市的环境、生存空间及发展影响巨大^[7-9], 是抚顺作为资源枯竭型城市转型升级的重要阻碍.

影响边坡稳定性的因素主要有高陡边坡的重力作用^[10-13]、降雨^[14]和地下水渗流^[15-16]. 地下水渗流可使西露天矿泥页岩质边坡软化、泥化, 同时由于渗流作用而造成泥页岩质边坡体积膨胀, 产生较大膨胀压力, 造成边坡失稳^[16-17]. 西露天矿近半数边坡滑坡发生在 6—9 月份雨季. 强降雨条件下, 随着地下水位升高, 边坡岩体的静水压力加大, 边坡软质岩层的泥化过程加快, 边坡岩石地质体的力学强度降低^[17-18]. 因此, 为定量研究地下水渗流对西露天矿边坡稳定性的影响以及制定科学的排水方案, 就需要深入研究西露天矿的涌水来源及其补给量.

本研究基于已有地质工作, 利用水文地质钻探、同位素技术、水位统测等方法, 分析西露天矿涌水来源, 进而评价各来源对西露天矿涌水的补给量, 为西露天

矿地质灾害评估和矿坑规划利用提供水文地质科学依据.

1 矿区及周边地质概况

抚顺西露天煤矿位于抚顺市区南部, 矿坑上部尺寸约 6600 m×2200 m, 底部尺寸约 3700 m×400 m^[19], 深 380~420 m. 西露天矿北面为浑河谷冲积平原, 南为丘陵山地, 西为古城子河河谷地带, 东为东露天矿.

西露天矿附近地表水系主要有浑河、古城子河. 浑河是抚顺地区的主要干流, 位于矿区北部, 平行西露天矿北帮由东向西流经抚顺市区, 距离北帮 1.4~1.8 km, 水力坡度约 1.2‰. 古城子河位于矿区西部, 是浑河主要支流之一, 由东南向西北汇入浑河干流(图 1).

矿区北部上覆第四系松散岩层, 主要分布于浑河河谷地带, 厚度 12~13 m, 含水层岩性主要为砂砾石或卵石, 上部有少量亚黏土或亚砂土, 夹细砂层; 下伏基岩主要为花岗片麻岩和古近系泥岩、页岩, 为基岩裂隙弱含水层(图 2). 西露天矿南帮第四系松散岩层主要分布于西端的古城子河阶地和东段及杨柏河、刘山河古河道, 岩性主要为中细砂、粗砂、砾石, 厚度 10~

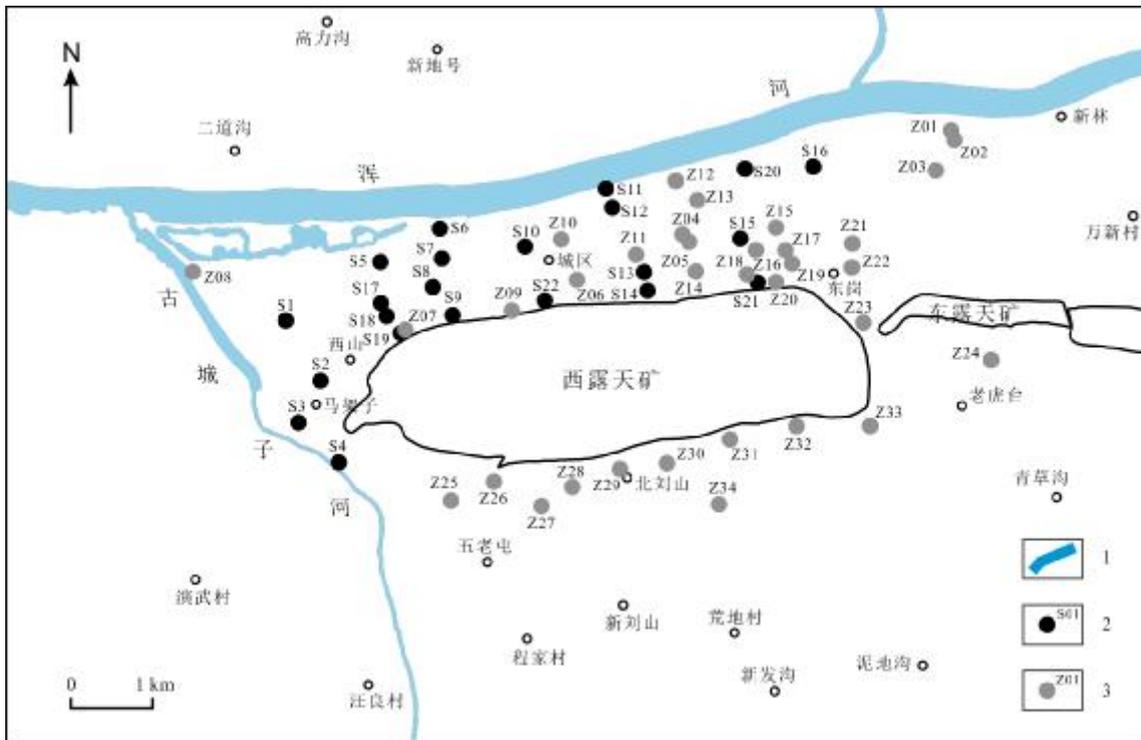


图 1 西露天矿区及周边钻孔分布图

Fig. 1 Distribution map of boreholes within and around the West Open-Pit Mine

1—河流(river); 2—施工钻孔及编号(studied borehole and number); 3—搜集钻孔及编号(collected borehole and number)

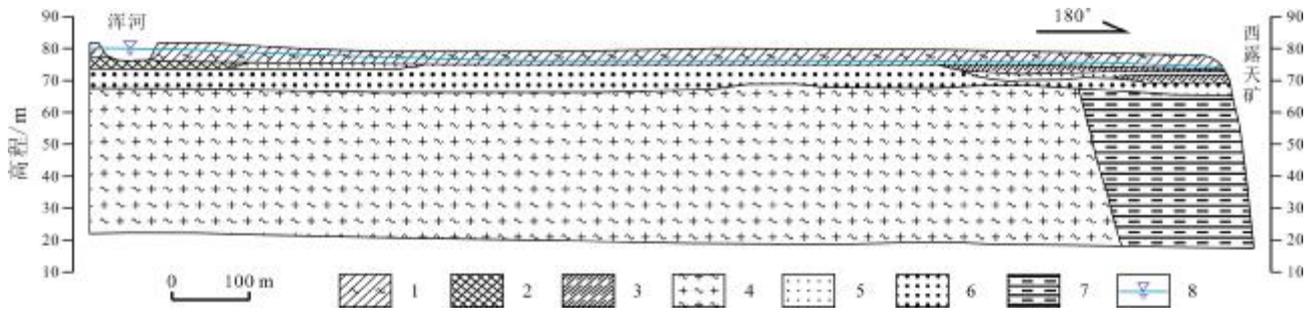


图 2 西露天矿北部水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile in the north of the West Open-Pit Mine

1—杂填土(miscellaneous fill); 2—素填土(plain fill); 3—粉质黏土(silty clay); 4—花岗片麻岩(granite gneiss); 5—粗砂(coarse sand); 6—圆砾(round gravel); 7—泥岩(mudstone); 8—等水位线(water table)

20 m, 下伏基岩主要为玄武岩和凝灰岩。

2 研究方法

2.1 钻孔布设

为获取计算西露天矿涌水量的相关参数,本研究共收集矿区周边钻孔 34 个(Z1—Z34),主要分布于西露天矿南部和东北部,在矿区北部和西部钻孔资料较少。因此,本研究在西露天矿北部和西部共布设水文地质钻孔 22 个(S1—S22),总进尺 600 m。各钻孔分布和参数见图1 和表 1。

表 1 西露天矿周边第四系含水层底板高程统计表

Table 1 Floor elevations of Quaternary aquifer around the West Open-Pit Mine

钻孔编号	底板高程/m	钻孔编号	底板高程/m	钻孔编号	底板高程/m	钻孔编号	底板高程/m
S1	61.5	S15	69.2	Z07	57.0	Z21	74.1
S2	62.9	S16	76.9	Z08	64.7	Z22	83.8
S3	64.9	S17	62.7	Z09	54.7	Z23	94.7
S4	66.7	S18	59.7	Z10	61.7	Z24	116.0
S5	63.8	S19	57.3	Z11	66.4	Z25	81.5
S6	65.1	S20	67.9	Z12	67.6	Z26	129.3
S7	64.8	S21	77.5	Z13	66.2	Z27	110.5
S8	60.6	S22	62.9	Z14	63.5	Z28	127.6
S9	61.4	Z01	69.8	Z15	90.1	Z29	101.1
S10	67.2	Z02	67.1	Z16	79.6	Z30	108.4
S11	66.4	Z03	66.1	Z17	103.0	Z31	96.2
S12	65.6	Z04	65.6	Z18	77.8	Z32	108.9
S13	67.3	Z05	68.4	Z19	88.1	Z33	104.0
S14	64.4	Z06	64.2	Z20	75.5	Z34	108.2

2.2 水位统测

为查明西露天矿周边地下水流程和补径排条件,本研究在西露天矿周边地区进行了水位统测共 80 点次,水位统测点分布见图 3。

2.3 同位素样品采集和测试

为研究西露天矿坑涌水来源,在矿区周边采集地下水 and 地表水同位素样品 20 件,其中浑河水样品 3 件,古城子河水样品 2 件,地下水样品 11 件,矿坑涌水样品 4 件。同位素样品分布见图 1,样品由中国地质科学院水文地质环境地质研究所测试完成,测试结果见表 2。

表 2 同位素样品测试结果

Table 2 Test results of isotope samples

编号	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	取样位置	编号	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	取样位置
HQ01	-60	-8.0	古城子河	HQ11	-67	-9.2	地下水
HQ02	-61	-8.0	古城子河	HQ12	-65	-8.8	地下水
HQ03	-66	-9.1	浑河	HQ13	-65	-8.9	地下水
HQ04	-66	-9.0	浑河	HQ14	-66	-9.0	地下水
HQ05	-65	-9.0	浑河	HQ15	-66	-9.0	地下水
HQ06	-64	-8.8	矿坑涌水	HQ16	-66	-9.2	地下水
HQ07	-65	-8.9	矿坑涌水	HQ17	-72	-9.7	地下水
HQ08	-64	-8.7	矿坑涌水	HQ18	-63	-8.9	地下水
HQ09	-64	-8.8	矿坑涌水	HQ19	-64	-9.0	地下水
HQ10	-66	-9.2	地下水	HQ20	-65	-9.0	地下水

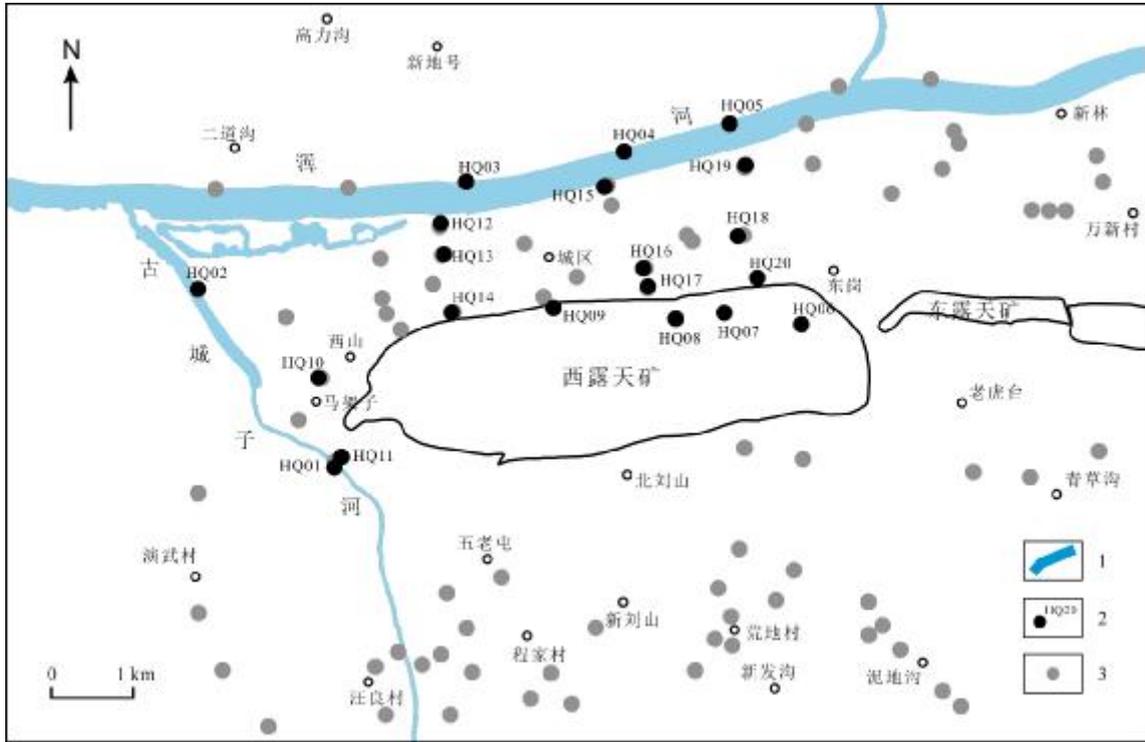


图 3 西露天矿周边同位素样品和水位统测点分布图

Fig. 3 Distribution of isotope samples and water level measurement points around the West Open-Pit Mine
1—河流 (river); 2—同位素采样点及编号 (isotope sample and number); 3—水位统测点 (water level measurement point)

3 涌水来源分析

由西露天矿周边地表水和地下水样品同位素组成 (图 4) 可以看出, 矿坑涌水氢氧稳定同位素组成在大气降水线附近, 并且与地下水和浑河水氢氧稳定同位素组成比较接近, 表明西露天矿涌水主要来源于大气降水、地下水和浑河水, 古城子河对涌水的补给较少。

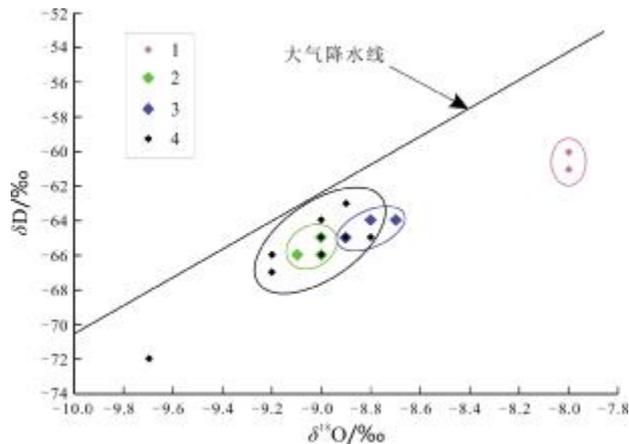


图 4 西露天矿周边地表水和地下水样品同位素组成分布图

Fig. 4 Isotopic composition distribution of surface water and groundwater samples around the West Open-Pit Mine
1—古城子河 (Guchengzi River); 2—浑河 (Hunhe River); 3—矿坑涌水 (mine water inrush); 4—地下水 (groundwater)

根据水位统测结果, 浑河水位为 69.2~74.7 m, 古城子河水位为 69.7~72.3 m. 西露天矿北帮与浑河、古城子河之间的第四系孔隙含水层连续分布, 且含水层底板低于浑河、古城子河水位 3~12 m, 底板坡度约 0.2%. 浑河和古城子河沿途通过侧向补给第四系孔隙潜水流向矿坑, 从第四系底板直接渗出。

除第四系松散岩类含水层外, 矿区及周边还存在白垩系龙凤坎组砂岩裂隙水含水层、古近系西露天组泥页岩裂隙水含水层、古近系玄武岩凝灰岩含水层、鞍山群片麻岩含水层等弱含水层. 上述含水层地下水沿基岩构造破碎带和风化破碎带侧向流入西露天矿。

总体上, 由于西露天矿不停地进行矿坑疏干, 大量排泄地下水, 周边地下水向矿坑内径流, 形成一定范围的人工流场, 矿坑周边地下水位急剧下降, 水力梯度达 8%~15% (图 5). 受西露天矿疏干影响, 越靠近矿区, 地下水位变幅越小 (0.8~1.2 m).

4 涌水补给量评价

4.1 大气降水对涌水的补给

大气降水对涌水的补给量取决于降水量和矿坑汇

水面积的大小，所以直接进入西露天矿的大气降水量通过以下公式计算得出：

$$Q_{\text{降水}}=H_{\text{雨}}\cdot A$$

其中， $H_{\text{雨}}$ 为降雨量， A 为汇水面积。

通过对抚顺水文站 2010—2019 年的降水资料进行统计分析（表 3），抚顺市多年平均降水量为 779.5 mm。根据西露天矿周边地形条件，矿区降雨汇水面积约为 12.8 km²。通过计算，直接进入西露天矿的大气降水量为 997.8×10⁴ m³/a。

4.2 地表水对涌水的补给

由于浑河与西露天矿北帮距离较短(1.4~1.8 km)，且浑河流向与西露天矿北帮走向基本平行（图 1），由矿区周边钻孔第四系含水层底板高程统计（表 1）可知，浑河与西露天矿北帮之间的第四系含水层底板接近水平。因此，对浑河与西露天矿北帮之间的第四系

松散岩类含水层进行如下概化：

- 1)含水层均质各向同性,第四系地层底板水平,上部降雨为均匀入渗；
- 2)浑河与西露天矿北帮之间的第四系含水层中的潜水流为一维渐变流,且趋于稳定；
- 3)浑河河床底板与第四系含水层底板位于同一水平面；
- 4)浑河与西露天矿北帮之间第四系松散岩类孔隙水不存在分水岭。

基于以上概化，浑河对西露天矿的补给单宽流量可用以下公式计算^[20]：

$$q=K\frac{h_1^2-h_2^2}{2l}+\frac{Wl}{2}$$

其中， K —浑河与西露天矿北帮之间的第四系含水层渗透系数(m/d)； l —浑河与西露天矿北帮之间的距离

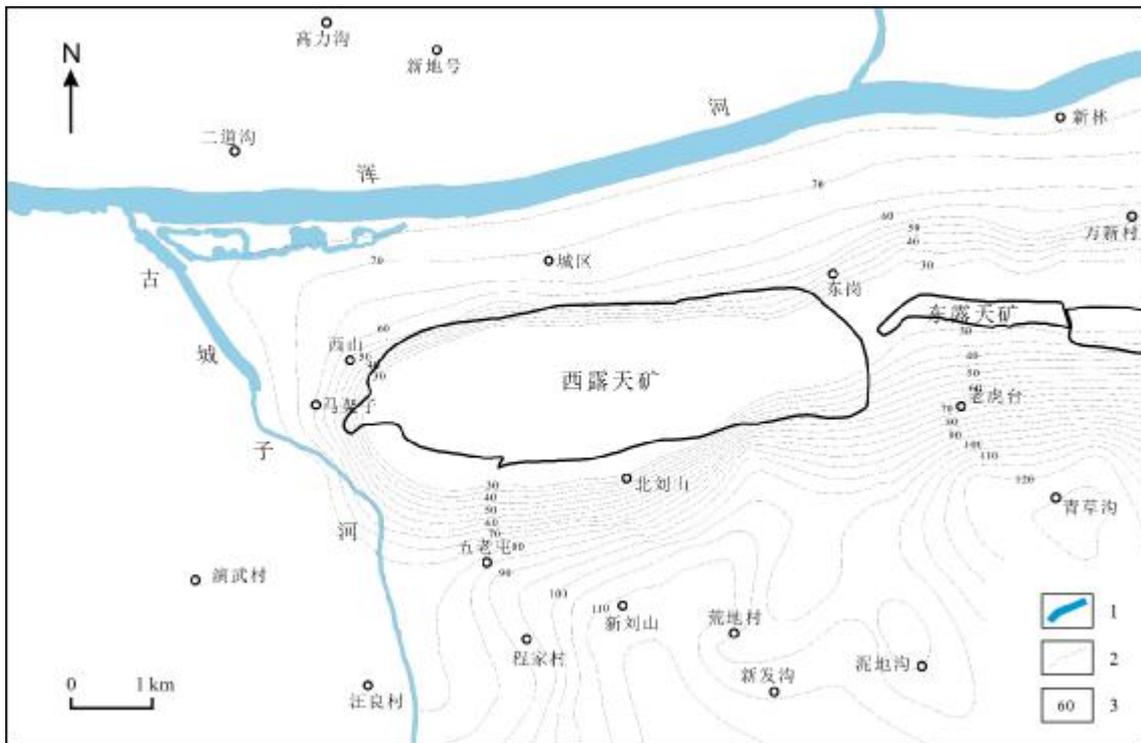


图 5 西露天矿周边地下水等水位线图

Fig. 5 Contour of groundwater level around the West Open-Pit Mine

1—河流(river); 2—等水位线(contour of water table); 3—水位值/m (water level value)

表 3 西露天矿历年平均降雨量统计表

Table 3 Average rainfall of the West Open-Pit Mine over the years

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
降水量/mm	1148.6	527.5	864.3	1025.6	537.7	645.5	1046.8	621.7	648.8	728.8

(m); h_1 —浑河水面至底板的距离(m); h_2 —西露天矿北帮潜水水面至底板的距离(m); W —浑河与西露天矿北帮之间单位时间、单位面积上的降雨入渗补给量(m/d).

浑河对西露天矿的年度补给量可用以下公式计算:

$$Q_{\text{浑河}}=q \cdot L \cdot 365$$

其中 L 为西露天矿北帮长度.

西露天矿北帮长度(L)取值为 6 500 m, 浑河与矿北帮之间的距离(l)取值为 1 600 m. 根据已有资料, 降雨渗入补给系数 α 取值 0.23. 通过 S10 钻孔抽水试验计算得出的渗透系数为 104.1 m/d. 结合水位统测结果, 计算得出浑河对西露天矿涌水的补给量为 $1\ 115.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$.

古城子河主要通过西帮对西露天矿补给, 其补给量的计算方法与浑河相同. 其中西露天矿西帮长度取值为 2 200 m, 古城子河与西帮之间的平均距离取值为 1 100 m. 结合水位统测结果, 计算得出古城子河对西露天矿的补给量计算结果为 $177.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$.

4.3 地下水对涌水的补给

由于西露天矿周边基岩裂隙含水层富水性较弱, 且经过实地勘察矿区基岩裂隙水渗水点出水量较小, 多为点状出水, 且形成水流的出水点较少, 故本研究仅计算第四系松散岩类含水层地下水对西露天矿涌水的补给量.

由于西露天矿东帮范围较小, 且在东露天矿多年共同疏干作用下, 其含水层的地下水赋存较少, 而北帮和西帮地下水对西露天矿涌水的补给量已包含在浑河和古城子河对西露天矿涌水的补给量中, 所以仅计算西露天矿南帮地下水对涌水的补给量.

由钻孔揭露的地层信息来看, 西露天矿南帮第四系松散岩类含水层主要分布于西端的古城子河阶地(Z25 钻孔)和矿区东段及杨柏河、刘山河古河道(Z30、Z31、Z32 钻孔), 含水层岩性主要为中细砂、粗砂及砾石, 厚度 10.4~32.2 m, 渗透系数约 30 m/d.

从地下水位统测数据来看, 南帮西端第四系松散岩类含水层接近疏干, 其地下水位低于第四系松散岩类含水层底板, 故南帮地下水对西露天矿涌水补给量的计算范围仅为南帮东段第四系松散岩类含水层.

基于以上概化, 南帮地下水对西露天矿的补给单宽流量可用以下公式计算^[20]:

$$q=K \frac{h_1^2-h_2^2}{2l} + \frac{Wl}{2}$$

其中, K —第四系含水层渗透系数(m/d); l —地下水补给区与西露天矿南帮之间的距离(m); h_1 —补给区地下水位至底板的距离(m); h_2 —西露天矿南帮地下水位至底板的距离(m); W —西露天矿南帮单位时间、单位面积上的降雨入渗补给量(m/d).

地下水对西露天矿的年度渗漏补给量可用以下公式计算:

$$Q_{\text{地下水}}=q \cdot L \cdot 365$$

其中 L 为西露天矿南帮长度.

通过以上公式, 结合地下水位统测结果和钻孔揭露的地层信息, 计算可得南帮地下水对西露天矿的年度渗漏补给量为 $186.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$.

综上, 通过计算, 周边地区进入西露天矿的总水量为 $2\ 477.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 来源主要为北帮浑河通过第四系含水层侧向补给和大气降水补给. 其中北帮浑河侧向补给的涌水量约 $1\ 115.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 45.0%; 大气降水直接降入矿坑水量约 $997.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 40.3%. 西帮涌水量约 $177.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 7.2%, 主要来源为古城子河侧向补给; 南帮涌水量约 $186.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 7.5%, 主要来源为地下水通过杨柏河、刘山河古河道等地段侧向径流补给; 东帮在东露天矿影响下接近疏干.

4.4 涌水补给量计算结果分析

根据已有资料, 西露天矿 2010—2019 年排水量见表 4.

由表 4 可知, 近 10 年西露天矿平均排水量为 $2\ 339.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 计算得出周边地区进入西露天矿的

表 4 西露天矿排水量统计表
Table 4 Water drainage of the West Open-Pit Mine

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
年排水量/ 10^4 m^3	2932.9	1870.0	2506.8	2887.0	1523.3	2105.1	2701.3	2486.1	2157.5	2225.7

总水量为 $2\ 477.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 二者相差为 5.6%, 表明计算得出周边地区进入西露天矿的总水量与西露天矿排水量基本达到平衡, 进入西露天矿的总水量计算值较合理。

5 结论

1) 西露天矿坑是区域地下水汇集区, 周边地下水向矿坑内径流。地下水通过第四系松散岩类孔隙、基岩构造破碎带和风化破碎带侧向流入西露天矿。受西露天矿疏干影响, 矿坑周边地下水位急剧下降, 水力梯度达 8%~15%。

2) 周边地区进入西露天矿的总水量为 $2\ 477.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 来源主要为北帮浑河通过第四系含水层侧向补给和大气降水补给。其中北帮浑河侧向补给的涌水量约 $1\ 115.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 45.0%; 大气降水直接降入矿坑水量约 $997.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占 40.3%。

3) 古城子河通过西露天矿西帮侧向补给矿坑的水量约 $177.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; 地下水通过南帮杨柏河、刘山河古河道等地段侧向径流补给的水量约 $186.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; 东帮涌水在东露天矿影响下接近疏干。

参考文献(References):

- [1] 孙兆涛. 抚顺西露天矿北帮地质灾害发展规律及其环境影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Sun Z T. The development law of geological disasters in the north slope of Fushun West Open Pit and its environmental impact [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [2] 李淑艳. 抚顺市矿山环境地质灾害形成机制与防治对策研究[D]. 沈阳: 煤炭科学研究总院, 2008.
Li S Y. The research of mining environmental geology disaster's forming mechanism and countermeasures of Fushun city [D]. Shenyang: China Coal Research Institute, 2018.
- [3] 张丽丽. 抚顺市煤田开采区地质灾害分区评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
Zhang L L. Evaluation of geological disasters of coal-mining areas in Fushun City [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [4] 张东旭. 抚顺西露天矿现状边坡稳定性分析[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(2): 105-108.
Zhang D X. Slope stability analysis of Fushun West Open-Pit Mine [J]. Opencast Mining Technology, 2021, 36(2): 105-108.
- [5] 韦忠跟. 抚顺西露天矿北帮 E200 段边坡蠕变特性与变形预测研究 [D]. 沈阳: 煤炭科学研究总院, 2008.
Wei Z G. Creep property and deformation prediction study on West Open Pit E200 north slope of Fushun [D]. Shenyang: China Coal Research Institute, 2008.
- [6] 王彤. 抚顺西露天矿北帮边坡动力响应分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Wang T. Dynamic response of the north slope of Fushun West Open Pit [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [7] 张明海. 抚顺西露天矿北帮某段边坡变形预测研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2002.
Zhang M H. The study on deformation predicting of some northern slope of Fushun West Open-Pit [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2002.
- [8] 翟文杰, 钟以章, 姜德录, 等. 抚顺西露天煤矿地质灾害预测[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 132-137.
Zhai W J, Zhong Y Z, Jiang D L, et al. Prediction of geological disaster in Fushun Xilutian Coal Mine [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 132-137.
- [9] 王永胜, 郭静芸, 董高峰, 等. 辽宁抚顺西露天矿北帮边坡稳定性分析及变形分区[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(4): 86-93.
Wang Y S, Guo J Y, Dong G F, et al. Slope stability evaluation of Fushun West Open-Pit Mine [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(4): 86-93.
- [10] 王翠珀, 陈跃月. GPS 实时监测技术在抚顺西露天矿边坡变形监测中的应用[J]. 地质与资源, 2010, 19(2): 180-183.
Wang C P, Chen Y Y. Application of GPS real-time monitoring in the slope deformation control of the Western Opencast Mine in Fushun, Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2010, 19(2): 180-183.
- [11] 郭昂青. 内蒙古乌努格吐山铜钼矿露天采场边坡工程地质特征及破坏类型[J]. 地质与资源, 2016, 25(1): 84-91.
Guo A Q. Engineering geology of the open pit slope of the Wunugetushan Copper-Molybdenum Mine in Inner Mongolia [J]. Geology and Resources, 2016, 25(1): 84-91.
- [12] 王洁玉, 张以晨, 汪茜. 长白山北坡边坡危岩体形成机理及危险性评价[J]. 地质与资源, 2010, 19(4): 315-318.
Wang J Y, Zhang Y C, Wang Q. Mechanism analysis and risk assessment of the dangerous rock mass in the northern slope of Changbai Mountain [J]. Geology and Resources, 2010, 19(4): 315-318.
- [13] 王佳运, 王根龙, 石小亚. 陕西山阳特大型滑坡视向滑移-溃屈破坏力学分析[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 381-388.
Wang J Y, Wang G L, Shi X Y. Mechanical analysis of apparent dip creep-buckling failure of Shanyang super large-scale rockslide in Shaanxi Province [J]. Geology in China, 2019, 46(2): 381-388.
- [14] 李小龙, 王雪冬. 山东废弃石灰岩矿山地质环境特征与治理恢复探索[J]. 地质与资源, 2018, 27(1): 89-92.
Li X L, Wang X D. Geological environment characteristics of

- abandoned limestone mines in Shandong Province: Management and restoration exploration [J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(1): 89-92.
- [15] 申力. 雨季露天煤矿边坡岩体变形破坏的调查与分析[J]. *露天采煤技术*, 1998(S1): 30-33.
- Shen L. Investigation and analysis on deformation and failure of slope rock mass in open pit coal mine in rainy season [J]. *Open Pit Mining Technology*, 1998(S1): 30-33.
- [16] 于子国. 抚顺西露天矿北帮边坡稳定性分析与防治[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2005.
- Yu Z G. Fondle the agreeable the northern slope of Fushun West Open-Pit stability to analyze with the prevention and manage [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2005.
- [17] 王明, 赵玉成, 刘家成, 等. 渗流作用下露天煤矿边坡稳定性数值模拟研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2014, 37(4): 273-276.
- Wang M, Zhao Y C, Liu J C, et al. Numerical simulation of side slope stability of opencast coal mine under the seepage flow [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2014, 37(4): 273-276.
- [18] 徐晨栋, 苑康泽, 郭子坤, 等. 清子高速某工程滑坡诱发机制及治理模拟[J]. *地质与资源*, 2020, 29(2): 196-201.
- Xu C D, Yuan K Z, Guo Z K, et al. Inducement mechanism and treatment simulation of an engineering landslide on Qingzi expressway [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(2): 196-201.
- [19] 张大伟. 抚顺西露天矿北帮边坡在地下开采条件下稳定性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- Zhang D W. Study on stability of north slope of Fushun West Open-Pit Mine under underground mining conditions [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [20] 王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 119-120.
- Wang H T. Dynamics of fluid flow and contaminant transport in porous media [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 119-120.

(上接第 565 页/Continued from Page 565)

- [38] 冯许魁, 朱斗星, 商国玺, 等. 库车前陆冲断带构造变形特征物理模拟[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(3): 339-343.
- Feng X K, Zhu D X, Shang G X, et al. Physical modeling of the tectonic characteristics of foreland thrust belt in Kuqa [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2015, 34(3): 339-343.
- [39] 肖立新, 雷德文, 魏凌云, 等. 淮南西段构造样式及逆冲推覆构造特征[J]. *天然气工业*, 2012, 32(11): 36-39.
- Xiao L X, Lei D W, Wei L Y, et al. Structural types and features in the west of south margin in the Junggar Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(11): 36-39.
- [40] 白振华, 姜振学, 宋岩, 等. 淮南前陆盆地玛纳斯背斜油气动态成藏过程[J]. *天然气工业*, 2013, 33(4): 37-42.
- Bai Z H, Jiang Z X, Song Y, et al. Dynamic hydrocarbon accumulation process in Manasi anticline in the southern Junggar foreland basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(4): 37-42.