

段乔文,吴继明,冷吉诚.滇东南高原岩溶盆地区普阳煤矿的深层涌水趋势分析[J].中国岩溶,2021,40(2):189-197.
DOI:10.11932/karst20210201

滇东南高原岩溶盆地区普阳煤矿的 深层涌水趋势分析

段乔文,吴继明,冷吉诚

(云南地质工程勘察设计研究院红河分院,云南 开远 661660)

摘要:普阳煤矿位于一断陷盆地的浅部新近系地层中,矿区被3种类型的水文地质边界圈闭。煤层分布标高低于暗河出口100~230 m,煤田四周及盆地基底均为岩溶含水层,其承压水头高于煤层底板67~268 m,预计最低开采标高的平均承压水头约206 m。为解决矿区地下水突水威胁,监测普阳河水流入和流出的水量,根据水均衡原理及矿坑充水要素,制定中长期排水方案。研究表明,矿区岩溶发育垂向分带特征清楚,煤层底板以下岩溶含水层以弱岩溶带为主,单元内93%的地下水通过普阳暗河集中排泄,加之煤层以下有一定厚度的隔水层阻隔,故深层开采时可能发生局部突水危害,但水量不大,最大涌水量仅限于自然状态下补给普阳河的地下水径流量。结合矿坑充水控制因素及地下水动力学分析,采用水均衡法评价突水量,方便可行。

关键词:岩溶;煤层底板;暗河出口;承压水头;涌水量

中图分类号:P641.4 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)02-0189-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶水害是威胁煤炭资源开采安全的主要灾害之一。纵观世界上岩溶大水煤田,以中国华南、华北和俄罗斯莫斯科近郊煤田最为突出。华南地区岩溶大水煤矿单点突水量一般为 $950\sim 3\ 000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,最大突水量达 $27\text{ 万 m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,华北地区煤矿单点的的突水量占据了世界采矿史上突水量的前五位,最大突水量达到 $2\ 053\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ [1-2]。自上世纪60年代,我国针对不同水文地质条件下,煤矿开采过程中突水类型进行了持续研究与攻关,目前我国的煤矿防治水理论和技术方法已处于世界领先水平[3-10],现已建立了基本完善的煤炭开采水害防治体系,并从空间预测向时间预测转化。尽管如此,仍很少看到从岩溶发育强弱分带及水资源均衡角度研究煤矿岩溶水害的文章。本文在总结前人研究成果的基础上,从采煤、地下水开采和岩土工程防治地下水害研究中,发现岩溶发育垂直分带规律[11-15],针对滇东南高原岩溶盆

地区普阳煤矿水文地质条件[16-18],划分水文地质勘探类型和矿井水文地质类型[19-21],并对矿区进行岩溶发育垂直分带,根据水均衡原理和底板突水控制要素对普阳煤矿基底深层岩溶含水层突水量大小和危险性进行趋势分析,为该矿山的中长期排水方案制定提供参考。

普阳煤矿位于文山州富宁县木央乡普阳村,煤炭资源蕴藏量近亿吨,煤矿露天生产能力已从建矿初期的 $15\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$ 发展到现在的 $90\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,成为滇东南地区重要的煤炭生产基地[17]。矿区周围和基底均为岩溶含水层,北部边缘出露了年均流量 $4\ 768.3\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的岩溶暗河,中部有常年性河流普阳河,矿区煤层分布标高低于普阳暗河出口100~230 m,基底岩溶含水层对预计最低开采标高的平均承压水头高达205.51 m,水文地质勘探类型为岩溶含水层充水,水文地质条件复杂的第三类第三型[19],矿井水文地质类型为复杂型[20]。类似普阳煤矿这样的底板及(或)周边岩溶水分布的矿区,在滇东地区的小龙潭煤

第一作者简介:段乔文(1967—),男,正高级工程师,主要研究方向:水文地质及环境地质。E-mail:787579281@qq.com。

收稿日期:2020-03-28

矿^[22]、先锋煤矿^[23]以及部分泥炭矿等多个新生代盆地矿区均存在。因此本研究具有明显的典型性和一定的代表性,研究成果对类似水文地质矿区的深层涌水趋势分析和防、排水方案制定具有一定的借鉴意义。

1 地质环境条件

1.1 地形地貌

普阳煤矿区地形地貌呈NWW向长条形断陷盆地展布^[17],四周被侵蚀溶蚀相间的低中山所环绕。盆地外围区总体地势北高南低,海拔多在1400~1740 m;盆地范围地形高程1290~786 m,相对高差约500 m,最低侵蚀基准面标高为692.9 m(普阳河与南利河交汇处)。盆地内呈波状起伏的缓丘地貌,地形标高895~786 m,相对高差109 m。矿区为侵蚀溶蚀相间的中低山地貌。

1.2 气象水文

矿区位于北回归线附近,属低纬度高原南亚热带季风气候区,呈现湿热多雨的立体气候特征。气温为39.5~-5.6℃,多年平均19.5℃。多年平均降雨量为1176 mm,每年5-10月为雨季,占全年降雨总量的82%,月最大降雨量为8月,降雨达461 mm,日最大降雨量为172.2 mm。

矿区处于红河水系南利河流域。南利河发源于砚山县南部,流入富宁县,从矿区西南边缘约1.5 km流过,进入越南,注入红河。据矿区北西侧约200 m的董湖站观测,月平均流量9.599~114.965 m³·s⁻¹,年平均流量40.414 m³·s⁻¹。矿区北侧边缘的普阳暗河出露后形成普阳河,由北向南从矿区中部流过汇入南利河,长约3 km,河床标高804.4~775.5 m,水力坡降8.3‰,普阳矿区最高洪水水位标高805.4 m(普阳暗河出口)~786.00 m(普阳河出口),一般约790 m。

1.3 地质构造与地层

矿区处于华南褶皱系西缘,三级构造单元划属文山—西畴弧形隆起带东部。矿区外围构造以NW向为主,断裂和褶皱发育,多具弧形特征,形成时期早,延伸长约10~60 km。其次发育有SN向、NE向及近EW向构造,长约2~9 km,常切割NW及近EW向构造。矿区所在的普阳盆地属断陷盆地,长约6 km,宽约0.25~1.2 km,面积约4.1 km²,为普阳断裂控制;普阳断裂在普阳矿区形成南北F₁、F₂二分支,北西

段在矿区外董湖盆地西端复合,南东延伸至花地坪南东1.8 km处复合。断层面倾向S,倾角65°~81°,属于正断层并兼有右行扭动的特征,新近纪以来,具有明显的继承性活动,控制着木杠、普阳、董湖新生代聚煤盆地的形成和发展。

盆地基底和盆缘由寒武系上统唐家坝组(ε_{3t})白云质灰岩、灰岩夹泥质条带灰岩及泥质粉砂岩构成。盆地内沉积了少量第四系(Q)砂质黏土夹砾石及新近系(N)泥灰岩、褐煤、黏土岩,厚160~530 m。盆地外围主要为泥盆系(D)至二叠系(P)的纯碳酸盐岩构成。

1.4 盆地的形成与岩溶发育

1.4.1 盆地形成与岩溶发育情况

普阳盆地形成于新近纪中新世初期,经历了盆地基底岩溶化—泥炭沼泽相沉积—湖泊相沉积—湖滨相及河流相沉积的沉积过程^[17]。上新世以来,以不均匀间歇性上升为主的新构造运动表现明显,岩溶发育伴随了盆地形成至今的全过程。

(1)明显的地形地势反差:中晚更新世以来,普阳盆地以不均匀的间歇性上升为主。流经盆地的普阳河急剧下切,形成了高出河床6~8 m的河流阶地,阶坡陡直,阶面宽30~100 m。普阳河中下段,侵蚀基准面标高773 m。新近系沉积物(泥灰岩)强烈剥蚀后形成了白石头梁子一带的地形,标高890 m,高出河床117 m;早期沉积的煤层经强烈剥蚀、冲刷后,在普阳盆地南东角形成了50~445 m宽的煤层出露区。

(2)岩溶发育的差异性:盆地北端的普阳暗河出口河水呈16 m的跌水涌出。暗河口溶洞崩塌明显;盆地中部及南利河谷区有四层溶洞分布,各层溶洞距河床高度不同,第一层溶洞高出河床120 m,第二层溶洞高出河床50 m,第三层溶洞高出河床15~20 m,第四层溶洞高出河床3~5 m。

1.4.2 岩溶发育垂向分带

普阳盆地基底及外围地层以碳酸盐岩夹碎屑岩和纯碳酸盐岩为主,为评判基底和周边岩溶水对煤矿开采的影响,根据岩溶微形态发育情况、钻孔单位涌水量(或泉流量)、渗透系数、所处标高、地下水动力特征等指标,将岩溶发育程度分成强、中等和弱三个岩溶发育带^[14],以及基本对应地下水径流系统的四个分带:垂直径流带、季节波动带、潜水—承压水径流带以及层状承压径流带^[15]。

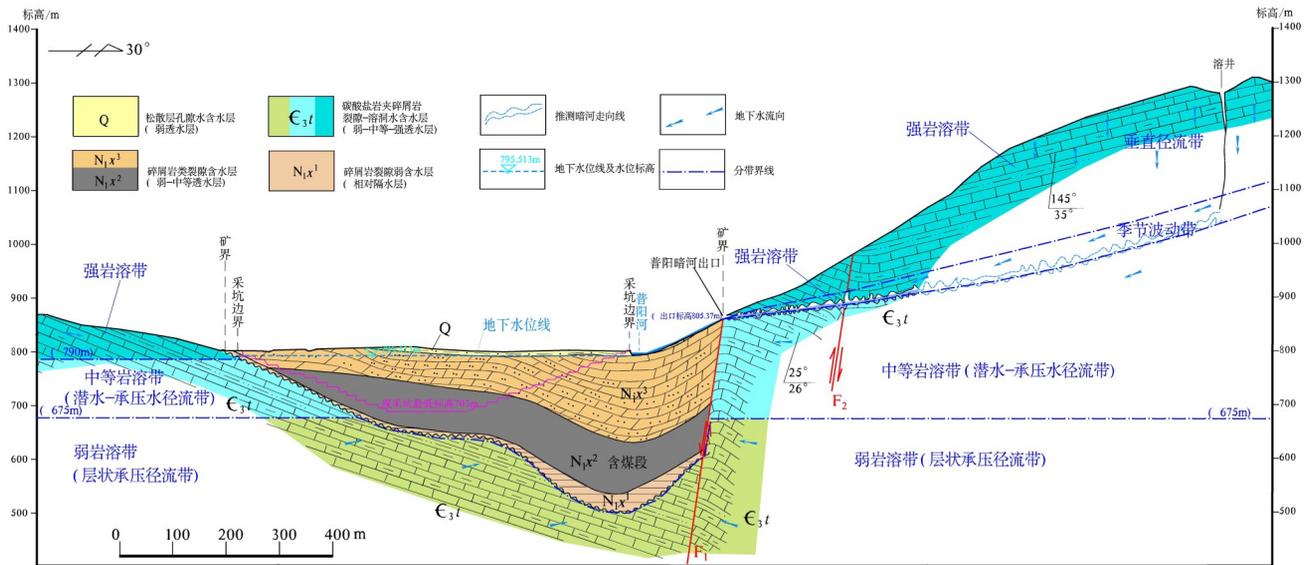


图 1 普阳盆地岩溶发育垂向分带图

Fig. 1 Vertical zoning of karst development in Puyang basin

(1)强岩溶带:包括地下水垂直径流带和季节波动带。垂直径流带主要分布于单元地下水补给区,标高约 1 100 ~ 1 740 m,地表洼地、漏斗星罗棋布,溶洞、溶井、落水洞发育,雨季大气降雨及地表水多通过这些垂直通道直接向暗河补给,旱季处于无水状态。分水岭一带纯碳酸盐岩含水层 P_{1q+m} 、 C_2w 钻孔渗透系数高达 $4.00 \sim 12.39 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,岩溶发育强烈,为强透水层。季节波动带雨季时基本为地下水所充满,旱季时地下水逐渐消落,变成包气带。随暗河水力坡度和地形标高而变化,厚度一般大于 30 m。在标高 1 100 m 以上分水岭地带,该带埋深一般小于 120 m;暗河径流区埋深普遍大于 120 m,甚者可达 300 m 以上,水力坡度相对较大,厚度一般小于 30 m。接近普阳暗河出口(标高 790 ~ 805 ~ 820 m),以发育水平溶洞、管道为主,地下水以水平运动为主。该带主要为强透水层。

(2)中等岩溶带:分布标高 805 ~ 675 m,以溶蚀孔、洞为主,溶蚀裂隙为辅,地下水在这些空隙中既有水平运动也有部分垂直运动且以前者为主,地下水通过侧向或越流补给普阳河,相当于地下水径流系统的潜水—承压水径流带。钻孔单位涌水量 $0.040 \ 84 \sim 0.291 \ 6 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$,渗透系数 $0.049 \sim 0.442 \ 8 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,富水性中等为主,部分富水性弱,岩溶发育均匀性较差。

(3)弱岩溶带:分布标高 675 m 以下,以溶蚀裂隙为主,局部仍然见小溶蚀孔,岩溶地下水主要通过断层、发育微弱的构造节理和溶蚀裂隙,经过深部循环

后在水头差作用下越流向普阳河排泄,地下水呈慢速承压流,相当于地下水径流系统中的层状承压径流带。地下水以垂直运动为主,水平运动为辅。钻孔单位涌水量 $0.0028 \sim 0.06 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$,渗透系数 $0.0015 \sim 0.094 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,富水性弱 ~ 中等,以弱为主。岩溶发育均匀性相对较好。

2 水文地质特征

2.1 区域水文地质单元边界的确定

圈定水文地质单元边界^[24]是分析矿区地下水补、径、排的基础。单元边界主要根据泉点的分布、地表水系的流向及相对排泄基准面、弱含水岩组的隔水作用、地表岩溶形态排列形式、发育方向、断裂的隔水作用及在同一含水岩组中地表分水岭因素以及地下水动力特征等综合考虑。按照上述原则,根据地面水文地质测绘、钻孔抽水试验等资料对单元边界圈定和矿区含水层及隔水层进行综合确定(见图 2)。地面测绘可靠性一般,钻孔资料可靠性高。

(1)西部:主要为纯碳酸盐岩分布区,边界近 SN 向展布,在普阳暗河与天生桥暗河伏流之间,主要是依据地表岩溶地貌、岩溶发育方向并结合地表分水岭,地下水流域边界,圈定为第一类边界。

(2)北部及北东部:本单元北西角至木兄坪北西部,呈南东向展布,主要为纯碳酸盐岩分布区,因地表岩溶发育方向和地表分水岭展布情况而圈定,为第一类边界。

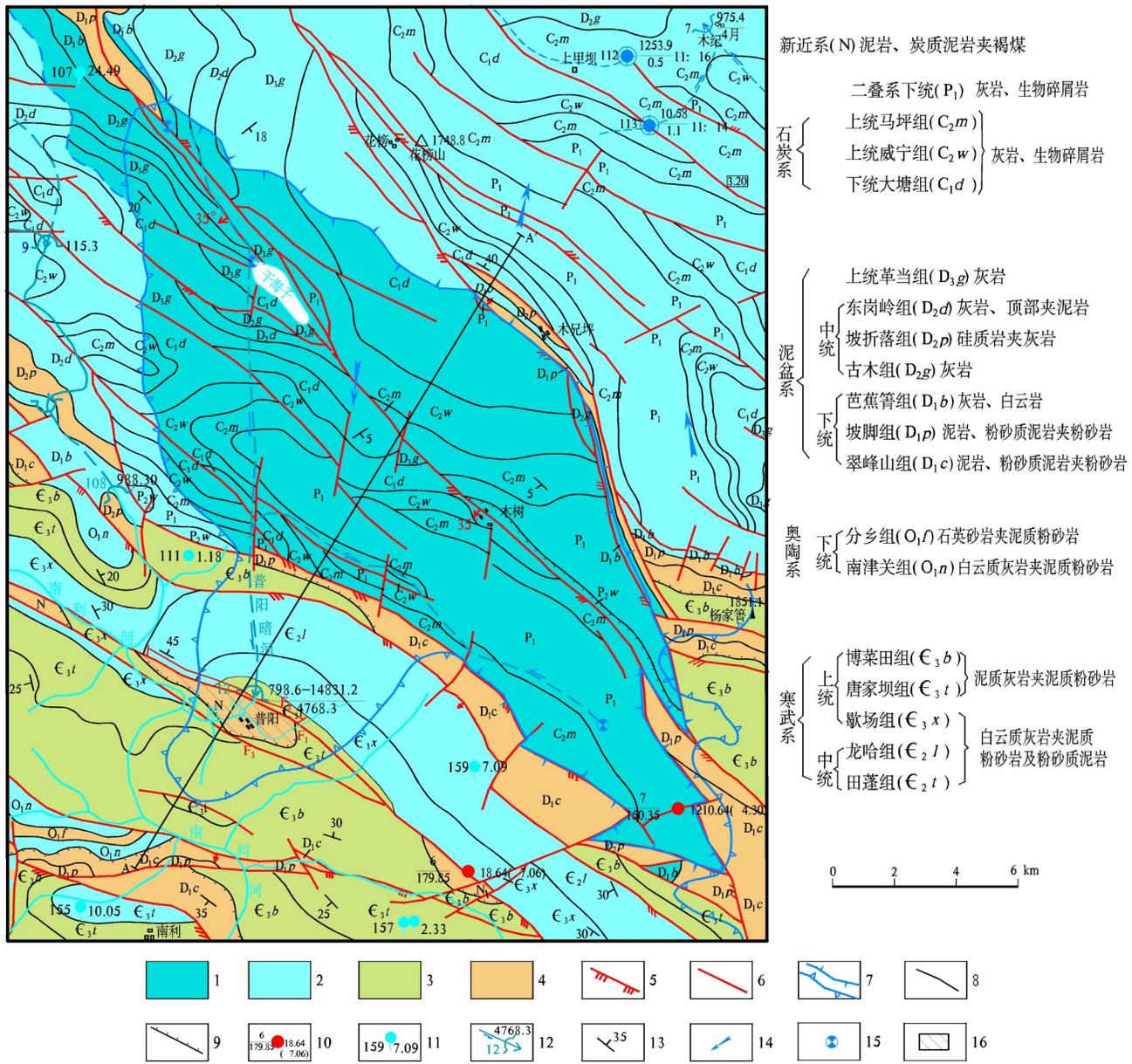


图2 普阳煤矿矿区区域水文地质图

Fig. 2 Regional hydrogeological map of Puyang coal mine area

1.碳酸盐岩裂隙溶洞水(富水性强) 2.碳酸盐岩裂隙溶洞水(富水性中等) 3.碎屑岩、碳酸盐岩溶洞-裂隙水(富水性弱) 4.碎屑岩裂隙水(富水性弱) 5.压性及压扭性断裂 6.性质不明断裂 7.地下分水岭、地表分水岭 8.地层界线 9.角度不整合地层界线 10.单层抽水孔 左为编号/孔深(m) 右为涌水量(降深值) 11.下降泉 左为编号 右为流量(升/秒) 12.地下暗河出口 左为编号 右为流量 13.地层产状 14.地下水流向 15.落水洞 16.矿区范围

(3)东部及南东部:为木兄坪至杨家箐西侧,地下水流域超出了地表分水岭范围,以两条SE向断裂挟持中的坡脚组D_{1p}泥岩、粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩为隔水边界,为第三类边界。

(4)南东角:为木央北西一段,地表分水岭超出了地下水流域边界,地表径流汇流后沿落水洞以集中灌入式补给地下水,单元边界以地表分水岭为界,属于第二类边界。

(5)南东部:依据地表岩溶地貌、发育方向并结合地层阻隔水性能圈定为翠峰山组D_{1c}泥岩及泥质粉砂岩夹细砂岩,循山脊由近NS向转为NW向,地下水分水岭与地表分水岭重合,属于第一类边界。

(6)南部:位于普阳河左岸,两条溪沟之间的泥质灰岩及泥质粉砂岩,循山脊由近NE向转为SN向,地下水分水岭与地表分水岭重合,属于第一类边界。

上述圈定水文地质单元面积为232.57 km²。其

中,普阳暗河汇水面积约208.24 km²,单元中约180 km²为岩溶强含水岩组分布区;暗河系统以外的普阳河东、南部地表汇水面积24.33 km²。

除上述平面周界外,水文地质单元在天然状态下,垂向上单元顶界可以考虑为垂直径流带顶部,普阳河为排泄边界,为单元底界;人工开采矿体激发条件下,单元底界考虑为钻孔控制的深部岩溶发育下限,标高450 m左右。

2.2 地下水的补给、径流及排泄

普阳水文地质单元,地下水的补、径、排均围绕普阳地下暗河系统及普阳河进行。普阳暗河系统,发源于矿区北部石炭—二叠系纯碳酸盐岩中,暗河主要发育有一条主流和一条支流:主流近SN向,发源于夷朗—干海子—普阳,长约21 km,平均水力坡度3.7%;支流自SE向NW发育,发源于木央一带(暗河管道主要依据长年消泄地表水的落水洞及充水溶洞的分布情况及地表岩溶漏斗成串珠状排列的方向推测),暗河管道长约13 km,在普阳盆地北部约8 km处与主流汇合,沿近SN向断裂发育,在普阳盆地北缘受F1断裂切割及受上寒武统 ϵ_3t 白云质灰岩、泥质灰岩

夹泥质粉砂岩阻隔而集中排泄,暗河出口标高805.37 m。

暗河系统的补给、径流区主要为矿区北部山区,标高多在1400~1740 m,地表岩溶极为发育,落水洞、漏斗、溶井广布,汇集了区域内的地表水及地下水。如区域南东部的木央河,年径流量2494万m³,北西部的木浪溪沟年径流量约417万m³,以及区域中部季节性岩溶湖干海子中的水均常年通过落水洞补给暗河系统。暗河最大流量14831.2 L·s⁻¹,最小流量798.6 L·s⁻¹,年平均流量4768.3 L·s⁻¹,年径流量15037.31万m³。暗河流量变化大,最大流量和最小流量相差可达19倍。

暗河出露后形成地表河流普阳河。普阳河横穿矿区最终汇流于南利河,标高从775.5 m处急泻而下形成80多m落差的瀑布,与南利河交汇处为当地最低侵蚀基准面,标高为692.90 m。

单元内暗河系统以外的地下水主要受普阳河与南利河相对排泄基准面控制,除接受大气降雨补给外,还有上覆含水层的向下渗入补给、周围含水层的侧向补给以及下伏含水层的越流补给等多种补给,最终排泄于普阳河和南利河(图3)。

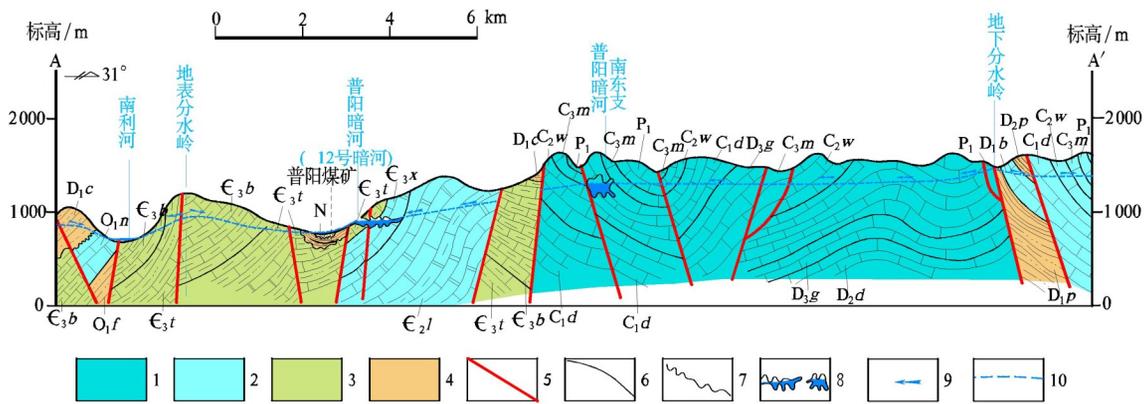


图3 普阳煤矿水文地质剖面图

Fig. 3 Hydrogeological profile of Puyang coal mining area

1.碳酸盐岩裂隙溶洞水(富水性强) 2.碳酸盐岩裂隙溶洞水(富水性中等) 3.碎屑岩、碳酸盐岩溶洞-裂隙水(富水性弱) 4.碎屑岩裂隙水(富水性弱) 5.断裂 6.地层界线 7.角度不整合地层界线 8.暗河出口及管道位置 9.地下水流向 10.地下水位线

2.3 矿区含(隔)水层的划分及特征

根据矿区出露地层的岩性组合、地下水赋存介质、水动力特征和区域水文地质资料、钻孔抽水试验等资料^[18],将矿区划分为6个含隔水层组:

(1)第四系沉积层(Q):褐色粉质黏土、砂砾石,黏土,冲洪积和残坡积组成,厚0~25 m;泉流量0.01~0.04 L·s⁻¹,为富水性弱的孔隙水含水层组。

(2)新近系上新统河头组(N₂h):砂砾岩,薄层状泥质砂岩及砂质泥灰岩,厚0~33.2 m,无泉流出露,为富水性弱的孔隙-裂隙含水层组。

(3)新近系中新统小龙潭组三段(N₁x³):灰色、褐灰色、灰紫色薄层—厚层块状泥灰岩、粉砂质泥灰岩、生物泥灰岩,厚0~322.06 m;泉流量0.022~0.87 L·s⁻¹,100 m以上钻孔单位涌水量0.037~

0.582 L·(s·m)⁻¹,以下0.000 2~0.009 L·(s·m)⁻¹,为富水性弱至中等的裂隙含水层组。

(4)新近系中新统小龙潭组二段(N₁x²):褐煤及灰黑色炭质黏土、泥岩、泥灰岩、生物泥灰岩,厚0~234.46 m;100 m以上钻孔单位涌水量0.079~0.080 5 L·(s·m)⁻¹,100 m以下为0.000 2~0.173 L·(s·m)⁻¹,为富水性弱至中等的褐煤裂隙含水层组。

(5)新近系中新统小龙潭组一段(N₁x¹):灰色、蓝灰色、浅灰色结核状钙质泥岩,粉砂质泥岩;厚0.80~72.6 m,钻孔单位涌水量0.002 54 L·(s·m)⁻¹;渗透系数为0.010 8 m·d⁻¹,为富水性弱的相对隔水层组。

(6)寒武系上统唐家坝组(ε₃t):灰白色、青灰色、紫红色厚层一块状白云质灰岩,角砾状灰岩,夹泥质灰岩和泥质条带灰岩。标高675 m以上,泉流量0.13~10.0 L·s⁻¹,平均2.8 L·s⁻¹。钻孔单位涌水量0.040 84~0.291 6 L·(s·m)⁻¹,以下钻孔单位涌水量0.0028~0.06 L·(s·m)⁻¹。为上强下弱的白云质灰岩、泥质灰岩岩溶—裂隙含水层组。

2.4 断裂带水文地质特征

矿区内对矿坑涌水有影响的断裂主要是F₁断裂,倾向南西,倾角65°~75°局部地段达81°,为高角度正断层。断裂带局部出露季节性下降泉,多个钻孔揭露深部的断层破碎带角砾岩(成分为灰岩)多为钙质及泥质胶结紧密,钻孔单位涌水量0.000 05~0.511 1 L·(s·m)⁻¹,渗透系数0.000 024~0.442 8 m·d⁻¹。断裂带浅部富水性和透水性较深部强。目前露天采坑北部边坡开挖揭露F₁断裂破碎带宽40~80 m,平均50 m,断层角砾岩成分为灰岩,钙泥质胶结较紧密,浅表部较破碎,开挖面多见地下水呈带状渗出,50~200 m间距可见渗水点,水量一般0.01~0.05 L·s⁻¹,局部呈泉状涌出,流量0.8 L·s⁻¹~0.65 L·s⁻¹,旱季断流,总体富水性弱。

3 现状涌水情况及深层涌水趋势分析

3.1 矿床形成与岩溶发育的关系

普阳盆地基底及围岩为ε₃t薄层—中厚层白云质灰岩、角砾状灰岩夹泥质灰岩、粉砂岩,其岩溶化明显但差异较大,呈凹凸不平的微地貌形态。在中新世初期以角度不整合沉积了新近系中新统泥岩、粉砂质泥岩段(N₁x¹),其中可见菱铁矿呈结核状、团块状分布,厚度严格受盆地基底起伏所控制,沉积厚度差异大。中新世中期,盆地沼泽化面积扩大至整个

普阳盆地,植物生长速度与盆地缓慢下沉速度相适应且延续时期较长,因而沉积的主含煤层结构简单,厚度巨大(N₁x²)。至中新世晚期,盆地急剧下沉,成为湖泊,沉积地层为湖泊相泥灰岩段(N₁x³)。随后,普阳盆地持续上升,湖泊缩小,至上新世时盆地仅在靠近F₁断层一侧相对低凹地段沉积了河头组(N₂h)泥灰岩、砂质黏土及砂砾石等湖滨相河流相沉积物。原来排泄于盆地中的普阳暗河出口抬升悬于F₁断层的陡崖上,高出现代盆地地面约16 m,下游的普阳河沿岸也发育了两级阶地。岩溶强烈发育形成的四层溶洞均高于盆地现状地面,近矿床周围和基底岩溶含水层中岩溶发育为中等至弱,并且有上强下弱的特征。

由于基底岩溶含水层与煤层之间有(N₁x¹)黏土岩段相隔,自然状态下二者之间水力联系微弱。钻孔和采场剥离均显示,F₁断层角砾岩多被钙质、泥质紧密胶结,富水性和透水性总体较弱,断层下盘及盆地基底中的地下水,透过中等至弱岩溶含水层并越过断层与煤层之间发生的水力联系也比较弱。

3.2 矿坑现状涌水来源及途径

现阶段,普阳煤矿露天开采形成长1 700 m、宽1 200 m的椭圆形采坑,采深95~140 m。坑底标高一般为720 m左右,坑底水仓标高703 m,坑底长760 m、宽60~140 m,露采场面积约为1.51 km²。根据普阳河以东钻孔抽水及静止水位观测结果统计^[18],N₁x²煤层平均静止水位标高为797.45 m,采坑范围最低开采标高为703 m,则现露采区煤层及上覆含水层平均水位降深为94.45 m。据矿山近五年(2014年1月—2018年6月)的涌水量实测资料,矿坑日涌水量旱季为1 052~1 734 m³·d⁻¹,雨季为2 778~11 740 m³·d⁻¹,全年日平均涌水量为3 664 m³·d⁻¹。旱、雨季变化系数为2.6~6.8。

矿坑充水来源主要有四个方面:①北帮边坡充水点主要出露于断层破碎带上,沿断层破碎带角砾岩呈带状渗出,50~200 m间距可见5处渗水点,水量一般0.01~0.05 L·s⁻¹,局部呈泉状涌出,流量0.1~0.8 L·s⁻¹,属F₁断层北盘寒武系ε₃t岩溶水充水;F₁断层南盘新近系泥灰岩富水性较弱,开挖坡面干燥,未见出水点。②东部边坡于北东帮高程816 m左右出露一泉点,泉流量为2.5~0.2 L·s⁻¹,属上游ε₃t岩溶水补给在新近系泥灰岩裂隙中出露的下降泉。③南部边坡基本为N₁x²煤层,富水性较弱,未见大面积渗水及突水现象,仅于局部开拓道路侧沟见面状渗水,

渗水量约 $0.01 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。④西部帮坡为新近系 N_1x^3 泥灰岩,开挖帮坡面未见渗水及突水现象,该层富水性弱;目前西帮坡顶距离普阳河仅 300 m,边坡脚靠近坑底(703 m 标高)一带有渗水现象,渗水量 $0.25 \sim 2.0 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

综上所述,目前矿坑涌水量主要来源于煤层内部及其上覆弱裂隙和孔隙含水层的疏干,其次为北部、东部北东帮 F_1 断层带附近局部揭露的 ϵ_3t 灰质白云岩含水层,呈面状渗出为主,局部为泉流出露,主要导水空隙以溶蚀裂隙为主,其次为构造裂隙。因此,目前盆地北侧和下伏岩溶水还未成为矿坑涌水的主要组成部分。

3.3 矿坑突水的危险性预测评估

3.3.1 依据宏观水均衡原理^[25-27]预测矿坑突水的危险性

基于地下水多年平均天然补给量等于多年平均天然排泄量这一水均衡原理,以及矿区长期监测结果表明^[18],普阳暗河年平均流量 $4\,768.3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,年径流量 $15\,037.31 \text{ 万 m}^3$;普阳水文地质单元内的地表水和地下水汇流后,在普阳河出矿区断面监测的年均流量为 $5\,127.3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,年径流量 $16\,169.45 \text{ 万 m}^3$,即单元内 93% 的水量已经从普阳暗河排出,除暗河及矿坑以外的地表水和地下水越流补给普阳河的径流量仅为 $1\,132.14 \text{ 万 m}^3$ 。暗河以外地表水汇流面积 24.33 km^2 (包括采坑面积 1.51 km^2),按照年均降雨量 $1\,176 \text{ mm}$,地表径流系数(按照针叶林地和砂土坡面)^[28]取 0.22,则每年汇入普阳河的地表径流量为 590.40 万 m^3 ,地下水补给普阳河的水量为 541.74 万 m^3 。可见,天然状态下,区域内普阳暗河以外的地下水并不丰富,即使开采袭夺全部地下水量,宏观考虑能够进入矿坑的地下水总量也不可能大于 541.74 万 m^3 ,故造成采坑长期大范围突水危害的可能性不大。但由于岩溶发育的不均匀性,不排除局

部短时间突水量较大的可能,危险性不大。

3.3.2 基于充水要素预测矿坑突水的危险性

影响岩溶水突水的主要因素有 6 项^[29-31]:①水源;②底板抗压强度与隔水能力;③矿压扰动带有效隔水层厚度;④底板断层等结构面发育程度;⑤底板下伏岩溶水水压分布;⑥岩溶裂隙含水岩组富水性及岩溶发育程度。

充水水源为煤层底板以下 ϵ_3t 岩溶含水层间接充水和北侧 F_1 断层下盘 ϵ_3t 岩溶含水层直接充水。煤层底板为 (N_1x^1) 粉砂质泥岩、黏土岩,隔水性能好,但抗压强度低,厚度分布不均匀,厚度 $0.8 \sim 72.6 \text{ m}$,平均厚约 15 m ,大部分低于采矿对底板隔水层所要求的厚度 67 m ^[18]。 F_1 断层面倾向盆地,倾角 $65^\circ \sim 81^\circ$,断层破碎带宽 $40 \sim 80 \text{ m}$,断层角砾岩成分为灰岩,钙泥质胶结紧密,富水性和透水性弱至中等;煤层底板相对隔水层 (N_1x^1) 粉砂质泥岩、黏土岩,未发现明显的断层。底板下伏岩溶水水位平均标高 795.51 m ,主要煤层底板标高 $528 \sim 729 \text{ m}$,承压水头高于煤层底板 $66.51 \sim 267.51 \text{ m}$,按照预计最低开采标高 590 m 即平均承压水头为 205.51 m ,具备突水水压条件。岩溶裂隙含水层富水性弱至中等,透水性弱至中等,岩溶发育程度以弱为主,局部中等。因此,基底和侧面中等岩溶带含水层中的地下水将通过弱透水层和断层破碎带越流进入采坑,局部薄弱地段产生突水的可能性较大,但来水量有限,危险性不大。

3.4 矿坑岩溶含水层涌水量计算

据图 1 和矿坑岩溶水充水预测分析,矿区强岩溶带中的地下水绝大部分从普阳暗河中排泄,进入矿坑的涌水量 (Q) 由三部分组成:一是北东部高程 675 m 以上中等岩溶含水层中的地下水 (Q_1);二是南西部高程 675 m 以上中等岩溶含水层中的地下水 (Q_2);三是基底弱岩溶带含水层 (ϵ_3t) 的地下水 (Q_3)。采用地下水动力学公式计算如下^[32-34]:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{1.366K_1H_1^2}{\lg R_{01} - \lg r_0} + \frac{1.366K_2H_2^2}{\lg R_{02} - \lg r_0} + (h_2 - h_1) \frac{FK_2}{M} \\ &= \frac{1.366 \times 0.1093 \times 130.37^2}{\lg 1523.65 - \lg 539.40} + \frac{1.366 \times 0.1093 \times 115.0^2}{\lg 1534.83 - \lg 539.40} + (795.51 - 788.97) \times \frac{774900 \times 0.0108}{15} \\ &= 5626.97 + 4936.68 + 3648.85 = 14212.49 (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}) = 518.76 (\text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}) \end{aligned}$$

式中^[17]: K_1 — 675 m 标高以上中等岩溶带含水层平均渗透系数, $K_1=0.1093 (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$; K_2 —弱岩溶带含水层平均渗透系数, $K_2=0.0108 (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$; M — N_1x^1 弱透水层平均厚度 $15.0 (\text{m})$; H_1 —北东部中等岩溶带含水层疏

干水头高度, $H_1=805.37-675=130.37 (\text{m})$; H_2 —南西部中等岩溶带含水层疏干水头高度, $H_2=790-675=115 (\text{m})$; r_0 —矿坑引用“大井”半径 (m); 开采至 675 m 水平时预算范围大致呈矩形条带,面积 $774\,900 \text{ m}^2$,

采用 $r_0 = \eta(a+b)/4$ 求矿坑大井半径,根据水文地质手册取值表内插得 $\eta=1.174$,则 $r_0=539.40\text{ m}$; R_0 —大井引用影响半径(m), $R_0=r_0+R=r_0+2\sqrt{HK}$; $R_{01}=1523.65\text{ m}$, $R_{02}=1354.83\text{ m}$; h_2 —基底 ϵ_3t 弱岩溶含水层水位795.51(m); h_1 — N_1x' 弱透水层裂隙水位788.97(m); F — N_1x' 弱透水层675 m高程投影面积(越流面积)774900(m²)。

上述大井法计算结果略小于均衡计算结果,二者相差4.3%。说明像普阳煤矿这种相对封闭盆地,以水均衡的观点,结合地下水动力学法分析、评价深层岩溶水的涌水趋势是合理可行的。

4 问题及讨论

(1)水均衡法的优点是能在查明有保证的补给来源的情况下,确定矿床充水的极限涌水量。缺点是矿山处于开采条件时均衡式的建立及均衡要素的测定均有一定的难度。文中地下水资源的排泄量是直接监测的结果,没有列式分开计算各项补给量予以验证。矿山的排水一般是疏干性质的,涉及的既有动储量也有静储量,如何建立疏干静储量和动储量与单元补给量和排泄量之间的关系值得进一步深入研究。

(2)计算深部岩溶含水层中的承压水,在水头差作用下,通过弱透水层越流补给上部采坑,除涉及弱透水层的厚度和强度外,弱透水层的渗透性决定着越流量。含水层的渗透系数与越流量的关系值得进一步监测、研究。本文计算越流量时参考了水利水电行业对岩土体渗透性分级的划分标准,越流含水层为弱透水层,若渗透系数为微透水和极微透水,可以不计算越流量。

(3)随着采矿规模增大及采坑扩展应着重研究以下问题:一是关注进出矿区的普阳暗河、普阳河的流量与采坑扩展、疏干地下水量之间的变化关系,以建立完善的地表水和地下水监测系统;二是研究生产过程中,如何使 F_1 断层破碎带和下伏底板相对隔水层(N_1x')粉砂质泥岩、黏土岩受采矿扰动最小,以期降低基底和侧边岩溶含水层突水危害。

5 结语

(1)普阳煤矿赋存于滇东南岩溶盆地新近系地层,盆地周边及基底均为岩溶含水层,岩溶水位高出矿体200 m以上,水文地质勘探类型为以岩溶含水层

充水为主的复杂型。

(2)矿区岩溶发育具有明显的垂向分带性,各带岩溶发育强度和地下水径流特征具有明显差异,计算矿坑涌水量时应充分考虑这一基本特点。

(3)水均衡分析结果表明,矿区强岩溶带的地下水绝大部分从普阳暗河排泄。矿区周围岩溶水对矿区的充水危害,主要来自于中等岩溶带含水层对矿区的侧向补给和下伏弱岩溶带含水层透过矿体底板越流补给。矿山开采激发周围岩溶含水层局部突(涌)水的可能性较大,但突(涌)水量不大。

参考文献

- [1] 白海波, 缪协兴. 晚古生代煤田与防治水理论及技术[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 1-10.
- [2] 董书宁, 虎维岳. 中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(5): 34-37.
- [3] 靳德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(6): 1-4.
- [4] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流与煤矿灾害防治[J]. 西安石油大学学报, 2007, 22(2): 72-78.
- [5] 虎维岳, 田干. 我国煤矿水害类型及其防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 92-96.
- [6] 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.
- [7] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报: 自然科学版, 1999, 18(4): 11-18.
- [8] 施龙青, 徐东晶, 邱梅, 等. 采场底板破坏深度计算公式的改进[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊2): 299-303.
- [9] 杨天鸿, 师文豪, 李顺才, 等. 破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1598-1609.
- [10] DOUPE RG, LYMBERG A J. Environmental risks associated with beneficial end uses of mine lakes in southwestern Australia[J]. Mine Water and the Environment, 2005, 24: 134-138.
- [11] 《中国北方岩溶地下水资源及大水矿区岩溶水的预测、利用与管理的研究》项目综合组. 中国北方岩溶含水介质研究[J]. 中国岩溶, 1990, 9(4): 318-329.
- [12] 王梦玉, 章至洁. 北方煤矿床充水与岩溶水系统[J]. 煤炭学报, 1991, 16(4): 1-13.
- [13] 虎维岳. 华北东部深部岩溶及煤矿岩溶水害特征[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(2): 23-27.
- [14] 熊道钡, 傅荣华. 岩溶发育强度垂直分带方法[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(3): 113-117.
- [15] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 1-8.
- [16] 云南省地质局第二地质队. 区域水文地质普查报告1/20万富宁幅[R]. 昆明: 1980.
- [17] 段乔文, 等. 云南省富宁县普阳煤矿补充勘探报告[R]. 云南地质工程勘察设计院. 昆明: 2009.

- [18] 冷吉诚,等.云南省富宁县普阳煤矿资源储量报告[R].云南地质工程勘察设计院.昆明:2018.
- [19] 国家技术监督局.矿区水文地质工程地质勘探规范(GB12719-91).[S].北京:中国标准出版社.1991.
- [20] 国家煤矿安全监察局.煤矿防治水细则[S].北京:国家煤矿安全监察局办公室,2018.
- [21] 中华人民共和国国土资源部.煤、泥炭地质勘查规范[S].北京:中国标准出版社.2002.
- [22] 王明珠,李国柱,等.云南省小龙潭矿务局矿区地质勘察成果系统研究报告[R].昆明:云南地质工程勘察设计院.2008.
- [23] 曹福明.先锋露天煤矿底板承压水的突水机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2015.
- [24] 王宇.岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J].中国岩溶,2019,38(6):823-830.
- [25] 许国柱.王文昭,编.专门水文地质学[M].北京:地质出版社,1987.
- [26] 戴岩柯,崔世新,张坤.水均衡法和数值模拟法在矿坑深部涌水量预测中的比较[J].地下水,2010,32(1):24-27.
- [27] 魏军.矿井涌水量的数值模拟研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2006.
- [28] 中华人民共和国水利部.水土保持工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [29] 王秀兰,王计堂.矿井充水因素分析及评价[J].煤炭工程,2009(7):87-90.
- [30] 高延法,章延平,张慧敏,等.底板突水危险性评价专家系统及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):253-258.
- [31] 毕玉明.高承压水条件下矿井岩溶水底板突水影响因素及危险性分析[J].煤炭与化工,2020,43(2):45-47.
- [32] 中华人民共和国自然资源部.矿坑涌水量预测计算规程[S].北京:地质出版社,2020.
- [33] 卞学洛.滨海平原深层地下水淡化越流补给机理及合理利用的研究[A]//中国水利学会2005学术年会论文集[C],2005,139-143.
- [34] 孙宇霆.小龙潭露天矿深部开采防排水系统研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.

Trend of water inrush at depth in the Puyang coal mine, karst basin area, southeastern Yunnan plateau

DUAN Qiaowen, WU Jiming, LENG Jicheng

(Honghe Branch of Yunnan Institute of Survey and Design for Geological Engineering, Kaiyuan, Yunnan 661600, China)

Abstract The Puyang coal mine, southeastern Yunnan lies in shallow Neogene strata of a fault-depression, encompassed by three kinds of hydrogeologic boundaries. The elevation of coal seams is lower than the outlet of an underground river by 100–230 m. Surroundings and basin basement all host karst aquifers, of which the confined water head is higher than the coal-bed bottom by 67–268 m, and the average confined water head at the estimated lowest mining elevation is about 260 m. To solve the inrush threat of groundwater in the mine, it is required to monitor the amount of water inflow and outflow of the Puyang river, and establish a long-term drainage scheme. Investigations show that the karst in the mine area is of clear vertical zoning. The karst aquifer beneath the coal-bed bottom is dominated by weak karst zones. In the mine area, 93% of underground water drainages through the underground Puyang river. Besides, confined beds of some thickness exist below the coal seam, thus local water inrush may occur when mining at depth. But the amount of such water inrush is not big, with the maximum only equivalent to the volume of underground water runoff to the Puyang river in the natural state. Combining the control factors of pit water filling and dynamic analysis of underground water, it is considered convenient and feasible to estimate amount of water inrush using the water balance method.

Key words karst, coal-seam bottom, underground river outlet, confined water head, inrush amount

(编辑 张玲)