

南水北调西线工程区地下径流模数、岩体透水性 及隧洞涌水量预测

王 媛, 秦 峰, 李冬田

(河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对南水北调西线引水工程区地形地貌和地质条件的特点, 研究了该工程区地下水径流模数、岩体透水性分布规律。提出了在遥感解译的基础上, 以水文图分析法为主, 结合野外泉流量和溪流量测验, 综合评价地下水径流模数的方法。研究表明, 贾曲单元地下水径流模数最大, 其他单元则基本接近, 越向西南, 径流模数逐渐减小。通过现场压水试验数据的整理分析, 结合现场钻孔同位素示踪试验, 建立了 Lu 值随埋深呈负指数减小的变化规律。在数据整理中, 提出了需剔除由于孔口止水处理不当造成的 Lu 值大于 40 Lu 的点, 以及由于断层或裂隙密集带影响产生的“奇异”点阵等要点, 使之更加符合实际。将建立的地下水径流模数和透水性规律直接应用于隧洞涌水量估算中, 为该工程区水文地质条件的评价提供了依据。

关键词: 岩土力学; 南水北调西线; 地下水径流模数; 水文图法; 遥感解译; 岩体透水性; 现场压水试验; 隧洞涌水

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)20 - 3673 - 06

GROUNDWATER RUNOFF MODULUS, ROCK PERMEABILITY AND PREDICTION OF WATER QUANTITIES OF TUNNEL IN WEST ROUTE OF SOUTH-TO-NORTH WATER TRANSFER PROJECT

WANG Yuan, QIN Feng, LI Dong-tian

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the analysis of topographic and geological conditions along the west route of South-to-North Water Transfer Project, the groundwater runoff modulus and the rock permeability properties are studied. Firstly, an integrated method for evaluating groundwater runoff modulus of non-karst plateau region is presented, in which the hydrological map analysis is mainly applied, combined with remote sensing interpretation and the analysis of field flow data obtained from the survey of regional springs and streams. In the analysis of hydrological map, it is emphasized that the influences of rainfall and snow melting should be considered during map being cut. In the calculation of groundwater runoff modulus according to field survey data of stream flow, a seasonal reduction coefficient is proposed. The research results indicate that the groundwater runoff modulus within the hydrogeological element of Jiaqu River is largest whereas those in the other elements have similar values. Secondly, the permeability of rock mass is also studied in terms of data analysis of field water pressure test and isotope trace test. In dealing with test data, a method of omitting unreasonable data is suggested, because these kinds of data are possibly caused by poor seal of orifice or by the occurrence of the faults passed across borehole. A negative exponential relationship describing the permeability variation with depth is developed. The results of

收稿日期: 2005 - 06 - 13; **修回日期:** 2005 - 08 - 15

作者简介: 王 媛(1969 -), 女, 1995 年于河海大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事环境水文地质、岩土工程渗流与控制、裂隙岩体渗流与应力耦合问题及反问题方面的教学与研究工作。E-mail: wangyuan@hhu.edu.cn.

the above parameters are finally applied to the prediction of water quantities flowing into tunnel.

Key words: rock and soil mechanics; west route of South-to-North Water Transfer Project; groundwater runoff modulus; hydrological map analysis; remote sensing interpretation; permeability of rock mass; field water pressure test; water flowing into tunnel

1 引言

南水北调西线一期工程区位于青藏高原东部边缘,横穿达曲、泥曲、色曲、杜柯河、玛柯河、阿柯河、贾曲7条河流流域,分布有以变质砂岩为主和以变质砂岩与板岩大段互层为主的两类岩体。工程区地下水径流模数和岩体透水性等水文地质参数的研究是水文地质条件专题评价中的一项重要基础内容,对引水隧洞及渠道涌水量估算、边坡渗流研究等都具有重要的意义。

地下水径流模数是评价基岩山区裂隙富水性的最基本的参数。非岩溶基岩山区的区域调查中,评价地下水径流模数的方法主要有^[1, 2]:根据泉流量观测进行计算,依据实测溪流断面流量计算,水文图分析法,水均衡法等。对于一般的非岩溶基岩山区主要的评价方法就是前3种。鉴于西线工程区地处高寒高原的特点,难以对每个泉域中各个泉都进行测流,溪流量测流中将存在需剔除地表水流量的问题,而且两种野外测流皆无法建立长期观测数据,并存在量测中地下水潜流被忽视的问题,因此,在遥感解译基础上,建立以水文图分析法为主,结合野外泉流量测量和溪流量测量,进行地下水径流模数综合评价的方法,可以弥补各种单一方法评价的缺陷,使评价结果适合于工程应用。

岩体透水性是研究边坡、地下洞室渗流问题和确定隧洞涌水量的最基本参数。透水性的研究方法有理论定量法、经验比拟法、现场压水试验法、反演分析法等。岩体透水性的大小不仅与地层岩性有关,还与所处围压有关^[3],通常出现随深度增加而透水性减小的现象。特别是西线一期工程中引水隧洞大部分埋深较深,主要穿越风化微弱及未风化的地层中,因此有必要研究岩体随深度的增加,风化程度的减弱,其透水性的减小规律。本文结合现场钻孔压水试验数据的分析和钻孔同位素示踪试验,对此进行了较深入的研究,揭示出透水性随埋深的分布规律,为工程服务。

隧洞涌水量估算研究已经有近半个多世纪的历史,特别是近30a来,无论是研究的深度还是广度

都有了很大的进展,提出了多种计算方法^[4]和模型,比如水均衡法、地下水动力学法、比拟法、评分法、同位素氚(T)法^[5],以及科研院所提出的有限元数值模型^[6]、随机数学模型^[7]以及渗流-应力耦合模型^[8]等。本文基于西线工程区地下水径流模数和岩体透水性的研究成果,根据引水隧洞所通过区域的地质及水文地质条件,选用水均衡法中的地下径流模数法,地下水动力学法中的裘布依理论式等多种方法,对引水隧洞的涌水问题进行了初步研究。

2 工程区地下水径流模数研究

首先运用水文图分析法研究工程区地下水径流模数。达曲、泥曲流域采用下游鲜水河的朱巴水文站的水文气象观测资料,色曲、杜柯河流域采用下游绰斯甲河的绰斯甲水文站观测资料,玛柯河、阿柯河下游有足木足河的足木足水文站监测数据,贾曲、结柯、邓扎柯流域则可借用地质地貌和水文气象条件相似的白河流域的唐克水文站资料进行分析。根据4个水文站的多年平均流量过程线和降水过程线的特征,对地下水流量过程线进行分割,初步确定地下水基流量和径流模数。再应用卫星遥感资料(TM图像)^[9],按地下水径流条件的差异,将流域的下垫面进行分区,按全流域不同区的比重,和研究区不同下垫面区的比重,对初步分割进行修正。水文图分析法对枯水季地下水径流量和径流模数的计算是准确的,但对丰水季的地下水径流量,不易得到准确的评价。因此本文进一步运用夏季野外测流资料,并引入季节性折减系数对其进行补充修正,以减少野外测流时间与降雨关系的随机性造成的误差,特别是丰水季地下水径流模数,具有较高的可靠性。

根据上述方法可确定出该研究区的地下水径流模数,达曲—泥曲单元为 $4.23 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,色曲—杜柯河单元为 $4.73 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,玛柯—克柯河单元为 $4.78 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,贾曲单元为 $6.33 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。可以看出,该区域地下水径流模数总体比较高,反映了因受强烈的融冻风化,风化裂隙水比较发育,地下水径流较强。对于贾曲单元,由于地形平缓,风化

层保存完好, 堆积层厚, 地下水径流模数最大。其他 3 个单元的地下水径流模数基本接近, 越向西南, 由于切割渐深, 径流模数逐渐减小。

3 岩体透水性研究

3.1 岩体透水性总体分布特征

岩体的透水性通常以现场压水试验得到的 Lu 值表示。按照规程, 可按以下标准对其进行分类: Lu 值 < 1 为极微透水岩体; 1 ≤ Lu 值 < 10 为微透水岩体; 10 ≤ Lu 值 < 100 为中等透水岩体; Lu 值 ≥ 100 为强透水岩体。

1 Lu 定义为: 在 1 MPa 压力下长为 1 m 钻孔经过 1 min 后压入的水量为 1L。

本文采用黄河勘测规划设计有限公司进行的 45 个钻孔压水试验成果, 按各个钻孔逐段的 Lu 值大小进行了统计, 结果如表 1 所示。从表中可以看出 Lu 值总体的分布频率为: 0~1 Lu 的极微透水岩体段占 12.49%; 1~10 Lu 的微透水岩体段占 51.57%; 10~100 Lu 的中等透水岩体段占 34.32%; 大于 100 Lu 的强透水岩体段占 1.62%。因此研究区岩体的透水性总体上属于微~中等透水岩体。

表 1 钻孔压水试验 Lu 值统计表

Table 1 Statistical data of Lu value in water pressure test on borehole

| Lu 值 | 段数 | Lu 平均值 | 百分比/% |
|--------|-----|--------|-------|
| <1 | 139 | 0.47 | 12.49 |
| 1~10 | 574 | 4.37 | 51.57 |
| 10~100 | 382 | 17.41 | 34.32 |
| >100 | 18 | 269.91 | 1.62 |

3.2 钻孔压水试验数据分析及“奇异”点的剔除

将钻孔压水试验数据点绘成 Lu 值与埋深的关系曲线, 通过观察, 可以发现:

(1) 岩层的 Lu 值总体随钻孔深度的增加而减小。这是因为风化裂隙发育的程度直接影响了岩体的 Lu 值, 越靠近地表, 风化裂隙越发育, 透水性越大。这一点符合该区域水文地质特征, 也与其他西部工程岩体透水性的一般规律相吻合。

(2) Lu 值总体都小于 40 Lu, 但存在个别很大的数值(最大达 385.5 Lu), 基本上发生在近地表, 可能是因为止水不好或孔口处理有缺陷, 或是有大的断裂影响造成的, 这些点应作剔除。

(3) 有些钻孔(约占总数的 1/4)中 Lu 值随深度的分布明显不符合上述规律, 构成了图上“奇异”的点阵。这些点阵的 Lu 值明显偏大, 或越往深部越大, 反映了断层或裂隙密集带对 Lu 值的影响。这些数据也应该剔除。

因此, 在应用压水试验资料研究透水性时, 首先需对压水试验资料作必要的处理。这里以达曲申达坝址 4 个钻孔压水试验数据处理为例。将原始试验数据点绘成 Lu 值与埋深的关系曲线, 如图 1(a)所示。从图 1(a)可以看出, 绝大部分压水试验点的 Lu 值都小于 40 Lu, 因此需要剔除 40 Lu 以上的压水试验点。剔除 Lu 值在 40 Lu 以上点之后, 可以得到如图 1(b)所示的关系曲线。从图 1(b)可以看出, 1#钻孔在 80 m 深度以下还有大于 15 Lu 的点, 这明显不符合上述规律。产生此种现象的原因可能是在压水的过程中上下止水没有做好, 或者是反映了断层或裂隙密集带对岩体透水性的影响, 因此需剔除 1#钻孔的数据, 最后可得到图 1(c)所示的达曲申达坝址的 Lu 值与埋深的关系。从图中可以看出, 剔除有断层及裂隙密集带影响的钻孔的资料和大于 40 Lu 的“奇异”点后, 得到的点阵分布规律更明显。

3.3 岩体透水性随埋深变化规律

按上述“奇异”点剔除方法, 对所有钻孔压水试验资料进行处理, 最后可以按岩性点绘制 Lu 值与埋深的关系曲线, 两者总体符合负指数关系。图 2 和 3 所示为两类地层的 Lu 值随深度增加而衰减的曲线^[3], 从图中可以看出:

(1) 岩层的透水性总体上是随钻孔深度的增加而减小的, 呈负指数曲线衰减。

其方程可表示如下:

$$y = ae^{-bx} \quad (1)$$

式中: a 和 b 均为拟合参数。

第一类为以变质砂岩为主的地层(主要包括杂谷脑组、两河口组、格底村组等), 其拟合参数为 $a = 26.747\ 54$, $b = -0.015\ 52$ 。第二类为以变质砂岩与板岩大段互层为主的地层(包括中扎尔山组、侏倭组和雅江组), 其拟合参数为 $a = 28.294\ 39$, $b = -0.020\ 36$ 。

(2) 两类地层在风化带的 Lu 值是接近的, 均值达到 30~35 Lu。第二类砂岩互层的岩组, 在强风化带, 其 Lu 值可能比第一类岩组(砂岩为主岩

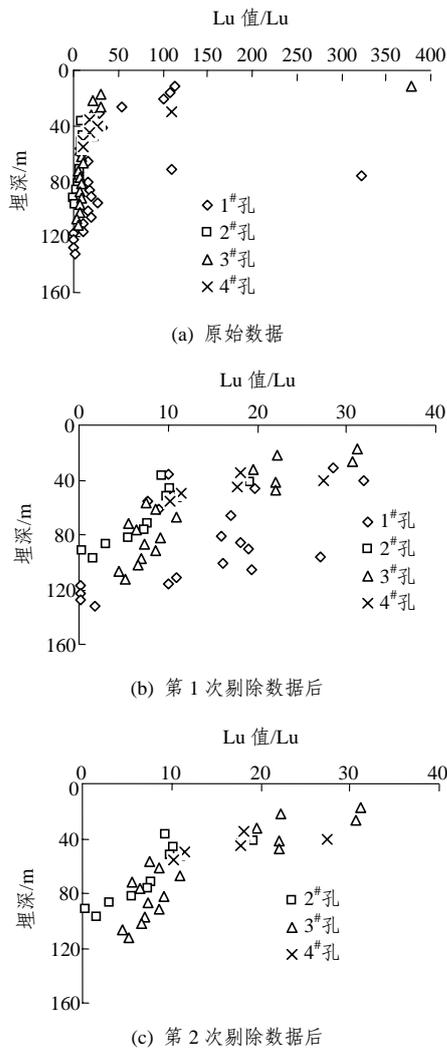


图1 达曲申达 Lu 值与埋深的关系

Fig.1 Relations between Lu value and depth at the dam site of Shengda on Daqu River

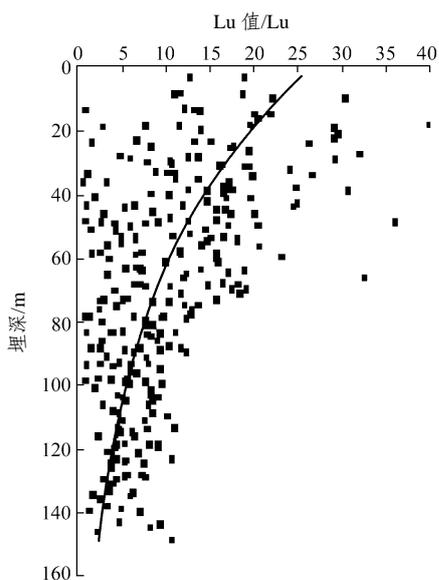


图2 第一类地层 Lu 值与埋深的关系曲线

Fig.2 Relation between Lu value and depth for the first kind of stratum

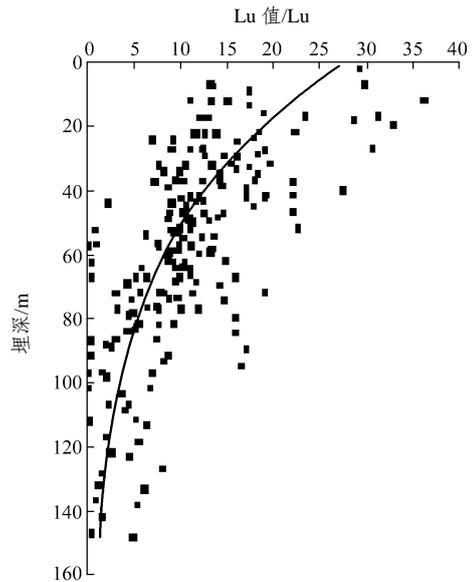


图3 第二类地层 Lu 值与埋深之间关系曲线

Fig.3 Relation between Lu value and depth for the second kind of stratum

组)会稍高些。

(3) 深度在 80 m 以下时, 风化裂隙的影响将变小。深度 80 m 处, 第一类岩组的 Lu 值为 8 Lu, 第二类岩组的 Lu 值为 5.5 Lu。

(4) 深度在 100 m 以下时, 风化裂隙对岩体的影响越来越微弱。深度 100 m 处, 第一类岩组的 Lu 值为 6 Lu, 第二类岩组的 Lu 值为 3.5 Lu。

(5) 在青藏高原的东北缘, 岩体风化的深度大约为 80~100 m。

3.4 岩体透水性随埋深变化规律的验证

共选用 7 个钻孔, 进行钻孔同位素示踪试验, 测定地下水的流速、流向及垂向流, 以研究不同深度、不同岩性的岩石渗透系数及涌漏水段的位置。从测试结果来看, 所有钻孔的总体渗透流速都很小, 所有地层的水平流速分布随深度递减, 表层的渗透流速一般比底部高一个数量级。除 XLZK14 钻孔由于垂向流的存在(估计与孔的地质条件、断层和裂隙的发育情况有关), 使得计算最大渗透系数在 10^{-3} cm/s 数量级, 其余钻孔整体平均渗透性能均能和压水试验对应, 最小在 10^{-6} cm/s 数量级。

4 隧洞涌水量预测

4.1 隧洞涌水量估算方法和模型

按照文[10], 分别选用水均衡法中的地下径流模数法, 地下水动力学法中的佐藤邦明经验式、正

常涌水量经验式、大岛洋志经验式、佐藤邦明非稳定流式、最大涌水量经验式，进行引水隧洞涌水量的估算，作为比较还采用了数值分析中的有限元法。计算参数渗透系数的选取系基于本文建立的岩体透水性随埋深变化的规律来确定，可以根据地下水位埋深和隧洞埋深，以地下水位埋深到隧洞埋深范围内的渗透系数平均值作为各洞段的计算渗透系数。由于该模型是在剔除断层和裂隙密集带的影响下而建立的，因此在隧洞涌水量估算中，对于断层和裂隙密集带还需重新单独考虑。有关参数见表 2 中所示。对于穿过洞线断裂带的透水性，系根据经验确定，一般取值为 0.1 m/d，对于个别张性断层，取为 1 m/d。

表 2 涌水量估算采用参数

Table 2 Parameters for evaluating water flow into tunnel

| 引水隧洞自然洞段 | 计算段号 | 隧洞长度 L/km | 总长 /km | 径流模数 M / $(L \cdot (s \cdot km^2)^{-1})$ | 渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$ |
|----------|------|-----------|--------|--|---------------------------|
| 达曲—泥曲 | 1 | 3.490 | 13.550 | 4.23 | 0.001 660 |
| | 2 | 1.485 | | 4.23 | 0.006 783 |
| | 3 | 3.435 | | 4.23 | 0.002 813 |
| | 4 | 5.140 | | 4.23 | 0.003 761 |
| 泥曲—色曲 | 5 | 11.155 | 23.980 | 4.23 | 0.004213 |
| | 6 | 12.825 | | 4.23/4.73 | 0.003 241 |
| 色曲—杜柯河 | 7 | 10.305 | 47.700 | 4.73 | 0.002 007 |
| | 8 | 26.340 | | 4.73 | 0.001 217 |
| | 9 | 11.055 | | 4.73 | 0.001 013 |
| 杜柯河—玛柯河 | 10 | 16.945 | 35.865 | 4.73/4.78 | 0.002 075 |
| | 11 | 18.920 | | 4.78 | 0.002 711 |
| 玛柯河—克曲 | 12 | 5.450 | 58.640 | 4.78 | 0.001 910 |
| | 13 | 53.190 | | 4.78 | 0.002 375 |
| 克曲—若曲 | 14 | 3.845 | 12.040 | 4.78 | 0.002 097 |
| | 15 | 8.195 | | 4.78 | 0.002 502 |
| 若曲—贾曲 | 16 | 23.270 | 50.200 | 4.78/6.33 | 0.004 245 |
| | 17 | 26.930 | | 6.33 | 0.004 045 |

根据引水隧洞沿线地层岩性和地质构造及水文地质条件，建立如图 4 所示的涌水量评价概化模型。

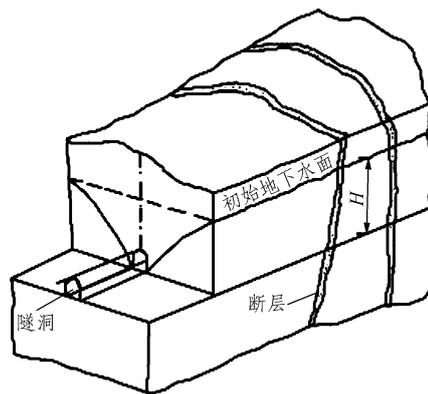


图 4 隧洞涌水量评价地质模型

Fig.4 Geological model for evaluating water flow into tunnel

4.2 隧洞分段涌水量估算成果

基于上述评价模型和各种估算方法，对引水隧洞各自然洞段各小段逐段进行涌水量评价，采用径流模数法和裘布依公式计算的结果比较接近，而采用规范经验式则偏大很多。无论采用哪种方法，克曲—贾曲段涌水量最大，达曲—泥曲段涌水量最小。影响涌水量大小的因素主要有引水隧洞埋深和长度，以及穿越断层的发育情况。从隧洞单位长度涌水量来看，达曲—泥曲段的丘洛断裂前 500 m 至格底村断裂后 500 m 之间、泥曲—杜柯河段的吉泽柯至色曲、杜柯河—玛柯河段的进洞口—则柯、若曲隧洞进口—扣格通东沟的涌水量较大，特别是丘洛断裂—格底村断裂和吉泽柯—色曲隧洞段存在断层突水的可能。

丘洛断裂前 500 m 至格底村断裂后 500 m 段，是断裂影响地段，地面所见的断裂影响带宽度均达 500 m，这两条断裂带之间为如年各组火山岩夹石灰岩地层。因断裂带的影响，如年各组各层的分布极不均衡，石灰岩地层在丘洛附近大片出露，形成石灰岩高山，但在洞线附近地表却未见出露，反映了其中的石灰岩层呈透镜状分布的特点。该洞段穿越达曲—泥曲分水岭，埋深很大。由于断裂带的影响和可能的石灰岩透镜体，该段水文地质条件相当复杂。

吉泽柯—色曲洞段穿过塔子乡断裂、亚龙乡断裂、亚龙寺—罗柯断裂、乌热柯断裂等巨大的 NNW 向压性断裂带，在地表可观察到其产状近直立，并向下延伸，总体产状将倾向 NE。因压性断裂带上盘岩体较破碎，泥曲—色曲的分水岭牟尼芒起山在此比较低，隧洞埋深一般为 400 m。隧洞过色曲河底处理深为 150 m，该洞段岩体破碎，地下水活动

是不可忽视的问题。

5 结 论

(1) 地下水径流模数对于某类工程计算是重要的参数,但它终究是具有基于随机数据统计性质的数据,本文所建立方法的目的在于尽可能在数量上正确反映地下水的这种特性。研究表明,贾曲单元地下水径流模数最大,其他 3 个单元则基本接近,越向西南,径流模数逐渐减小。

(2) 本文在现场钻孔压水试验资料分析与处理的基础上,结合钻孔同位素示踪试验,初步建立了岩体透水性随深度的变化规律,可直接应用于引水隧洞涌水量估算中。但需注意以下问题:

① 本文所作统计分析是在剔除了局部构造影响的情况下进行的。如果考虑到构造影响,包括断裂构造的影响带和因为褶皱造成的节理密集带,岩体的 Lu 值将增高。在估算隧洞涌水量中,应用此衰减曲线确定每个洞段岩体渗透系数时,则必须额外考虑断层和裂隙密集带的影响。

② 目前深度超过 150 m 的钻探试验资料较少,本文未对这些 Lu 值资料进行统计分析。但从个别深度大于 200 m 的钻孔的 Lu 值资料来看,当孔深大于 100 m 时, Lu 值继续随深度增加而减小。除因风化裂隙的影响越来越小之外,随着深部的围压逐渐增大,岩体的裂隙率必定逐渐减小时,这是研究深部 Lu 值减小必须要考虑的主要因素。

参考文献(References):

- [1] 河北省地质局水文地质四大队. 水文地质手册[M]. 北京:地质出版社, 1978.(The 4th Hydrogeology Branches of Hebei Provincial Geology Bureau. Handbook of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978.(in Chinese))
- [2] 李东海. 用水文、水文地质分析法计算基岩山区水文地质参数[J]. 勘察科学技术, 1994, (3): 41 - 43.(Li Donghai. Calculating hydrogeological parameters at bedrock mountain region using hydrology and hydrogeological analytical methods[J]. Site Investigation Science and Technology, 1994, (3): 41 - 43.(in Chinese))
- [3] 米 勒. 岩石力学[M]. 李世海, 冯震海译. 北京:煤炭工业出版社, 1981.(Muller L. Rock Mechanics[M]. Translated by Li Shihai, Feng Zhenhai. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1981.(in Chinese))
- [4] 朱大力, 李秋枫. 预测隧道涌水量的方法[J]. 工程勘察, 2000, (4): 18 - 22, 32.(Zhu Dali, Li Qiufeng. Methods for predicting the water recharge into tunnel[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2000, (4): 18 - 22, 32.(in Chinese))
- [5] 杜红梅. 水中氚测试在山岭隧道涌水量预测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2004, (1): 69 - 72, 68.(Du Hongmei. Study on the tritium test for water gushing capacity forecast into Qinling's full-length tunnel of Xi'an Ankang railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, (1): 69 - 72, 68.(in Chinese))
- [6] 李保珠, 李 峰, 薛传东, 等. 有限单元法在涌水量预测中的应用[J]. 矿业工程, 2003, (5): 56 - 58.(Li Baozhu, Li feng, Xue Chuandong, et al. Water inrush prediction using finite element method[J]. Mining Engineering, 2003, (5): 56 - 58.(in Chinese))
- [7] 李兴高, 刘维宁, 张昀青. 隧道渗涌水量的随机模型预测[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(4): 60 - 64.(Li Xinggao, Liu Weining, Zhang Yunqing. Predicting the amount of water inflow in tunnel by stationary random model[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(4): 60 - 64.(in Chinese))
- [8] 黄 涛, 杨立中. 渗流场与应力耦合环境下裂隙围岩隧道涌水量的预测研究[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 75 - 80.(Huang Tao, Yang Lizhong. A prediction study of water-gush yield in fractured tunnels under coupling between seepage and stress[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(6): 75 - 80.(in Chinese))
- [9] 李冬田. 地质遥感[M]. 北京:水利电力出版社, 1995.(Li Dongtian. Geological Remote Sensing[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. 铁路工程水文地质勘察规程(TB10049 - 2004)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Hydrogeological Investigation of Railway Engineering(TB10049 - 2004)[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.(in Chinese))