

# 巨厚非均质潜水含水层抽水试验及参数计算

车灿辉<sup>1,2</sup>

(1.安徽省地矿局第一水文工程地质勘察院,安徽 蚌埠 233000; 2.安徽水文地质工程地质公司,安徽 蚌埠 233000)

**摘要:**渗透系数决定了深基坑工程涌水量的估算及止水帷幕的型式,影响工程安全及造价,对富水地区深基坑工程建设具有重大的意义。对于非均质含水层组,现有的解析公式中,很难找到合适的方法计算水文地质参数,特别是垂直方向的渗透系数。通过在现场施作临时止水帷幕,利用帷幕的绕流阻水作用进行抽水试验,模拟基坑开挖过程中的降水问题,再建立水文地质概念模型和地下水流数学模型,并利用三维有限差分数值模拟软件反演出各层渗透系数,最后通过验证性抽水资料对模型进行了验证,为福州一临江巨厚砂卵石地层地铁车站的围护结构设计提供地下水控制提供了设计参数。该试验和数值模拟结果可为类似工程参考。

**关键词:**渗透系数;抽水试验;非均质含水层;临时止水帷幕;深基坑工程

**中图分类号:**TU46<sup>+</sup>3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)11-0060-05

**Pumping Test and Calculation of Hydrogeological Parameters for Massive Anisotropic Phreatic Aquifers/CHE Cancan<sup>1,2</sup>** (1.No.1 Institute of Hydrology and Engineering Geological Prospecting, Anhui Geological Prospecting Bureau, Bengbu Anhui 233000, China; 2.Anhui Hydrogeology and Engineering Geology Corporation, Bengbu Anhui 233000, China)

**Abstract:** The permeability coefficient determines the estimation of water inflow at deep foundation pits and the type of the water cutting-off curtain, and affects the safety and cost of the project; thus, it is of great significance to the construction of deep foundation pits in water-rich areas. For anisotropic aquifers, it is difficult to find a suitable method to calculate the hydrogeological parameters from the existing analytical formula, especially for the vertical permeability coefficient. A pumping test was carried out on the flow resistance by using the temporary water cutting-off curtain in the field to simulate the dewatering of foundation pits; then, the hydrogeological conceptual model and the groundwater flow mathematical model were established to invert the permeability coefficient of each layer by using a 3D finite difference numerical simulation software; finally, the model was validated by the data of verification pumping; which provided a guiding basis for the design of the envelope of a subway station in the super-thick sand and gravel stratum near the river in Fuzhou. The results of the test and the numerical simulation can be used for reference for similar projects.

**Key words:** permeability coefficient; pumping test; anisotropic aquifer; temporary water cutting-off curtain; deep foundation pit

## 0 引言

渗透系数是水文地质计算中的一个重要参数<sup>[1]</sup>。在富水地层中进行深基坑工程建设时,其取值的正确与否对涌水量的估算、周边环境的影响评价以及地下水控制技术的确定等起到至关重要的作用,特别是对围护结构的型式、深度等的确定。渗透系数的测定方法很多,例如在实验室测定、用物探方法测定等<sup>[1]</sup>,但最有效的办法还是通过现场抽水试验或注水试验<sup>[1-2]</sup>,根据流量与水位变化之间的关系,通过解析公式(Dupuit、Thies 等)或数值法(有

限差分、有限元)对水文地质参数进行计算分析。

解析法有很大的局限性,只适用于含水层几何形状规则、方程式简单、边界条件单一的情况,例如均质各向同性、等厚的含水层<sup>[3]</sup>。因此,利用解析法时,需将场地概化为均质各向同性、等厚的含水层,求解的结果为等效渗透系数,不能反映出各地层的渗透性能差异。

对于含水层边界形状不规则、厚度变化、非均质和各向异性、多种边界条件同时存在等,解析法都无法适用。而数值法可将整个渗流区分割成若干个形

收稿日期:2018-08-06; 修回日期:2018-10-23

作者简介:车灿辉,男,汉族,1984年生,硕士,水文地质专业,主要从事水文地质研究工作,江苏省南京市建邺区江东中路311号中泰国际广场5栋1616室(221000),checanhuai@126.com。

状规则的单元,这些单元可以近似地看成是均质的,可以很容易建立起描述各个单元地下水流动的关系式,把本来是形状不规则的、非均质问题转化为容易计算的形状规则的、均质问题。各个单元可以根据需要选择合适的水文地质参数,单元形状也可以不同,把所有单元合在一起就能表现出渗流区域在几何上的不规则形状和在水文地质上的非均质性,可以很方便地处理解析法难以解决的困难,适用于任何复杂的地下水流动问题<sup>[3-4]</sup>。

### 1 抽水试验概况

福州一地铁车站全长约 280 m、宽约 20 m、深 6.5~18.5 m,位于仓山区,距离乌龙江约 800 m,周边存在居民小区及大量管线。车站所处场地自上而下主要为<2-5-2>粗中砂(稍密)、<2-5-2>粗中砂(中密)、<3-3>中粗砂、<3-8>卵石层,厚度>50 m,为典型的非均质潜水含水层,与乌龙江水存在水力联系,存在降水难度大、周边沉降控制难度大等风险。地下水的控制方式决定了工程的造价及安全

性,因此,在围护结构设计前,特进行现场抽水试验,确定各层水文地质参数,为地下水控制设计提供资料。

为真实地反映止水帷幕影响下的地下水流特征,以及准确地获取垂直方向的渗透系数,现场采用三轴搅拌桩施工面积 20 m×10 m、深 30 m 的临时悬挂式止水帷幕。在帷幕内施工 4 口抽水井、1 口观测井,帷幕外施工 1 口抽水井、4 口回灌井、7 口水位观测孔,见图 1、图 2。

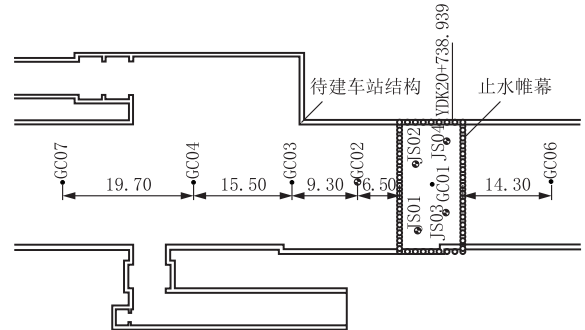


图 1 试验井平面布置(单位:m)

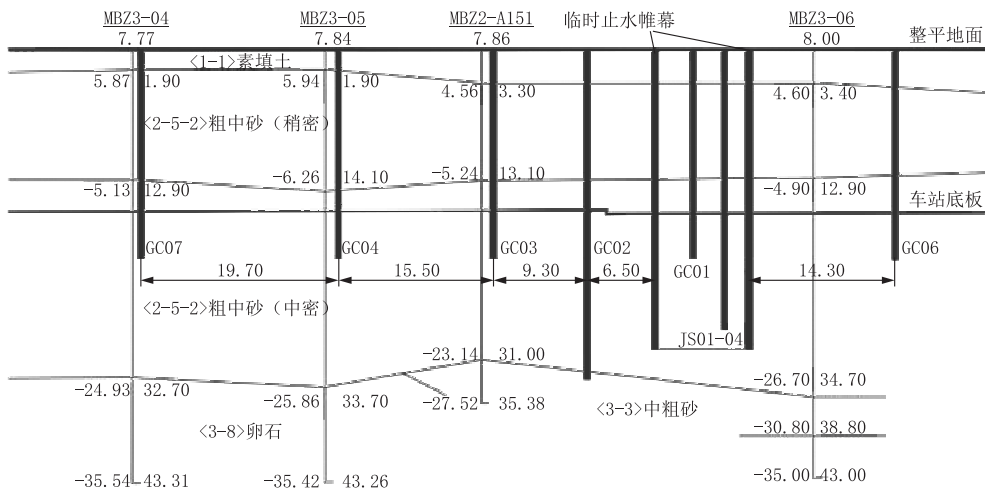


图 2 试验井与地层剖面位置(单位:m)

根据场地地层特征,抽水井采用大口径管井,孔径 600 mm、管径 325 mm,深度尽量接近开挖阶段生产井深度;观测井孔径 300 mm、管径 150 mm、深度大于基坑深度,见表 1。

表 1 试验井结构一览表

位置	编号	井深/m	备注
帷幕内	JS01~JS04	28	抽水井
	GC01	21	观测井
帷幕外	GC02	33	抽水井兼做观测井
	GC03~GC07	21	观测井

试验过程中,分别进行帷幕外抽水、帷幕内抽水、水位恢复、验证性抽水,具体见表 2。帷幕外单井抽水时,抽水量约 200 m<sup>3</sup>/h,主井水位降深仅为 8 m,而最近观测井最大水位降深仅约 0.70 m,反映出场地地下水极其丰富。

现场采用稳定流进行抽水试验,为满足非稳定流计算要求,结合非稳定流要求进行数据观测。

## 2 水文地质参数计算

### 2.1 稳定流解析法

表2 试验过程一览

试验阶段	历时	主要目的
帷幕外抽水	3d16h	(1)无帷幕条件下水位下降规律;(2)求综合水文地质参数
帷幕内抽水	7d3h	(1)对比坑内外水位差异;(2)分析止水帷幕的绕流作用;(3)求取各层水文地质参数
水位恢复	3d	了解水位恢复情况
验证性抽水	9d8h	(1)将帷幕内水位降至车站预计开挖面以下,实测涌水量及坑外水位下降情况;(2)对模型进行验证

经过条件概化,帷幕外 GC02 单井抽水试验数据可近似满足解析法适用条件。根据《供水水文地质手册(第二册)》,选择以下计算公式:

$$K = \frac{0.16Q}{l''(S_1 - S_2)} \left( \operatorname{arsh} \frac{l''}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l''}{r_2} \right)$$

其中:

$$l'' = l_0 - 0.5(S_1 + S_2)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$ ——观测孔的水位降深值, m;  $r_1$ 、 $r_2$ ——观测孔至抽水井间的中心距离, m;  $Q$ ——抽水井涌水量,  $\text{m}^3/\text{h}$  或  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $l_0$ ——滤管长度, m。

利用观测孔 GC03、GC04、GC07 水位数据求得综合渗透系数为 106.8~110.65 m/d, 见表 3。

表3 稳定流计算水文地质参数结果

序号	降次	Q/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	观测井	距离 r/ m	水位 降深 S/m	$l''$	$\operatorname{arsh} \frac{l''}{r}$	渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )
1	第一降深	2481.60	G03	9.30	0.320	27.735	1.813	110.65
			G04	24.80	0.210		0.963	
2	第一降深	2481.60	G03	9.30	0.320	27.760	1.814	109.47
			G07	44.50	0.160		0.589	
3	第一降深	2481.60	G04	24.80	0.210	27.815	0.965	106.94
			G07	44.50	0.160		0.590	
4	第二降深	5187.12	G03	9.30	0.690	27.428	1.802	109.18
			G04	24.80	0.455		0.954	
5	第二降深	5187.12	G03	9.30	0.690	27.480	1.804	108.39
			G07	44.50	0.350		0.584	
6	第二降深	5187.12	G04	24.80	0.455	27.598	0.959	106.80
			G07	44.50	0.350		0.586	

## 2.2 数值法

### 2.2.1 概念模型

根据场地水文地质特征,对水文地质条件进行概化,建立本工程水文地质概念模型。平面上,西侧乌龙江直接切割含水层,对含水层进行补给,取乌龙江为模型西侧边界,设定为定水头补给边界;其余三侧距离天然水文地质边界较远,为克服边界的不确定性给计算结果带来影响,将其设置在抽水影响范

围以外,人为处理为零流量边界;模拟区范围约 2300 m×2000 m,见图 3。剖面上,由于地层起伏变化,根据地层岩性、钻孔柱状资料对含水层组进行划分,见图 4。

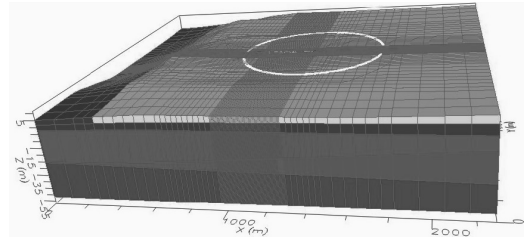


图3 三维模型及网格剖分

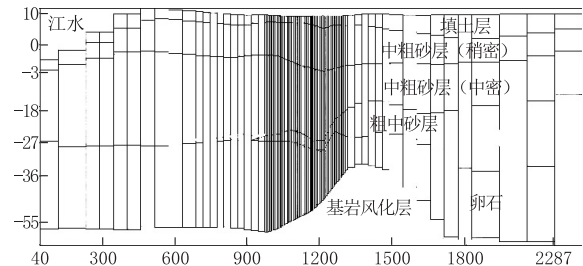


图4 模型地层概化示意

### 2.2.2 数学模型

由于含水层组由多个含水介质相差较大的含水层组成、厚度起伏变化且存在止水帷幕影响,地下水流动复杂,三维模型能很好地刻画此种情况下地下水的实际流动情况,地下水连续方程及其定解条件如下:<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y, z) \in \Omega$$

$$H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, 0) \quad (x, y, z) \in \Omega$$

$$H(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1$$

$$K \frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_2$$

式中:  $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$ ——平行于主轴  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的渗透系数, L/T;  $W$ ——单位体积流量,用以代表流进或流出的源汇项,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $h$ ——点  $(x, y, z)$  在  $t$  时刻的水位, m;  $S_s$ ——储水率, L/m;  $\Omega$ ——渗流区域;  $H_0(x, y, z, 0)$ ——研究区各层初始水头值;  $H_1(x, y, z, t)$ ——研究区各层第一类边界  $\Gamma_1$  上的已知水头函数, L;  $q(x, y, z, t)$ ——第二类边界  $\Gamma_2$  上的单位面积法向流量 [ $\text{L}^2 \text{T}^{-1}$ ], 对于隔水边界,  $q=0$ 。

### 2.2.3 网格剖分

采用六面体网格剖分,网格大小 25 m×25 m,在抽水井、临时止水帷幕附近采用较小的网格距进行再次剖分,大小约 1 m×1 m,平面上剖分为 84 行、105 列,共 44100 个网格。剖面上,根据地层岩性、钻孔柱状资料、临时止水帷幕深度等对含水层组进行划分,分为 6 层(见图 4)。

### 2.2.4 参数反演

将抽水试验的流量和水位资料输入模型,采用数值模拟反求出水文地质参数。求解时,先给待定的水文地质参数{K}假设一组初值,然后再利用这一组参数去求出各点在  $t_i$  时刻的水头值  $H_j(t_i)$ ,与该点相应的水位观测值  $H_j^{ob}(t_i)$  去对比,根据两者之间的误差,不断地修改水文地质参数。如此反复修改,直至计算值和观测值相差很小(或称之为很好拟合)时为止,这时的水文地质参数值就是所求的水文地质参数值<sup>[4]</sup>。

本次利用帷幕内观测井 GC01 以及帷幕外观测井 GC02、GC06 的实测水位曲线与数值模拟计算的水位曲线进行对比,通过反复调整参数,得出图 5~7 所示拟合情况较好的曲线。210 组数据中,标准误差 0.006 m、残差均值 0.029 m,均方根 0.096 m,标准均方根 1.006%,相关系数达到 1.0,仅 3 个数据误差 >5%(见图 8)。相应的渗透系数见表 4。

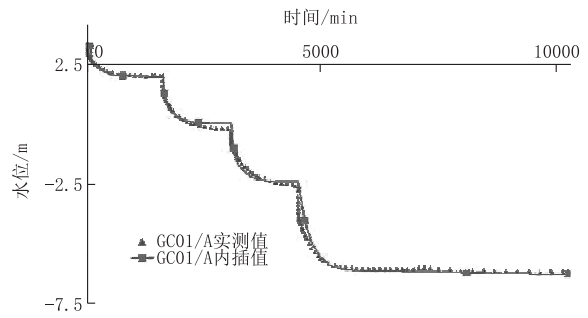


图 7 GC01 观测井水位拟合曲线

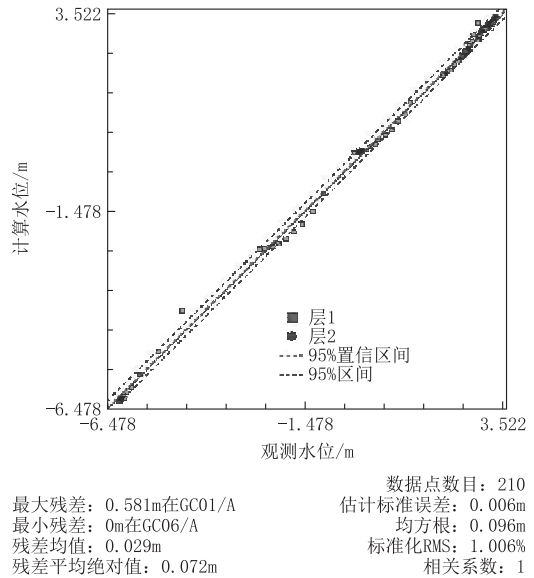


图 8 反演结果误差分析

表 4 水文地质参数反演结果

序号	土层名称	渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )		S <sub>s</sub> /S <sub>y</sub>
		水平方向	垂直方向	
1	粗中砂(稍密)	100.07	50.62	1.529×10 <sup>-1</sup>
2	粗中砂(中密)、中粗砂	65.70	33.83	5.547×10 <sup>-3</sup>
35	卵石	128.77	48.08	2.235×10 <sup>-2</sup>

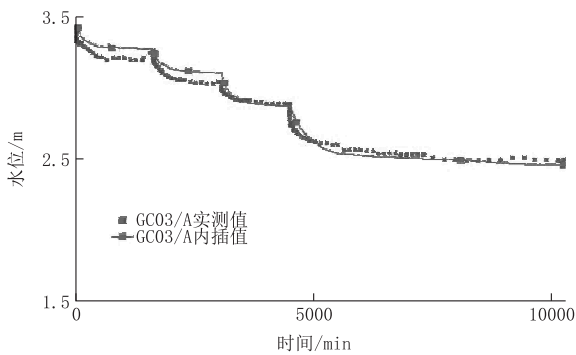


图 5 GC03 观测井水位拟合曲线

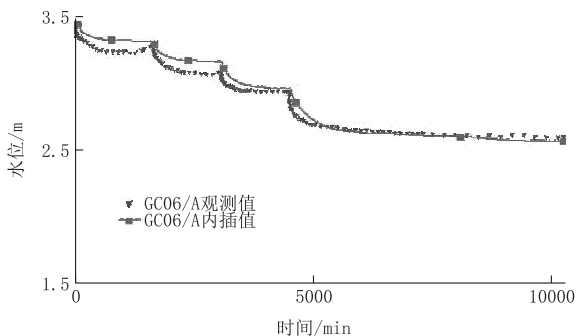


图 6 GC06 观测井水位拟合曲线

### 3 计算结果评价

根据《水文地质手册(第二版)》,粗砂渗透系数经验值为 25~50 m/d、砾砂为 50~100 m/d、圆砾为 75~150 m/d。本次抽水试验,采用稳定流解析公式计算得到的综合渗透系数约为 110 m/d,采用数值反演得到的粗中砂层水平向渗透系数为 65.7~100.07 m/d,远大于粗砂层渗透系数的经验值,似乎不合常理。

理论上,由于砂层密实程度的影响,上部稍密粗中砂层的透水性要大于中密粗中砂层;同时,在成井施工过程中,17 m 以浅地层粘粒含量极少,几乎无

泥浆,17 m以深开始出现少量粘粒;另外,在抽水过程中,深层水位观测孔的水位降深要大于浅层观测孔,这些均符合数值法反演结果中的上部粗中砂层的渗透系数大于下部粗中砂。

为模拟基坑开挖阶段的最大水位降深,后期又将帷幕内的水位降至地面以下17 m(水位降深达12.65 m),观测到坑外水位降深约1.60 m,并逐渐停抽,观测水位回升。同时也利用此次水位数据对模型进行进一步的检验,模型计算的曲线与实际观测曲线吻合极好(见图9)。

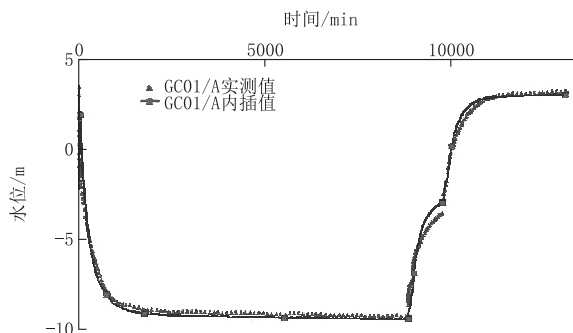


图9 验证抽水阶段GC01观测井水位拟合曲线

从拟合图中可以看出,数值模拟水位变化和实测水位变化规律基本一致,模拟结果基本反映了抽水过程中观测井水位变化,较真实地反映了含水层的渗流特征,所建模型能够代表场地的水文地质特征,可以用于深基坑地下水控制计算。

另外,根据周边居民反映,场区主要为人工堆填而成,上部砂层并非自然沉积而成,渗透系数超过经验值属于正常情况。

#### 4 结论

(1)本次抽水试验周期长,获取了大量的观测数据,并利用数值法反算了各层的水文地质参数,为基坑地下水控制技术的确定提供了可靠的依据,经后

期基坑降水实践,计算的渗透系数真实可靠。

(2)在复杂水文地质条件下进行深基坑工程设计,有必要在前期进行现场抽水试验,为深基坑地下水控制提供科学的指导依据。

(3)利用临时止水帷幕进行现场抽水试验,更能够反映地下水的绕流特征,所计算的垂向渗透系数更具有代表性。

#### 参考文献:

- [1] 施普德.井水量计算的理论与实践[M].北京:地质出版社,1977.
- [2] 周志芳,汤瑞凉,汪斌.基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数[J].河海大学学报(自然科学版),1999,(3):5-8.
- [3] 薛禹群,朱学愚,等.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997.
- [4] 薛禹群,谢春红.地下水数值模拟[M].北京:科学出版社,2007.
- [5] 李贵仁,赵珍,陈植华.数值模拟在反演矿区水文地质条件中的应用[J].水文地质工程地质,2013,40(2):19-23.
- [6] 李洪财.南京长江江心洲超大直径盾构接收井明挖段超深基坑降水技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):87-92.
- [7] 瞿成松.邻近多条地铁的基坑降水技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(2):29-35.
- [8] 朱明忠,施淑芬,王春雨.深井降水设计与施工若干问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):35-38.
- [9] 李培妍,宫全美,元翔,等.杭州某地铁深基坑减压降水措施研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):213-219.
- [10] 张楠.深基坑水文地质参数的确定及降水设计[J].地下空间与工程学报,2011,7(2):375-379.
- [11] 赵琳琳,肖长来,陈昌亮,等.基于抽水试验的多种方法确定水文地质参数[J].地下空间与工程学报,2015,11(2):306-309.
- [12] 刘清文,车灿辉.长江漫滩复杂地层条件下超大超深基坑降水设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):54-59.
- [13] Xu B, Yan C, Sun Q, et al. Field pumping experiments and numerical simulations of shield tunnel dewatering under the Yangtze River[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8):1-16.
- [14] 中国地质调查局.水文地质手册(第2版)[M].北京:地质出版社,2012.