

doi:10.3799/dqkx.2017.069

含水岩组概化的累积导水系数法

白宏伟^{1,2}, 刘延锋^{1,2}, 靳孟贵^{1,2*}

1. 中国地质大学盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 地下水流系统理论和数值模拟技术分别是水文地质学的基本理论和技术方法, 含水岩组的概化是地下水水流系统分析和地下水数值模拟的重要基础, 直接影响着数值模拟和水流系统分析的精度和可信度。为提高含水岩组概化的精度和可信度, 提出一种含水岩组概化的新方法, 即累积导水系数法。依据岩层厚度与渗透系数乘积累积值随深度的变化, 以及水文地质剖面岩性分布的整体特征, 概化含水介质结构。以玛纳斯河流域为例, 应用该方法概化流域内的岩性剖面, 结合 GMS 软件中 TINS 模块构建水文地质结构模型。结果表明, 应用该方法概化后的含水层结构具有较好的合理性和仿真性, 建立的三维模型很好地显示了研究区含水介质的空间展布特征, 为建立地下水水流模型奠定了良好的基础。

关键词: 含水岩组; 累积导水系数法; 结构模型; 概化; 渗透系数; 地下水; 水文地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2017)05-0813-08

收稿日期: 2016-12-17

Generalization of Aquifer Group by Cumulative Transmissivity Method

Bai Hongwei^{1,2}, Liu Yanfeng^{1,2}, Jin Menggui^{1,2*}

1. Laboratory of Basin Hydrology and Wetland Eco-Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Groundwater flow system theory and numerical simulation technique are fundamentals in hydrogeology. Generalizing aquifer group is an important foundation for groundwater flow system analysis and numerical simulation, which directly affects the accuracy and the reliability of the simulation results. This paper proposes a new method named cumulative transmissivity to generalize aquifer group, aiming at improving the generalization accuracy and reliability. The new method is characterized by aquifer structure based on the changes of the accumulated transmissivity (product of hydraulic conductivity and its thickness) with depth and the integral characteristics of the hydrogeological profile. A case study in the Manas River basin is presented in this paper. Based on the generalization, a hydrogeological structure model is built using the GMS software and its TINS module. The results indicate that the aquifer structures generalized using this method have a high rationality and fidelity. The 3D model well displays the spatial distribution of the aquifers and auctards in the study area and provides a good foundation for groundwater flow model.

Key words: aquifer group; cumulative transmissivity method; structure model; generalization; hydraulic conductivity; groundwater; hydrogeology.

0 引言

地下水水流系统理论和地下水数值模拟技术分别是水文地质学的基本理论和技术方法(王浩等,

2010; 梁杏等, 2012; Filimonova and Baldenkov, 2015; Dogrul *et al.*, 2016). 含水系统结构的刻画是地下水水流系统分析和数值模拟的关键基础工作, 也是目前研究的前沿问题(Raiber *et al.*, 2015)。岩层

基金项目: 国家自然科学基金——新疆联合基金重点支持项目(No.U1403282); 国家自然科学基金面上项目(No.41572224)。

作者简介: 白宏伟(1991—), 男, 硕士, 主要从事地下水数值模拟的研究。ORCID: 0000-0002-1222-5990。E-mail: hwwhite@126.com

* 通讯作者: 靳孟贵, ORCID: 0000-0002-0125-4286。E-mail: mgjin@cug.edu.cn

引用格式: 白宏伟, 刘延锋, 靳孟贵, 2017. 含水岩组概化的累积导水系数法. 地球科学, 42(5): 813—820.

沉积环境和地质构造的复杂性决定了含水介质的空间分布普遍存在不连续性、不均匀性和不确定性,如何概化多层结构的含水岩组是水文地质空间结构三维建模的一个关键问题(吴吉春和陆乐,2011)。例如,自山前向下游排泄区,第四系松散沉积物岩性通常由单一结构逐渐变为复杂的多层结构,特别是下游冲积平原区,存在很多砂和粘性土的互层,以及不同规模的透镜体,增加了含水岩组概化的难度。以往研究对含水岩组划分和概化的专题研究相对较少(胡国华,1980)。一般根据钻孔和物探资料(如地震剖面)以及沉积环境(杨辉等,2000;张生伟,2009;陈浩辉,2014),在二维剖面图上依据经验和地层的整体性分布推断地层的空间展布,进而概化含水系统结构(张渭军,2016),具有较大的主观性,很难保证精度。魏国孝等(2006)在概化第四系松散层含水介质结构时,发现很难找到一层分布比较稳定的隔水层,潜水含水层和承压含水层存在区域上的水力联系,可视为统一的多层含水系统。这种刻画方法简化了模型,但降低了数值模拟的精度。此外,大量地层资料的分区和分层主要依靠经验,分层结果常因人而异,任意性较大(蔡树英等,2003)。为了准确刻画含水系统结构,一些学者综合运用钻孔岩性分布与地下水化学组成和同位素以及物探(地震)等资料,划分含水岩组与水文地质结构模型,但地层的空间分布复杂性导致划分结构与实际存在较大的差异(葛伟亚等,2006)。

为了减少主观因素,定量或半定量划分含水岩组,受灰色模型理论数据累积思想(张子旭,1997;同小军等,2002)和层状岩层等效渗透系数(薛禹群和吴吉春,2010)计算方法的启发,笔者提出依据渗透系数与地层厚度乘积(即导水系数)累积值随深度变化曲线特征划分含水岩组的累积导水系数分层法。本文以玛纳斯河流域为例,阐述如何用累积导水系数曲线的斜率变化概化多层结构的含水岩组、构建三维水文地质结构模型,为区域地下水水流系统分析和地下水数值模拟奠定基础。

1 方法原理

根据研究区实际钻孔数据(新疆地质局水文地质工程地质大队编制,新疆维吾尔自治区准噶尔盆地南缘水文地质图(1:500 000)说明书,1977),绘制钻孔柱状图。例如,选择位于研究区134团团部附近的钻孔,岩性组成主要为砂和粘性土互层(图1)。

层序号(i)	层底深度(m)	层厚(m)	钻孔剖面	岩性描述
1	44.09	44.09	· · · · · · · · · · · · · · · ·	粉土
2	60.15	16.06	· · · · · · · · · · · ·	粗砂
3	93.00	32.85	· · · · · · · · · · · · · · · ·	粉土
4	104.57	11.56	· · · · · · · · · · · ·	细砂
5	134.86	30.29	· · · · · · · · · · · · · · · ·	粉土
6	154.39	19.53	· · · · · · · · · · · ·	粗砂
7	164.06	9.67	· · · · · · · · · · · ·	粉土
8	171.92	7.86	· · · · · · · · · · · ·	细砂
9	176.97	5.04	· · · · · · · · · · · ·	粉土
10	209.44	32.47	· · · · · · · · · · · ·	细砂
11	233.41	23.96	· · · · · · · · · · · ·	粘土
12	255.95	22.54	· · · · · · · · · · · ·	粗砂
13	274.39	18.44	· · · · · · · · · · · ·	粉质粘土
14	286.80	12.42	· · · · · · · · · · · ·	细砂

图 1 钻孔岩性柱状图

Fig.1 Lithological column of a bore hole

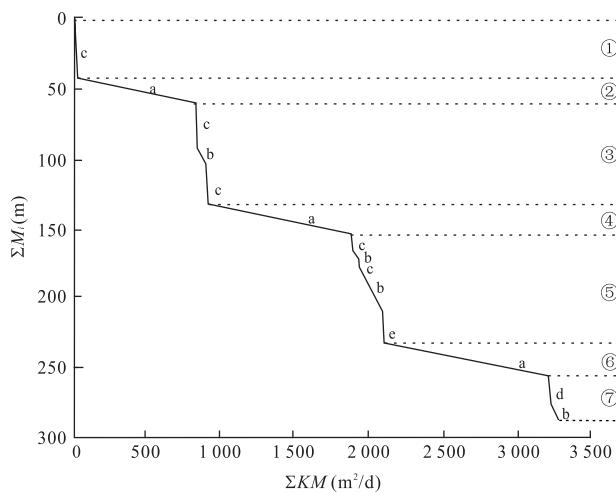
表 1 玛纳斯河流域不同岩性的渗透系数

Table 1 Hydraulic conductivity of different lithology in Ma-nas River basin

岩性	粗砂	细砂	粉土	粉质粘土	粘土
水平渗透系数(m/d)	50	5	0.5	0.1	0.01

依据玛纳斯河流域钻孔抽水试验成果(新疆地质局水文地质工程地质大队编制,新疆维吾尔自治区准噶尔盆地南缘水文地质图(1:500 000)说明书,1977),结合经验值(中国地质调查局,地下水水流数值模拟技术要求,2004),得到玛纳斯河流域不同岩性的水平渗透系数,如表1所示。

根据表1获得的钻孔每一层渗透系数和层厚,计算每层渗透系数与层厚的乘积,并累加 $\sum_{i=0}^p K_i M_i$

图 2 $\sum K_i M_i$ 与 $\sum M_i$ 变化关系Fig.2 The relation of $\sum K_i M_i$ and $\sum M_i$

a.粗砂;b.细砂;c.粉土;d.粉质粘土;e.黏土;①~⑦概化后层序号

表 2 概化后各分层的综合渗透系数

Table 2 Hydraulic conductivity of aquifer after generalization

岩性概化	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
K_h	0.5	50	1.2	50	2.65	50	2.07

(简计为 $\sum KM$),绘制 $\sum KM$ 随深度变化曲线(图 2).由图 2 可见,曲线随深度变化斜率存在显著差异,斜率大表明渗透性好,而斜率小表示渗透性差.依据斜率变化趋势将钻孔岩性概化为 7 层,即第 1、2、6、12 各层单独概化为一层,第 3~5 层斜率变化趋势相近,合并为一层,第 7~11 层斜率变化趋势相近概化为一层,第 13~14 段为一层,所以整个钻孔岩性可概化为 7 层(图 2).根据公式(1)可求得概化后每层的水平综合渗透系数(表 2).

$$K_h = \frac{\sum_{i=1}^n K_{hi} M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (1)$$

式中: K_h 为概化后的水平方向综合渗透系数,单位(m/d); K_{hi} 为第 i 层水平方向渗透系数,单位(m/d); M_i 为第 i 层含水介质层厚度,单位(m).

将研究区所有钻孔均按照上述方法处理,绘制每个钻孔 $\sum KM$ 随深度的变化曲线,根据曲线斜率变化特征概化每个钻孔,使概化后的所有钻孔岩性层数相同.结合钻孔分布选取特定剖面,综合剖面各钻孔曲线的斜率变化特征,参考沉积环境将不同钻孔变化趋势相同或相近且深度相近的岩层连接为一层.如遇厚度很薄且横向不连续的岩层,可与相邻层合并.若导水系数累积曲线斜率不随深度变化,则

渗透系数为常数,表明岩性结构单一,为均质含水层.

与传统方法相比,在概化复杂岩性含水介质结构时,累积导水系数法把实际经验与定量计算相结合,单孔与剖面整体相结合,实现了含水岩组概化的半定量化,提高了复杂含水岩组概化的可靠性,使概化的含水介质结构更为合理.

2 二维水文地质剖面概化

2.1 研究区概况

玛纳斯河流域位于新疆天山北麓准噶尔盆地(图 3),属典型的大陆性干旱气候,年降水量为 110~200 mm,年蒸发量为 1 500~2 000 mm,蒸降比为 7.5~19.0;年平均气温为 6.6 °C,昼夜温差大.玛纳斯河流域东起塔西河,西至巴音沟河,主要有塔西河、玛纳斯河、宁家河、金沟河、巴音沟河等河流,其中玛纳斯河是准噶尔盆地流程最长、流量最大的内陆河流.地势南高北低,由南至北依次为山地丘陵区、中部绿洲平原区及北部沙漠区(赵宝峰,2010).

2.2 含水岩组划分

2.2.1 含水系统结构特征 玛纳斯河流域山前平原分布有 $Q_2 \sim Q_4$ 巨厚松散沉积物.水文地质条件

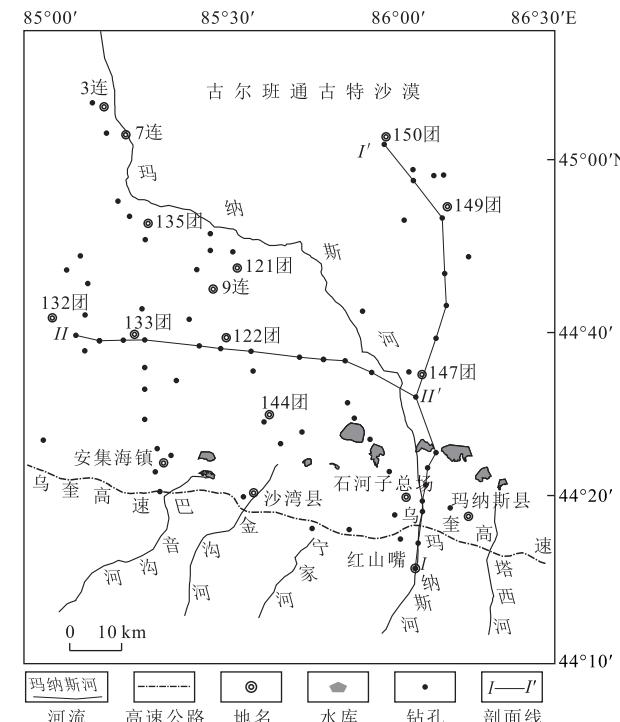


图 3 研究区地理位置

Fig.3 Geographical location of the study area

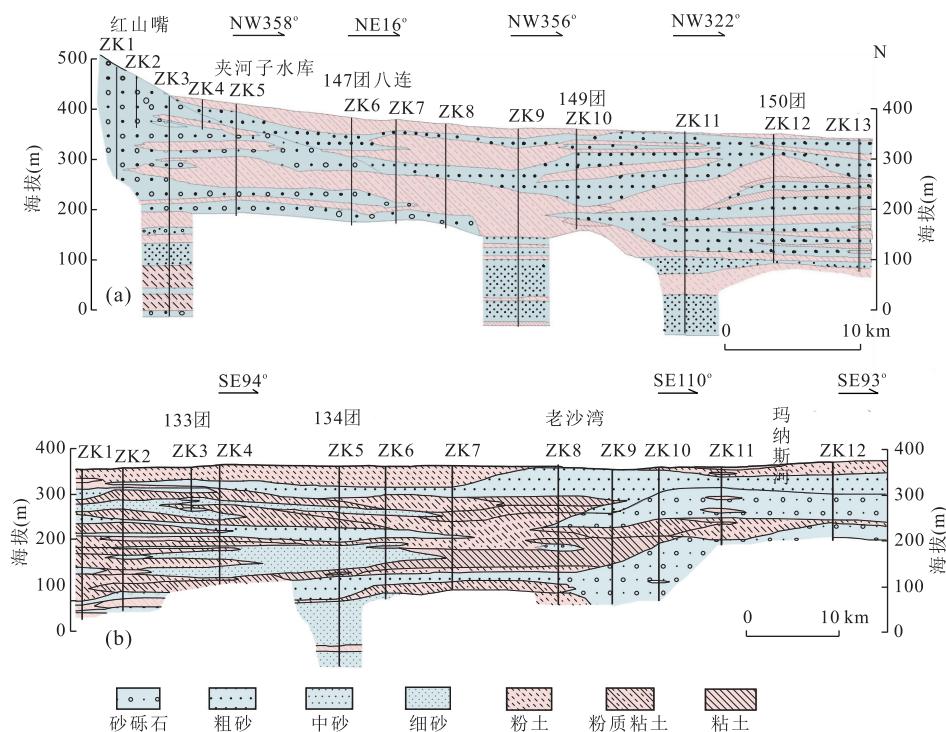


图 4 红山嘴—150 团(a)和玛纳斯河流域 132—147 团(b)剖面

Fig.4 Cross-section from regiment 150 in Hongshanzui (a), and regiment 132 to 147 in Manas River basin (b)
据赵宝峰(2010)修改

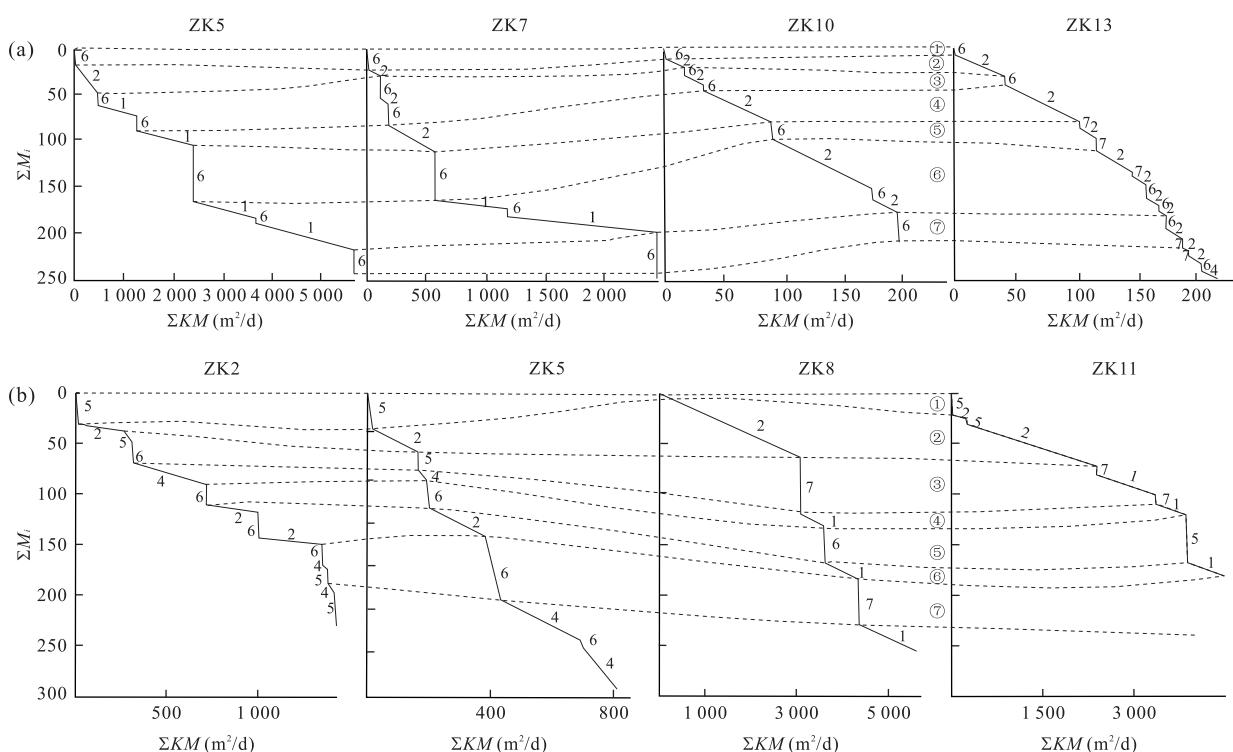


图 5 钻孔 $\sum_{i=0}^p K_i M_i$ 与 $\sum_{i=0}^p M_i$ 变化及分层概化

Fig.5 The relations between and and generalization of layers

a.红山嘴—150 团,b.132 团—147 团;1.砂砾石,2.粗砂,3.中砂,4.细砂,5.粉土,6.粉质粘土,7.粘土;①~⑦概化后分层

从山前到沙漠边缘变化非常显著,含水层结构分布从单一巨厚卵砾石层逐渐过渡到多层含水层(崔亚莉等,2003).含水层颗粒由粗变细,岩性由卵砾石、砂砾石逐渐过渡为细砂、粉细砂、粘性土;层次由少变多,单层厚度由厚变薄,潜水位埋深由深变浅,地下水流速由快变慢(赵宝峰,2010);中下游冲积区含水介质具有复杂的非均质性和各向异性,存在多层次不同规模的透镜体(图 4a).横向变化范围大小不一,多数显示局部特征,水文地质特征空间分布差异性很大(图 4b),缺乏稳定的区域性隔水层.

2.2.2 剖面岩性概化 绘制图 4a 和图 4b 两个剖面上所有钻孔 $\sum KM$ 随深度 $\sum_{i=0}^p M_i$ 变化关系图,分析剖面整体趋势,将变化趋势相同或者相近的视作一层.

以图 4a 为例,为节省篇幅,从图 4a 所示的剖面按距离提取 4 个钻孔(ZK5, ZK7, ZK10, ZK13)作为代表.绘制上述 4 个钻孔各自的 $\sum_{i=0}^p K_i M_i$ 随 $\sum_{i=0}^p M_i$ 变化关系(图 5a),根据每个钻孔累积导水系数曲线的斜率变化趋势概化分层.如钻孔 ZK5 第 1、2 层斜

率变化趋势差异显著,对应的岩性分别为较厚的粉质粘土层和粗砂层,即分别概化为第①、②层;第 3、4、5 层斜率变化趋势有明显差异,岩性分别为粉质粘土层、砂砾石层和粉质粘土层,由于砂砾石层很薄,而相邻的粉质粘土层较厚,则可将砂砾石层与相邻层合并概化,即概化为第③层,依次类似,将钻孔 ZK5 在 250 m 深度内概化为 7 层.同理概化钻孔 ZK7、ZK10、ZK13 等(图 5a 所示).

单一钻孔概化之后,从剖面整体分析钻孔 $\sum_{i=0}^p K_i M_i$ 随 $\sum_{i=0}^p M_i$ 变化趋势,将整体曲线斜率变化趋势相同或相近的岩层概化为同一层.同理可对图 4b 所示剖面按上述方法概化,概化过程如图 5b 所示.

2.2.3 结果分析 将图 4 所有的钻孔均按照图 5 所示的概化过程概化分层,概化结果还原到图 4 所示的剖面图上,得到分层结果如图 6 所示.

对比分析概化前后剖面结构变化,图 4 是原始地质剖面图,岩性错综复杂且不连续,很难定量刻画.通过累积导水系数法概化得到的图 6 剖面图,岩性分层与图 4 相比具有较好的空间连续性,概化前

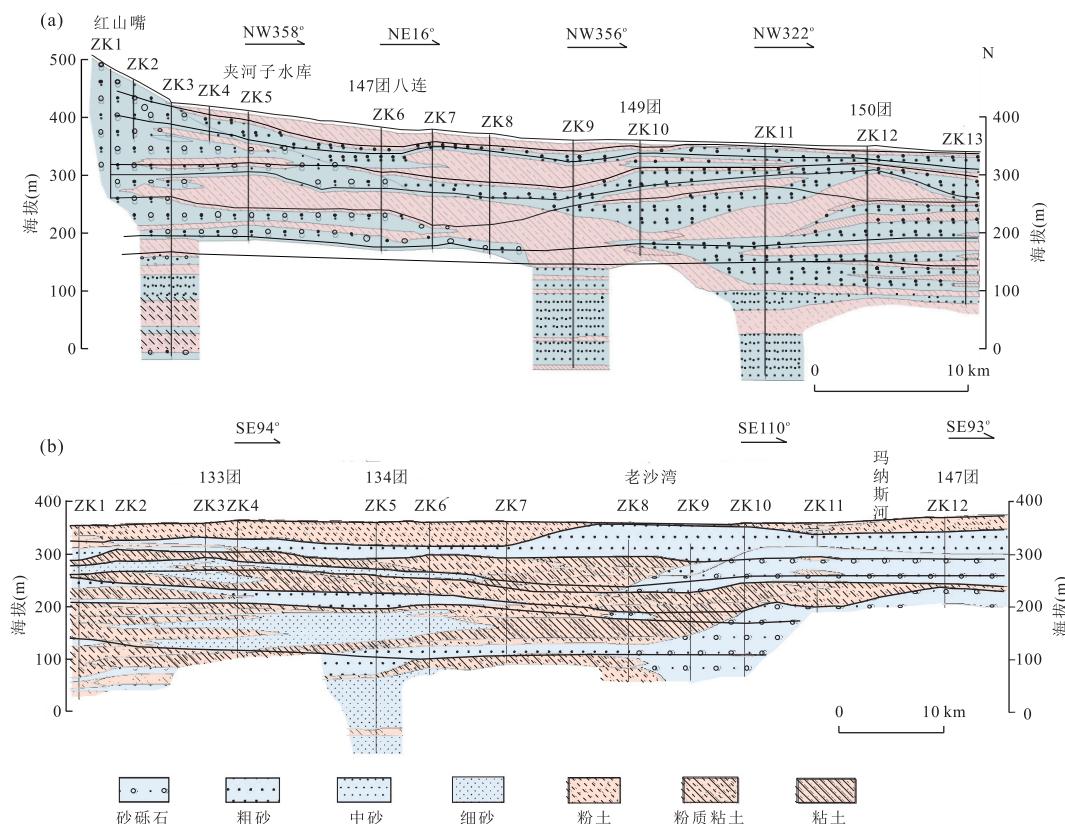


图 6 概化后的水文地质剖面

Fig.6 Hydrogeological cross section after generalization
a.红山嘴—150 团;b.132 团—147 团.实线表示概化后含水岩组分界线

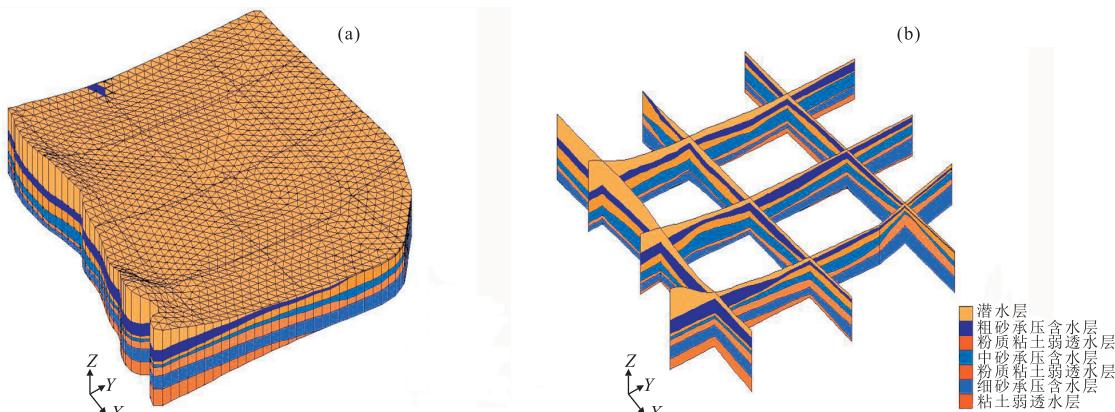


图 7 研究区三维含水层结构模型(a)和含水介质空间结构剖面(b)

Fig.7 Three-dimensional model of aquifer structures (a) and spatial structure profile of aquifers aquitards (b) in the study area

后含水介质的水力性质保持不变.原则 上概化后的含水层尽可能多地包含砂性土,弱透水层尽可能多地包含粘土或粉质粘土,使得概化后的水文地质结构具有较高合理性.

3 三维水文地质结构建模

三维地质建模在地质领域发挥着越来越重要的作用,对三维构造建模技术提出了更高的要求,使其能解决更加复杂的地质问题,能够更精细地刻画地质构造(王国灿等,2015;李兆亮等,2016).根据研究区钻孔分布,在研究区内尽可能多地绘制二维岩性结构剖面图,分析研究区内岩性分布.依据累积导水系数法对各剖面概化分层,获取每个剖面对应钻孔各层的高程和岩性等属性,借助 GMS 软件中的 TINS 构建三维含水层结构模型.具体步骤如下:(1)把概化好的各含水层顶底板高程散点数据按照坐标高程格式保存成文本文件;(2)模型边界采用导入在 MAPGIS 中处理好 shp 格式边界文件,然后描绘出模型区域边界;再对模型边界节点间的距离重新划分后生成 TINS,对模拟区进行网格剖分;(3)将整理好的各含水层高程散点数据通过 2DScatterPoint 模块导入 GMS 中,采用 Kriging 插值法进行插值计算,并将结果插值到相应的 TIN 上;(4)在 TIN 模块中选择 horizons→solids命令,生成各含水层实体结构模型,从而建立整个研究区的三维含水层结构模型(贾瑞亮等,2014).

该三维含水层结构模型通过打开和关闭相应地层,可展示研究区任意含水层剖面,以及分解和组合不同含水层组(图 7a).通过 GMS 中 Solid 模块下的 Create Cross Section 命令可以任意切割出模型的剖面

结构,使每个剖面都可以直观地显示出来(图 7b).

如 7b,通过对三维实体结构模型剖切,可以清晰展现模型内部含水介质结构分布细节,最大程度上提高含水系统分析的直观性和准确性,为分析研究各含水层系统,查明地下水空间分布规律及赋存环境等提供重要依据.

4 结论

本文提出的累积导水系数法以钻孔资料为主要源数据,依据累积导水系数值随地层深度的变化,概化分层岩性,结合水文地质剖面岩性沉积规律和剖面各钻孔累积导水系数曲线斜率随深度变化的整体特征,概化剖面含水介质结构.以玛纳斯河流域为例,应用该方法对实际岩性剖面概化分层,分层结果显示,该方法保持了概化前后含水介质的水力性质不变,概化分层后的含水层在空间上具有很好地连续性,为地下水数值模拟奠定了基础.与传统方法相比,该方法在概化复杂层状岩性的含水介质时,实现了含水岩组的半定量概化,减少了人为主观性.这种定量与经验的有机结合,提高了复杂含水岩组概化的合理性和可靠性,具有较高的仿真度.所用钻孔数据等资料均为野外实际资料,表明累积导水系数法具有很强的实用性和普适性.

应用概化后的各含水层高程数据,通过 GMS 建立三维水文地质结构模型,可以清晰看到研究区含水系统的空间展布情况及组合关系,并能够以不同的角度、任意位置的剖面展示含水层和弱透水层的空间结构,使人们能获得含水层具体且直观的概念,便于确定地下水数值模拟的参数分区和参数初值.

References

- Cai, S.Y., Yang, J.Z., Huang, S., et al., 2003. Study of Strata Permeability Classification and Optimum Partition Methods. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 20(6): 37—40 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H.H., 2014. Comprehensive Geophysical Methods Applied in Deep Geological Formations Coverage Area is Divided in (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y.L., Shao, J.L., Li, C.J., et al., 2003. Groundwater System Analysis and Modeling in Plain of Manas Valley. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 30(5): 18—22 (in Chinese with English abstract).
- Dogrul, E.C., Kadir, T.N., Brush, C.F., et al., 2016. Linking Groundwater Simulation and Reservoir System Analysis Models: The Case for California's Central Valley. *Environmental Modeling & Software*, 77: 168—182. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.12.006
- Filimonova, E. A., Baldenkov, M. G., 2015. A Combined-Water-System Approach for Tackling Water Scarcity: Application to the Permillovo Groundwater Basin, Russia. *Hydrogeology Journal*, 24(2): 489—502. doi: 10.1007/s10040-015-1325-3
- Ge, W.Y., Ye, N.J., Gong, J.S., et al., 2006. The Quaternary Aquifer Division and Character Analysis of Plain in Huaihe River Basin. *Resources Survey & Environment*, 27(4): 268—276 (in Chinese with English abstract).
- Hu, G. H., 1980. Discussion on the Water Bearing Stratum Unit—Discussion on the Division of Water Bearing Strata. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (6): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Jia, R. L., Zhou, J. L., Liu, Y. F., et al., 2014. Application of GMS Software in Establishing Three-Dimensional Model of Aquifer Structures. *Water Saving Irrigation*, (1): 57—59 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. L., Pan, M., Han, D. K., et al., 2016. Three-Dimensional Structural Modeling Technique. *Earth Science*, 41(12): 2136—2146 (in Chinese with English abstract).
- Liang, X., Zhang, R.Q., Niu, H., et al., 2012. Development of the Theory and Research Method of Groundwater Flow System. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 143—151 (in Chinese with English abstract).
- Raiber, M., Webb, J. A., Cendón, D. I., et al., 2015. Environmental Isotopes Meet 3D Geological Modeling: Conceptualising Recharge and Structurally-Controlled Aquifer Connectivity in the Basalt Plains of South-Western Victoria, Australia. *Journal of Hydrology*, 527: 262—280. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.053
- Tong, X.J., Chen, M. Y., Zhou, L., 2002. On AGO Effect of the Grey Model. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 22(11): 121—125 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Xu, Y. X., Chen, X. J., et al., 2015. Three-Dimensional Geological Mapping and Visualization of Complex Orogenic Belts. *Earth Science*, 40(3): 397—406 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Lu, C. Y., Qin, D. Y., et al., 2010. Advances in Method and Application of Groundwater Numerical Simulation. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G.X., Wang, G., Li, C.B., et al., 2006. The Numerical Simulation of Groundwater in the South of Qinwangchuan Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 42(6): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.C., Lu, L., 2011. Uncertainty Analysis for Groundwater Modeling. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 47(3): 227—234 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y.Q., Wu, J.C., 2010. Groundwater Dynamics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, H., Wang, Y. T., Lü, J. H., et al., 2000. Comprehensive Geological-Geophysical Interpretation of One Typical Section. *Earth Science*, 25(1): 88—92 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B. F., 2010. Research on Water Resources Characteristics and Its Rational Development Pattern for Arid Areas—A Case of Manas River Basin (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. W., 2009. Bore Information Management and the Method Improvement of Auto-Generating Histogram (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.J., 2016. Three Dimensional Modeling and Visualization of the Hydrogeological Structure in the Guanzhong Basin. Sciencepaper Online, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/2016/01/525/>, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Z.X., 1997. On the Accumulation Formation of the GM in Grey Prediction. *Journal of Xi'an Petroleum Institute*, 12(5): 52—54 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡树英,杨金忠,黄爽,等,2003.地层渗透性分区和分层方法初步研究.长江科学院院报, 20(6): 37—40.
- 陈浩辉,2014.综合物探方法在深覆盖区地质构造划分中的应用(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 崔亚莉,邵景力,李慈君,等,2003.玛纳斯河流域山前平原地下水系统分析及其模拟.水文地质工程地质, 30(5):

18—22.

葛伟亚,叶念军,龚建师,等,2006.淮河流域平原区第四系含水层划分及特征分析.资源调查与环境,27(4):268—276.

胡国华,1980.试论含水地层单位——关于含水岩组划分问题的讨论.水文地质工程地质,(6):1—5.

贾瑞亮,周金龙,刘延锋,等,2014.应用 GMS 软件构建三维含水层结构模型.节水灌溉,(1):57—59.

李兆亮,潘懋,韩大匡,等,2016.三维构造建模技术.地球科学,41(12):2136—2146.

梁杏,张人权,牛宏,等,2012.地下水水流系统理论与研究方法的发展.地质科技情报,31(5):143—151.

同小军,陈绵云,周龙,2002.关于灰色模型的累加生成效果.系统工程理论与实践,22(11):121—125.

王国灿,徐义贤,陈旭军,等,2015.基于地表地质调查剖面网络基础上的复杂造山带三维地质调查与建模方法.地球科学,40(3):397—406.

王浩,陆垂裕,秦大庸,等,2010.地下水数值计算与应用研究

进展综述.地学前缘,17(6):1—12.

魏国孝,王刚,李常斌,等,2006.秦王川盆地南部地下水水流场数值模拟.兰州大学学报(自然科学版),42(6):16—21.

吴吉春,陆乐,2011.地下水模拟不确定性分析.南京大学学报(自然科学版),47(3):227—234.

薛禹群,吴吉春,2010.地下水动力学.北京:地质出版社.

杨辉,王永涛,吕金海,等,2000.某典型剖面综合地质地球物理解释.地球科学,25(1):88—92.

赵宝峰,2010.干旱区水资源特征及其合理开发模式研究——以玛纳斯河流域为例(博士学位论文).西安:长安大学.

张生伟,2009.钻孔信息管理和柱状图成图方法的改进研究(硕士学位论文).北京:中国地质大学.

张渭军,2016.关中盆地水文地质结构三维建模与可视化.北京:中国科技论文在线.<http://www.paper.edu.cn/releasepaper/2016/01/525/>

张子旭,1997.灰色预测中 GM 模型的累加生成问题.西安石油学院学报(自然科学版),12(5):52—54.