

文章编号:2095-6134(2015)04-0506-06

# 基于 GMS 的多约束下三维地下水系统 可视化模型构建\*

刘丽花<sup>1,2</sup>, 张树清<sup>1†</sup>

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2 中国科学院大学, 北京 100049)  
(2014 年 9 月 4 日收稿; 2014 年 10 月 20 日收修改稿)

Liu L H, Zhang S Q. Construction of 3D visualization model of groundwater system under multiple constraints based on GMS[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(4): 506-511.

**摘 要** 近些年来, 由于地下水资源的过量开采, 已经引发地面沉降、植被退化、土壤盐渍化等一系列的生态环境问题. 三维地下水含水层模型能够直观展示含水层的空间分布, 可为进行水资源评价, 预测地下水的动态变化趋势, 合理开采利用地下水提供决策支持和技术支撑. 本文基于 GMS 软件, 以获取的钻孔数据为源数据, 构建苏锡常部分地区的三维地下水含水层模型. 通过对研究区进行分区, 针对每个分区地质单元的特点在钻孔稀疏地区和地层尖灭地区引入虚拟钻孔, 并利用地质剖面图对模型构建过程中的钻孔剖面进行约束的方式对模型进行修正和处理. 结果表明, 模型的精度有了显著提高, 所揭示的三维含水层模型与勘探资料基本相符. 该模型对指导地下水开发利用, 优化种植结构, 制定节水灌溉措施具有重要的现实意义.

**关键词** 地下水; 含水层; 三维模型; GMS 软件

中图分类号: P641      文献标志码: A      doi:10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2015. 04. 012

## Construction of 3D visualization model of groundwater system under multiple constraints based on GMS

LIU Lihua<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuqing<sup>1</sup>

(1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;  
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In recent years, the excessive exploitation of groundwater resources caused a series of ecological and environmental problems, such as land subsidence, vegetation degradation, and soil salinization. The 3D groundwater aquifer model can intuitively show the spatial distribution of aquifer and provide decision and technical supports to water resource evaluation, prediction, and reasonable exploitation. By using GMS software, a 3D model of groundwater aquifers in some areas of Suzhou-Wuxi-Changzhou region is constructed based on the borehole data. The model is modified by partitioning the study area and by introducing virtual borehole and geological cross-section in the

\* 国家自然科学基金(41271196)资助  
† 通信作者, E-mail: zhangshuqing@neigae. ac. cn

borehole sparse and stratigraphic pinch-out areas for enhancing the model precision. The results show that the accuracy has been significantly improved, and the 3D model revealed is basically consistent with the survey data. This model will be useful for guiding utilization of groundwater, optimization of planning structure, and development of water-saving irrigation measures.

**Key words** groundwater; aquifer; 3D model; GMS software

地下水是一种宝贵的自然资源,是影响环境质量的一个重要因素.近年来,伴随着地下水资源开发利用的规模越来越大,造成很多地区地下水资源的过度开采,地下水位持续下降,蓄水量逐渐减少,引起了诸如地面沉降、海水入侵、植被退化、水源供水不足、地下水漏斗等一系列的生态、环境、经济、生活问题,给人类的生产生活带来不同程度的危害.地下水位下降对农田灌溉也产生了重大影响,例如水井提水扬程加大,出水量减小,水井运行费用加大,像陕西泾惠渠灌区由于地下水超采严重,地下水埋深大幅下降,造成大量机井水泵吊空,井壁坍塌,甚至有的机井报废<sup>[1]</sup>;部分灌区由于地下水位下降,形成地下水漏斗,导致周围地下水向灌区补给,地表水及周围地下水带来的盐分聚集,在长期利用地下水灌溉,又缺乏排水措施的情况下,容易使土壤含盐量及矿化度增加,导致土壤盐渍化和农作物减产<sup>[2]</sup>.因此正确认识和表达区域地下水的分布和赋存状况是实现其合理开采利用的基本条件.以往,研究人员主要是依据钻孔数据人工绘制出地下水的剖面图或者立体剖面图,以期得到对地下水系统的直观反映,但大多是以二维形式输出,不能进行直观形象的展示.三维含水层模型可以综合利用地质勘探资料的分析结果构建含水层的水文地质信息,为直观认识地下水的赋存特征提供有效手段,也是进一步进行地下水数值模拟的基础.通过对模型的剖切,可以清晰地展现模型内部的细节,最大程度上提高地下水系统分析的直观性和准确性,为分析研究各含水层系统,查明地下水的空间分布规律及赋存环境,确定数值模拟参数分区及参数初值提供重要依据.所以利用先进的地下水模拟软件,建立区域水文地质体及其含水层系统三维空间分布模型,并对其进行水资源的评价,预测地下水未来的动态变化,是对地下水进行合理开采和管理的有效措施. GMS (groundwater modeling system) 在构建三维含水层的可视化方面简单方便,不仅能够对构建的三维可视化模型在任意层位、任意位置

以任意角度进行剖分,还能够从不同角度对模型进行展示,目前已经成为国际上广泛应用的地下水模拟软件之一<sup>[3]</sup>.

本文基于 GMS 软件系统,以苏锡常地区为例,综合现有的地质调查资料,利用概念模型法建立研究区含水层的空间分布模型,利用所获得的剖面图以及地质图对研究区进行分区,通过在每个分区的钻孔稀疏及含有地层尖灭处构建虚拟钻孔,利用地质剖面数据等地质调查资料对模型进行修正和处理,试图找到提高建模精度的方法来查明地下水的空间分布规律,为合理开采利用地下水提供决策支持和技术支撑.

## 1 研究区概况及 GMS 软件介绍

### 1.1 研究区概况

苏锡常地区位于江苏省南部,行政区划上分别隶属于苏州、无锡、常州 3 市,总面积约 13 180 km<sup>2</sup>,是中国经济较发达地区,但是由于过量开采地下水,出现了严重的区域性地面沉降和地裂缝等地质灾害,成为本地区经济社会发展的重要制约因素.区内地势平坦,地貌比较单一,第四纪沉积物类型多,厚度变化大,最大厚度为 220.8 m,基底为白垩纪以前的基岩.第四系发育有下更新统粘土、砂;中更新统(Q<sub>2</sub>)粘土、砂、砂砾石;上更新统(Q<sub>3</sub>)粘土中粗砂、砂砾石;全新统(Q<sub>4</sub>)含植物碎屑的淤泥质亚粘土、粘土、含砾中粗砂等.该地区区内第四系松散岩类孔隙含水层分布广,发育有多个含水层组,自上而下有潜水含水层,第 I、II、III 承压含水层等<sup>[4-7]</sup>.其中第 II 承压含水层组分布范围最广,是区内主要的开采层位.该层水质优良,富水性好,尤其是在沿江带含水层厚度大,各层之间的水力联系较密切,局部地段相互连通,可以激化长江水的侧向补给.

根据已掌握的钻孔资料的分布情况及相关地质图、剖面图等资料,主要来源于地球系统科学数据共享平台<sup>[8]</sup>.本文选取的研究区位于苏锡常地区北部,包括武进市、常州市市辖区、江阴市、张家

港市、常熟市等区域,研究区位置如图 1 所示.

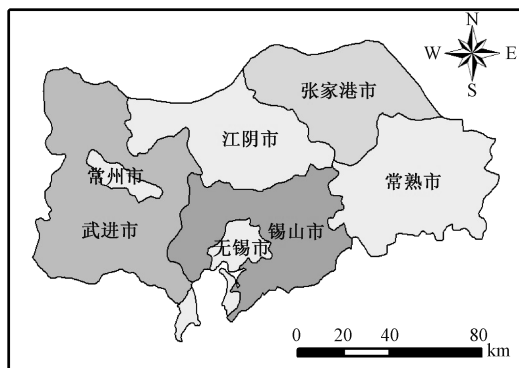


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

## 1.2 GMS 软件介绍

地下水模拟系统是由美国 Brigham Young University 的环境模型研究实验室和美国军队排水工程实验工作站开发的系统软件,简称 GMS. 软件是在综合 MODFLOW、FEMWATER、MT3DMS、RT3D、SEAM3D、MODPATH、SEEP2D、NUFT、UTCHEMD 等已有地下水模型基础上开发的一个综合性的、用于地下水模拟的图形界面软件. 除以上计算模块外,还包含 PEST、UCODE、MAP、Borehole Data、TINs、Solid 等辅助模块. GMS 是唯一支持 TINS(triangulated irregular networks)、Solids、钻孔数据、2D 与 3D 地质统计学的地下水模拟软件. 由于 GMS 软件具有良好的使用界面,强大的前处理、后处理功能及优良的三维可视化效果,目前已成为国际上最受欢迎的地下水模拟软件之一. 与其他地下水数值模拟软件相比, GMS 是能够从钻孔到地层结构、从平面到空间、从单元到系统的综合性、系统性、全面性的软件,其最大的优势在于以概念化方式建立水文地质概念模型,不仅具有地下水模拟、地下水溶质运移模拟的功能,其在实现地质结构可视化方面功能亦同样突出<sup>[9-12]</sup>.

利用 GMS 软件构建地下水含水层模型主要有 2 种方法:一种是利用 TINS 模块构建,这种方法主要利用地层的分布资料及钻孔数据提取出各含水层顶、底部的高程离散点数据,结合地理底图描绘出的模型边界上的节点数据生成 TINS,继而在相邻 TINS 之间形成含水层结构体(Solid),将多个含水层组合,建立含水层结构模型;另一种是利用 Borehole 模块构建,主要是利用获取的钻孔

数据,按照一定的标准整理成文本文档,在 GMS 中生成钻孔柱状图,利用经过插值处理后的模型区域边界进行三角剖分生成概念模型,最后选取合适的插值方法生成含水层的结构体,建立三维含水层的结构模型<sup>[4]</sup>. 前者是最简单、最基本的建模方法,适用于水文条件比较简单,研究区面积较小的模型,有时候参数分区的赋值、边界条件的指定和调参也比较繁琐,一般结合在其他建模方法中使用. 因此,本文根据获取的钻孔资料,结合地质图及剖面图资料构建虚拟钻孔,选择 Borehole 模块来构建研究区三维地下水含水层模型.

## 2 三维含水层模型建模流程及含水层结构可视化的实现

### 2.1 三维含水层可视化模型构建步骤

在利用 GMS 软件进行三维地下水含水层的建模之前,要对已经收集到的长江三角洲地区的水文地质资料进行预处理. 地下水含水层三维模型的构建在很大程度上是依赖于原始的输入数据,其中钻孔数据作为地质资料的第一手资料,具有直观、准确、详细的特征,能够记录大量地下实体单元的原始信息,其研究在三维建模中发挥了不可替代的作用. 以下是本文建立含水层三维可视化模型的主要步骤.

1) 建立钻孔数据集:根据所有收集到资料,针对钻孔岩性数据依据保留主要岩性,将复杂岩性简单化,在尽可能揭示岩性变化特征和地层厚度的原则下,进行合理概化. 按照统一的原则对钻孔进行标准化处理,建立钻孔数据集,主要包括钻孔编号、地理坐标、地面标高、水位标高、含水层岩性编码、含水层编码等数据,实现钻孔数据的三维可视化.

2) 导入钻孔数据集:在 GMS 软件中 Boreholes 模块下,导入已经处理好的钻孔数据集.

3) 根据岩层标识形成岩层分界面:分界面标示钻孔的岩层分界,将各钻孔属于同一层的岩层标示出来,运用 Create Cross Section 工具对同一层分界面点进行连接,形成分界面,来模拟地层面.

4) 导入工作底图:将在 ArcGIS 中作好的 shp 格式的研究区底图导入 GMS 中,根据研究区底图绘制模型区域边界,并对边界进行离散化,由这些离散点生成不规则三角网进行网格剖分,生成概



念模型。

5) 将概念模型转化成可视化数值模型: 利用 GMS 软件中 Boreholes 模块下的 Horizons- > Solids 命令, 自动生成结构实体, 从而建立三维地下水含水层的可视化模型。

## 2.2 建模过程中的处理及修正

稀疏的钻孔数据在表达真实的地下空间实体方面具有不确定性和局限性。首先, 钻孔数据获取的成本较高, 钻孔之间的不连续性导致各地层参数仅在钻孔的范围内有效, 钻孔相互之间关联性较差<sup>[13]</sup>; 其次, 钻孔数据分布的不均匀性导致一些区域密集, 而偏远地区相对稀疏甚至缺乏钻孔数据。因此要综合利用已经掌握的地质资料, 在建模过程中对模型进行处理, 在多约束条件下构建更加精细和实用的模型。

首先进行区域地质单元的划分: 以剖面线作为区域单元划分的优势在于能够对每个分区都起到边界约束的作用, 充分发挥剖面图的作用。由于断层两侧岩层之间不连续, 将其作为一个整体处理会降低模型的精度, 而断层一侧岩层是连续的, 因此将断层也作为分区的考虑因素。根据研究区的地质略图中断层的分布、剖面线的位置以及钻孔的疏密情况对研究区进行分区划分, 全区共划分成 6 个区域, 如图 2 所示。针对每个区域地质单元的复杂性、地质数据的丰富程度及钻孔分布的不均匀性等的不同, 在建模过程中针对每个区域单元采取的处理修正的程度不同, 本文采用的处理修正方法如下:

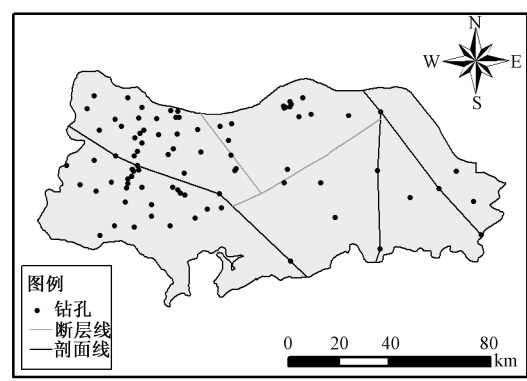


图2 研究区的分区

Fig. 2 Subareas of the study area

1) 利用虚拟钻孔修正模型

“虚拟钻孔”是指在地质建模过程中, 根据建模需要在特定位置添加的假想的控制性的钻孔,

这些钻孔不是由实际钻探工作获取的, 而是基于已有的地质剖面及地图资料, 在遵循地质规律的基础上, 由工程人员根据经验和其他勘查手段获取的成果来推断的<sup>[14]</sup>。虚拟钻孔的引入使得三维含水层模型更加符合工程的需要, 具有较强的直观性和可操作性, 为实际工程操作人员提供了可行的模型精度检测手段和误差修正机制。本文通过构建虚拟钻孔对出现的以下 2 种情况进行处理。

①对钻孔加密处理: 结合钻孔分布疏密情况、地质剖面、横断面等已有的水文地质资料对研究区进行分析, 根据原始钻孔的空间分布特点, 确定插值点的间距, 自适应地添加虚拟钻孔, 也即在钻孔分布相对集中的地区不添加虚拟钻孔, 而在钻孔相对稀疏的地方构建虚拟钻孔, 并利用不同的插值算法对虚拟钻孔的地层信息进行拟合。根据本研究区中钻孔分布的特点可将其分为 3 种情况: 均匀分布, 在整个建模区域离散点分布较密也比较均匀; 簇状分布, 数据在区域内分布不均, 有的地方比较密, 而在另外一些地方比较稀疏; 稀疏分布, 整个区域内离散点数量少, 密度低。针对数据插值方法自身的特点和适应性, 选取适合每个分区的最优插值算法, 针对平均分布的地区选取离散光滑插值方法, 簇状分布的区域选择距离反比插值方法, 稀疏分布区域选取克里金插值算法。为了保证分区插值算法中相邻区块间地层能够平滑、连续地拼接, 每个分区之间有一定区域的重叠。为了避免更多人为因素误差的加入, 在构建虚拟钻孔时还需要结合地质图件进行分析, 以此来提高虚拟钻孔的可靠性。

②对地层的尖灭处理: 地层尖灭指岩层的厚度在沉积盆地边缘变薄以至消失的现象<sup>[15]</sup>。当地层缺失出现在相邻钻孔之间时就会出现地层的尖灭。本文进行地层尖灭处理原则是: 地层的分布具有较强的年代顺序规律, 在进行地层尖灭处理时, 根据新地层向上尖灭, 老地层向下尖灭原则来判断地层尖灭的走向, 并按照地层新老年代的排列顺序进行连接。在构建地层尖灭虚拟钻孔时, 对于 2 个实际钻孔之间不同厚度的地层夹层进行不同的处理: 当地层夹层  $< 3\text{ m}$  时, 本地层可以忽略;  $3\text{ m} < \text{地层夹层} < 5\text{ m}$  时, 地层尖灭点位于 2 钻孔之间  $1/3$  处;  $5\text{ m} < \text{地层夹层} < 8\text{ m}$  时, 地层尖灭点位于 2 钻孔之间  $1/2$  处;  $8\text{ m} < \text{地层夹层}$  时, 地层尖灭

点位于 2 钻孔之间 2/3 处. 在地层尖灭点处构建虚拟钻孔, 根据地层尖灭处理原则计算虚拟钻孔的地层信息.

2) 利用地质剖面修正模型

地质剖面图是反映地层结构、岩层信息的重要参考图件. 其绘制过程是在地表上绘制一条剖面线, 利用其上面分布的钻孔信息绘制出分层线, 并利用不同的颜色或图形进行填充, 构造该剖面地质的二维图. 目前, 由于三维数据较难获取, 三维模型大多采用低维的数据生成, 而剖面数据是地质学领域最常用的表达较大范围内地质信息的重要数据资料, 不仅包含真实已知的地质信息而且还加入了地质专家的经验, 具有重要的参考依据, 因此剖面图在三维建模中最早也被最广泛地采用<sup>[16-19]</sup>. 根据获得的二维图纸上已经画好的地质剖面进行数字化, 将其转入到计算机环境当中, 根据剖面上实际的钻孔地层数据, 计算得到剖面图上地层的位置信息. 针对剖面中出现的地层尖灭、缺失等地质现象, 构建边界虚拟钻孔加以控制<sup>[20]</sup>. 同时在 GMS 软件中 Create Cross Section 模块下, 根据钻孔数据得到新的矢量化剖面数据, 可以利用原始剖面图数据对新产生的剖面进行对比修正, 以此提高建模的精度和准确性. 除此之外, 由于在钻孔稀疏的区域无法选取实际钻孔对插值算法进行精度验证, 剖面图体现的地层数据也可以对插值算法的选取起到一定程度的精度验证作用. 同时, 地质剖面在钻孔比较稀疏的地质分区所起的边界约束作用, 也能为建模过程中仅依靠原有稀疏的钻孔数据插值拟合地层数据减少大量误差.

2.3 含水层结构可视化的实现

根据已建立的研究区的三维地下水可视化模型(图 3), 可通过 Create Cross Section 模块对模型在任意位置、任意方向进行切割, 使每个剖面都可以直观显示出来, 而且可以展示多个角度多个剖面的组合显示(图 4). 三维地下水可视化模型不仅可以展示各含水层组合图(图 5), 也可直接显示单个含水层的空间分布情况(图 6).

通过三维地下水可视化模型可以清晰地看到研究区地下水系统的空间展布状况及其组合关系, 全区含水层组主要有潜水含水层(phreatic water aquifer)、第 I、II、III 承压含水层(confined water aquifer). 潜水含水层埋藏深度较浅, 广布全区, 仅武进区主要在 10~15 m 之间, 厚度不大, 岩

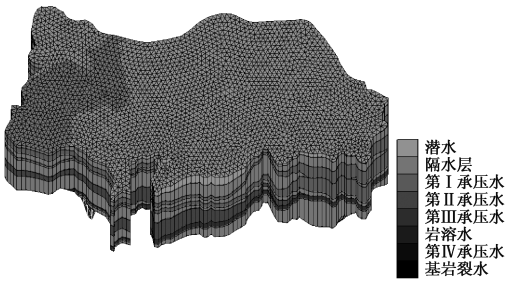


图 3 地下水系统空间结构可视化模型图

Fig. 3 Visual model graph of spatial structure of groundwater system

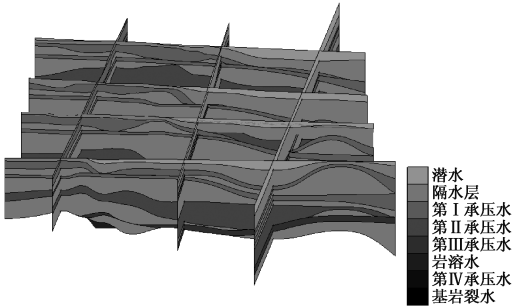


图 4 含水层空间结构剖面图

Fig. 4 Vertical profiles graph of spatial structure of aquifer

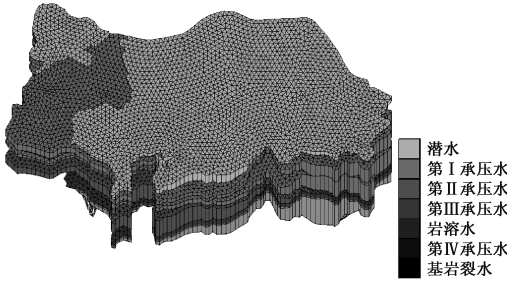


图 5 含水层空间结构可视化模型图

Fig. 5 Visual model graph of spatial structure of aquifer

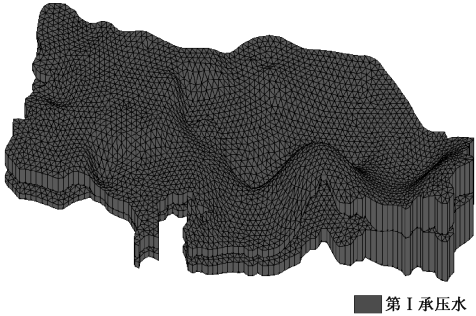


图 6 第 I 承压水含水层空间结构图

Fig. 6 Special structure of the first confined aquifer

性主要以亚粘土、亚砂土、粉砂为主. 第 I 承压水在全区呈透镜体状多层分布, 主要分为上下 2 层,

上层呈不连续分布,含水层岩性主要以粉砂层、亚砂土为主,含水层厚度大约在 5~10 m 范围内,局部地区大于 10 m,起伏变化较小;下层广布全区,岩性主要以砂为主,含水层起伏变化较大。第Ⅱ承压水含水层,广布全区,仅部分地区缺失,厚度较厚,第Ⅱ承压水含水层主要分布在 50~160 m 的区间范围内,该含水层是苏锡常地区的主要开采层,岩性主要以砂、砂砾石为主。第Ⅲ承压含水层在全区不连续分布,在常州地区有部分缺失,顶板埋深大约在 120~180 m 之间,岩性主要为砂、泥砾等。在各个含水层之间有厚度比较稳定的隔水层,岩性大都以亚粘土、亚砂土为主,部分夹有细砂、粉细砂,为弱透水层。

与前任对本研究区地下水的调查资料与模型分析结果进行对比验证,模型模拟的结果与资料中通过地质勘查得出的结果基本吻合,具有较高的模拟精度,说明基于 GMS 软件构建三维地下水可视化模型切实可行,并且虚拟钻孔与地质剖面图资料对于模型的处理与修正对模型精度的提高起到至关重要的作用,模型可以较好地揭示含水层的空间分布情况,对于合理开采地下水资源具有重要意义。

### 3 结语

本文利用钻孔数据为主要源数据,结合获取的地质勘探信息、水文地质信息、工程地质信息以及剖面图,构建了苏锡常部分地区的三维地下水含水层结构模型。在建模过程中,通过对研究区进行分区,针对地质单元分区的特点,引入钻孔以外的其他信息对模型进行修正和处理,显著提高了模型的精度。基于 GMS 构建的三维地下水含水层模型,能够以不同的角度、任意位置的剖分展示含水层的空间结构,使人们获得含水层具体而直观的概念,能够根据地下水的实际情况,调整和优化种植结构,合理制定节水灌溉措施,对于农田整体水分的提高具有明显的优势。同时水资源开发利用工作者可以根据地下水的含水层分布情况为开采区合理布井,以合理利用地下水资源,节省人力、物力、财力,对含水层系空间结构的研究具有重要的现实意义。但是当研究区范围较大时,海量数据的整理、钻孔的纵向尺度与区域的横向尺度关系、插值方法的适用性等都为 GMS 的大尺度建模提出了新的挑战。

### 参考文献

- [1] 周万亩,齐全,徐敏,等. 地下水超采对农业灌溉的影响及对策研究[J]. 地下水, 2007, 29(4):17-19,29.
- [2] 张玉春. 地下水超采对农业灌溉环境影响及策略[J]. 农业科技与装备, 2014(3):49-50,53.
- [3] 王丽霞,刘芳,唐泽军. 基于 GMS 的石羊河流域含水层空间结构变化的可视化研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1):62-69.
- [4] 贾瑞亮,周金龙,刘延峰,等. 应用 GMS 软件构建三维含水层结构模型[J]. 节水灌溉, 2014(1):57-59,64.
- [5] 祝晓彬,吴吉春,叶淑君,等. GMS 在长江三角洲(长江以南)深层地下水资源评价中的应用[J]. 工程勘察, 2005(1):26-29,33.
- [6] 蒋咏,杨桂莲,常本春,等. 苏锡常地区地下水禁采效应分析与保护策略探讨[J]. 水文, 2013, 33(1):58-62.
- [7] 祝晓彬,吴吉春,叶淑君,等. 长江三角洲(长江以南)地区深层地下水三维数值模拟[J]. 地理科学, 2005, 25(1):68-73.
- [8] 国家基础条件平台:地球系统科学共享平台[EB/OL]. [2014-09-01]. <http://nnu.geodata.cn>.
- [9] Environmental Modeling Research Laboratory, Brigham Young University. Groundwater Modeling System (GMS), GMS 3.1 Tutorials[G]. 2000.
- [10] 纪媛媛,周金龙,杨广焱. GMS 在我国地下水资源评价与管理中的应用[J]. 地下水, 2013, 35(2):76-79.
- [11] 贺国平,张彤,赵月芬,等. GMS 数值建模方法研究综述[J]. 地下水, 2007, 29(3):33-35,38.
- [12] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质, 2003(5):53-55.
- [13] 贺怀建,白世伟,赵新华,等. 三维地层模型中层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5):637-639.
- [14] 朱良峰,吴信才,刘修国,等. 城市三维地层建模中虚拟孔的引入与实现[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6):26-30,43.
- [15] 林冰仙,周良辰,吕国年. 虚拟钻孔控制的三维地质体模型构建方法[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5):672-679.
- [16] Tipper J C. The study of geological objects in three dimensions by the computerized reconstruction of serial sections[J]. The Journal of Geology, 1976, 84(4):476-484.
- [17] Sirakow N M, Granado I, Muge F H. A system for reconstructing and visualising three-dimensional objects[J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(1):59-69.
- [18] Sirakov N M, Muge F H. Interpolation approach for 3D smooth reconstruction of subsurface objects[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8):877-885.
- [19] Xu C, Dowd P A. Optimal construction and visualization of geological structures[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(6):761-773.
- [20] 王润怀,李永树. 边界虚拟钻孔在复杂地质体 3 维建模中的引入与确定[J]. 测绘学报, 2007, 36(4):468-475.