

# 水利水电工程多源地质数据集成处理与分析

王刚<sup>1</sup>,李明超<sup>2</sup>,周四宝<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610072;

2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

**摘要:**针对水利水电工程地质特点,基于多种地质勘察手段(地质测绘、遥感、地质勘探、试验等)得到的遥感图像、地形等高线、钻孔平硐数据、地质描述、空间位置数据、物探测试数据、试验数据等各种地质数据,提出了耦合多源数据的地质信息空间集成方法。通过对地形、地层和地质构造等地质结构的空解,采用耦合多源数据的剖面生成方法获得保持所有数据一致的二维CAD剖面图(横纵剖面、轴切剖面和平切面等),实现综合数据的自动分层和集成分析。工程实例应用表明,对工程坝区不同来源、精度、分辨率的地质数据进行耦合分析和自动集成,保证了所有有效数据成为地质分析可利用的、可靠的信息。

**关键词:**多源地质数据;地质剖面;地质分类;数据集成;水利水电工程

中图分类号:P642

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)02-0073-04

**Multi-source geologic data integration and analysis of hydraulic and hydropower engineering//WANG Gang<sup>1</sup>, LI Mingchao<sup>2</sup>, ZHOU Sibao<sup>2</sup>(1. Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)**

**Abstract:** According to the geological characteristics of hydraulic and hydropower engineering, and based on the geologic datasets such as satellite images, topographic contour maps, drilling and adit data, geological description, georeferenced data, geophysical test data, test data among others, a spatial integrated approach of geological information combining multi-source data is proposed. Through the space interpretation and analysis of geological structures including terrain, rock formations and geotectonic bodies, a series of two-dimensional geologic sections, consistent with all data, were obtained by using a semi-automatic plotting method. Then, all these data were automatically layered and integrated analyzed. A practical example showed that coupling analysis and automatic integration of geological data with multiple sources, different accuracy and resolution ensure that all valid data become available and reliable information.

**Key words:** multi-source geologic data; geologic section; geological classification; data integration; hydraulic and hydropower engineering

在水利水电工程地质勘察勘探中获得的各种地质信息如地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水位、风化层分布以及各种物探化探资料等<sup>[1]</sup>都是离散数据,很难直接分析其在地质体中的分布规律<sup>[2]</sup>,即使能够预测各种信息在区域中的分布,大量的数据还是很难处理与表达。这些来源不同的数据在精度、分辨率、数量、质量等方面存在较大差异,为了使所有有效数据一起成为建模系统可利用的、可靠的、一致的信息,必须解决多源地质数据的耦合技术问题<sup>[3-4]</sup>。因此,利用计算机技术进行工程地质数据解译分析是工程地质信息分析的一个必然趋势<sup>[5]</sup>。

国内外学者结合不同工程领域的地质分析目

的,对复杂地质数据的处理与分析开展了大量研究。Wu等<sup>[3]</sup>提出了逐步细化方法来处理稀疏、采样不足的多种来源地质数据耦合问题;钟登华等<sup>[6]</sup>从点、面、体3个层次来表达地质空间图形及其相关信息,并建立了综合地质信息数据库;Zhang等<sup>[7]</sup>提出了结点-层数据模型来管理组织不同实体类型的复杂地质数据;刘军旗等<sup>[8]</sup>提出了以水利水电工程地质勘察数据管理为中心的三维地质信息系统;崔莹<sup>[9]</sup>针对区域矿产资源潜力预测问题,考虑地质空间数据的不确定性,采用数据挖掘方法对多源地质空间信息进行了分析,并开发了相应的原型系统;Ballagh等<sup>[10]</sup>综合分析了采用虚拟地球如Google

Earth 来查看、查询和下载地质信息的方法和存在的问题;刘尚蔚等<sup>[11]</sup>基于不同采集方法获得的多源地质数据建立了统一的耦合数据库;张鸣之等<sup>[12]</sup>采用网络技术设计实现了地质环境数据集成服务系统;Zhu 等<sup>[13]</sup>也应用 Google Earth 开发了相应的程序直接可视化管理大量的钻孔数据。这些研究在不同程度促进了计算机技术和信息技术在地质数据分析领域的发展。

本文以水利水电工程地质数据为对象,在采集分析多种地质勘测方式(如地质测绘、遥感、地质勘探等)得到的各种地质数据的基础上,针对多源无序数据难以直接耦合的问题,采用多源数据生成地质剖面,进而在三维环境中集成,并结合实际工程开展相应的应用分析。

## 1 水利水电工程地质勘测数据分析

水利水电工程地质勘探的任务与要求主要是调查地层岩性、地质构造、物理地质、水文地质等对工程有重要意义的地质现象和地质问题,以及这些现象和问题对水工建筑物的影响<sup>[1]</sup>,主要从地表测绘和地下勘探两个方面开展工作获取所需的地质信息,解译分析各种地质结构的原始信息,为工程选址、设计和施工提供可靠的地质资料。

地表空间数据主要通过工程地质测绘工作获得,包括地形等高线、地质点数据和遥感信息数据等,这些数据反映了区域地形地貌、地层、岩性、地质构造、水文地质条件、物理地质现象等。这些数据需要填绘在适当比例尺地形图上加以综合反映。地下空间数据主要来源于工程地质勘探和工程物探,是在工程地质测绘的基础上,通过勘探查明地表以下的工程地质问题而取得的深部地质资料数据。这两类数据的具体描述见表 1。

表 1 水利水电工程地质勘探主要数据分类

大类	小类	获取手段	数据描述
地表数据	地形高程	经纬仪或 GPS 测量	等高线、集水线和地面特殊点(最高最低点、鞍部点等)的高程数据
	地质点	露头测绘	地质点位置、岩层产状要素、地质现象素描与照片、岩石标本等
	遥感信息	遥感技术 航拍	地质边界、岩层产状、构造线方位、岩体的出露面积、地质体空间分布关系等
地下数据	钻孔	垂直钻探	钻孔坐标与深度、所揭露的地质属性、取样分析试验数据、钻孔柱状图等
	平硐	水平坑探	平硐位置、所揭露的地质属性、取样分析试验数据、平硐展视图等
	物探数据	地球物理 勘探	地层岩性分层及其厚度、不良地质体、覆盖层、风化卸荷带分布形态等

这些通过各种勘测手段获得的地表、地下空间数据共同构成了反映工程区地质情况的原始数据。

从计算机表达形式上看,地质数据实际上是表示地质信息的数、字母和符号的集合,可分为 3 类:①字符型数据,如地层名称及代号、断层名称及编号、断层规模和级别等,此类数据量较大;②数值型数据,如地层产状、钻孔坐标和高程、地层厚度等;③图形数据,如航拍图、素描图等。

由于地质条件和地质作用的复杂多变,以及各种技术勘测手段之间的较大差异,造成地质原始数据数量巨大、种类繁多且结构复杂,其多源性、离散性和定性特征给工程地质分析带来很大的困难,因此需要耦合多种类型的地质数据对地质结构进行解译分析,将离散不确定的数据通过各种手段转化为连续确定的数据,将定性数据描述定量化,尽量以数值型数据和图形数据来表达,为工程地质问题分析提供高质量的数据。

## 2 耦合多源数据的水利水电工程地质剖面生成方法

各类地质数据解译分析的目的是为了弄清工程区复杂的地质结构几何形态和空间分布关系,水利水电工程地质研究的主要对象为地形地貌、地层岩性和地质构造三类地质要素。因此,耦合多源地质数据的解译分析结果,对各类地质要素进行综合分析,获得能客观反映其空间构造的剖面数据,将为三维地质数据的集成提供数据源。

根据地质结构分析可知,反映工程地质条件的数据多种多样,如地形等高线、钻孔、平硐、实测剖面、遥感解译图、地层柱状图、区域地质图、构造地质图等,由于数据来源、勘测手段、数据精度等方面的不一致,使得这些地质数据不能完全统一地反映实际地质条件,需要进行耦合处理分析,形成一致的解释结果。

根据数据的类型和使用方式,可将其分为两大类:①直接可用数据。包括钻孔、平硐及其相关属性数据,这些通过地质勘探得到的原始采样数据,精度很高,利用数据库进行存储管理后,可直接用于剖面解译和集成系统中。②间接图形数据。由不同分辨率不同精度的图形组成,既包含分析处理过的原始信息,如三维地形、剖面数据等,也包括分析得到的数据,如通过地质点、遥感图像解译获得的地层界线、断层、褶皱等构造迹线,以及地层柱状图、构造地质图等,这类数据一般利用 AutoCAD 平台进行二维存储,需要进行耦合统一分析。

在传统剖面形成的基础上,提出改进的耦合多源地质数据的地质剖面生成方法如下:

a. 将综合反映工程区域地质测绘、勘探和分析成果的工程地质平面图数字化处理,主要包含地形

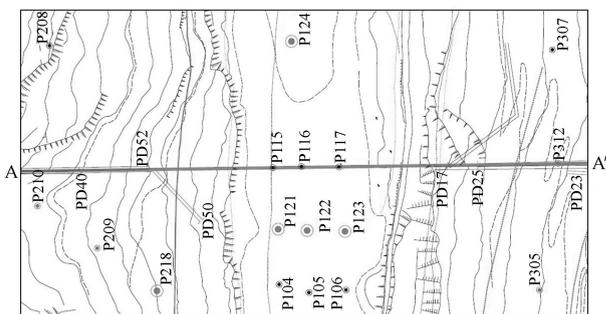
等高线、地表出露的岩层界线和构造轮廓线(断层、褶皱等),以及勘探数据分布,如图1(a)所示。

b. 结合工程需要在平面图上交互动义剖面位置,如图1(a)中的A—A'剖面线。

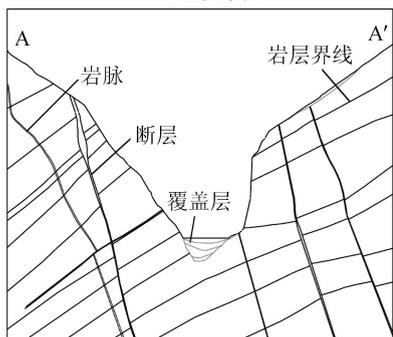
c. 确定剖面位置后,考虑一定的距离  $s(0 \leq s \leq r, r$  定义为研究区域内剖面的缓冲半径)和权重  $w$  选择该位置附近的钻孔和平硐,  $s$  越小,  $w$  越大。

d. 在平面图的基础上,结合岩层剖面分析图和构造地质图,分别计算剖切面与地形面、岩层界面及断层迹线之间的交点,得到点集  $P_s$  和  $P_f$ , 连接各点集中的点即可形成相应的地形线、岩层界线和断层线。

e. 自动导入钻孔、平硐数据并分析各地质结构产状,对上一步得到的结果进行调整修改,使其与实际数据完全吻合;并采用样条曲线技术对每条界线进行平滑处理,获得如图1(b)所示的剖面。



(a)地质平面



(b) A—A'剖面

图1 耦合多源数据的工程地质分析

该方法基于表格数据、图形数据和相关的地质信息,能够半自动化地完成剖面定义和绘制,依此可形成一系列工程所需要的地质横纵剖面图和轴线剖面图,并可在确定的高程下对这些剖面图进行平切,可获得不同高程下向深部推断分析的地质平切图。

### 3 水利水电工程地质综合数据集成

通过对各种原始勘探资料的整理分析和耦合,获得了一系列与工程相关的、含有地质专家经验知识的二维横纵剖面图和平切图,钻孔、平硐数据可通过数据库直接读入,还需要将所有剖面中的各类岩层界线、构造界线等按照统一的“层(layer)”进行分

层归类,其自动分层和集成处理的主要步骤如下:

a. 定位二维剖面图。收集所有剖面,分别对横纵剖面和平切面进行定位,其中横纵剖面的定位数据包括剖面名称、段数、起始坐标  $(x_1, y_1, z)$  和终点坐标  $(x_2, y_2, z)$ ,当剖面段数大于1时还有一系列分段坐标;平切面的定位数据为平切面名称和高程。这些定位数据存储于数据库中。

b. 提取二维剖面线数据并作三维转换。在AutoCAD中自动提取相关的横纵剖面和平切图等二维图形中的地质线条上的点坐标,并依次分类全部存储在数据库中,主要包括地层类、断层类和界限类(主要是划分的风化、卸荷上下限)等。

c. 剖面线自动分层。必须有一个较完整的细分图层的剖面,才能对所有剖面线进行自动求交判断。两条不同剖面线之间存在交点则表明同属一个图层,据此可将剖面线自动分层,每条剖面线的数据包括图层名、所在剖面名称和一系列构成剖面线的点数据。

d. 读取数据库,汇总分层数据。汇总所有的空间剖面线形成一个总的数据集  $\Omega$ ,其中包含各岩层界线集合  $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  ( $n$  为岩层数)、断层线集合  $\{f_{1u}, f_{1d}\}, \{f_{2u}, f_{2d}\}, \dots, \{f_{mu}, f_{md}\}$  ( $m$  为断层数)和钻孔点集合  $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  等。

### 4 工程实例分析

某水电工程所处地区属扬子板块西缘松潘-甘孜造山带南的木里弧形构造带,坝段及邻近区域地层普遍变质,褶皱强烈,断裂发育,工程地质条件非常复杂。该工程坝址位于雅砻江中下游河段,河流流向约  $N25^\circ E$ ,河道顺直而狭窄,其工程地质研究区域为一长方形,沿河流方向呈北东向展布,长1700 m,宽1560 m,面积约2.7  $km^2$ 。该工程地质勘测设计历经10余年,获得了大量工程地质勘察资料和研究成果,基于上述不同阶段的地质勘察数据,针对选定坝址区域进行各种地质解译分析研究,对其地质结构进行空间构造推断分析,按照研究区域和各主体工程设计的需要,获得了一系列的地质分析成果,包括研究区域的工程地质平面图和数字地形,8个从坝址上游到下游展布的横剖面图,5个左右岸分布的纵剖面图,19个不同高程的平切面图,以及其他沿各种建筑物轴线剖切的剖面图等。图2给出了基于坝区5 m间距地形等高线建立的数字地形模型,图3为坝轴线附近的横剖面图。所有上述数据三维集成后的成果如图4所示,包括所有钻孔、平硐和剖面数据,并分类得到不同岩层、断层、岩脉、覆盖层、风化卸荷界限等耦合解译数据。基于耦合集成的三维数据可建立相应的三维地质模型,如图5所示,为地质、水工、施工等不同

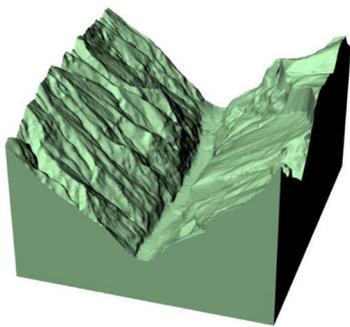


图2 坝区数字地形模型

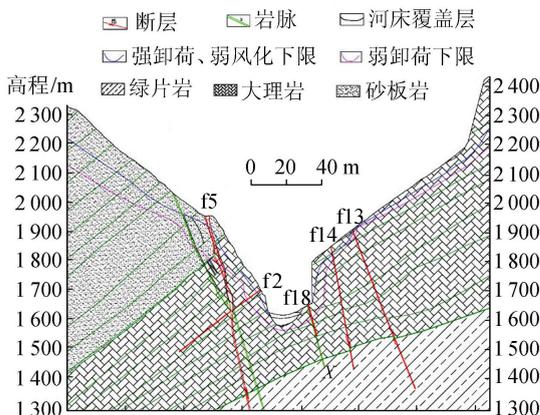


图3 典型横剖面

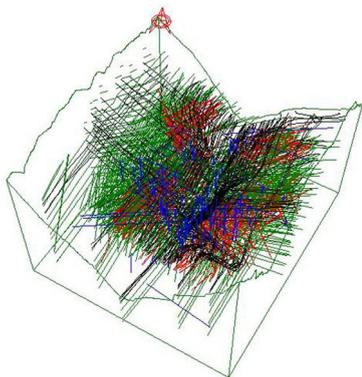


图4 多源地质数据集成

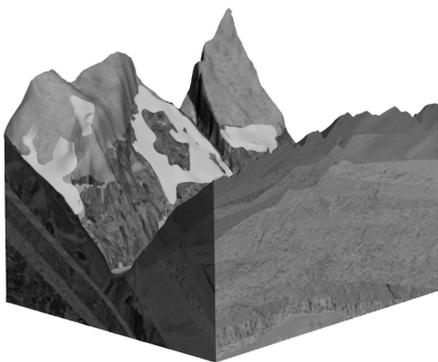


图5 基于多源集成数据的三维地质模型

## 5 结语

基于工程地质勘测数据如数字化地形等高线、

钻孔、平硐数据等,和解析得到的各种地质结构空间构造数据,采用耦合多源数据的剖面解析与生成方法,获得了保持所有数据一致的二维 CAD 剖面图(横纵剖面、轴切剖面和平切面等),进而通过三维环境下的自动分层处理方法实现了水利水电工程多源地质数据的综合集成。这些多源数据构成了水利水电工程地质建模的基础数据,必须准确、可靠,因此该部分基础性工作不仅需要地质工程师丰富的专业知识和实践经验,而且庞大的信息量需要进行自动化和智能化处理,构建以数据库为基础的驱动模式,能够同时满足地质构造规律和地质分析的数据需要。本文提出的耦合多源数据的地质信息空间解析与三维集成方法,对各种来源、精度、分辨率不同的地质数据进行耦合解译分析和三维自动集成,保证了所有有效数据成为地质分析可利用的、可靠的信息,并结合工程实例进行了应用分析,在实践中取得了较好的效果。

## 参考文献:

- [1] 崔冠英,朱济祥. 水利工程地质[M]. 4版. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 张咸恭,王思敬,张倬元. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [3] WU Qiang, XU Hua, ZOU Xukai. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 35-43.
- [4] 钟登华,李明超. 水利水电工程地质三维建模与分析理论及实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] HOULDING S W. 3D Geoscience modeling: computer techniques for geological characterization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [6] 钟登华,王刚,李明超,等. 三维地质模型信息可视化与工程应用[J]. 天津大学学报, 2005, 38(1): 36-40. (ZHONG Denghua, WANG Gang, LI Mingchao, et al. Visualization of 3D geologic model information and its engineering application[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(1): 36-40. (in Chinese))
- [7] ZHANG Liqiang, TAN Yumin, KANG Zhizhong, et al. A methodology for 3D modeling and visualization of geological objects [J]. Science in China Series D: Earth Science, 2009, 52(7): 1022-1029.
- [8] 刘军旗,吴冲龙,刘刚,等. 基于“双C”集成的水利水电工程地质三维信息系统[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 59-63. (LIU Junqi, WU Chonglong, LIU Gang, et al. Three-dimensional information system for water conservancy and hydropower engineering geology based on “double C” integration [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3): 59-63. (in Chinese))

(下转第84页)

- and fluid-particle interaction sediment-laden flows over developing sand dunes [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2008, 8(5/6): 569-578.
- [44] NEZU I, SANJOU M. PIV and PTV measurements in hydro-sciences with focus on turbulent open-channel flows [J]. *Journal of Hydro-Environment Research* 2011, 5(4): 215-230.
- [45] OMIDYEGANEH M, PIOMELLI U. Large-eddy simulation of three-dimensional dunes in a steady, unidirectional flow: part 1. turbulence statistics [J]. *Journal of Fluid Mechanism*, 2013, 721: 454-483.
- [46] LIU Shihe. Turbulent coherent structures in channels with sand waves [J]. *Journal of Hydraulic Dynamics*, 2002(2): 106-110.
- [47] LÓPEZ F, FEMANDEZ R, BEST J. Turbulence and coherent flow structures associated with bedform amalgamation [J]. *Water Resources*, 2004(10): 1-10.
- [48] NEZU I, ADOA A. Three-dimensional structure of space time correlation on coherent vortices generated behind dune crest. [J]. *Journal of Hydraulic Researches*, 1999, 37(1): 945-958.
- [49] CHANG K, CONSTANTINESCU G. Coherent structures in flow over two-dimensional dunes [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(5): 2446-2460.
- [50] KESHAVARZI A, BALL J, NABAVI H. Frequency pattern of turbulent flow and sediment entrainment over ripples using image processing [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012(16): 147-156.
- [51] GYR A, SCHMID A. Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1998, 36(6): 1003-1007.
- [52] DEY S, SARJAR S, SOLARI L. Near-bed turbulence characteristics at the entrainment threshold of sediment beds [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(9): 945-958.

(收稿日期: 2014-07-15 编辑: 熊水斌)

(上接第 56 页)

- [2] 石长征, 伍鹤皋, 李云, 等. 跨活断层倒虹吸明钢管对断层错动的适应性 [J]. *水力发电学报*, 2012, 31(2): 198-204. (SHI Changzheng, WU Hegao, LI Yun, et al. Study on adaptability to fault slide and aseismic behavior of exposed steel penstock for fault-crossing inverted siphon [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(2): 198-204. (in Chinese))
- [3] 诸葛睿鑑. 明钢管支座的横向推力 [J]. *云南水力发电*, 2007, 23(3): 33-34. (ZHUGE Ruijian. Transverse thrust for piers of exposed penstock [J]. *Yunnan Water Power*, 2007, 23(3): 33-34. (in Chinese))
- [4] 徐海洋, 伍鹤皋, 石长征. 日照温差影响下明钢管支墩受力特性研究 [J]. *水力发电*, 2010(12): 27-30. (XU Haiyang, WU Hegao, SHI Changzheng. Analysis on the stress characteristics of exposed penstock supports under the influence of temperature differences due to sunshine [J]. *Water Power*, 2010(12): 27-30. (in Chinese))
- [5] 杨和风. 钢衬钢筋混凝土地面管在依萨河二级水电站中的应用 [J]. *水力发电*, 1997(1): 56-58. (YANG hefeng. Application of steel lined reinforced concrete pipe in Yisahe II hydropower station [J]. *Water Power*, 1997(1): 56-58. (in Chinese))
- [6] 徐彬, 候建国, 安旭文, 等. 水电站压力钢管的安全度设置水平 [J]. *水利学报*, 2012, 43(8): 957-965. (XU Bin, HOU Jianguo, AN Xuwen, et al. Safety level of hydropower steel penstocks [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(8): 957-965. (in Chinese))
- [7] 杨绿峰, 张伟, 韩晓凤. 水电站压力钢管整体安全评估方法研究 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(5): 149-156. (YANG Lufeng, ZHANG Wei, HAN Xiaofeng. Integral safety evaluation method for steel penstocks of hydroelectric station [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5): 149-156. (in Chinese))
- [8] DL/T 5141—2001 水电站压力钢管设计规范 [S].
- [9] DL/T 5057—2009 水工混凝土结构设计规范 [S].

(收稿日期: 2013-11-19 编辑: 周红梅)

(上接第 76 页)

- [9] 崔莹. 多源地质空间数据挖掘方法及应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [10] BALLAGH L M, RAUP B H, DUERR R E, et al. Representing scientific data sets in KML: methods and challenges [J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(1): 57-64.
- [11] 刘尚蔚, 魏鲁双. 数字地质多源数据库及三维建模方法研究 [J]. *人民黄河*, 2012, 34(2): 123-125. (LIU Shangwei, WEI Lushuang. Research on the digital geological multiple source database and 3D modeling method [J]. *Yellow River*, 2012, 34(2): 123-125. (in Chinese))
- [12] 张鸣之, 诸云强, 罗德利, 等. 地质环境数据集成服务及其系统实现 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 84-89. (ZHANG Mingzhi, ZHU Yunqiang, LUO Deli, et al. Geo-environmental data integration and service research and software system implement [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(3): 84-89. (in Chinese))
- [13] ZHU Liangfeng, WANG Xifeng, ZHANG Bing. Modeling and visualizing borehole information on virtual globes using KML [J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 62(1): 62-70.
- [14] 俞鸿年, 卢华复. 构造地质学原理 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.

(收稿日期: 2014-03-21 编辑: 熊水斌)