

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.036

华北平原地面沉降与深层地下水开采关系

朱菊艳¹, 郭海朋², 李文鹏³, 田小伟⁴

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 4. 河北省地矿局 第四水文工程地质大队, 河北 沧州 061000)

摘要: 由于地下水的长期超量开采, 华北平原已成为世界上超采地下水最严重、地下水降落漏斗面积最大、地面沉降面积最大、沉降类型最复杂的地区。本文利用 GIS 空间分析方法, 分别对整个华北平原和沧州市的深层地下水开采量和沉降量进行对比分析, 发现到 2010 年为止, 华北平原年均沉降体积为 10.73 亿 m³, 同期深层水年均开采量大约为 24.5~26.75 亿 m³, 因此, 华北平原地面沉降体积占深层水开采量的 40.1%~43.8%, 间接表明了深层水开采量中含水层和弱透水土层压密释水量所占比例; 沧州地区 1970 年-2008 年年均沉降体积约为 1.98 亿 m³, 深层地下水年均开采量为 3.44 亿 m³, 该区的沉降体积占深层水开采量的 57.6%, 远大于华北平原的计算结果, 这与沧州地区的岩性结构和补给条件有关。

关键词: 深层地下水; 地面沉降; 空间分析; 华北平原; 压密释水; 地质灾害; 资源属性

中图分类号: P642.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0165-05

Relationship Between Land Subsidence and Deep Groundwater Yield in the North China Plain

ZHU Juyan¹, GUO Haipeng², LI Weipeng³, TIAN Xiaowei⁴

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 3. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, Baoding 071051, China; 4. The Fourth Team of Hydrogeological and Engineering Geology, Hebei Bureau of Geosurveying, Cangzhou 061000, China)

Abstract: Due to long term excessive groundwater exploitation, the North China Plain has become an area with the most excessive groundwater pumping, the largest area of groundwater depression cones and land subsidence, and the most complex subsidence type in the world. In this paper, GIS spatial analysis method was used to conduct comparative analysis of deep groundwater yield and land subsidence in the North China Plain and Cangzhou City. The results showed that the annual subsidence volume of the North China plain is $10.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ until 2010 while the annual deep groundwater yield is about $24.5 \times 10^8 \sim 26.75 \times 10^8 \text{ m}^3$. Therefore, the land subsidence volume accounted for 40.1% to 43.8% of deep groundwater yield in the North China Plain, indicating the proportion of released water from the compressibility of aquifer and the aquitard of the total deep groundwater yield. The annual subsidence volume was $1.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ and the annual deep groundwater yield was about $3.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ in Cangzhou region between 1970 and 2008. The proportion of subsidence volume of total deep groundwater yield was 57.6%, which was much higher than that of the North China Plain and can be explained by the lithological structure and recharge conditions of deep groundwater in Cangzhou region.

Key words: deep groundwater; land subsidence; spatial analysis; North China plain; compressibility; geological disasters; resource attribute

地面沉降是指由于自然因素或人类工程活动引发的地
下松散岩层固结压缩并导致一定区域范围内地面高程降低

的地质现象, 是一种缓变性地质灾害。目前, 世界上已有 50
多个国家和地区发生地面沉降, 比如墨西哥城、美国的长滩、

收稿日期: 2013-09-24 修回日期: 2014-04-11 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.035.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“华北平原地下水演变机制与调控”(2010CB428806); 中国地质调查局地质矿产调查评价专项项目(12120113011700)

作者简介: 朱菊艳(1982-), 女, 江苏镇江人, 工程师, 博士, 现主要从事地面沉降相关研究。E-mail: zhujuyan82@sina.cn

通讯作者: 郭海朋(1979-), 男, 山东青州人, 副研究员, 博士, 主要从事地面沉降方面研究。E-mail: guohp@mail.cigem.gov.cn

意大利的波河三角洲、英国的伦敦等等。国内外对于地面沉降的研究表明,地面沉降量与地下水的开采量有关,如在美国圣华金流域最大地面沉降区,承压水位每下降3~7.6 m,地面下沉0.3 m^[1]。我国诸多专家学者也曾对地面沉降与地下水关系进行研究:张宏仁^[2]认为,多年从承压含水层抽取的地下水总体积,大体上等于地面沉降的总体积,侧向补给少得可以忽略不计。根据张兆吉等^[3]的研究,1991年~2003年,河北平原和天津平原的压密释水量分别为7.29亿 m³/a和1.09亿 m³/a,分别占深层地下水开采量的29.6%和32.9%,平均为31.3%。而石建省等人^[4]以京津冀德地区为研究对象,求得压密释水量占深层地下水开采的比例为41.6%~44.3%。郭永海等人^[5]选取沧州地区54个均匀分布的地面沉降监测点进行统计计算得到沧州地区地面平均沉降量,进而求得了深层地下水压密释水量,得出压密释水量占深层水开采量的60.81%。

由前人的研究可以看出,抽取深层地下水可引起地面沉降,但深层地下水开采量和地面沉降量之间的关系众说纷纭。本文在前人研究基础上,利用GIS空间分析方法,基于华北平原地面沉降监测中取得的大量最新沉降量数据,对华北平原及其地面沉降典型区——沧州地区的深层地下水开采量与地面沉降量关系进行探讨。

1 研究区概况

华北平原包括北京、天津、河北和山东省黄河以北地区(图1),共计约14万 km²,其中超过2/3的地区发生了不同程度的地面沉降,是我国目前地面沉降范围最广,沉降速率最快,危害最为严重的地区。另外,由不均匀地面沉降引发的地裂缝也在区内出现,严重影响到区域社会经济的可持续发展。

华北平原地下水特别是深层地下水开采是引起地面沉降的外部原因,而不同地区地质环境特征是产生地面沉降的控制因素,特别是第四系粘性土层是地面沉降产生的基础。华北平原第四系地层在山麓前缘平原地带为200~300 m,广大低平原区为350~500 m。由于受不同地质历史时期的古气候、古地理沉积环境及新构造运动等因素控制,含水岩层在不同深度的分布形态和发育程度,均存在着差异性,并导致了它们的水力性质、水化学、渗透性、导水性、富水性及地下水动态等水文地质条件发生相应变化。

根据华北平原地层结构特征,可划分为单层结构区和多层结构区。其中,单层结构区分布于山前平原顶部,岩性较粗,黏性土多以透镜体分布,上下水力联系好。而多层结构区第四系可分为四个含水层组,第Ⅳ含水层组底界埋深10~50 m,是地下水积极循环交替层;第Ⅲ含水层组底界埋深为120~210 m,是农业用水的主要开采层位;第Ⅱ含水层组底界埋深为250~310 m,是深层地下水的主要开采层位;第Ⅰ含水层组底界埋深为350~550 m,滨海平原有少量开采该层位。

华北平原地面沉降的发生和发展主要是由地下水位变化引起的,而华北平原地下水位变化受自然和人为因素影响。一般山前至中部平原因处于全淡水区,社会经济发达,地下水开发程度也较高,地下水水位变化较大。而有咸水区浅层地下水由于水质较差,单井出水量小,故开发利用程度

不高,地下水水位变化也小。深层地下水水质相对较好,开采程度高,但其补给能力差。在大中城市等工业及人口集中的地区,需水量大,地下水开采程度高,均处于长期超采状态,水位大幅下降,形成了大范围地下水水位下降漏斗,甚至使部分含水层大面积被疏干。

目前,环渤海经济圈的迅速崛起对水资源环境的压力持续增大,水资源严重缺乏引发的供需矛盾已成为限制华北平原地区经济社会持续快速发展的重要因素^[6]。华北平原(河北平原、鲁北平原、天津平原和北京平原)^[3]20世纪70年代平均地下水开采量为126.63亿 m³/a,到80年代,开采量增加至171.92亿 m³/a,到2000年平均开采量为186.60亿 m³/a,增速略微趋缓(见表1)。

表1 各年代华北平原各区平均开采量统计

Table 1 Average groundwater yields of different times and areas in the North China plain

研究区	亿 m ³ /a			
	20世纪 70年代	20世纪 80年代	20世纪 90年代	2000年
河北平原	88.04	123.50	122.26	128.62
鲁北平原	13.80	16.02		27.56
天津平原	7.14	8.09	7.42	5.55
北京平原	17.65	24.31		24.87
合计	126.63	171.92		186.60

沧州地区位于河北省东南部(图1),东临渤海,西毗衡水及有“华北明珠”之称的保定,南与山东半岛及辽东半岛隔海相望,北与天津、廊坊接壤。沧州地区是华北平原沉降量最大的地面沉降区域,它具有沉降量大、沉降速度快、沉降范围广、沉降导致的危害大四个特点。



图1 华北平原行政区划及沧州市地理位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the administrative divisions in the North China Plain and location of Cangzhou City

2 华北平原地面沉降与深层地下水开采

华北平原地面沉降发生于20世纪60年代后期,20世纪

60-70年代,地面沉降仅发生在少数漏斗中心;到80年代初期,华北平原累积沉降量大于500mm地区的面积约有29km²;到80年代后期,大于500mm地区的面积已增到508km²;20世纪90年代开始,地下水开采量增长趋缓,地面沉降量的增速也有所放缓^[4]。本文采用mapgis软件的空间分析模块,对绘制的空间图形中不同高程累积沉降体积进行计算和分析。

2.1 华北平原深层地下水资源属性

根据1991年-2003年数据^[3],华北平原深层地下水补给及蓄变量合计为29.38亿m³/a。主要为越流补给和黏土释水,分别为12.26亿m³/a和8.38亿m³/a,而侧向流入和弹性释水分别为4.83亿m³/a和3.91亿m³/a。从表2可以得出,浅层地下水对深层地下水的越流补给量占整个深层地下水补给及蓄变量的41.73%,黏土释水占28.52%,侧向流入占16.44%。

表2 华北平原深层淡水补给资源构成

Table 2 Deep water recharge resources in the North China plain

时间	深层地下水补给及蓄变量/(亿m ³ ·a ⁻¹)				合计
	越流补给	侧向流入	弹性释水	黏土释水	
1991-2003	12.26	4.83	3.91	8.38	29.38

深层含水层和弱透水土层压密、弹性释放的水量均是动用储存资源。在承压含水层以上有咸水覆盖的地区开采的越流补给的淡水量也是动用储存量,只有在无咸水覆盖的地区,部分越流补给的水量来自潜水或浅层地下水。这部分水量虽然可以持续利用,但它来自浅层水的越流消耗量,并已计算在潜水(或浅层水)资源中,属于浅层水和深层水资源的重复量。在远离山前的地区侧向补给十分微弱,由于地下水的开采水位下降而引起的侧向补给实际上也是动用邻区的地下水储存量^[13]。

2.2 华北平原累积地面沉降量分析

华北平原地面沉降累计沉降量从有历史记录时间起算,能追溯到20世纪60年代末70年代初。水准测量、InSAR监测、GPS监测及分层标测量等资料表明,华北平原不同地

区的沉降中心仍在不断发展之中,地面沉降总体形势严峻。目前华北平原地面沉降呈现沉降速率快、影响范围广的特点,其中北京、天津等重大城市城区周边地面沉降加速,主城区趋于稳定。山东鲁北平原单一地面沉降漏斗明显,影响范围相对较小,但沉降速率较快。

根据收集到的资料,绘制了华北平原地面沉降程度分区图(图2),利用mapgis空间分析功能对华北平原地面沉降进行空间统计,得到该区地面沉降累积体积为429.21亿m³。从表3可以看出,累积沉降量大于500mm的面积已达34680.49km²,相对应的沉降体积为150.40亿m³;累积沉降量大于1000mm的面积约为9620.81km²,对应的沉降体积为40.47亿m³。收集到的资料显示,地面沉降快速发展是在20世纪70年代之后,可以算出华北平原地区每年的沉降体积约为10.73亿m³,等效平均沉降量约为0.57m,年均沉降量为0.014m。

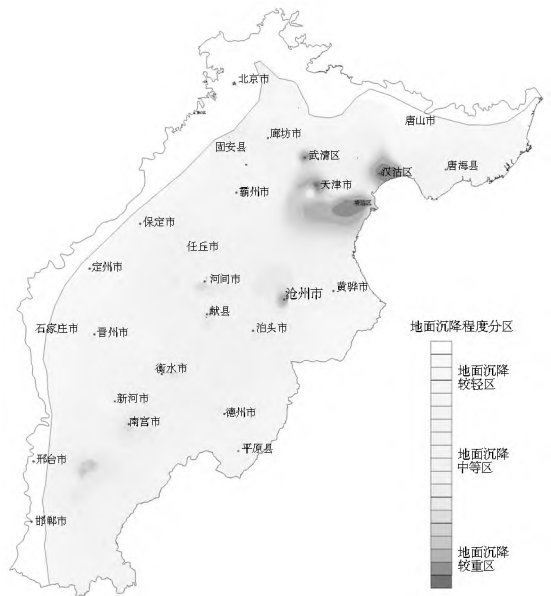


图2 华北平原地面沉降程度分区(2010年)

Fig. 2 Distribution map of land subsidence in the North China plain (year 2010)

表3 华北平原累积地面沉降量空间分布统计结果

Table 3 Statistical results of spatial distribution of accumulative land subsidence in the North China plain

累计沉降量/mm	区间体积/亿m ³	累计体积/亿m ³	体积比例(%)	区间面积/km ²	累计面积/km ²	面积比例(%)
0	0.00			1 139.19	75 644.11	100.0
0~100	69.56	429.21	100.0	4 366.44	74 504.92	98.5
100~200	65.01	359.65	83.8	7 180.22	70 138.48	92.7
200~300	57.25	294.65	68.6	8 084.05	62 958.26	83.2
300~400	48.89	237.39	55.3	11 603.10	54 874.21	72.5
400~500	38.10	188.50	43.9	8 590.62	43 271.11	57.2
500~600	31.67	150.40	35.0	4 774.97	34 680.49	45.8
600~700	27.13	118.73	27.7	3 740.07	29 905.52	39.5
700~800	22.74	91.59	21.3	4 592.93	26 165.45	34.6
800~900	17.17	68.86	16.0	7 823.47	21 572.52	28.5
900~1000	11.22	51.69	12.0	4 128.24	13 749.05	18.2
1000~1200	14.63	40.47	9.4	3 160.74	9 620.81	12.7
1200~1400	9.64	25.84	6.0	2 121.60	6 460.08	8.5
1400~1600	7.09	16.20	3.8	1 094.15	4 338.48	5.7
1600~1800	5.23	9.11	2.1	1 008.91	3 244.33	4.3
>1800	3.88	3.88	0.9	2 235.42	2 235.42	3.0
合计	429.21			75 644.11		

2.3 华北平原地面沉降与深层地下水开采关系

研究区历年的深层地下水开采量如表 4 所示, 多年均开采量大约为 24.5~26.75 亿 m^3 可以算出, 开采量的 40.1~43.8% 与沉降量吻合。此结果略小于石建省等人的计算结果^[4] (41.6%~44.3%), 但是大于张兆吉等^[3] 的区域研究结果(河北平原和天津平原的压密释水量分别占深层地下水开采量的 29.6% 和 32.9%)。

表 4 研究区深层地下水开采量统计

Table 4 Statistical results of deep groundwater yield in the study area

时间	平均开采量/ 亿 m^3	累积开采量/ 亿 m^3
20 世纪 70 年代 ^[3]	15~17	150~170
20 世纪 80 年代 ^[10]	24~27	240~270
20 世纪 90 年代 ^[11]	30~32	300~320
2000 年后 ^[7]	29~31	290~310
多年平均	24.5~26.75	980~1 070

3 沧州市地面沉降与深层地下水开采

沧州地处渤海之滨, 是我国沿海开放的港口城市及著名的化工城市。20 世纪 70 年代以来, 工农业迅猛发展, 城市群体规模不断扩大, 为满足经济发展及人民生活用水需求, 地下水开采量剧增, 地下水头急剧下降, 形成了以沧县东庞河为中心的大型复合地下水头降落漏斗, 并引发了地面沉降、地裂缝等地质灾害。

3.1 沧州地区累积地面沉降量分析

根据收集资料绘制了沧州地区 1970 年-2008 年累积地

表 5 沧州地区 1970 年-2008 年累积地面沉降量空间分布统计结果

Table 5 Statistical results of spatial distribution of accumulative land subsidence in Cangzhou from 1970 to 2008

累积沉降量/ mm	区间体积/ 亿 m^3	累积体积/ 亿 m^3	体积比例 (%)	区间面积/ km^2	累积面积/ km^2	面积比例 (%)
200~400	25.41	75.11	100.0	1 554.93	12 784.32	100.0
400~600	20.71	49.70	66.2	2 399.27	11 229.39	87.8
600~800	16.25	28.99	38.6	2 162.18	8 830.12	69.1
800~1 000	9.13	12.74	17.0	4 652.73	6 667.94	52.2
1 000~1 200	2.93	3.61	4.8	1 525.76	2 015.22	15.8
1 200~1 400	0.47	0.67	0.9	372.05	489.45	3.8
1 400~1 600	0.13	0.20	0.3	71.91	117.41	0.9
1 600~1 800	0.06	0.07	0.1	29.78	45.50	0.4
> 1 800	0.01	0.01	0.0	15.72	15.72	0.1
合计	75.11			12784.32		

3.2 沧州地区地面沉降与深层地下水开采关系

据沧州地区多年开采量统计, 1972 年开始对地下水大规模开采^[5], 1972 年-1990 年深层地下水开采总量为 55.96 亿 m^3 。1991 年-2000 年深层地下水开采量为 41.15 亿 m^3 ; 2001 年-2008 年深层地下水开采量为 30.23 亿 m^3 ^[12]。1972 年-2008 年深层地下水的总开采量为 127.34 亿 m^3 , 年均开采量为 3.44 亿 m^3 。

由 mapgis 空间分析可知, 沧州地区多年平均沉降体积约为 1.98 亿 m^3 , 而该区深层地下水多年平均开采量约为 3.44 亿 m^3 , 即深层地下水多年平均开采量的 57.6% 与多年平均沉降体积一致, 此结果远大于整个华北平原研究区的计算结果(40.1%~43.8%)。究其原因, 沧州地区含水层及弱

面沉降量分区图(图 3)。

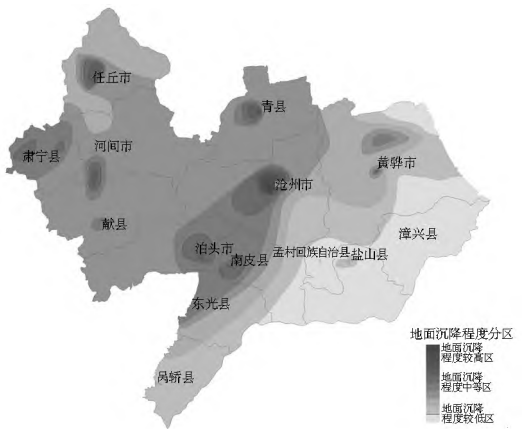


图 3 1970 年-2008 年沧州地区累积地面沉降量分区

Fig. 3 Distribution map of accumulative land subsidence from 1970 to 2008 in Cangzhou

利用 mapgis 空间分析功能, 对沧州地区地面沉降进行了空间统计。从表 5 中可以看到, 1970 年-2008 年, 沧州地区地面沉降累积体积为 75.11 亿 m^3 , 每年沉降体积约为 1.98 亿 m^3 ; 累积沉降面积为 12 784.32 km^2 , 等效平均沉降量约为 0.59 m, 年均沉降量为 0.015 m。截至 2008 年累积沉降量大于 600 mm 的面积已达 8 830.12 km^2 , 相对应的沉降体积为 28.99 亿 m^3 ; 累积沉降量大于 1 000 mm 的面积约为 2 015.22 km^2 , 对应的沉降体积为 3.61 亿 m^3 。

透水层岩性较细, 更易产生地面沉降。地面沉降最大的沧州市沉降中心, 其黏土累计厚度达 214.42 m, 亚黏土累计厚度 131.41 m, 主要开采段 200~400 m 的黏性土累计厚度达 179.01 m, 为地面沉降的发生提供了物质基础。此外, 多年来沧州周边深层地下水水头下降也比较强烈, 沧州地区周边形成了相应的地下水降落漏斗, 如北部的大城漏斗、南部的德州漏斗、西部的衡水漏斗等, 使得沧州地区深层地下水从外围获得的侧向补给较少, 因此, 沧州地区深层地下水的开采对地面沉降的影响会更大。

4 结论

(1) 华北平原自深层承压水开采的水量, 除山前地区有一定的侧向补给和在无咸水覆盖区有少量越流补给的水量

外,大部分动用的是储存资源。

(2) 截止 2010 年,华北平原地面沉降年均体积占深层水开采体积的 40.1%~43.8%,暗示了深层水中压密释水占开采量的比例。华北平原的等效平均沉降量约为 0.57 m,年均沉降量为 0.014 m。

(3) 1970 年-2008 年,沧州地区地面沉降体积占深层水开采体积的 57.6%。沧州地区深层地下水开采量中压缩释水量的比例远大于华北平原,这是由于华北中东部平原的黏性土厚度大、侧向补给量微弱所致。

参考文献(References):

- [1] 郭永海,王东胜,沈照理,等.河北平原部分地区深层地下水开采的地沉效应及水资源属性再认识[J].中国地质灾害与防治学报,1994,(增刊):7581.(GUO Yong hai,WANG Dong sheng,SHEN Zhao-li,et al.The Recognition of Subsidence Effect and Water Resource Attribute of Deep Groundwater Exploitation in Parts of Hebei Plain[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,1994,(Supp.):7581.(in Chinese))
- [2] 张宏仁.中国的淡水资源问题[C].地质环境与生态保护建设重大科学问题研讨会,大连:2003.(ZHANG Hong ren.The Problem on the Freshwater Resources in China[C].Symposium on the Major Scientific Problems of the Protection and Construction of Geological and Ecological Environment,DA-Lian,2003.(in Chinese))
- [3] 张兆吉.华北平原地下水可持续利用调查评价[M].地质出版社,2009.(ZHANG Zhaoji.The Investigation and Assessment of the Groundwater Sustainable Use in the North China Plain[M].Geological Publ. House,2009.(in Chinese))
- [4] 石建省,郭娇.京津冀德平原区深层水开采与地面沉降关系空间分析[J].地质评论,2006,52(6):805-809.(SHI Jian sheng,GUO Jiao.The Relationship between the Ground Subsidence and the Deep Groundwater Yield of Jingjinjide Plain[J].Geological Review,2006,52(6):805-809.(in Chinese))
- [5] 郭永海,沈照理.从地面沉降论河北平原深层地下水资源属性及合理评价[J].地球科学,1995,(4).(GUO Yong-hai,SHEN Zhao-li.The Property of Deep lying Groundwater Resources in Hebei Plain and Its Reasonable Evaluation in View of Land Subsidence[J].Journal of Earth Science,1995,(4).(in Chinese))
- [6] 郭小方,葛大庆.华北平原地面沉降区 insar 监测项目成果报告[R].2010.(GUO Xiaofang,GE Daqing.The Report of the Insar Monitoring Results of the Subsidence Area in the North China Plain[R].2010.(in Chinese))
- [7] 张兆吉.华北平原地下水可持续开发利用前景调查评价报告[R].国土资源大调查项目报告,2006.(ZHANG Zhaoji.The Report of Groundwater Sustainable Development and Utilization Prospect in the North China plain[R].Project Report of Land Resources Survey,2006.(in Chinese))
- [8] 邢忠信.沧州市地面沉降研究及防治对策[J].地质调查与研究,2004,27(3):157-163.(XING Zhong xin.Surface Subsidence and Its Countermeasures in Cangzhou City[J].Geological Survey and Research,2004,27(3):157-163.(in Chinese))
- [9] 张宗祜,李烈荣.中国地下水资源(河北卷)[M].北京:中国地图出版社,2005:48-50.(ZHANG Zong-hu,LI Lie rong.Chinese Groundwater Resources(Hebei)[M].Sinomaps Press,2005:48-50.(in Chinese))
- [10] 谢金荣.华北地区水资源供需现状发展趋势和战略研究[R].“七五”国家重点科技公关项目专题报告,1990.(XIE Jirong.The Development Trend and Strategy Research of the Status of Supply and Demand of Water Resources in North China[R].Special Report "Seven Five" of National Key Scientific and Technological Project,1990.(in Chinese))
- [11] 张宗祜.华北地下水可持续开发利用前景[R].国土资源大调查项目报告,2003.(ZHANG Zong-hu.The Prospect of Sustainable Exploitation and Utilization of Groundwater in North China[R].Project Report of Land Resources Survey,2003.(in Chinese))
- [12] 田俊花,简明.河北省沧州市地质环境监测报告[R].2011.(TIAN Jun hua,JIAN Ming.The Report of Geological Environmental Monitoring in Cangzhou,Hebei[R].2011.(in Chinese))
- [13] 张蔚榛.地下水的合理开发利用在南水北调中的作用[J].南水北调与水利科技,2003,(4):1-7.(ZHANG Weizhen.The Effect of Rational Exploitation and Utilization of Groundwater in South to North Water Transfer Project[J].South to north Water Transfers and Water Science & Technology,2003,(4):1-7.(in Chinese))