

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.006

天津盘山矿泉水资源优化配置的系统动力学模型

斯 藹¹,杜关记²,刘振辉¹

(1.天津市地质环境监测总站,天津 300191 2.天津市勘察院,天津 300191)

摘要 针对天津蓟县盘山矿泉水资源分配不合理现状,在分析矿泉水赋存的地质环境条件基础上,采用系统动力学模型(SD),设计了维持现状(方案1)、重矿泉水(方案2)、节水治理(方案3)及综合管理(方案4)等4种水资源配置方案。结果表明:方案1和方案2以消耗自然资源为代价,没有体现生态效益,且经济效益不突出,为不可取方案;方案3引入节水技术及污水治理等措施,体现良好的生态效益,同时经济效益又分别是前二者的1.6倍和1.2倍,是可选方案;方案4调整了区内产业用水结构,通过引入外部水源替换生活用水,提高矿泉水生产量,经济效益是方案3的1.5倍,同时具有较高的生态效益。因此,从社会、经济和生态综合效益分析,选定综合管理方案(方案4)为研究区水资源优化的最佳配置方案。

关键词 系统动力学;优化配置;矿泉水资源;盘山矿泉水田

中图分类号:TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2010)06-0023-05

Optimal allocation of mineral water resources based on the system dynamic (SD) model

SI Ai¹, DU Guan-ji², LIU Zhen-hui¹

(1. Tianjin Geo-Environment Monitoring Central Station, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Tianjin 300191, China)

Abstract: According to the distribution of mineral drinking water resources at Pan Mountain in Ji County near Tianjing, and based on analysis of the geo-environmental condition of storage of mineral water, four schemes of water resource allocation were designed using the system dynamic (SD) model: maintaining the present status (scheme one), mineral water (scheme two), water saving and control (scheme three), and integrated management (scheme four). The results showed that schemes one and two were not acceptable for their lesser ecological and economic efficiency. Scheme three, meanwhile, introducing water saving techniques and wastewater treatment, was an acceptable scheme because of its better ecological and economic efficiencies. The economic benefit was 1.6 and 1.2 times higher than schemes one and two, respectively. The optimal scheme was scheme four, which had greater economical efficiency (1.5 times higher than scheme three) and the same ecological efficiency as scheme three due to regulation of the structure of industrial water utilization, replacing domestic water by introducing external water sources and increasing production of mineral water. Therefore, the integrated management scheme (scheme four) was the best scheme of water resources allocation in the study area.

Key words: system dynamic model; optimal allocation; mineral water resources; Pan Moutain mineral water field

天津市蓟县盘山地区因其得天独厚的地理环境和复杂的地质构造条件,蕴藏着丰富的饮用天然矿泉水资源,被称为盘山矿泉水田^[1]。作为一种可直接饮用的、宝贵的天然液体矿产资源,天津市蓟县盘

山天然矿泉水资源开发已有 10 余年的历史。当前,水资源量分配不合理已成为蓟县地区矿泉水产业经济快速增长的瓶颈,严重抑制其可持续发展。本研究旨在通过分析当前矿泉水开发利用现状及市场需

求 对区域内有限的矿泉水资源进行宏观调控研究, 提出最佳配置方案, 以期实现经济、社会和环境效益的最大化, 为政府部门开展矿泉水资源管理和环境保护提供技术支持。

1 区域概况

天津市蓟县盘山矿泉水田位于天津市蓟县西部, 面积约 185 km², 见图 1。蓟县盘山矿泉水田位于燕山台褶带马兰峪复式背斜南翼西段, 地层以中新元古界(长城系和蓟县系)和新生界第四系为主。区内侵入的岩浆岩体主要为花岗岩复合体, 岩体内风化裂隙发育, 围岩(碳酸盐岩)普遍发生热接触变质^[2]; 该区地质构造相对复杂, 发育有盘山短轴背斜和庄果峪向斜 2 个次级褶皱, 断裂构造发育, 主要有蓟县山前断裂(F1)、许家庄断裂(F2)、夏各庄断裂(F3)、大孙各庄断裂(F4)、塔院—居官屯断裂(F5)和官庄断裂(F6)等 6 条断裂, 这些为本区矿泉水的形成提供了良好的区域地质条件, 见图 2。

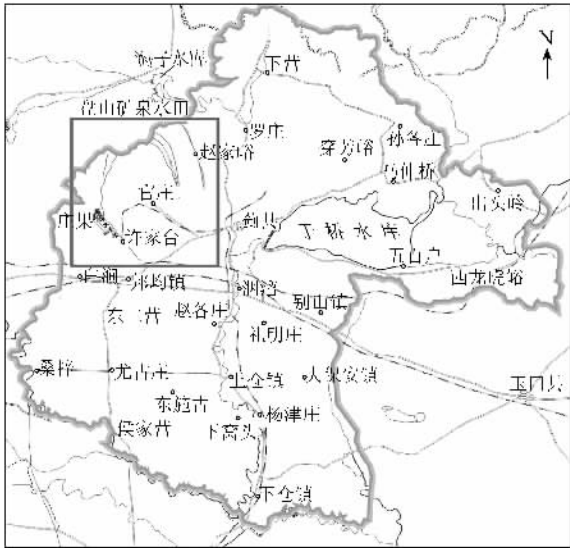


图 1 研究区空间位置

北部燕山山地为区域地下水补给区, 广泛发育以白云岩为主的碳酸盐岩岩溶裂隙水。区内形成盘山岩体东西两侧赵家峪和庄果峪 2 个裸露型基岩储水构造及南部蓟县城关浅埋隐伏型基岩岩溶储水构造, 岩溶裂隙发育, 连通性和导水性好, 补给资源丰富。矿泉水主要赋存在盘山岩体周边围岩接触变质带及储水构造的下游排泄区^[1]。水化学类型主要为 HCO₃-Ca 或 HCO₃-Ca·Mg 型, 矿化度为 233.9~598.2 mg/L, 偏硅酸的质量浓度为 32.8~52 mg/L, 锶的质量浓度大于 0.2 mg/L(但温度低于 25℃), 为低矿化度、含锶的偏硅酸型饮用天然矿泉水。

2 矿泉水资源开发利用现状评价

据 2007 年统计资料^[3], 蓟县盘山矿泉水田水资源开发利用程度较高, 开采量为 395.84 万 m³, 主要用于农业灌溉、生活用水、工业用水及矿泉水生产等。从图 3 中可看出, 盘山矿泉水田矿泉水资源利用格局不合理: 工农业灌溉占 61.2%, 天然矿泉水生产比例偏小(仅占 12.6%), 矿泉水资源被作为一般地下水用于农业灌溉和工业生产, 优质水源没有得到优用, 矿泉水资源未突显其潜在的优势。

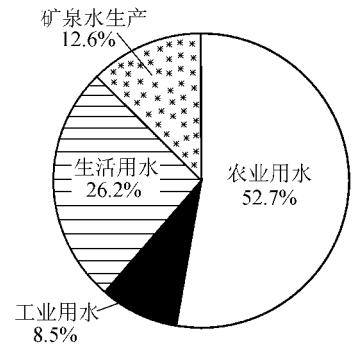


图 3 蓟县盘山矿泉水田各行业用水情况

研究表明, 蓟县盘山矿泉水田矿泉水资源尚存在一定的开采余量。但由于区内开采区位极不平衡, 导致矿泉水资源整体的开采潜力不容乐观^[3]; 西部庄果峪储水构造下游地区已超采, 中部花岗岩风化区及东部赵家峪储水构造开采潜力较小, 南部蓟县城关储水构造西侧存在较大的开采空间。

在上述背景下, 研究区矿泉水市场的进一步发展受到局限。因此, 调整当前的产业用水格局, 优化产业用水结构, 对区内矿泉水资源的开发利用进行优化配置十分必要。

3 矿泉水资源优化配置的系统动力学模型

3.1 系统边界的确定

系统动力学(system dynamics)是一种以计算机仿真技术为辅助手段的研究复杂社会经济系统的定

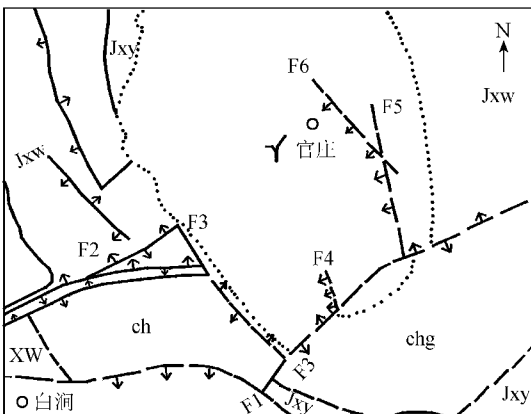


图 2 蓟县盘山矿泉水田地质构造

量分析方法^[4]。自 20 世纪 50 年代中期创立以来,得到了广泛应用,包括在水资源研究方面的应用^[5-8]。

根据系统动力学理论,通过对盘山矿泉水田水资源系统的分析,将直接参与或对盘山矿泉水田水资源系统有直接或间接影响的因素划分在边界之内。天津市蓟县盘山矿泉水田水资源优化配置 SD 模型由农业用水、工业用水、生活用水和矿泉水生产等 4 个子系统组成,各子系统间相互联系、相互影响(见图 4)。该系统的目标集包括经济效益、生态效益、社会效益,通过系统变量—目标的反馈,实现总体最佳效益。

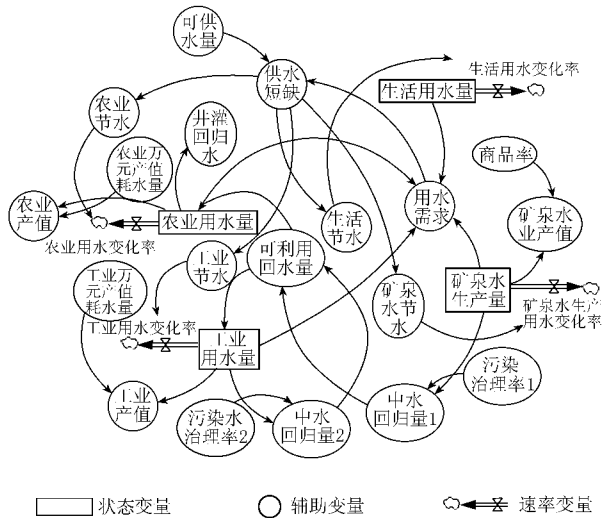


图 4 盘山矿泉水田水资源优化配置 SD 模型流程图

3.2 系统的反馈机制

3.2.1 变量集

该系统的变量集包括:目标变量、状态变量、速率变量、控制变量、辅助变量和常量等。

a. 目标变量是表示系统最终要实现的目标。如经济效益(农业产值、工业产值、矿泉水产值)、生态效益(污染治理);

b. 状态变量是表示系统状态的量,通常具有累积的性质。如农业用水、工业用水、生活用水、矿泉水生产用水;

c. 速率变量是描述系统变量对时间的变化速度的量。如农业用水变化率、工业用水变化率、生活用水变化率、矿泉水生产用水变化率;

d. 控制变量是指为促进发展目标的实现而采取的诸项措施的量化指标。如农业节水、工业节水、生活节水;

e. 辅助变量为连接状态变量和目标变量等而设置的变量。如可利用水量、供水短缺量、中水回归量(行业污水处理后可循环使用的水量);

f. 常量是指在仿真运行期间,某个参数的值始

终保持不变的量,如可供水量、矿泉水商品率。

3.2.2 反馈环

系统动力学认为系统与系统之间,系统内部各因素之间存在着互为因果关系,并且这些因果关系构成闭合的反馈回路。主要反馈环有:

a. 农业用水量⁽⁺⁾→用水需求量⁽⁺⁾→供水短缺⁽⁺⁾→农业节水率⁽⁺⁾→农业用水变化率⁽⁻⁾→农业用水量⁽⁻⁾,呈负反馈;

b. 工业用水量⁽⁺⁾→用水需求量⁽⁺⁾→供水短缺⁽⁺⁾→工业节水率⁽⁺⁾→工业用水变化率⁽⁻⁾→工业用水量⁽⁻⁾,呈负反馈;

c. 生活用水量⁽⁺⁾→用水需求量⁽⁺⁾→供水短缺⁽⁺⁾→生活节水率⁽⁺⁾→生活用水变化率⁽⁻⁾→生活用水量⁽⁻⁾,呈负反馈;

d. 矿泉水生产量⁽⁺⁾→用水需求量⁽⁺⁾→供水短缺⁽⁺⁾→矿泉水节水率⁽⁺⁾→矿泉水用水变化率⁽⁻⁾→矿泉水生产量⁽⁻⁾,呈负反馈;

e. 矿泉水生产量⁽⁺⁾→中水回归水量⁽⁺⁾→可利用回水量⁽⁺⁾→农业供水量⁽⁺⁾→用农业用水量⁽⁻⁾→供水短缺⁽⁻⁾→矿泉水生产量⁽⁺⁾,呈正反馈;

f. 工业用水量⁽⁺⁾→中水回归水量⁽⁺⁾→可利用回水量⁽⁺⁾→工业用水量⁽⁺⁾,呈正反馈。

通过对盘山矿泉水田水资源系统分析,共设置 4 个状态变量,4 个速率变量,19 个辅助变量。采用 VENSIM 软件,进行了 SD 模型的计算机模拟。首先进行模型误差的检验,既计算数据与历史数据相比较,误差小于 5% 的概率为 81%,说明模型仿真结果具有足够有效性。此外,该模型对现状年 2010 年农业、工业、矿泉水产业等产值的推算结果与当年实际产值相比,最大误差小于 7%。同理,说明基于 2007 年的 SD 模型具有较强的可信度。因此,模型的初始时间为 2007 年,仿真终止时间为 2020 年,步长为 1a。在 2007—2020 年的模型运行中,设计选取了 4 种具有代表性的方案:①维持现状方案;②重矿泉水方案;③节水治理方案;④综合管理方案。

4 优化方案的设计及仿真结果

4.1 优化方案的设计

方案 1:维持现状方案。该方案没有考虑节水技术、农田回归水的利用及工业、矿泉水等污水处理。根据历史拟合,农业用水变化率取决于农业产值增加速率,取 1%;工业用水变化率取决于工业产值增长速率,为 15%;矿泉水生产用水变化率取 1.5%;按目前自然演化的方向发展,生活用水量变化随人口自然增长改变,取 0.3%。农业产值、工业产值根据历史数据趋势预测。认为在现状条件下,人均用

水定额不变,农业耗水量、乡镇工业产值耗水量按现状年取 $88\text{ m}^3/\text{万元}$ 和 $30\text{ m}^3/\text{万元}$ ^[9];生活用水收费 $3.3\text{ 元}/\text{m}^3$ 、矿泉水商品率取 $635\text{ 元}/\text{m}^3$ 。依据这些数据仿真模拟2020年研究区各行业用水指标。

方案2:重矿泉水方案。在方案1的基础,追加矿泉水生产总量至供需平衡,其他调控变量不变,预测2020年研究区各行业用水指标。

方案3:节水治理方案。通过加大科技投入,采用节水技术,利用达标排放的回归中水等来降低农业单位产值耗水量:农业节水率按8%计算;通过水重复利用率来降低工业和矿泉水业单位产值耗水量:工业节水率为5%,水重复利用率介于10%~30%;生活节水率取-0.6%;矿泉水节水率按-8%计算,污水治理率介于30%~60%。农业万元产值耗水量取 80 m^3 ,根据蓟县农村需水量规划,乡镇工业万元产值耗水量取 20 m^3 ;生活用水(自来水)收费产值同上,矿泉水商品率取 $635\text{ 元}/\text{m}^3$ 。仿真模拟2020年研究区各行业用水指标。

方案4:综合管理方案。首先考虑优水优用原则,区内生活用水全部由区外蓟县城关岩溶水提供,余下的矿泉水资源拟扩建一个大型矿泉水厂。同时兼顾节水措施:农业节水率和工业节水率同方案3,通过调整产业间配水结构,使整个系统内部用水结构相互贯通,水资源良性循环,整体配置合理。

4.2 仿真模拟结果分析

通过研究区水资源优化配置的4种方案仿真模拟,选取具有代表性的指标进行各方案的对比,主要指标为矿泉水产业收入、农业产值、工业产值、农业用水量、工业用水量、生活用水量、矿泉水生产用水量等(见表1)。

表1 蓟县盘山矿泉水田水资源各方案预测结果

年份	井灌渗漏水量/ 万 m^3	农业用水量	工业用水量/ 万 m^3	矿泉水生产量/ 万 m^3	生活用水量/ 万 m^3	农业产值/亿元	工业产值/亿元	矿泉水产值/亿元	节水产值/亿元	
方案1	2007	33.37	208.56	33.76	49.84	103.68	2.37	1.125	3.165	0.000
	2010	34.37	214.82	48.95	52.12	104.62	2.441	1.632	3.309	0.000
	2015	36.04	225.24	74.27	56.14	106.19	2.56	2.476	3.565	0.000
	2020	37.71	235.67	99.59	60.48	107.8	2.678	3.32	3.841	0.000
方案2	2007	33.37	208.56	33.76	49.84	103.68	2.37	1.125	3.165	0.000
	2010	34.37	214.82	48.95	65.12	104.62	2.441	1.632	4.135	0.000
	2015	36.04	225.24	74.27	92.17	106.19	2.56	2.476	5.852	0.000
	2020	37.71	235.67	99.59	121.3	107.8	2.678	3.32	7.702	0.000
方案3	2007	33.37	208.56	33.76	49.84	103.68	2.37	1.125	3.165	0.000
	2010	22.88	176.03	34.93	62.78	105.56	2.2	1.747	3.987	1.005
	2015	12.68	158.48	46.21	99.28	108.76	1.981	2.311	6.304	0.952
	2020	5.56	185.18	72.2	159.88	112.06	2.315	3.61	10.153	1.170
方案4	2007	33.37	208.56	33.76	49.84	103.68	2.37	1.125	3.165	0.000
	2010	24.79	180.09	36.71	168.34	105.56*	2.251	1.836	10.69	1.005
	2015	14.5	177.12	54.78	208.04	108.76*	2.214	2.739	13.21	0.952
	2020	5.83	198.78	79.58	271.95	112.06*	2.485	3.979	17.269	1.170

注:*表示水源来自外部基岩地下水。

根据方案1,2007—2020年间,各行业用水比例基本保持不变。经济总体产值从6.688亿元增至9.867亿元,但是矿泉水产值贡献率从47.3%降至38.9%。由此可见,研究区矿泉水资源主要用于其他产业生产,产生的经济效益不明显。

根据方案2,通过增大矿泉水生产量,矿泉水业在预测期内用水比例从12%增至21.4%;总体经济产值增至13.729亿元,增幅为7.52%/a,其中矿泉水产值贡献率增至56.1%。经济效益较明显,但方案2仅通过产量追加来提高产值,单位产值耗水成本较高,方案1中存在的问题在方案2中没有解决。

根据方案3,2007—2020年间,经济总产值增至16.077亿元,增长率为9.87%/a,其中矿泉水产值贡献率增至63.1%,经济效益明显。由于采用节水技术,工业和农业节水产生的潜在价值达到1.17亿元(2020年)。此外,污水治理后达标排放,既保护了环境,同时提供系统其他产业循环利用,体现了水资源持续利用的生态效益。

根据方案4,2007—2020年间,经济总产值增至23.733亿元,增长率为18.2%/a,其中矿泉水产值贡献率增至72.8%,经济效益显著。由区外供水,由此用来建设大型矿泉水产业的水资源增加值为7.116亿元(2020年)约占总经济产值的30%,产生的经济效益十分可观。由于方案4是在方案3的基础上进行的设计,节水技术的应用及污水治理产生的生态效益,与方案3同价。

4.3 优化方案的优选

按目前的现状,即方案1进行发展,农业产值和工业产值没有采用节水及污水处理等环保设施,这部分的产值增加量以消耗有限的水资源存本为代

价。因此,该方案没有体现生态效益。在该方案中,矿泉水生产量及经济产值相对较低。因此,该方案是不可取的方案。

方案2提高了矿泉水产业生产规模,至2020年,矿泉水业用水比例增加至24%。农业、工业和矿泉水用水量均呈不同程度的增长(生活用水量变化不大),用水需求接近供需平衡的临界状态。在没有采取水资源可持续利用措施的前提下,这种变化必然会向供不应求的方向发展。因此,仅通过水量的增加来提高经济收入,也达不到水资源可持续利用的目的。因此,方案2也不是理想的配置方案。

方案3加大了科技资金投入,一方面通过加大田间节水改造力度,发展田间渠道防渗和管道输水等节水型灌溉措施,降低单位农业产值用水量及井灌渗漏量;另一方面建设污水处理设施,提高工业生产用水的重复利用率,矿泉水生产废水经达标排放至渠道,提高农业灌溉用水量。通过以上措施,产生良好的生态效益和经济效益。结果表明:至2020年,方案3经济产值是方案1的1.6倍,方案2的1.2倍;从各产业用水比例来看,农业、工业、矿泉水业和生活用水比例为35%、13.6%、30%和21%,行业用水比例基本合理。由此可见,从资源、环境、经济等角度考虑,方案3为可选的方案。

方案4调整了产业用水结构。该方案从优水优用的原则出发,引入蓟县城关岩溶水解决区内生活用水的需求,余水集中用于建设大型矿泉水企业,从而提升矿泉水产业的市场份额,带动整体经济产值的增加。结果表明,方案4经济产值是方案3的1.5倍左右。至2020年,农业、工业、矿泉水业用水比例为36.1%、14.5%和49.4%(生活用水外配),行业用水比例较合理。另外,方案4与方案3具有同价的生态效益。综上所述,方案4在经济、社会及生态等方面均体现了盘山矿泉水田水资源优化配置的合理性,是4个方案中的最优方案。

5 加强矿泉水资源保护的措施

矿泉水一般补给条件较好,但极易遭受污染。针对盘山矿泉水田存在的局部水质污染问题,建议采取以下措施,加强矿泉水资源保护。

a. 卫生防护区的建立。根据《饮用天然矿泉水厂卫生规范》要求,在矿泉水水源地必须设立卫生防护区,在卫生防护区内严禁排灌工业、生活废水和使用农药;严禁修建渗水厕所、渗水坑、堆放废渣或铺设污水管道,并不得有破坏水源地水文地质条件的活动。

b. 沙坑清污及垃圾填埋。研究表明,盘山地区

局部矿泉水生产井周围已发现污染现象,且已发现个别生产井偶有 NO_3^- -N或 NO_2^- -N超标现象,直接威胁现有矿泉水井的生产^[10]。因此,由少量采沙坑积污和积水导致的环境危害是不容忽视的。对已有污水及生活垃圾等废弃物进入的沙坑,要彻底清除污染物,遏制污水下渗,回土填埋沙坑;对没有废弃物覆盖的沙坑坑底进行防渗处理,特别是靠近污染源的沙坑,利用渗透性较弱的黏性土进行坑底处理,雨季来临时可作为蓄水池或干净水塘,增加可供水量。

c. 污水处理。按《中华人民共和国水污染防治法》、《水污染物排放许可证管理暂行办法》、《饮用水水源保护区污染防治管理规定》等政策法规的相关规定,对盘山地区已存在的从事排放含有高浓度污染物的企业,责令其停产、转产,防止进一步排放有毒有害污染物污染矿泉水。对其他的危害矿泉水水质污染的排污企业,建立污水集中处理站,生产污水经达标处理后,方可排放。

参考文献:

- [1] 李桂玲,王国良,李学宁,等.天津市蓟县官庄盆地天然矿泉水田水化学特征及形成条件[J].水文地质工程地质,2007(4):57-60.
- [2] 许文帅,李希武,陈天生.盘山矿泉水成因及开发条件[J].地质找矿论丛,1996,10(3):54-62.
- [3] 丁雍.天津雀巢天然矿泉水有限公司2#井地质环境调查报告[R].天津:天津市地质环境监测总站,2007.
- [4] 马军霞,左其亭.基于嵌入式系统动力学的人水系统模拟及应用[J].水利水电科技进展,2007,27(6):6-9.
- [5] 黄莉新.水资源承载力评价方法探讨[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):613-617.
- [6] 徐建新,郝志斌,蒋晓辉,等.区域水资源系统动力学特征分析[J].水科学进展,2008,19(4):519-524.
- [7] 袁汝华,耿小娟,邱德华.区域水资源供需的系统动力学仿真[J].水利经济,2007,25(4):7-9.
- [8] 黄莉新.江苏省水资源承载力评价[J].水科学进展,2007,18(6):879-883.
- [9] 蓟县人民政府地下水资源管理办公室.天津市蓟县地下水资源开发区域规划报告[R].蓟县:蓟县人民政府地下水资源管理办公室,1995.
- [10] 李学美,赵子军,崔亚莉,等.盘山山前地下水与矿泉水污染成因分析[J].水文地质工程地质,2008(1):112-116.

(收稿日期 2010-05-12 编辑 徐娟)