

水平井开采地下水方案优选的实例研究

郭倩^{a,b}, 牟海斌^{a,b}, 徐嘉璐^{a,b}, 陈泉萌^{a,b}

(长安大学 a. 环境科学与工程学院; b. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 为了合理有效地开采地下水, 科学地设计地下水开采方案非常关键。在陕西省北部神木县境内的合河水源地选择了廊道、辐射井和渗流井3种水平井开采地下水方式, 每种方式设计了多种开采方案, 其中廊道有20种方案, 辐射井有2种, 渗流井有2种。利用 Visual MODFLOW 软件, 以“等效渗透系数”及“渗流-管流耦合模型”为理论基础, 对不同方案进行地下水数值模拟, 并分别计算其平水期和枯水期的取水量。考虑枯水期的衰减程度、施工难度、造价及管理的难易程度等多种因素, 最终确定“4眼渗流井开采”为最佳方案, 其平水期总开采量为 35 400 m³/d, 枯水期总开采量为 27 500 m³/d。

关键词: 地下水; 水平井; 开采方式; 等效渗透系数; 渗流-管流耦合模型; 最佳方案

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0105-04

A Case Study on the Scheme Optimization of Horizontal Wells to Exploit Groundwater

GUO Qian^{a,b}, MOU Hai bin^{a,b}, XU Jialu^{a,b}, CHEN Xiaomeng^{a,b}

(Chang'an University, a. School of Environmental Science and Engineering; b. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to exploit groundwater reasonably and effectively, a scientific design of exploitation plan is very important. In the Hehe water source region of Shenmu County in the north of Shaanxi province, three groundwater exploitation schemes with horizontal wells were selected including the gallery, radial well, and seepage well. Each scheme had several exploitation plans with 20 plans designed for gallery, 2 for radial well, and 2 for seepage well. Numerical simulations of groundwater flow under different schemes were performed using Visual MODFLOW based on the theories of "equivalent permeability coefficient" and "seepage-pipe coupling model", and the water yields in the normal season and dry season were calculated for each exploitation plan. In consideration of the factors such as the attenuation degree of water yield in the dry season, construction difficulty and cost, and management complexity, the plan of "4 seepage wells to exploit groundwater" was regarded as the best plan. The total water yield was 35 400 m³/d in the normal season and 27 500 m³/d in the dry season under this exploitation plan in the study area.

Key words: groundwater; horizontal well; exploitation plan; equivalent permeability coefficient; seepage pipe coupling model; best plan

在薄含水层和低渗透性含水层中开采地下水时, 水平井比垂直井更具明显的优势, 因此, 近年来引起了很多水文地质工作者的研究兴趣。国际上, 不管是解析法还是数值法, 目前基本上都是采用等开采强度或是等水头的线汇来刻画水平井管^[1-5], 但其适用性并未得到严格证明。陈崇希等提出了等效渗透系数的概念与确定方法, 将“水平井-含水层”系统视为含有圆柱形透镜体的非均质含水层, 给出新的水平井流数学模型, 避免了采用线汇刻画水平井管时假定其流量

分布和水头分布的困难。若将竖井的出水口作为水平井管的内边界, 则可以方便地给出边界条件, 这样整个“水平井-含水层”系统就简化为一个非均质介质中定流量抽水或定降深抽水的问题。

在“水平井-含水层”系统中一般是多种流态并存, 其中在含水层介质中地下水流动形态一般为低雷诺数的层流, 符合达西定律。而在“水平井管”中, 因其水力半径较大, 水流的雷诺数一般较大, 所以其中的水流一般为紊流。通过引入

收稿日期: 2013-03-11 修回日期: 2013-06-13 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.019.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972154)

作者简介: 郭倩(1989), 女(蒙古族), 内蒙古四子王旗人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: guoqian19890104@126.com

通讯作者: 王玮(1970), 男, 江西乐平人, 副教授, 博士, 主要从事水资源与环境的教学与科研工作。E-mail: wangwei1@chd.edu.cn

紊流状态等效渗透系数的概念,将其流动定律表示为达西定律的形式,就可以使整个“水平井-含水层”系统中各种流态的流动规律都统一地用达西定律形式来表示。把“水平井管”看作“水平井-含水层”系统中透水性很强的含水介质,就能将渗流和管流耦合起来^[6-14]。基于上述思路,本文在陕西省北部合河水源地分别模拟了廊道、辐射井和渗流井三种地下水开采方式,在综合分析了当地水文地质条件、地方现在及未来发展需求等因素的基础上,避免因过量开采而导致环境问题及次生灾害的发生等问题,确定经济上合理、技术上可行的水平井开采方案。

1 合河水源地基本情况及模型建立

神木县位于陕西省北部的黄河西岸,陕西、山西、内蒙古三省(区)接壤地带。本次研究区合河水源地地属神木县行政区划范围,位于神木县东南边境的黄河河谷区,地处西北内陆,黄河为该研究区内的主要河流。本区从水资源形成条件可分为黄河河谷区和低山丘陵区。黄河河谷区地势平坦,冲洪积层结构松散,含水层岩性以含砾砂层和砂砾卵石为主,孔隙率较大,透水性较强,易于接受大气降水入渗补给,开采状态下还可得到黄河地表水的渗漏补给,地下水开采条件较为优越。低山丘陵区地形切割强烈,黄土或黄土状土呈崩状披盖在基岩上,为透水不含水地层,且分布不连续,不易形成良好的供水含水层。

建立模型时,模型各边界确定如下。研究区东部边界为黄河,在天然条件下,地下水在接受大气降水入渗补给后向黄河排泄,在开采条件下,将激发黄河河水大量渗漏补给地下水,所以将黄河概化为第三类河流边界;西部边界为低山丘陵区与黄河河谷区分界线,基岩透水性差,加之地形破碎,概化为隔水边界;考虑到黄河水面宽广、纵向延伸长,取水工程正常工作时不会影响到黄河上、下游边界,故可将上、下游边界概化为一类定水头边界;顶面为潜水面,在该面上发生着降水入渗、潜水蒸发等垂向水交换作用,故可概化为潜水面边界;底面为三叠系完整基岩,基岩结构致密,裂隙不发育,构成区域隔水底板。

采用廊道、辐射井或渗流井开采地下水时,由于受开采井结构及集水方式影响,井周围地下水三维流特征显著,所以将地下水概化为三维流,水流服从达西定律。根据水文地质概念模型,建立研究区地下水三维稳定流数学模型,利用有限差分数值方法,对研究区采用规则网格进行精细的剖分。平面上网格间距均为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,垂向上根据不同的井结构把第四系及基岩含水层剖分为不同的形式。在野外工作中共做 3 个在研究区分布较均匀的钻孔抽水试验,经过计算得出 3 个渗透系数值,第四系含水层水平渗透系数依次为 19.116 m/d 、 0.682 m/d 、 17.889 m/d ,在大致相同的位置做双环渗水试验,计算出对应的垂向渗透系数依次为 1.675 m/d 、 2.782 m/d 、 1.704 m/d ,根据这 3 个钻孔的位置把研究范围内的黄河河谷区分成 3 个区,每个区分别采用上述参数值进行模拟计算。同理根据计算出的基岩含水层 3 个渗透系数值 0.559 m/d 、 1.106 m/d 、 0.005 m/d 来进行分区赋值。给水度取 0.2。由于合河河谷区面积较小,并且降水入渗量、蒸发排泄量与开采条件下激发的黄河水渗漏补给量相比很

小,故模型建立时可忽略设计开采量之外的源汇项,这样初始水头取为黄河平水期水位值 40 m 。黄河概化为三类边界,边界水位取平水期黄河水位,枯水期水位下降 1 m 。区内黄河河床淤积层厚 1 cm ,渗透系数根据邻区资料并结合经验取值为 0.01 m/d 。

由加拿大 Waterloo 水文地质公司在原 MODFLOW 软件的基础上应用现代可视化技术开发研制的,并于 1994 年首次在国际上公开发行的 Visual MODFLOW 是目前国际上最流行且被各国一致认可的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标准可视化专业软件系统。由于该软件设计新颖的菜单结构允许用户非常容易地在计算机上直接圈定模型区域和剖分计算单元,并可方便地为各剖分单元和边界条件直接在机上赋值。据此在建模过程中设定上述各类条件,以“水平井管”各段与含水层间的交换水量为纽带,建立各开采方案下的三维有限差分数值模型,对河流平水期和枯水期条件下的水平井出水量进行模拟计算^[15]。

2 不同开采方式下的开采方案设计

2.1 廊道

廊道沿黄河平水期水边线进行布设,在廊道下游尾部布设一口竖井(图 1(a))。廊道汇集的水量进入竖井,竖井井壁衬砌处理,使其不进水。设计廊道顶面埋深分别为 2 m 、 3 m 、 4 m 、 5 m 、 6 m ,对应的设计竖井降深分别为 $1\sim 2\text{ m}$ 、 $1\sim 3\text{ m}$ 、 $1\sim 4\text{ m}$ 、 $1\sim 5\text{ m}$ 、 $1\sim 6\text{ m}$ 。这样在合河研究区共设计了不同廊道埋深、不同竖井降深条件下的 20 种地下水开采方案。

2.2 辐射井

辐射井布设时竖井距黄河平水期水边线 50 m ,设计各竖井降深为 5 m 。布设时需要考虑井与井之间的干扰,尽量在相互干扰小的条件下多布井。最终根据竖井之间的间距不同,在合河研究区共设计了两种方案开采地下水,即 10 眼(竖井间距 200 m)和 13 眼(竖井间距 150 m)大口径辐射井(图 1(b))。

2.3 渗流井

本次计算选用各渗流井设计为 5 个硐室,硐室平面位置位于黄河平水期水边线,相邻硐室间间距为 70 m ,各硐室向斜上方分布辐射管,平巷沿黄河平水期水边线布设,竖井距黄河平水期水边线 40 m ,设计各竖井降深为 5 m 。渗流井布设时考虑了各工程间距以不产生显著降深叠加为宜。根据竖井之间的间距不同,合河研究区共设计了两种开采方案,即 3 眼(竖井间距 750 m)和 4 眼(竖井间距 500 m)渗流井(图 1(c))。

3 不同开采方式下各开采方案的遴选

3.1 廊道

对比竖井降深相同的方案可总结出,廊道埋深对廊道的出水量影响不大,随着廊道埋深的减小,对应的地下水降落漏斗分布的范围增大,廊道开采条件下激发的黄河水渗漏补给量增多,但增加的量较小。对比同一埋深条件下,随着竖井降深的增加,廊道内水头逐步下降,从河流到廊道的水头差逐渐增大,这样地下水流动水力坡度加大,导致廊道计算

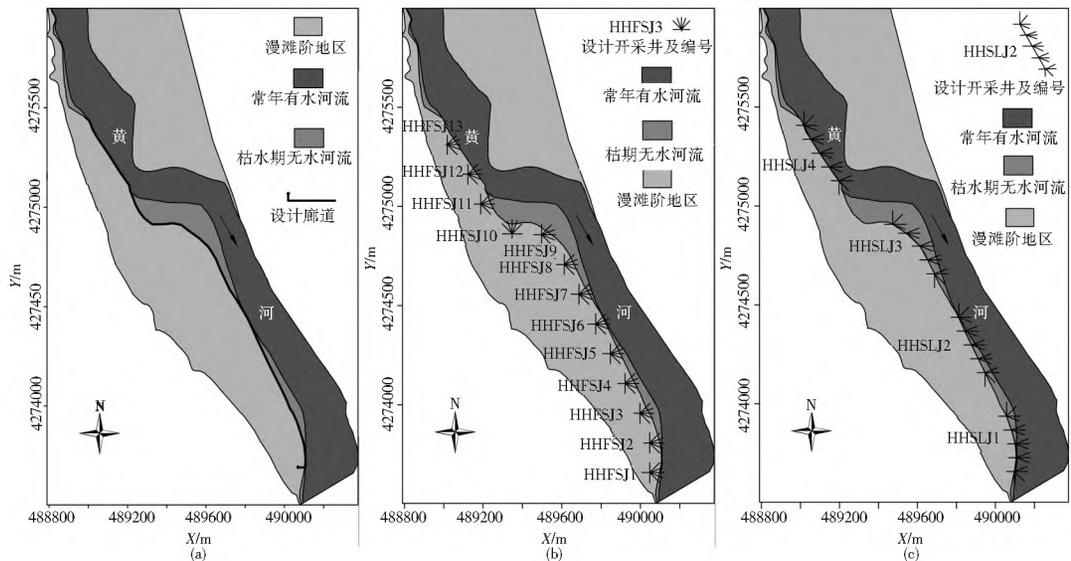


图1 廊道、辐射井和渗流井选取方案的布井图

Fig. 1 Distribution of wells for the plans of gallery, radial well, and seepage well

出水量显著增加。同时出水量与竖井降深不是完全的线性关系,随着降深的增大出水量增加的趋势逐渐变缓,而且竖井降深太大可能会导致出现地下水与河流脱节的现象,河流达到最大补给能力后若再进一步增加竖井降深,其出水量将不再显著增加,甚至随竖井降深增加,单位竖井降深条件下计算出水量反而逐渐减小。

另外,考虑到随着廊道埋深的增加,其施工难度及成本也会急剧增加,同时还需考虑合适的竖井降深,以保证不出现大范围的地下水与河流脱节的现象,因此,最终推荐采用埋深5 m,降深5 m的廊道开采方案开采黄河河谷区的地下水。对该方案进行模拟计算,结果显示合河研究区平水期廊道计算出水量为35 412 01 m³/d,建议开采量为35 400 m³/d。枯水期由于黄河水位下降、水边线后退,将导致黄河水渗漏补给地下水的水力坡度变小,且补给面积变小,使得廊道出水量迅速下降。模拟时把枯水期的河流代入推荐方案的模型中,求解出结果为19 905 98 m³/d,枯水期建议开采量为19 900 m³/d。

3.2 辐射井

针对10眼井方案的模拟结果见表1,对比单井作用和群井作用下的各辐射井总出水量,发现布设的各辐射井间相互干扰较小。对比黄河平水期与枯水期辐射井出水量,枯水期出水量急剧减少的原因与廊道一致。根据10眼辐射井群井共同作用条件下的模拟结果,可确定各辐射井的建议开采量,即建议平水期总开采量为25 400 m³/d,枯水期为18 200 m³/d。

13眼井方案中,辐射井数量的增加使得出水量显著增加,但也会使相邻两辐射井之间的距离减小,相互干扰增大。同样对比单井作用与群井作用下各辐射井的出水量,平水期各辐射井群井作用下总出水量减少了10%,枯水期减少了16.64%(表1)。对比黄河平水期与枯水期辐射井出水量,明显看出枯水期的出水量显著减小。根据13眼辐射井群井共同作用条件下的结果,确定平水期建议总开采量为30 900 m³/d,枯水期为21 700 m³/d。需要注意虽然增加辐射井数

量能显著增加研究区的出水量,但随着辐射井的增多,井与井之间的影响会增大,施工成本会随之增长,因此不建议设计过多的辐射井。根据以上分析,考虑辐射井建设成本及出水量,选择13眼方案开采区内地下水。

表1 辐射井与渗流井总出水量对比

Table 1 Comparison of total water yields between radial well plan and seepage well plan

开采期	辐射井开采量		渗流井开采量		m ³ /d
	10眼方案	13眼方案	3眼方案	4眼方案	
平水期	单井作用	27 015.03	34 421.20	27 366.73	35 588.71
	群井作用	25 481.23	30 973.60	27 347.29	35 425.55
	群井衰减率(%)	5.68	10.00	0.07	0.46
枯水期	单井作用	20 512.85	26 097.36	22 130.46	27 912.08
	群井作用	18 298.56	21 753.78	22 088.80	27 564.20
	群井衰减率(%)	10.79	16.64	0.19	1.25

3.3 渗流井

针对3眼井方案的模拟结果见表1,对比单井作用与群井作用下的各渗流井总出水量,发现布设的渗流井各井间相互干扰很小。同时对比黄河平水期与枯水期渗流井取水量,易看出枯水期渗流井的出水量明显减少,分析同上。根据群井共同作用条件下的模拟结果,可确定各渗流井建议开采量,建议平水期总开采量为27 300 m³/d,枯水期为22 000 m³/d。

在4眼井方案中,渗流井数量的增加能显著增加研究区的出水量,对比单井作用与群井作用下的各渗流井取水量,可得出平水期和枯水期的井间相互干扰都没有显著增加。对比黄河平水期与枯水期渗流井出水量,看出枯水期渗流井的出水量明显减少。根据群井共同作用条件下的模拟结果,确定平水期建议总开采量为35 400 m³/d,枯水期为27 500 m³/d。由于随渗流井数量的增加,出水量增多,但同时井间干扰及施工成本均会随之增长,因此同样不建议设计过多的渗流井。综合考虑渗流井建设成本、取水点数目、单井出水量、总出水量等因素,选择4眼井方案开采区内地下水。

4 最佳方案的选择

在对不同开采形式下的各推荐方案进行模拟计算后,各方案下平枯期的建议开采量结果见表 2。同时可看出,当枯水季节黄河水边线后退、水位下降时,渗流井的衰减量最小。

对比廊道和渗流井的出水量,在布井范围相当的条件,两种取水方式在平水期的出水量相差很小,但因渗流井辐射管深入黄河河床之下,对黄河地表水的激发效果更好,

使得在枯水期黄河水边线后退的条件下,渗流井的出水量明显大的多。对比辐射井和渗流井两种相近的取水方式,从平水期及枯水期黄河水边线后退条件下的出水量方面考虑,渗流井激发黄河水渗漏补给的范围更大,导致渗流井平枯期出水量大且衰减量相对较小。根据以上分析及表 3 中 3 种水平井开采方式优缺点的对比,建议在合河研究区采用 4 眼渗流井方案开采区内地下水资源,建议平水期总开采量为 35 400 m³/d,枯水期总开采量为 27 500 m³/d。

表 2 各推荐方案平水期与枯水期的开采量对比

Table 2 Comparison of water yields between normal season and dry season for every proposed plan

各开采方式下的推荐方案	平水期开采量	建议开采量	枯水期开采量	建议开采量	平枯期差值	减少率(%)
廊道(埋深 5 m,降深 5 m)	35 412.01	35 400	19 905.98	19 900	15 506.03	43.8
辐射井 13 眼方案	30 973.60	30 900	21 753.78	21 700	9 219.82	29.8
渗流井 4 眼方案	35 425.55	35 400	27 564.20	27 500	7861.35	22.2

表 3 各开采方式的优缺点对比

Table 3 Comparison of merits and demerits for every plan

开采方式	优点	缺点
廊道	施工简单且成本较低、取水量大、取水点集中、易管理	开挖廊道会破坏河床、影响河流行洪能力、人工回填滤层易淤积、导致出水量下降
辐射井	出水量大、适用地层广、寿命长、调控范围大	施工较复杂、施工质量和技术水平直接影响出水量、取水点多而分散、不易管理
渗流井	出水量大、取水点少、易管理	施工工艺复杂、造价较高

5 结语

以渗流-管流耦合模型为理论依据,对选取的 3 种水平井开采方式下各自方案在合河水源地模拟计算出的取水量,根据平水期和枯水期对取水量的要求,并且需要考虑廊道、辐射井及渗流井的优缺点,选择最适合在本区开采地下水的方式及相应的方案,最终确定 4 眼渗流井开采地下水为最佳方案,建议平水期开采量 35 400 m³/d,枯水期开采量 27 500 m³/d。

本研究对于在实际应用中选择恰当的水平井开采地下水具有重要的意义。但是研究过程中没有考虑如枯水期黄河水位下降很大,同时伴随水边线大幅后退等极端情况,甚至出现河水与地下水脱节而导致局部出现取水机理更加复杂的饱和-非饱和流同时存在的现象,因此还需更深入地研究“饱和-非饱和、渗流-管流”综合的耦合模型,来进一步准确细致地刻画水平井的取水机理,建立符合其取水机理的地下水、地表水耦合数值模型。

参考文献(References):

- [1] Hantush M S, Papadopoulos I S. Flow of Groundwater to Collector Wells[J]. Hydraulics Division, 1962, (5): 221-244.
- [2] Goode P A, Thambynayagam R K M. Pressure Draw down and Buildup Analysis of Horizontal Wells in Anisotropic Media[J]. SPE Formation Evaluation, 1987, 2(4): 683-697.
- [3] Daviau F, Mouronval G, Bourdarot G et al. Pressure Analysis for Horizontal Wells[J]. SPE Formation Evaluation, 1987, 3(4): 716-724.
- [4] Tarshish M. Combined Mathematical Model of Flow in an Aquifer Horizontal Well System[J]. Ground Water, 1992, 30(6): 931-935.
- [5] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. New York: Elsevier, 1972.
- [6] 陈崇希,林敏.地下水水力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.(CHEN Chong-xi, LIN Min. Groundwater Hydraulics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 郭东屏.地下水水力学[M].西安:陕西科学技术出版社,1994.(GUO Dong-ping. Groundwater Hydraulics[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [8] 陈崇希,万军伟,詹红兵,等.“渗流-管流耦合模型”的物理模拟及其数值模拟[J].水文地质工程地质,2004,(1): 1-8.(CHEN Chong xi, WAN Jun wei, ZHAN Hong-bing, et al. Physical and Numerical Simulation of "Seepage Pipe Coupling Model"[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, (1): 1-8. (in Chinese))
- [9] 陈崇希,林敏.“渗流-管流耦合模型”及其应用综述[J].水文地质工程地质,2008,(3): 70-75.(CHEN Chong xi, LIN Min. "Seepage Pipe Coupling Model" and its Application[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, (3): 70-75. (in Chinese))
- [10] 王玮,畅俊斌,王俊杰.渗流井取水方式地下水允许开采量计算[J].水文地质工程地质,2009,(1): 35-43.(WANG Wei, CHANG Jun bin, WANG Jun jie. Calculation of Groundwater Allowable Yield by Seepage Well Exploitation Plan [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, (1): 35-43. (in Chinese))
- [11] 李俊亭.地下水流数值模拟[M].北京:地质出版社,1989.(LI Jun ting. Groundwater Numerical Simulation[M]. Beijing: Geology Press, 1989. (in Chinese))

(下转第 113 页)

- 分析[J]. 贵州地质, 2012, (2): 108-110. (XI Yi ming, YANG Tai yi. Analyses on Development Direction of Comprehensive Geophysical Ground Water Exploration Technology in karst Mountain Area of Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2012, (2): 108-110. (in Chinese))
- [6] 秦军付. 岩溶地区物探找水的技巧[J]. 广西水利水电, 2012, (3): 1-3. (QIN Jun fu. Skills of Water Search by Geophysical Prospecting in Karst Area[J]. Guangxi Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, (3): 1-3. (in Chinese))
- [7] 张之淦, 陈伟海. 岩溶蓄水构造与找水——以广西来宾小平阳为例[J]. 水文地质工程地质, 2006, (6): 1-3. (ZHANG Zhi gang, CHEN Wei hai. Water bearing Structures in Karst Terrain: A Case Study in Xiaopingyang Area, Laibin, Guangxi[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 6: 1-3. (in Chinese))
- [8] 焦彦杰, 吴文贤, 杨剑, 等. 云南岩溶石山区物探找水方法与实例分析[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 13-15. (JIAO Yan Jie, WU Wen xian, YANG Jian, et al. Geophysical Water Exploration Methods in Stone Mountain Karst Areas and Case Analysis [J]. Geology in China, 2011, 38(3): 13-15. (in Chinese))
- [9] 王伟, 向群. 黔西北地区岩溶水系统划分及找水方向[J]. 贵州地质, 2010, 27(1): 49-52. (WANG Wei, XIANG Qun. Division of Karst Water System and Water Prospecting Direction in Northwest Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2010, 27(1): 49-52. (in Chinese))
- [10] 郑东明, 叶松青, 孟庆龙, 等. 基岩山区找水电测深曲线解释初探[J]. 吉林地质, 2005, 24(1): 22-25. (ZHENG Dong ming, YE Song qing, MENG Qing long, et al. Interpretation of Electrical Sounding Curves of Water Research in the Bedrock Mountain Area[J]. Jilin Geology, 2005, 24(1): 22-25. (in Chinese))
- [11] 彭玉明. 沂南县贫水区找水定井技术研究[J]. 山东国土资源, 2012, 28(1): 34-36. (PENG Yu ming. Research on Borehole Location Techniques in Water Shortage Mountain Areas in Yinan County[J]. Shandong Land and Resources, 2012, 28(1): 34-36. (in Chinese))
- [12] 武选民, 郭建强, 文冬光, 等. “逐步逼近式”找水方法及其在缺水地区水文地质勘查中的应用[J]. 西北地质, 2009, (4): 14-16. (WU Xuan min, GUO Jian qiang, WEN Dong guang. The Successive Approximation Method on Groundwater Exploration and Its Application in Hydrogeological Investigation in Water shortage Areas[J]. Northwestern Geology, 2009, (4): 14-16. (in Chinese))
- [13] 陈鑫发, 牛建设. 空气潜孔锤钻进技术在豫西抗旱找水打井施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2001, 38(10): 37-39. (Chen Xin fa, Niu Jian she. Construction for Drought Resistance in Westem Henan[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2001, 38(10): 37-39. (in Chinese))
- [14] 刘新号. 基于蓄水构造类型的山区综合找水技术[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 24-26. (LIU Xin hao. Integrated Techniques of Locating Groundwater in Mountain Areas Based on Groundwater impounding Types[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(6): 24-26. (in Chinese))
- [15] 王祥永, 王建, 彭超, 等. 泰安市山丘区地下水找水方向[J]. 山东国土资源, 2011, 27(11): 26-28. (WANG Xiang yong, WANG Jian, PENG Chao, et al. Direction of Underground Water Exploitation in Hilly Areas in Tai'an City[J]. Shandong Land and Resources, 2011, 27(11): 26-28. (in Chinese))

(上接第 108 页)

- [12] Chen C X, Jiao J J. Numerical Simulation of Pumping Test in Multilayer Wells with Non Darcy Flow in the Wellbore[J]. Ground Water, 1999, 37(3): 465-474.
- [13] 王允麒, 王涟, 孙存忠. 辐射管集水计算模型研究[J]. 工程勘察, 1994, (5): 26-28. (WANG Yun qi, WANG Lian, SUN Cun zhong. The Research on Calculated Model of Water Collection into the Radial Well[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1994, (5): 26-28. (in Chinese))
- [14] 陈崇希. 岩溶管缝-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1995, 20(4): 361-366. (CHEN Chong xi. Groundwater Flow Model and Simulation Method in Triple Media of Karstic Tube Fissure Pore[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(4): 361-366. (in Chinese))
- [15] 曾献奎, 卢文喜, 王伟卓, 等. 地下水与地表水耦合模拟模型研究与展望[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 47-49. (ZENG Xian kui, LU Wen xi, WANG Wei zhuo, et al. The Research and Prospection of Groundwater and Surface Water Coupling Model[J]. Yellow River, 2009, 31(11): 47-49. (in Chinese))