

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.032

宿州市城西水源地地下水限采及其效果分析

孙凤荣^{1,2}, 温忠辉^{1,2}, 束龙仓^{1,2}, 荆艳东^{1,2}, 鲁程鹏^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:针对宿州市城西水源地由于长期开采地下水、井位布局不合理,且地下水补给有限,已严重超采,形成了若干个地下水水位降落漏斗,直接威胁城区供水安全的现实,通过数值模拟法计算宿州市城西水源地的地下水可开采量,采用开采系数法对水源地进行地下水超采评价,并制定相应的限采方案,预测限采后地下水水位的变化,分析限采效果。结果表明,现状年 2010 年城西水源地地下水开采系数为 1.30,属于严重超采;实施限采方案后,规划年 2015 年、2020 年,地下水开采系数分别为 1.21、0.97,限采效果较明显。

关键词:地下水水位;地下水超采;超采评价;限采方案;开采系数;水源地;供水安全

中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)01-0184-06

Analysis of groundwater pumping-limit and effect in Chengxi well field in Suzhou City

SUN Fengrong^{1,2}, WEN Zhonghui^{1,2}, SHU Longcang^{1,2}, JING Yandong^{1,2}, LU Chengpeng^{1,2}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Because of the long-term exploitation, unreasonable distribution of pumping wells and limited groundwater recharge, Chengxi well field in Suzhou City was over-drafted seriously and formed several cones of depression, threatening the safety of water supply directly. Allowable groundwater withdrawal of Chengxi well field in Suzhou City was calculated through numerical simulation method, and then the overexploitation situation was evaluated based on the exploitation coefficient method, to formulate the limited pumping scheme, predict the groundwater level after conducting the scheme, and analyze the recovery effect. The results showed that, in the year of 2010, the exploitation coefficient of Chengxi well field was 1.30, and the well field was overexploited seriously. After the implementation of limited pumping scheme, in the year of 2015 and 2020, the exploitation coefficient would be 1.21 and 0.97 respectively, showing the effect of pumping-limit scheme would be significant.

Key words: groundwater level; groundwater overexploitation; overexploitation evaluation; pumping-limit scheme; exploitation coefficient; well field; safety of water supply

宿州市地处东经 116°09′~118°10′,北纬 33°18′~34°38′,辖砀山县、萧县、灵璧县、泗县、埇桥区 4 县 1 区(图 1),总面积 9 787 km²,人口 642.07 万。宿州市城西水源地已被列为国家第二批重要饮用水水源地,是宿州市城区唯一的饮用水水源地。由于

长期开采地下水,井位布局不合理,且地下水补给有限,水源地地下水已严重超采,形成 3 个较大的地下水水位降落漏斗。若不对水源地采取限采措施,地下水水位降落漏斗将继续扩大,有可能产生地面沉降等地质灾害^[1-4],直接威胁到城区的供水安全。为

基金项目:国家自然科学基金(41172203)
作者简介:孙凤荣(1991—),女,硕士研究生,研究方向为地下水数值模拟及开发利用。E-mail:sunfengrong1@sina.com
通信作者:温忠辉,副教授。E-mail:wenzh2812@sina.com

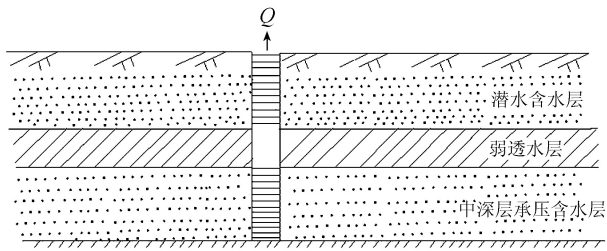


图2 宿州市主采含水层系统划分示意图

将水文地质概念模型概化如下:潜水、承压水均概化为非均质各向同性,同一参数分区内可视为均质,水流服从 Darcy 定律,地下水流态为二维非稳定流^[7]。

根据水文地质概念模型,建立相应的数学模型。

潜水数学模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_1 (H_1 - B) \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_1 (H_1 - B) \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] - \\ K' \frac{H_1 - H_2}{m'} + w_1 - Q_E - Q_{V_1} = \mu \frac{\partial H_1}{\partial t} \\ H_1(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_1^0(x, y) \quad (x, y) \in D, t = 0 \\ K_1 (H_1 - B) \frac{\partial H_1}{\partial n_1} \Big|_{r_2} = q_1(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_2, t > t_0 \end{array} \right. \quad (1)$$

承压水数学模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_2 M_2 \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_2 M_2 \frac{\partial H_2}{\partial y} \right) + \\ K' \frac{H_1 - H_2}{m'} - Q_{V_2} = \mu^* \frac{\partial H_2}{\partial t} \\ H_2(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_2^0(x, y) \quad (x, y) \in D, t = 0 \\ T \frac{\partial H_2}{\partial n_2} \Big|_{r_2} = q_2(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_2, t > t_0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: K_1 、 K' 、 K_2 分别为潜水含水层、弱透水层、承压含水层的渗透系数, m/d; H_1 、 H_2 分别为潜水含水层水位和承压含水层水位, m; B 为潜水含水层底板标高, m; w_1 为潜水含水层补给强度, m/d; Q_E 为潜水含水层蒸发强度, m/d; Q_{V_1} 、 Q_{V_2} 分别为潜水含水层、承压含水层开采强度, m/d; μ 为给水度; μ^* 为弹性释水系数; H_1^0 、 H_2^0 分别为潜水和承压水初始水位, m; n_1 、 n_2 分别为潜水含水层、承压含水层边界外法线方向; M_2 、 m' 分别为承压含水层厚度和弱透水层厚度, m; T 为导水系数, m^2/d ; q_1 、 q_2 分别为潜水和承压水二类边界单宽流量, m^2/d ; t 为时间, d; t_0 为初始时刻; D 为研究区范围; Γ_2 为二类流量边界。

将研究区自上而下剖分为 3 层,每一层均剖分为 100 行、100 列,共计 10 000 个单元格。研究区北部为宿北断裂带,东西横贯全区,全长大于 120 km,为一隔水断裂,因此处理为二类流量边界中的隔水

边界。其他周边界由于侧向径流量比较稳定,概化为二类流量边界。根据研究区水文地质条件进行参数分区,其中渗透系数分区见图 3,潜水含水层给水度分区见图 4,承压含水层弹性释水系数分区见图 5。运用 Visual MODFLOW 软件对模型进行求解。模拟时段为 2006 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日,以月为应力期。

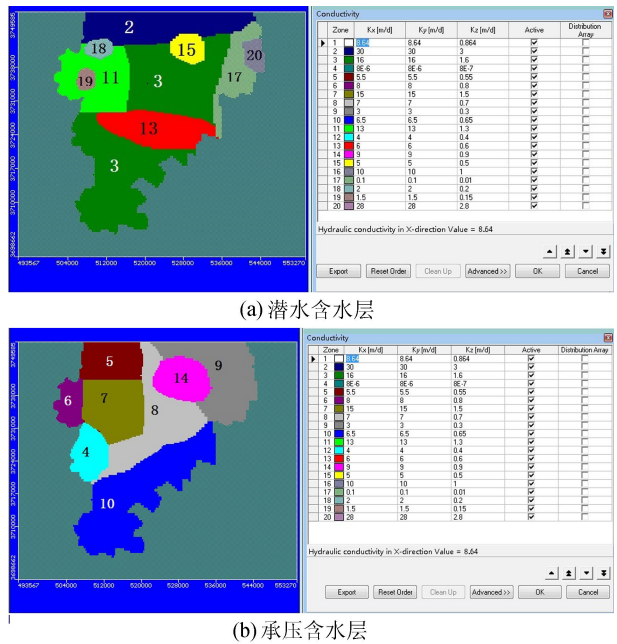


图3 研究区渗透系数分区

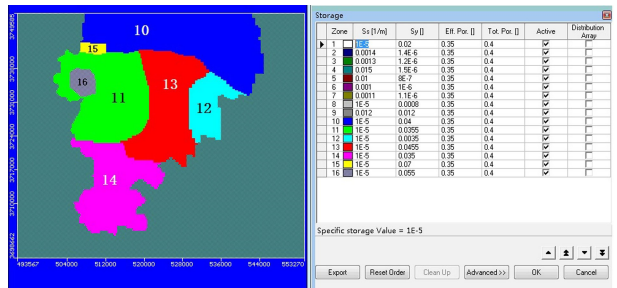


图4 潜水含水层给水度分区

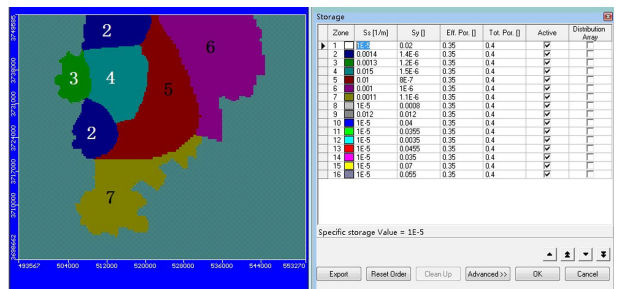


图5 承压含水层弹性释水系数分区

2.2 模型的校正与验证

为使数学模型正确反映研究区水文地质条件,需要根据观测水位及其动态变化曲线对模型进行校正和验证。校正时段选取 2006 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 31 日,验证时段选取 2007 年 1 月 1 日到

2007年12月31日。研究区共3眼潜水观测孔和3眼承压水观测孔,拟合效果见图6~11。从图6~11可见,观测水位与计算水位相近,拟合效果较好。

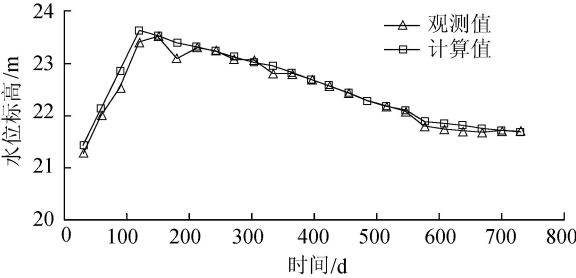


图6 潜水观测孔蒿沟拟合结果

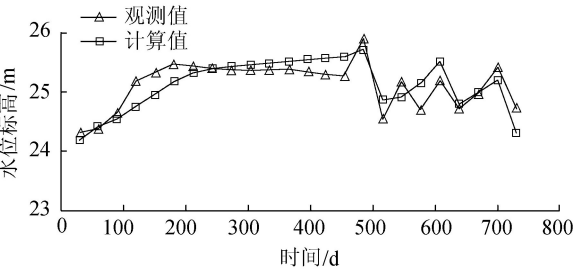


图7 潜水观测孔612拟合结果

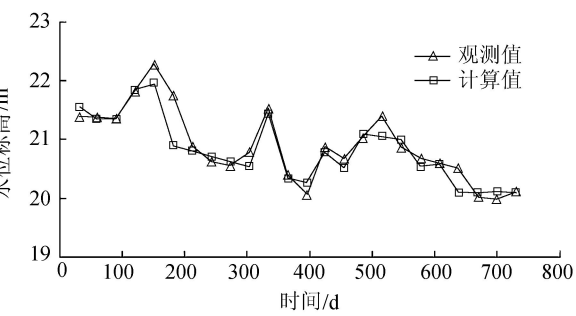


图8 潜水观测孔101拟合结果

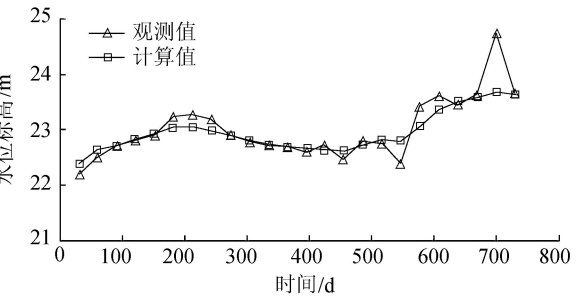


图9 承压水观测孔608B拟合结果

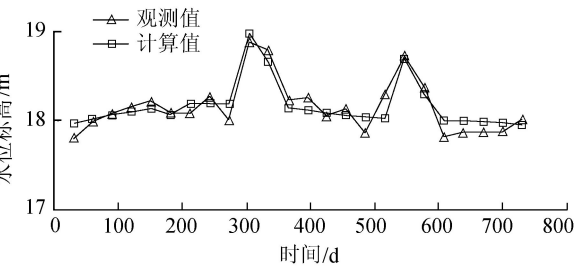


图10 承压水观测孔2118B拟合结果

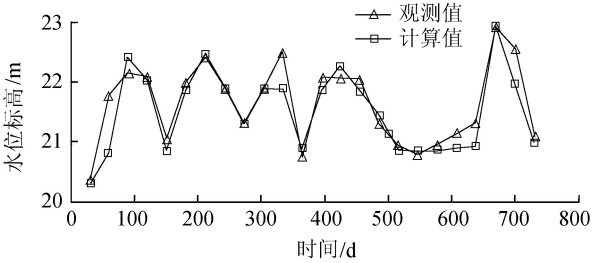


图11 承压水观测孔1004B拟合结果

2.3 地下水可开采量计算

应用已建立的地下水流数值模型来计算2010年城西水源地的地下水可开采量。开采条件下地下水的水量均衡可以简化为下式：

$$Q_{\text{可开}} = \Delta Q_{\text{补}} + \Delta Q_{\text{排}} + EF \frac{\Delta h}{\Delta t} \tag{3}$$

式中： $Q_{\text{可开}}$ 为年地下水可开采量，万 m^3 ； $\Delta Q_{\text{补}}$ 为地下水开采时的补给增量，万 m^3 ； $\Delta Q_{\text{排}}$ 为地下水开采时天然排泄量的年减少量，万 m^3 ； E 对于潜水含水层为给水度，对于承压含水层为弹性释水系数； F 为均衡区面积，万 m^2 ； Δt 为开采时间，a； Δh 为在开采时间段内开采影响范围内的平均水位降深，m/a。

地下水开采时的补给增量 $\Delta Q_{\text{补}}$ ，也就是地下水开采时夺取的额外补给量。通过对模型进行水量均衡计算，可得出 $Q\Delta_{\text{补}}=2800$ 万 m^3 。

减少的天然排泄量 $Q_{\text{排}}$ ，如开采后地下水向河流的排泄量的减少、潜水蒸发的减少、侧向流出量的减少等，它的最大极限等于天然排泄量。通过模型可以算出 $\Delta Q_{\text{排}}=725$ 万 m^3 。

可动用的储存量 $EF \frac{\Delta h}{\Delta t}$ ，是含水层中永久储存量所提供的一部分。《安徽省淮北地区地下水限采规划研究》针对宿州市地下水资源的超采情况，制定了相应的限采规划，以压缩地下水的开采。结合文献[7]，确定平均水位降深 Δh 取2.5 m/a。根据研究区水文地质条件，潜水含水层给水度 μ 取为0.045，承压含水层弹性释水系数 μ^* 取为0.0018，城西水源地面积 $F=35000$ 万 m^2 ，开采时间 Δt 取为1 a，则可动用的年储存量 $EF \frac{\Delta h}{\Delta t}=4095$ 万 m^3 。

由以上分析计算，可以得到2010年城西水源地的可开采量 $Q_{\text{可开}}=7620$ 万 m^3 。

3 水源地地下水限采方案分析

3.1 水源地现状年超采评价

根据水利部颁发的SL286—2003《地下水超采区评价导则》^[8]（以下简称导则）和《全国地下水超采区评价技术大纲》^[9]，超采评价方法可大致分为3

类:开采系数法、水位动态法^[10]、引发问题法^[11]。由于开采系数法能够直观地判断出一个区域是否发生超采,因此本文采用该方法对水源地作超采评价。

目前,国内外大多将可开采量或安全开采量作为衡量地下水开采是否超量的标准^[8,12-14],因此,本文采用导则中规定的地下水可开采量作为衡量标准。年均地下水开采系数计算公式为

$$k = \frac{Q_{\text{开}}}{Q_{\text{可开}}} \tag{4}$$

式中: k 为年均地下水开采系数,; $Q_{\text{开}}$ 为地下水开发利用时期内年均地下水实际开采量,万 m^3/a 。

根据文献^[15],考虑到地下水的调蓄功能,制定开采系数评价标准,见表 1。

表 1 开采系数评价标准

开采区	非超采区		超采区	
	潜力区	补给均衡区	一般超采区	严重超采区
k	<0.95	[0.95,1.05)	[1.05,1.20]	>1.20

2010 年城西水源地地下水可开采量 $Q_{\text{可开}} = 7620 \text{ 万 m}^3$,据实际调查资料,当年水源地实际开采量 $Q_{\text{开}} = 9920 \text{ 万 m}^3$,可知城西水源地发生了超采,开采系数 $k = 1.30$,属于严重超采。因此,急需对水源地进行地下水超采评价,并制定科学可行的地下

水限采方案。

3.2 水源地限采效果分析

根据导则,以 2010 年为现状水平年,2015 年为近期规划水平年,2020 年为远期规划水平年。依据水利部《关于加强地下水超采区水资源管理工作的意见》,在 2015 年和 2020 年底,现状年的地下水超采规模^[16]将分别被压缩 30% 和 80%。

2010 年城西水源地地下水超采量为 2 300 万 m^3 ,则 2015 年和 2020 年的超采压缩计划见表 2。

表 2 城西水源地各规划年地下水限采方案 万 m^3

2010 年		2015 年		2020 年	
开采量	超采量	压缩量	开采量	压缩量	开采量
9920	2300	690	9230	1840	7390

根据限采方案,利用所建地下水流数值模型,预测各规划年的地下水水位,以反映限采效果。水源地现状年与规划年潜水等水位线见图 12,承压水等水位线见图 13。

由图 12~13 可知,从现状年至规划年,随着地下水限采方案的实施,城西水源地的地下水水位总体呈上升趋势,地下水水位降落漏斗面积呈减小趋势。2010 年潜水水位降落漏斗中心水位标高为 8.54 m,2015 年为 10.96 m,2020 年为 15.08 m;2010

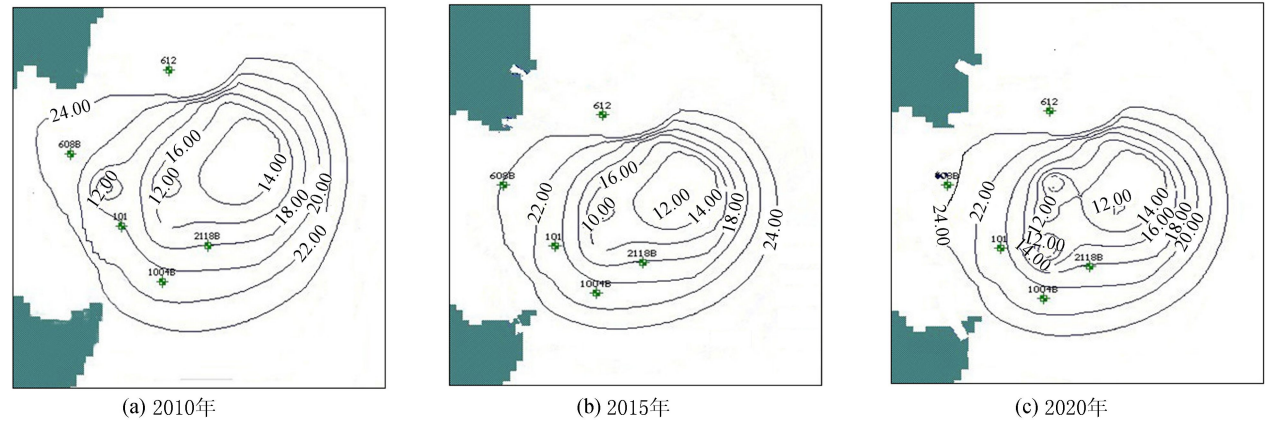


图 12 现状年与规划年潜水等水位线(单位:m)

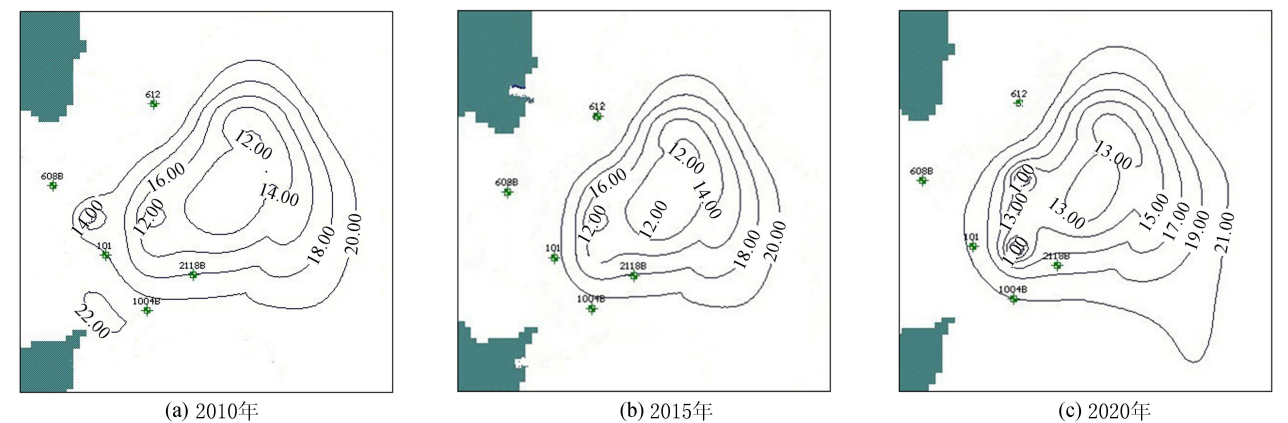


图 13 现状年与规划年承压水等水位线(单位:m)

年承压水水位降落漏斗中心水位标高为 3.89 m, 2015 年为 8.92 m, 2020 年为 14.97 m。2010 年潜水水位降落漏斗面积为 75.17 km², 2015 年为 40.91 km², 2020 年为 25.04 km²; 2010 年承压水水位降落漏斗面积为 190.49 km², 2015 年为 146.90 km², 2020 年为 109.53 km²。

由于水源地可开采量年际变化比较小, 因此假定规划年地下水可开采量均为 7 620 万 m³, 可以算出 2015 年、2020 年水源地的地下水开采系数分别约为 1.21、0.97。因此, 2015 年底水源地地下水超采状况有所改善, 2020 年底已处于采补平衡状态。由以上分析可知, 该限采方案可行, 限采效果显著。

4 结 语

a. 建立城西水源地地下水流数值模型, 并运用 Visual MODFLOW 软件对模型进行校正及验证, 计算出现状年 2010 年城西水源地的地下水可开采量为 7 620 万 m³。

b. 采用开采系数法对城西水源地进行超采评价。现状年水源地开采系数为 1.30, 属于严重超采。

c. 对水源地制定限采方案, 2015 年、2020 年底现状超采规模分别压缩 30% 和 80%。利用模型预测水源地地下水水位, 结果显示, 到 2020 年底, 水源地开采系数约为 0.97, 已处于采补平衡状态。

地下水的超采评价方法有多种, 开采系数法虽然能够直观地判断出一个区域是否发生超采, 但受开采量统计精度、可开采量计算精度等多种因素影响。在以后的研究中, 应提高实际开采量统计结果的精度, 使可开采量计算结果更加精确, 并采用多种方法对研究区的超采状况做出评价, 使评价结果更加可靠。

参考文献:

[1] MARIA V E, CARLOS D. Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the highlands of Mexico [J]. Environmental Management, 2002, 29(2): 266-278.

[2] 束龙仓, BASIL T I, 刘佩贵, 等. 济宁市漏斗区地下水超采修复的风险评价[J]. 工程勘察, 2007(12): 33-38. (SHU Longcang, BASIL T I, LIU Peigui, et al. Risk assessment of groundwater overdraft restoration in Jining funnel area[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007(12): 33-38. (in Chinese))

[3] CUSTODIO E. Aquifer overexploitation: what does it mean? [J]. Hydrogeology Journal, 2002(10): 254-277.

[4] 王恩, 束龙仓, 刘波. 地下水系统对水资源开发利用方案的时空响应[J]. 吉林大学学报: 地球科学报, 2010,

40(3): 617-630. (WANG En, SHU Longcang, LIU Bo. Tempo-spatially responses of the groundwater system to water resources exploration and utilization schemes [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(3): 617-630. (in Chinese))

[5] 陶月赞, 席道瑛. 安徽淮北平原地下水超采评价与限采规划[J]. 工程勘察, 2006(1): 30-33. (TAO Yuezan, XI Daoying. Overdraft evaluation and pumping-limit planning of groundwater in Huaibei Plain of Anhui Povince [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(1): 30-33. (in Chinese))

[6] 束龙仓, 陶月赞. 地下水水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 121-124.

[7] 殷玉忠. 淮北、宿州两市地下水限采规划研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.

[8] SL286—2003 地下水超采区评价导则[S].

[9] 中华人民共和国水利部. 全国地下水超采区评价技术大纲[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2012.

[10] 方燕娜, 林学钰, 廖资生. 吉林中部平原区地下水动态变化特征和地下水超采状况的判定[J]. 水文, 2005, 25(5): 19-22. (FANG Yanna, LIN Xueyu, LIAO Zisheng. Analysis of dynamic variation of groundwater level and over-draft in the plain area of central Jilin [J]. Journal of China Hydrology, 2005, 25(5): 19-22. (in Chinese))

[11] 单兰波, 汪家权. 地下水超采评价研究的现状与发展[J]. 低碳世界, 2013, 11(21): 110-111. (SHAN Lanbo, WANG Jiaquan. The present situation and development tendency of groundwater overexploitation evaluation [J]. Low Carbon World, 2013, 11(21): 110-111. (in Chinese))

[12] FINK M. Overexploitation and permissible exploitation of groundwaters [C]//The 23th IAH proceedings. Valencia: CRC Press, 1992: 51-55.

[13] 吴季松. 21 世纪初期中国地下水资源开发利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 15-17.

[14] 陶月赞, 席道瑛. 淮北市岩溶水源地超采评价[J]. 水文地质工程地质, 2005(3): 46-50. (TAO Yuezan, XI Daoying. Overdraft evaluation and pumping-limit of Huaibei karst water field [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005(3): 46-50. (in Chinese))

[15] 杨国强, 孟婧莹, 苏小四, 等. 地下水超采评价的指标体系与评价过程[J]. 节水灌溉, 2012(8): 34-38. (YANG Guoqiang, MENG Jingying, SU Xiaosi, et al. A briefly review of evaluation index and method of groundwater overdraft [J]. Water Saving Irrigation, 2012(8): 34-38. (in Chinese))

[16] 陶月赞, 席道瑛. 孔隙承压水盆地超采评价与限采规划[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 624-628. (TAO Yuezan, XI Daoying. Evaluation of overdraft and pumping-limit of confined groundwater aquifer [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 624-628. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 03 - 27 编辑: 彭桃英)