

黄河下游地区浅层地下水资源特征及保护建议

王薇,张太平,王强,张红军,刘洋,赵慧,王岳林,张瑞华,王奎峰

山东省地质科学研究院,国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室,

山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室,济南,250013

内容提要:随着黄河下游城市经济的快速发展,有限的黄河水资源与不断增长的居民用水之间的矛盾日趋突出。为提高应急供水的保障程度,保障人民群众生命安全,维护社会稳定,本文以利津县浅层地下水资源调查为例,采用现场地质调查、物探、水质分析、水文地质孔钻探与抽水试验等相互结合的试验方法查清了该地区可利用的地下水资源分布和具体资源量。并基于以上研究成果,结合各种取水方法的适用条件,提出了浅层地下水水源地范围和开发利用方案。研究成果为利津县的供水安全和人民生活水平的提高,提供水资源保障具有十分重要的现实意义和战略意义。

关键词:黄河下游地区;应急地下水;调查评价;保护建议

城市供水是城市和乡村基础设施的重要组成部分,供水安全直接关系到城市的发展水平。随着我国城市化战略的加快实施,在水资源紧缺、水质污染加剧、突发水污染日益频繁的形势下,城市供水安全问题已不容忽视了解、摸清区域地下水资源现状是解决用水安全与水资源可持续利用的当务之急(Yao Xiuju et al., 2002; Yi Shuping et al., 2006; Yang Lizhi et al., 2010; Zheng Sanyuan, 2011; An Lesheng, 2012; Liu Yong et al., 2014)。为尽可能精确计算地下水储量及开采潜力,国内外学者进行了深入研究,取得了一些代表性的成果。其中国外研究起步较早,如 Franchini et al. (1991) 利用 MODFLOW 软件模拟预测地下水径流过程; Hellstrom et al. (2000) 建立了可持续发展的城市水资源管理系统,分析了瑞典城市供水系统对环境的影响和社会的影响,明确水资源的评价标准和指标体系; Singh et al. (2011) 利用卫星数据,综合考虑地貌和地球物理方法,再加上电阻率调查得出研究区含水层的空间和深度变化,对印度地区的地下水资源进行评估。我国地下水研究方面起步较晚,但

进步飞速,如 Mao Le et al. (2019) 基于水文地质条件和土体力学特征综合分析,推算沿海各县市地面沉降约束下的地下水可采资源量; Fu Xiaogang et al. (2019) 为了准确量化与优化地下水水源地开采量采用数值模拟软件,建立起整个盆地地下水流的计算模型,对地下水开采潜力进行了较为精确的评价; Liang Jing (2018) 在分析雷州半岛水文地质条件的基础上,应用水文学与地下水动力学原理,建立雷州半岛地下水补给量和地下水允许开采量的计算模型。以上各位学者的研究结果表明,保障地下水安全是许多突发性和极端性气候事件发生后最为迫切需要解决的问题之一,尤其是在人口高度集中的城市地区(Cao Jianfeng et al., 2004; Zhao Yunzhang et al., 2004; Lan Ziting, 2005; Yu Litao., 2011; Wang Weiqi, 2014; Zhang Jiaxing et al., 2016)。近些年由于黄河枯季水量减少及水位下降等原因,黄河下游地区水资源紧缺问题已经凸现。以水资源紧张、水污染严重为特征的水危机严重制约着黄河下游城市,如东营、滨州等地市的社会经济可持续发展。因此,利用地下水含水层的储藏

注:本文为国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室和山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室联合项目(编号 kfkt201803)、山东省地勘项目(编号 鲁地勘字(2018)8号)资助成果。

收稿日期:2019-07-23;改回日期:2019-09-16;责任编辑:周健。

作者简介:王薇,女,1980年生。高级工程师,水工环专业。Email: veily91@163.com。通讯作者:张红军,男,1987年生。博士后,水工环专业。Email: sduhongjun@163.com。

引用本文:王薇,张太平,王强,张红军,刘洋,赵慧,王岳林,张瑞华,王奎峰. 2019. 黄河下游地区浅层地下水资源特征及保护建议. 地质学报, 93(s1):93~99, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019215.

Wang Wei, Zhang Taiping, Wang Qiang, Zhang Hongjun, Liu Yang, Zhao Hui, Wang Yuelin, Zhang Ruihua, Wang Kuifeng. 2019. Characteristics and protection of shallow groundwater resources in the lower reaches of the Yellow River. Acta Geologica Sinica, 93(s1):93~99.

和调蓄能力,为紧急状态下提供后备水源地和优质地下水资源,将有效提高黄河下游地区城市的供水安全。其中利津县位于山东省北部,隶属东营市,为典型的黄河下游城市。目前,利津县绝大部分供水来自黄河,包括大部分的农业、工业和全部的居民生活用水,而经济的快速发展,对水资源的需求量越来越大,有限的黄河水资源与不断增长的用水之间的矛盾日趋突出。因此,本文以利津县浅层应急地下水调查为例,从调查手段、浅层地下水特征、地下水质量及储量几个方面研究其应急供水的可能性,希望为该地区应急水源地建设提供一定的参考价值。

1 研究区概况

利津县位于山东省东北部,渤海西南岸,黄河进口段左侧,是黄河三角洲高效生态经济区和山东半岛蓝色经济区的重要组成部分。地跨东经 118°07′~118°54′,北纬 37°22′~38°12′。县境呈西南至东北向狭长带状,南北长 102.5km,东西宽 8.5~25km,总面积 1301.02km²。

在利津县辖区地表下数百米以内分布有多层系统结构的粉砂、淤泥和黏土,辖区内地下水可以划分为:浅层地下淡水、深层地下淡水和地下微咸水和咸水。

浅层地下淡水主要分布在现黄河河漫滩区及利津县南宋—王庄、盐窝—北岭近黄河一带的缓岗区,淡水砂层底界面埋深近黄河深远黄河浅。岩性为粉土、粉砂,厚度上游大下游小,南部大北部小,近黄河大远黄河小,实际淡咸水呈渐变关系,无明显界面,而且往往处于同一岩性含水层中。富水性同样具有上游好下游差、南部好北部差、近黄河好远黄河差的规律。浅层地下淡水主要靠黄河侧渗补给,其次为降水入渗、灌溉回渗、河渠渗漏,总体径流方向为由西南向东北,由于黄河的侧渗,近黄河地带为背河方向径流。

2 浅层地下水资源调查

本文主要利用水位统测、动态监测、物探、钻探、渗水试验、抽水试验等工作手段,开展水文地质调查工作,重点调查浅层淡水分布区和深层淡水分布区。

调查结果表明,利津县浅层地下水淡水资源主要分布在黄河河道、近黄河地带,包括北宋镇、利津街道办事处南部、盐窝镇、凤凰街道办事处南部一带。

通过水质分析得出:利津县浅层地下水淡水的

水化学类型主要为 Cl·HCO₃-Na、HCO₃·Cl-Na·Mg·Ca 型水;咸水的水化学类型以 Cl-Na 型为主,其次为 Cl·HCO₃-Na·Ca 型水;盐水的水化学类型为 Cl-Na 型水。阴离子以 Cl⁻ 和 HCO₃⁻ 为主,Cl⁻ 含量一般在 29.0~21571.32mg/L 之间,空间上的变化规律为由南向北、由东向西离子含量逐步增加;HCO₃⁻ 含量在 204.75~1078.77mg/L,主要存在于淡水区,其含量由南向北逐渐减少;局部如利津县生活垃圾场附近 SO₄²⁻ 含量偏高,与地下水污染有关。阳离子以 Na⁺ 为主,含量在 69.48~11755.0mg/L,越近海浓度越高;Mg²⁺ 主要分布在淡水区,离子含量较 Na⁺ 低,在 6.07~1693.41mg/L 之间,境内含钙量较低,在 6.42~698.50mg/L 之间(图 1)。

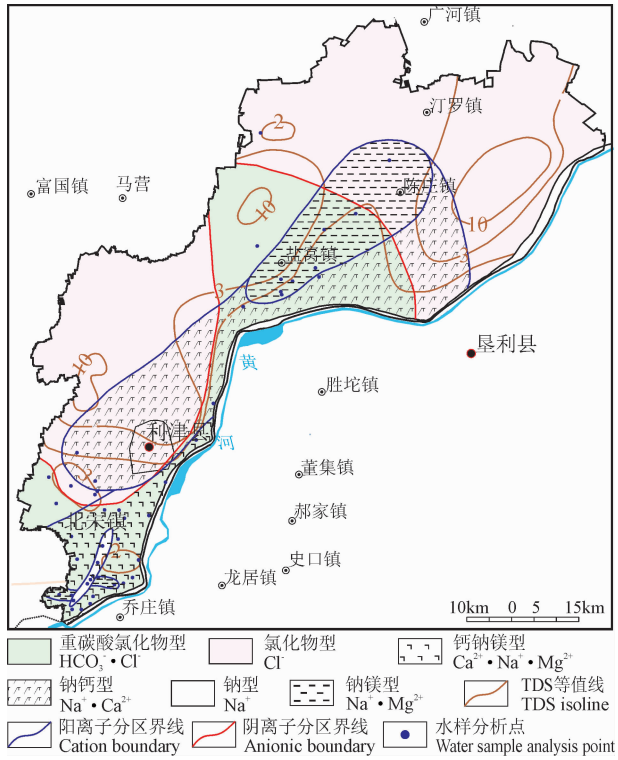


图 1 利津县浅层地下水水化学图

Fig. 1 Hydrochemical map of shallow groundwater in Lijin County

为确定含水层的分布范围岩性、厚度、埋藏深度及富水地段、地下水埋藏深度等关键参数,开展了大量物探工作。根据各剖面拟断面图中视电阻率等值线梯度带变化规律及物探测井成果,详细划分了调查区浅层地下淡水的分布范围:大体沿黄河北岸的南宋—东孙家—蔡家夹河一带、盐窝镇老董附近,底板埋深一般为 15~30m,及盐窝镇—北岭乡南、虎滩乡的北苏秦河附近,其底板埋深约为 10~20m

之间。

为查明地表水与地下水的水力联系,查明咸水与淡水界面动态特征,监测地下水水位的动态变化特征,分析地下水动态影响因素,确定地下水动态类型,为水资源的计算和验证提供依据。在该研究区域共部署了 20 个水位动态监测点和 19 个水位统测点,动态监测点按 6 次/月测量水位,水位统测点枯、丰水期各开展一次水位统测。通过对动态监测数据分析得出:该地区地下水动态主要受气象因素影响,此外还与黄河水灌溉回渗有关,年内水位表现为降—升—降的周期变化,水位动态与降水分配过程和春季黄河水灌溉回渗过程基本一致,动态类型主要为气象-蒸发型,一般年内变化分几个阶段,每年 3~4 月春灌开始,地下水位开始升高,出现一个小峰值,5~6 月为枯水期,水位下降,6 月底达到最低值,7~9 月为丰水期,水位上升,8 月水位达到最高值,10 月至次年 2 月为调整期(平水期)。多年水位动态基本保持均衡。部分监测点及监测结果如图 2 所示。

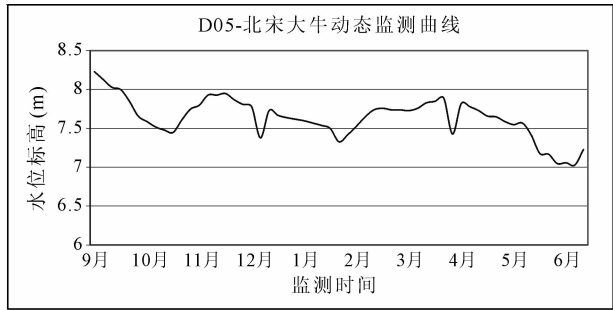


图 2 利津县部分典型水位动态监测结果

Fig. 2 Dynamic monitoring results of typical water levels in Lijin County

通过对抽水试验所取得的数据进行计算分析,得到地下含水层渗透系数(K)、导水系数(T)、单井影响半径(R)等参数。

为了解利津县应急地下水资源调查研究区内包气带渗透性,确定其垂直渗透系数,对调查区包气带不同岩性的渗透性能划分,采用双环法进行渗水试验:

$$K_z = Qh / [\omega(h + H_k + Z)] \quad (1)$$

式中: K_z 为垂直渗透系数(m/d); Q 为内环稳定渗入量(m^3/d); h 为水渗入土层深度(m); ω 为内环截面积(m^2); Z 为试验水层厚度(m); H_k 为土层毛细压力(水柱)(m)。

利用取得的数据,按照公式(1)计算得出凤凰街

街道办事处东潘果园、县利津街道办事处夹河村、盐窝镇康宁村、北宋镇林家村、北宋镇丁家村试验场一带渗透系数 K_z 分别为 0.5226m/d、2.3459m/d、0.0666m/d、0.6727m/d、0.2939m/d。

3 浅层地下水资源计算

3.1 浅层地下水资源分区

按照浅层淡水含水砂层厚度,将浅层淡水富水性较好区为计算分区 I 区,中等区为计算分区 II 区,较差区为计算分区 III 区,如图 3 所示。

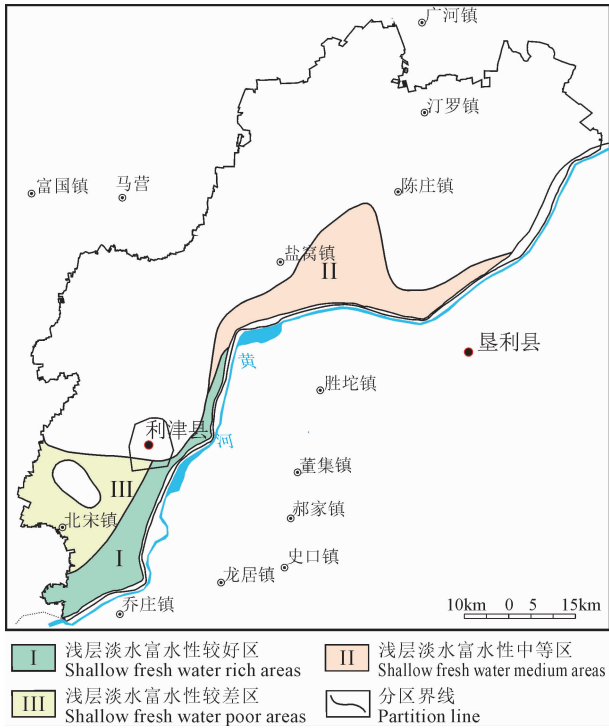


图 3 利津县浅层地下水资源分区

Fig. 3 Shallow groundwater resources division in Lijin County

其中,各区浅层淡水含水砂层厚度如下: I 区 5~30m,平均厚度 25m(计算时按 25m 计); II 区 5~20m,平均厚度 15m(计算时按 15m 计); III 区砂层厚度大都略小于 5m(计算时按 5m 计)。I、III 区的水位埋深 2m 左右,以 2m 计,II 区的 1~3m,以 2m 计。因此,计算区潜水含水层厚度为各区水位埋深至同区内含水砂层底的距离,即 I 区为 23m,II 区为 13m,III 区为 3m。

3.2 浅层淡水资源计算

目前区域地下水资源计算与评价方法有:水量均衡法、水文分析法、数值法、水文地质比拟法等,其中,水文分析法适用于基岩山区岩溶水、裂隙水系统水文地质条件复杂、研究程度相对较低的地下水系

统;数值法适用于地下水开发利用程度较高的地区;水文地质比拟法适用于有较多开采资料的地区;水量均衡法适用于任何地下水系统地下水资源计算,需掌握多年平均的补排量。

根据区内的水文地质特点和本次调查工作的实际情况,调查区内淡水体分布范围清楚,补排项明确,多年水位处于动平衡状态,因此确定地下水资源评价方法为水量均衡法。

采用下列经验计算公式:

$$Q_{\text{补}} - Q_{\text{排}} = \pm \mu \cdot F \frac{\Delta H}{\Delta t} \tag{2}$$

式中: $Q_{\text{补}}$ 为均衡期内各补给项量之和(m^3); $Q_{\text{排}}$ 为均衡期内各排泄项量之和(m^3); μ 为含水层水位变动带平均给水度(无量纲); ΔH 为均衡期内地下水位变化幅度(上升为正,下降为负)(m); F 为含水层(组)分布面积(m^2); Δt 为时段长度(d)。根据利津县水利部门资料显示,近几年的浅层地下水人工开采量很小。通过调查访问,境内浅层地下水的开采基本是蔬菜瓜果大棚取水灌溉,开采量不大;中深层为咸水,开采量可以忽略不计,因而地下越流量也忽略。研究区地势较平坦,地下水径流微弱,径流量小。

故,境内浅层地下淡水的补给与排泄项如下:

$$\begin{aligned} Q_{\text{补}} &= Q_P + Q_{\beta} + Q_h \\ Q_{\text{排}} &= Q_{\epsilon} + Q_{\text{径}} + Q_{\text{采}} \end{aligned} \tag{3}$$

式中: Q_P 为降水入渗补给量(m^3/a); Q_h 为黄河侧渗量(m^3/a); Q_{β} 为灌溉入渗量(m^3/a)。

根据各补给、排泄项量的计算方法,将(2)式改写为:

$$\begin{aligned} \mu \cdot F \frac{\Delta H}{\Delta t} &= \alpha \cdot F \cdot P + q \cdot L + Q_G \cdot \beta \cdot F - \\ &\quad C \cdot \epsilon \cdot F \end{aligned} \tag{4}$$

式中: α 为降水入渗系数(无量纲); P 为降水量(m); F 为含水层(组)分布面积(m^2); q 为黄河单侧单宽补给强度($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$); L 为分别为河渠补给计算段长度(m); Q_G 为农田灌溉量(灌溉定额)(m^3/m^2); β 为灌溉水入渗系数(无量纲); ϵ 为多年平均蒸发量(mm); C 为潜水蒸发系数(无量纲)。

根据研究区内地下水动态监测资料及抽水试验所得数据,利用 Aquifer test 软件计算结果,参考其他相关成果,取一合理参数数值。有关计算参数确定如表 1 所示。

浅层地下淡水补给量的计算:

(1)降水入渗补给量(Q_P):利津县多年平均降

雨量为 552.7mm 。利用公式 $Q_p = \alpha \cdot F \cdot P$ 分别计算均衡区的补给量,各计算分区的面积分别为 $44.64 \times 10^6 \text{m}^2$ 、 $85.21 \times 10^6 \text{m}^2$ 、 $53.59 \times 10^6 \text{m}^2$ 。计算结果,Ⅰ区补给量为 $814 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$;Ⅱ区补给量为 $1319 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$;Ⅲ区补给量为 $825 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。降水入渗总补给量 $2958 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,即 $8.10 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

表 1 利津县浅层淡水资源计算参数一览表

Table 1 List of calculation parameters of shallow fresh water resources in Lijin County

分区	Ⅰ 区	Ⅱ 区	Ⅲ 区
面积($\times 10^6 \text{m}^2$)	56.57	99.04	65.92
砂层厚度(m)	23	12	3
渗透系数 K (m/d)	3.9	3.71	2.80
给水度 μ	0.067	0.06	0.05
降水入渗系数 α	0.33	0.28	0.28
灌溉入渗系数 β	0.187	0.15	0.15
潜水蒸发系数 C	0.164	0.14	0.116
黄河侧渗单侧补给强度 q ($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$)	0.56	0.56	

(2)灌溉入渗补给量(Q_{β}):调查得到的Ⅰ区的灌溉面积 $30.51 \times 10^6 \text{m}^2$ (45765 亩),Ⅱ区的灌溉面积 $59.03 \times 10^6 \text{m}^2$ (88545 亩),Ⅲ区的灌溉面积 $39.82 \times 10^6 \text{m}^2$ (59730 亩)。利用公式 $Q_{\beta} = Q_G \cdot \beta \cdot F$ 计算各均衡区的灌溉入渗补给量,计算结果:Ⅰ区入渗量为 $209 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$;Ⅱ区入渗量为 $324 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,Ⅲ区入渗量为 $219 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,灌溉入渗总补给量 $752 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,即 $2.06 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

(3)黄河侧渗补给量(Q_h):利用公式 $Q_h = q \cdot L$,求得黄河的侧向补给量。Ⅰ区侧渗量为 $650 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,Ⅱ区侧渗量为 $595 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。黄河侧渗量总计为 $1245 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。

综合各项之和为区内浅层地下水总补给资源量计 $4995 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,即 $13.69 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

浅层地下淡水排泄量计算:

(1)潜水蒸发量(Q_C):根据利津县水利部门统计资料,1971~2004 年,利津县多年平均蒸发量为 1885mm 。利用公式: $Q_C = C \cdot \epsilon \cdot F$ 计算得到的浅层淡水蒸发量Ⅰ区: $1380 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$;Ⅱ区: $2249 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$;Ⅲ区: $1172 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。总计为 $4801 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,即 $13.15 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

(2)径流排泄量($Q_{\text{径}}$):水力坡度利用等水位线图上直接测量取得,Ⅰ区、Ⅲ区取其平均值, $I = 0.00032$,Ⅱ区取其平均值 $I = 0.00025$ 。过水断面厚度Ⅰ区为 23m ,Ⅱ区为 12m ,Ⅲ区为 3m 。利用公式: $Q_{\text{径}} = KBI$ 计算得出浅层淡水径流排泄量Ⅰ

区: $9.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; II 区: $10.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; III 区: $0.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。总计为 $19.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,取整为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(3)人工开采量($Q_{\text{采}}$):据实地调查, I 区开采地下水主要用于农田灌溉,每年大约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$,II区开采量要大于I区,用于农田灌溉与蔬菜大棚灌溉,每

年大约 $110 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、III区很少开采地下水,其开采量可忽略不计。总计人工开采量为 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

所以,境内浅层地下淡水的总排泄量为: $(4801 + 20 + 150) \times 10^4 = 4971 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。由以上计算结果与表 2 可知,目前浅层淡水资源的补给和排泄基本处于均衡状态。

表 2 利津县浅层地下水淡水补给、排泄均衡计算表 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)

计算分区	补给量			补给总量	排泄量			排泄总量
	降雨入渗量 Q_P	灌溉入渗量 Q_g	黄河侧渗量 Q_h		潜水蒸发量 Q_C	人工开采量 $Q_{\text{采}}$	径流排泄量 $Q_{\text{径}}$	
I	814	209	650	1673	1380	40	9.0	1429
II	1319	324	595	2238	2249	110	10.2	2369.2
III	825	219	0	1044	1172	0	0.8	1172.8
合计	2958	752	1245	4955	4801	150	20	4971

3.3 浅层淡水储存量的计算

根据统计计算各区含水层的厚度,和不同岩性分布面积,据表 1 中的参数系列表中确定各区疏干给水度 μ (各层不同,含水层厚度也不同)。利用下式:

$$Q_{\text{储}} = \mu \cdot V \tag{5}$$

式中: V 为含水层的体积; μ 为含水层给水度。

$$Q_{\text{储}} = (23 \times 56.57 \times 0.067 + 12 \times 99.04 \times 0.06 + 3 \times 65.92 \times 0.05) \times 10^6 = 16837 \times 10^4 (\text{m}^3)$$

计算得到浅层淡水储存量为 $16837 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3.4 浅层地下水淡水资源总量

由上可知,浅层淡水资源的补给和排泄基本处于均衡状态。因此,现状条件下,无论是淡水的补给量还是排泄量均可作为淡水的资源总量来衡量。本次计算以补给量总量作为计算区的资源总量,则境内浅层淡水的资源总量为 $4955 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (表 3)。

表 3 利津县浅层地下水淡水资源总量表 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)

计算分区	资源量			资源总量
	降雨入渗量	灌溉入渗量	黄河侧渗量	
I	814	209	650	1673
II	1319	324	595	2238
III	825	219	0	1044
合计	2958	752	1245	4955

3.5 浅层地下水开发利用方案

I 区:从区段的水文地质特征和取水建筑物的适用条件分析来看,该区段对辐射井、小径井群、砂管井等取水建筑物皆适应。其中辐射井位置可选择在含水层厚度大,含水介质较细的利津县城南的董王、张家滩与东潘一带。使用单排布井法,布井间距

1000m,布置井数量 2~3 眼。单井涌水量估算可达 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右。

管井可使用双排布井法,近河一排井间距 500m,远河一排井间距 800m,排与排之间的距离可选 400~500m,管井结构见管井开采试验,单井涌水量可达 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,布井个数约为 60 个。

小径井群可布置在含水层厚度薄,含水介质颗粒细或远离河道地段,主要用于村庄、农田灌溉等供水。单井涌水量 $350 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,布井个数约为 10 个。

II 区:从区段的水文地质特征和取水建筑物的适用条件分析来看,该区段适应于小径井群。布井方法可采用双排布井,布井间距 200~250m,近河道井间距可以小一些,远河道井间距可大一些,单井涌水量 $250 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,布井个数约为 40 个。

III 区:从区段的水文地质特征及取水建筑物的适用条件来看,目前该区段只适应于水平集水管取水建筑物。取水方法为水平集水管(渗渠),主要用于人畜零星供水。布井方法可采用单排布井,布井间距 500m,单位长度涌水量 $2.88 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 左右,布井个数约为 50 个。

4 结论及建议

(1)物探及水位动态监测结果表明:利津县地下浅层淡水资源主要赋存于黄河故道带、决口扇上游、现黄河河道带及两侧,咸淡水界面埋藏较浅,主要补给来源为黄河侧渗和降水入渗,向下游径流和蒸发排泄。

(2)浅层淡水含水层的富水性特征将淡水分布区划分为浅层淡水富水性较好区 I 区、浅层淡水富

水性中等区Ⅱ区和浅层淡水富水性较差区Ⅲ区。其中,Ⅰ区资源总量为 $1673 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 储存量为 $8717 \times 10^4 \text{ m}^3$, 应急可采资源量为 $334.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; Ⅱ区资源总量为 $2238 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 储存量为 $7131 \times 10^4 \text{ m}^3$, 应急可采资源量为 $447.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; Ⅲ区资源总量为 $1044 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 储存量为 $989 \times 10^4 \text{ m}^3$, 应急可采资源量为 $208.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

浅层地下水保护建议:地下水应急水源是应对突发性事件或极端性气候事件的“救命水”。为提高应急供水的保障程度,保障人民群众生命安全,维护社会稳定,现提出以下几点保护建议:① 健全体制,建立健全统一领导、分级负责、属地管理、分工协作的应急管理体制。② 为增强应急决策与处置能力和预警预防能力,提高应急供水保障程度,应加强地下水应急水源地的自动监测、预警系统建设和管理信息平台建设,为地下水应急管理决策提供基础数据和强有力的技术支撑。③ 加强地下水动态监测,建设地下水监测站网和信息管理系统,增加城市水源地、超采区监测密度,全面真实掌握地下水的各种动态变化,对地下水情,特别是地下水水位、水质动态变化进行预测预报,实现地下水量和水质的统一管理,从根本上和深层次上推进地下水保护和水资源管理。④ 应建立应急水源地的涵养机制。有条件的地区,可充分利用地表水及雨洪等资源,对应急水源地进行人工回灌和调蓄,促使地下水水位的尽快恢复。此外,地方政府和有关部门应当积极采取多种有效的工程措施,加强应急水源涵养工作。

致谢:衷心感谢评审专家提出的宝贵意见和建议,对本文的进一步完善提供了极大的帮助。

References

- An Lesheng. 2012. Water-salt characters of groundwater and ecological effects in the Yellow River Delta. PhD thesis of Ocean University of China (in Chinese with English abstract).
- Cao Jianfeng, Ye Xueyan, Jiang Jiyi, et al. 2004. Groundwater resources and exploitation potential of the aboveground segment of Yellow River downstream. *Resources Science*, 26(2):9~16 (in Chinese with English abstract).
- Franchini M, Pacciani M. 1991. Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 122(1-4):161~219.
- Fu Xiaogang, Tang Zhonghua, Liu Bintao, et al. 2019. Study on exploitable groundwater resources of Yangzhuang Basin in Shandong Province by using simulation-optimization model. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(3):784~796 (in Chinese with English abstract).
- Hellstrom D, Jeppsson U, Karrman E. 2000. A framework for systems analysis of sustainable urban water management. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(3):311~321.
- Lan Ziting. 2005. Sustainable utilization of shallow groundwater resources in the North Henan Plain. *Groundwater*, 27(4):229~231 (in Chinese with English abstract).
- Liang Jing. 2018. Characteristics and potential assessment of groundwater resources in the Leizhou Peninsula. *East China Geology*, 39(4):299~304 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Li Peiying, Feng Aiping, Huang Haijun. 2014. Groundwater dynamic evolution and relationship between groundwater level and land subsidence in the Yellow River Delta. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(11):1551~1565 (in Chinese with English abstract).
- Mao Lei, Zhang Yan, Liu Mingyao, et al. 2019. Evaluation of groundwater recoverable resources under the constraints of land subsidence in Jiangsu coastal areas. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 55(3):429~439 (in Chinese with English abstract).
- Singh P K, Kumar S, Singh U C. 2011. Groundwater resource evaluation in the Gwalior area, India, using satellite data: An integrated geomorphological and geophysical approach. *Hydrogeology Journal*, 19(7):1421~1429.
- Wang Weiqi. 2014. Study on assessment and sustainable utilization of groundwater resources in Yanji City. *Jilin University* (in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhi, Liu Chunhua, Liu Zhongye. 2010. Identification of threshold value of land subsidence caused by exploiting deep groundwater in Dezhou. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 21(5):55~60 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xiuju, Wang Hongde, Zhang Fucun, An Yonghui. 2002. Formation and evolution of ground fresh water (blackish water) in the Yellow River Delta. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(4):375~378 (in Chinese with English abstract).
- Yi Shuping, Chi Baoming, Wu Fawei, Zhou Yanzhang. 2006. Research on numerical simulation and evaluation of riverside source field—A case study of Liguangpu riverside source field in Shenyang City. *Journal of Natural Resources*, 21(1):154~160 (in Chinese with English abstract).
- Yu Litaio. 2011. Based on GIS Yellow River Delta shallow layer underground fresh water resources vulnerable appraisal. *Shandong Normal University* (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiaxing, Zhang Xuezhi. 2016. Analysis on the characteristics of deep groundwater exploitation and its influence on environment in Hengshui City. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 22(6):86~91 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yunzhang, Shao Jingli, Yan Zhenpeng, et al. 2004. A comprehensive approach to groundwater system boundaries along the zone affected by the lower reaches of the Yellow River. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(1):99~102 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Sanyuan. 2011. Study on methods of calculation and evaluation of mid-deep underground pore water resources in Huaibei Plain of Anhui Province. *Water Resource and Hydropower Engineering*, 42(8):82~85 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 安乐生. 2012. 黄河三角洲地下水水盐特征及其生态效应. 中国海洋大学博士学位论文.
- 曹剑峰, 冶雪艳, 姜纪沂, 等. 2004. 黄河下游悬河段地下水资源计算及开发潜力分析. *资源科学*, 26(2):9~16.
- 付晓刚, 唐仲华, 刘彬涛, 等. 2019. 基于模拟-优化模型的山东羊庄盆地地下水可开采量研究. *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(3):784~796.
- 兰自亭. 2005. 豫北平原浅层地下水资源可持续开发利用. *地下水*, 27(4):229~231.
- 梁靖. 2018. 雷州半岛地下水资源特征及开采潜力评价. *华东地质*,

39(4):299~304.

刘勇,李培英,丰爱平,黄海军. 2014. 黄河三角洲地下水动态变化及其与地面沉降的关系. 地球科学——中国地质大学学报, 39(11):1551~1565.

毛磊,张岩,刘明遥,等. 2019. 江苏沿海地区地面沉降约束下的地下水可采资源量评价. 南京大学学报(自然科学), 55(3):429~439.

王维琦. 2014. 延吉市地下水资源评价及可持续利用研究. 吉林大学.

杨丽芝,刘春华,刘中业. 2010. 德州深层地下水开采引发地面沉降变化阈值识别. 水资源与水工程学报, 21(5):55~60.

姚秀菊,王洪德,张福存,安永会. 2002. 黄河三角洲地区地下淡水(微咸水)的形成与演化. 地球学报, 23(4):375~378.

易树平,迟宝明,吴法伟,周彦章. 2006. 傍河地下水源地数值模拟与评价研究——以沈阳市浑河李官堡水源地为. 自然资源学报, 21(1):154~160.

于利涛. 2011. 基于 GIS 的黄河三角洲浅层地下淡水资源的脆弱性评价. 山东师范大学.

张家兴,张学知. 2016. 衡水市深层地下水开采量变化特征及对环境的影响分析. 水利科技与经济, 22(6):86~91.

赵云章,邵景力,闫震鹏,等. 2004. 黄河下游影响带地下水系统边界的划分方法. 地球学报, 25(1):99~102.

郑三元. 2011. 安徽省淮北平原中层及深层孔隙地下水资源计算与评价方法研究. 水利水电技术, 42(8):82~85.

Characteristics and protection of shallow groundwater resources in the lower reaches of the Yellow River

WANG Wei, ZHANG Taiping, WANG Qiang, ZHANG Hongjun* , LIU Yang, ZHAO Hui, WANG Yuelin, ZHANG Ruihua, WANG Kuifeng

Shandong Institute of Geological Sciences, Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Land and Resources, Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Jinan, 250013

* Corresponding author: sduhongjun@163.com

Abstract

With rapid development of urban economy in the lower reaches of the Yellow River, the contradiction between the limited water resources of the Yellow River and increasing water use by residents becomes increasingly evident. In order to improve the degree of security for emergency water supply, ensure the safety of people's lives and maintain social stability, this study took Lijin county as an example to conduct an investigation of shallow groundwater resources. Distribution and specific amount of available groundwater resources in this region have been identified using field geological investigation, geophysical exploration, water quality analysis, hydrogeology drilling and pumping test. Based on research results above and applicable conditions of various water extraction methods, the scope of emergency water source and emergency development and utilization scheme of shallow groundwater and deep groundwater have been proposed respectively. The research results have very important practical and strategic significance for the improvement of water supply safety, the promotion of people's living standards and the assurance of water resources security in Lijin County.

Key words: lower reaches of the Yellow River; emergency groundwater; investigation and evaluation; suggestions for shallow groundwater resources protection