

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.03.06

引用格式: 刘帅,刘志涛,段晓飞,等.山东省广饶县地下水位多年动态及其地质环境效应分析[J].中国地质调查,2021,8(3):49-57.(Liu S,Liu Z T,Duan X F,et al.Dynamic monitoring of the groundwater in Guangrao County in Shandong Province and the analysis of its geological environmental effect[J].Geological Survey of China,2021,8(3):49-57.)

山东省广饶县地下水位多年动态及其地质环境效应分析

刘帅^{1,2}, 刘志涛^{1,2}, 段晓飞^{1,2}, 冯颖^{1,2}, 蒋书杰^{1,2}, 黄松^{1,2}

(1. 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队, 山东 德州 253072;

2. 山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253072)

摘要: 山东省广饶县地下淡水资源丰富,是本区工农业生产和生活用水的重要水源,长期大量开采地下水引发了地下水降落漏斗、咸水入侵、地面沉降等地质环境问题。通过对广饶县地下水多年监测资料的整理和分析,揭示了本区地下水水位的变化规律,预测了地下水水位的变化趋势。分析表明:在现状开采条件下,浅层地下水降落漏斗已基本稳定,无加重趋势。考虑地面沉降和咸水入侵的发展趋势,提出深层地下水的约束埋深不应大于80 m,甄庙地区咸水入侵临界水位为10 m,这为当地地下水的合理开采与环境地质问题的防治提供了依据。

关键词: 地下水位; 动态监测; 变化趋势; 约束埋深

中图分类号: P641.8; P642.2; X141

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2021)03-0049-09

0 引言

地下水是地质环境领域中的一项重要研究内容。前人在我国陆区和沿海地区做了大量分析工作,探讨了不同地质环境下地下水变化特征及引起的地质环境效应,为地质环境问题研究提供了基础性资料^[1-5]。广饶县是山东省淡水资源较为丰富的地区,浅层地下水和深层地下水是当地工农业生产和生活用水的重要水源^[6]。长期大量开采地下水引发了地下水降落漏斗、咸水入侵、地面沉降等环境地质问题^[6-8]。为研究地下水动态变化规律,寻求地质环境问题的解决方案,山东省地质矿产勘查开发局在该区进行了地下水多年动态监测工作。本文通过对该区地下水监测资料的整理与分析,研究了地下水水位变化规律,重点分析了地下水开采与地质环境问题的关系,并进一步提出了地下淡水资源开发利用的建议,为该区地下水的合理开采及地质环境问

题的防治提供了依据。

1 研究区概况

1.1 水文地质特征

广饶县位于东营市南部,属鲁西北平原松散岩类水文地质区,包括2个水文地质亚区,大致以石村镇—肖家村—稻庄镇一线为界,以南属冲积洪积平原淡水水文地质亚区,以北属海积冲积、冲积海积平原咸水水文地质亚区^[9](图1)。该区地下水类型属第四系松散岩类孔隙水,按水力特征又分为浅层孔隙潜水—微承压水(以下简称浅层地下水)、中深层承压水和深层承压水(图1、表1)。

1.2 地下水监测现状

为研究地下水动态变化特征,寻求地质环境问题的最佳解决方案,自1983年开始,山东省地质矿产勘查开发局等相关单位对该区浅层地下水和深层地下水进行了长期监测,现保留有22个动态监测点(图1、表2)。

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2021-04-26。

基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局“2018年度地下水及地质环境监测(编号:鲁地字[2018]20号文)”项目资助。

第一作者简介: 刘帅(1989—),男,工程师,主要从事水工环地质工作。Email: 332182068@qq.com。

通信作者简介: 刘志涛(1982—),男,正高级工程师,主要从事水工环地质工作。Email: strawe@126.com。

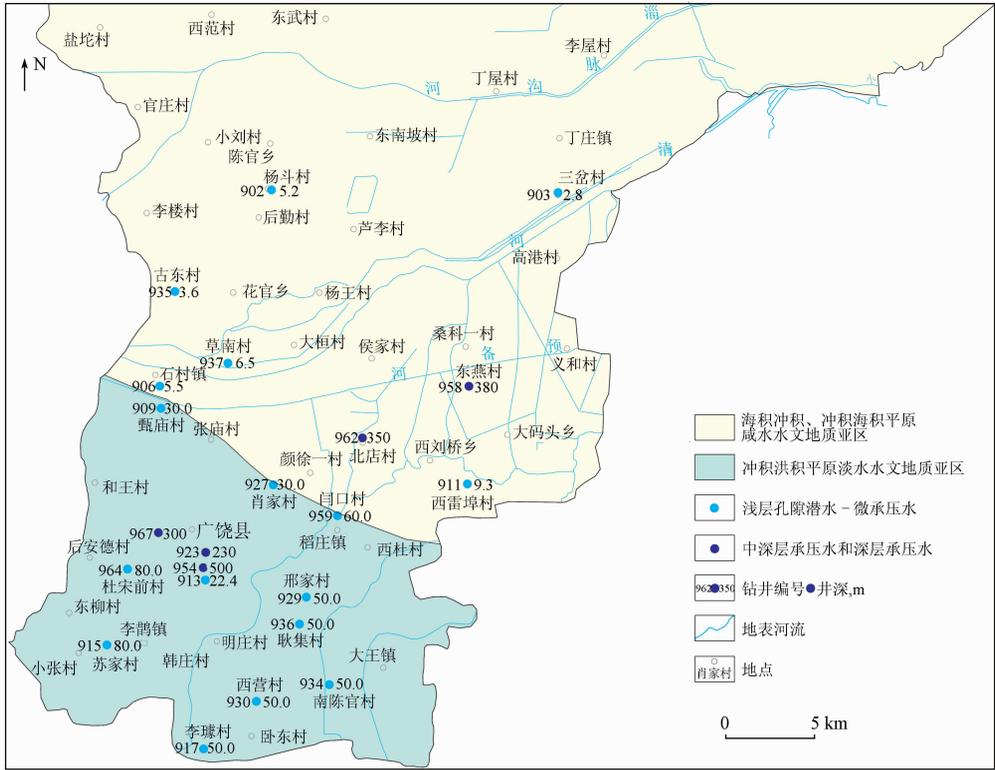


图1 广饶县水文地质分区及地下水位监测点分布

Fig.1 Hydrogeological subdivision and distribution of groundwater level monitoring points in Guangrao County

表1 研究区水文地质特征

Tab.1 Hydrogeological characteristics of the study area

地下水类型	含水层岩性	累计厚度/m	单井涌水量	矿化度	水化学类型	补径排特征
浅层孔隙潜水	以细砂、中细砂为主,局部有中粗砂和含砾粗砂	5~20	单井涌水量多大于500 m ³ /d,砂层厚度较大的地方可达到1 000 m ³ /d以上	一般小于2 g/L,广饶县城大王镇以南小于1 g/L	阴离子主要为HCO ₃ ·Cl型或HCO ₃ 型,阳离子主要为Ca·Mg型或Mg·Ca·Na型	补给方式为大气降水补给和径流补给,排泄方式为人工开采
微承压水	海积冲积、冲积海积平原咸水水文地质亚区 粉砂为主,局部有粉细砂层	5~20	200~700 m ³ /d	2~6 g/L	多为Cl·Na型	补给方式为大气降水补给和灌溉回渗补给,排泄方式为蒸发排泄
中深层承压水	中砂、粗砂为主	30~50	1 000~3 000 m ³ /d	南部小于1.0 g/L,北部陈官乡—丁庄镇一带大于1.0 g/L	由南向北依次为HCO ₃ -Ca·Mg、HCO ₃ -Ca·Mg·Na、HCO ₃ -Na·Mg和HCO ₃ -Na	补给方式为径流补给,排泄方式为人工开采
深层承压水	中砂、中粗砂,顶部为细砂	20~50	由北向南增大,南部为1 000~2 000 m ³ /d,局部地段大于2 000 m ³ /d,北部为500~1 000 m ³ /d,局部小于500 m ³ /d	小于2 g/L	主要为HCO ₃ 或HCO ₃ ·Cl型	补给方式为径流补给,排泄方式为人工开采

表2 地下水动态监测点情况

Tab.2 List of groundwater dynamic monitoring points

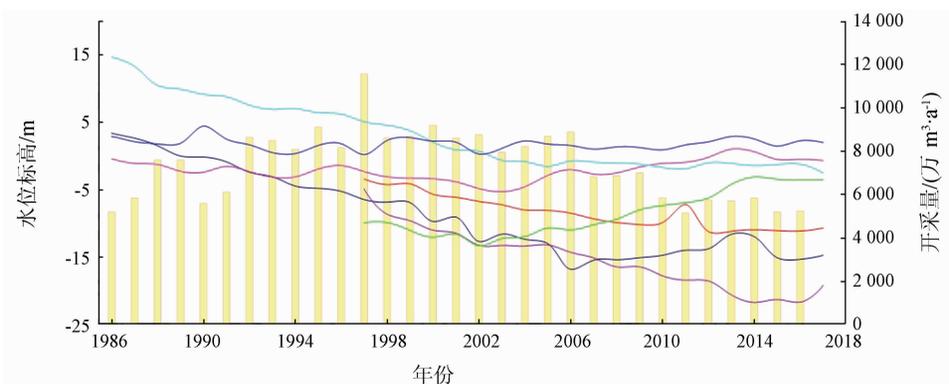
编号	地点	地下水类型	井深/m	编号	地点	地下水类型	井深/m
902	陈官乡杨斗村	浅层地下水	5.2	934	大王镇南陈官村	浅层地下水	50.0
903	丁庄镇三岔村	浅层地下水	2.8	935	花官乡古东村	浅层地下水	3.6
906	石村镇石村	浅层地下水	5.5	936	大王镇耿集村	浅层地下水	50.0
909	石村镇甄庙村	浅层地下水	30.0	937	花官乡草南村	浅层地下水	6.5
911	西刘桥乡西雷埠村	浅层地下水	9.3	959	稻庄镇闫口村	浅层地下水	60.0
913	广饶县十村	浅层地下水	22.4	964	花园乡杜宋前村	浅层地下水	80.0
915	李鹊镇苏家村	浅层地下水	80.0	954	广饶县自来水公司	深层地下水	500.0
917	大王镇李臻村	浅层地下水	50.0	967	广饶经济开发区科创公司	深层地下水	300.0
927	肖家村	浅层地下水	30.0	923	广饶县水利局	深层地下水	230.0
929	稻庄镇邢家村	浅层地下水	50.0	958	大码头乡东燕村	深层地下水	380.0
930	大王镇西营村	浅层地下水	50.0	962	稻庄北店村	深层地下水	350.0

2 地下水位多年动态

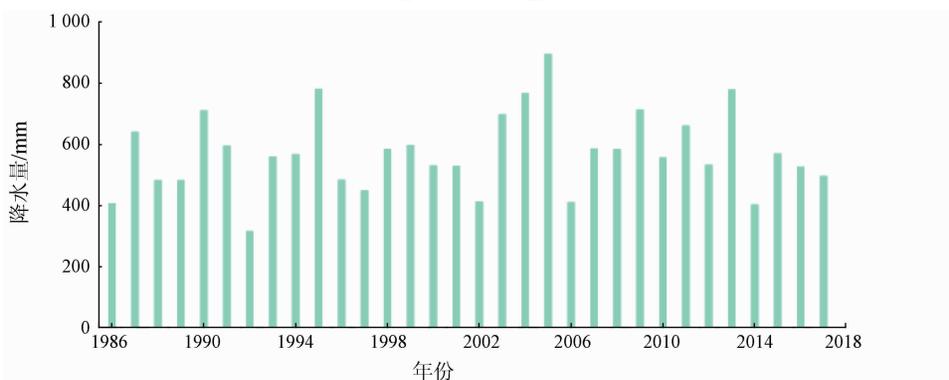
2.1 浅层地下水

广饶县南部多为井灌区,地下水埋藏一般较深,水位受蒸发作用影响很小,人工开采是地下水的主要排泄途径。地下水主要补给来源是大气降

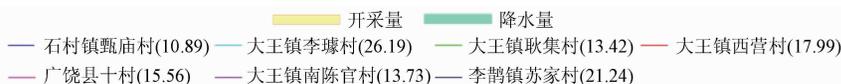
水,其次是比较微弱的径流补给,其动态类型为降水入渗-径流-开采型。由于多年过量开采地下水,各监测点水位呈多年下降趋势(图2),目前已经形成了地下水降落漏斗(图3)。根据2016年9月监测资料,浅层地下水降落漏斗中心为李鹊镇苏家村和大王镇南陈官村。



(a) 水位动态曲线及开采量



(b) 多年降水量动态图



注: 括号内数字为监测点地面标高, m。

图2 广饶县浅层地下水监测点地下水多年动态

Fig.2 Multi-year dynamic curves of shallow groundwater monitoring points in Guangrao County

大王镇南陈官村监测点 2014 年之前地下水水位一直表现为下降趋势,1997—2014 年地下水水位下降了 16.85 m,下降速率为 0.99 m/a; 2014 年之后,水位处于平稳状态,并有小幅回升,主要是近年来开采量减少的结果。据此推测,在现有开采量维持不变的前提下,降水补给基本能使地下水补给和排泄达到平衡,南陈官村浅层地下水水位可保持在现有状态,不会出现较大变化(图 5)。其他监

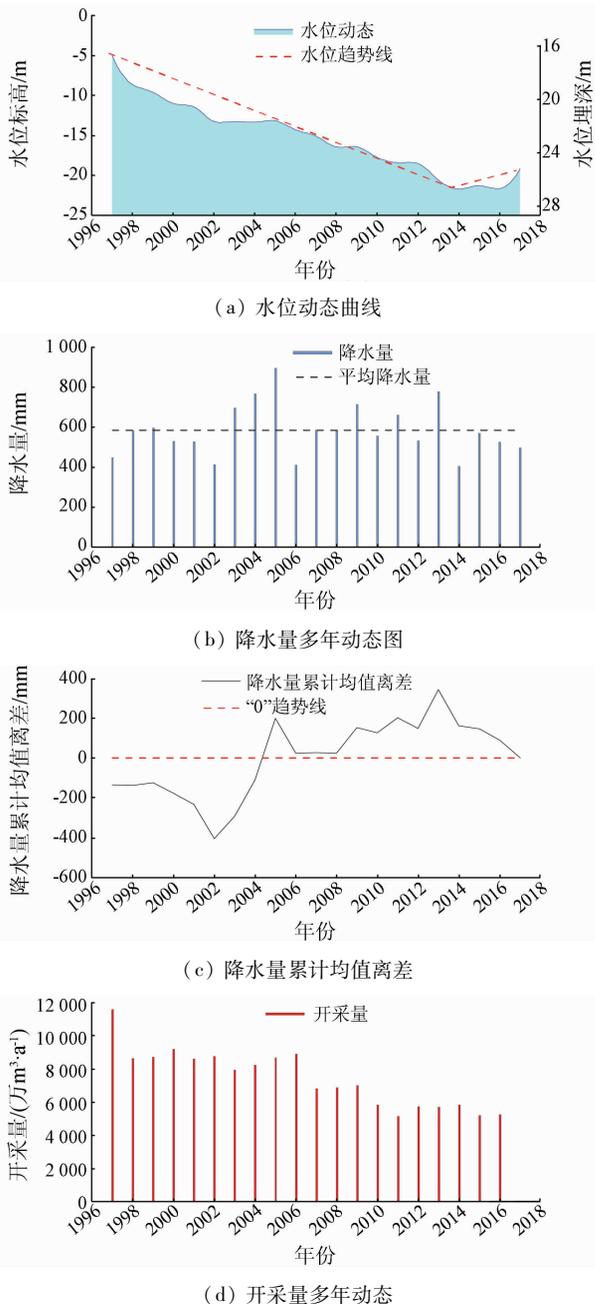


图 5 大王镇南陈官村浅层地下水多年水位动态曲线
Fig. 5 Multi-year dynamic curve of shallow groundwater level in Nanchenguan Village of Dawang Town

测点近几年水位也出现平稳现象,说明本区浅层地下水降落漏斗已基本稳定。

2.2 中深层承压水和深层承压水

中深层承压水和深层承压水水位动态与当地的气象、水文等因素关系不大,主要受人工开采因素影响。因每个井开采需求不同,年内水位动态无规律,其水位随开采量的变化而变化,开采量大则水位下降,开采量小则水位缓慢回升。

根据以往资料,1980 年本区 200 ~ 500 m 深层地下水具有较高承压水头,原始状态下均能溢出地表自流,自流高度由南向北、由西向东逐渐减小,一般为 3 ~ 10 m,广饶南部最大,高出地面 22.08 m(1972 年 12 月)。监测资料显示,1991 年深层地下水水位已有明显下降,均不能出现自流现象。由于不同地区历年开采量不同,深层地下水水位空间分布存在较大差异。广饶县城水位埋深最大,2017 年 10 月统测水位埋深最大为 110 m。漏斗外围水位埋深相对较小,但均处于多年下降过程中。大码头乡东燕村附近水位下降年速率为 1.71 m/a(图 6)。

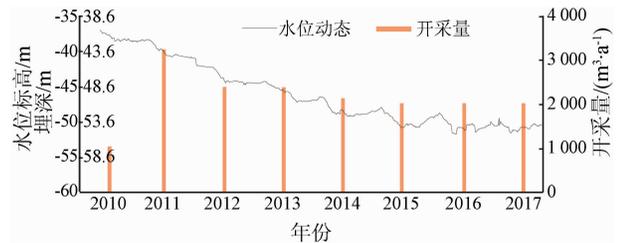


图 6 广饶县大码头乡东燕村深层地下水多年水位动态
Fig. 6 Multi-year dynamic curve of deep groundwater level in Dongyan Village of Damatou Town in Guangrao County

3 地质环境效应的约束水位

3.1 咸水入侵

3.1.1 发展趋势

区内咸水入侵始于 1965 年,1986 年入侵加剧。根据历年监测资料,广饶县咸水入侵主要表现为由北向南发展,1980—2017 年入侵面积约 41.58 km²。2017 年,咸淡水界线(咸水入侵锋面)大致分布在石村镇—东南村—后燕村—肖家村—小杨家—闫口村北一段—村北一线(图 7、表 3)。

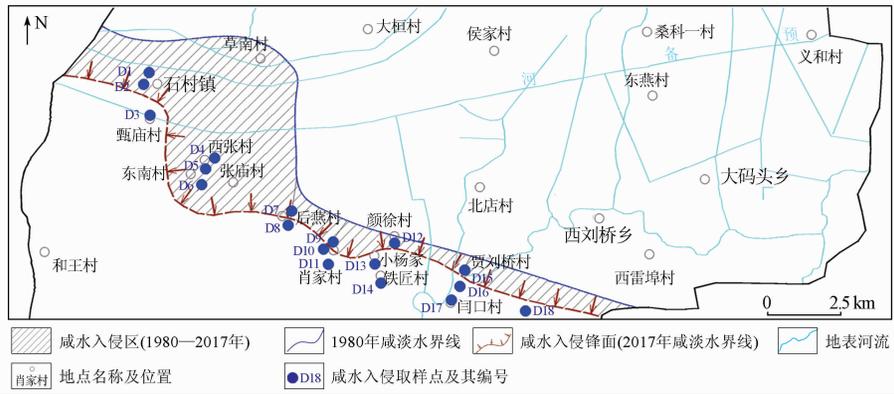


图7 广饶县咸水入侵示意图

Fig.7 Saltwater intrusion in Guangrao County

表3 咸水入侵取样点水质分析结果

Tab.3 List of water quality analysis results in saltwater intrusion sampling points

取样点编号	地点	水化学类型	矿化度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cl}^-)/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
D1	石村镇	LS - MNC	2 323.28	666.46
D2	石村镇中心超市	L - MC	2 488.34	779.90
D3	甄庙村	LH - MC	1 168.86	269.42
D4	西张村	L - NM	4 098.67	1 807.95
D5	西张村南	L - NM	3 990.78	1 581.07
D6	东南村东南	L - NM	3 077.73	985.51
D7	后燕村北	L - MN	2 636.86	967.79
D8	前燕村东	LH - MN	1 781.22	436.04
D9	肖家村	LH - MN	2 554.50	733.82
D10	肖家村南 500 m	HLS - MNC	1 328.64	248.15
D11	肖家村南 1 000 m	HLS - MN	1 539.29	276.51
D12	颜徐村南	LHS - MCN	2 291.26	549.48
D13	小杨家南	LH - MC	1 734.83	425.40
D14	铁匠村南	HL - MN	1 550.80	251.70
D15	贾刘桥村	LH - NM	2 267.23	599.11
D16	闫口村北 500 m	LH - M	1 610.32	524.66
D17	闫口村	HL - MN	1 226.80	163.07
D18	段一村北	HS - N	2 733.00	280.00

咸水入侵是在天然和人类活动的复合作用下地下水咸水和淡水共同运动的流体动力学过程。水文地质条件是形成咸水入侵的物质基础,地下淡水资源的过度开采是引发咸水入侵的主要影响因素。地下水过度开采造成区内浅层地下水降落漏斗的生成,破坏了含水层中咸水和淡水之间的动态平衡,咸水区地下水向漏斗中心流动造成了咸水入侵的发生,继而造成水环境恶化,地下淡水资源量减少,使得本来就紧张的供需矛盾更加紧张^[10]。

咸水入侵必然导致地下水矿化度和氯离子浓度的升高,因此地下水矿化度和氯离子浓度可以指

示咸水侵入的程度和淡水与咸水的平衡状态。从咸淡水界线附近几个监测点的历年水质分析资料(图8—图10)可以看出,监测点地下水的矿化度

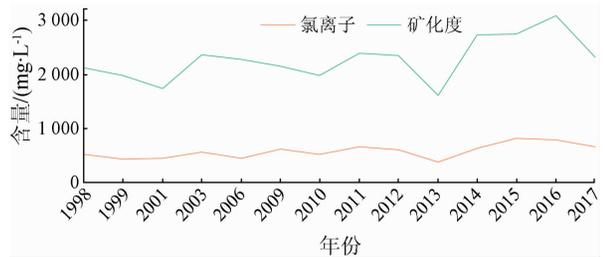


图8 广饶县石村监测点矿化度和氯离子含量变化曲线
Fig.8 Variation curve of salinity and chloride ion content in the monitoring points of Shicun Village in Guangrao County

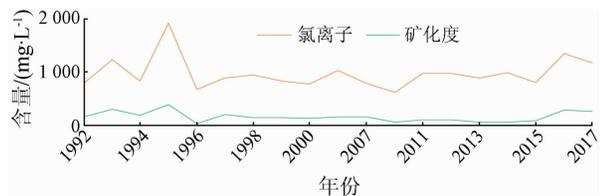


图9 广饶县甄庙村监测点矿化度和氯离子含量变化曲线
Fig.9 Variation curve of salinity and chloride ion content in the monitoring points of Zhenmiao Village in Guangrao County

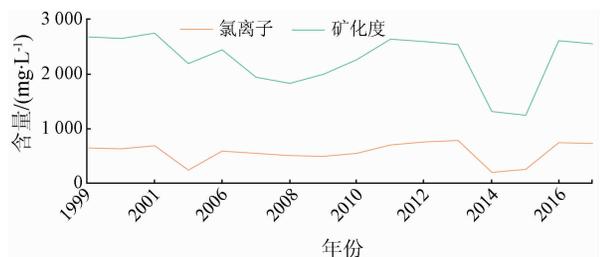


图10 广饶县肖家村监测点矿化度和氯离子含量变化曲线
Fig.10 Variation curve of salinity and chloride ion content in the monitoring points of Xiaojia Village in Guangrao County

和氯离子浓度大致在一个范围内波动,并没有出现持续上升和下降。这说明,目前在咸淡水界线附近,入侵的咸水与地下淡水基本处于平衡状态。

总之,在保持现有浅层地下水开采量不变的前提下,浅层地下水降落漏斗不会恶化,同时,咸水入侵现象也不会加剧。但是,如果浅层地下水的开采量增加,就会打破浅层地下水的补、排平衡,造成咸水入侵现象加剧。

3.1.2 临界水位

广饶县咸淡水界线附近甄庙村监测点水位监测资料(图 11)显示:1997 年之前水位一直呈现下降趋势,咸水入侵处于发展状态,当水位出现下降时,咸水入侵监测点的矿化度在次年会有一个增大的过程;1998 年之后,水位迅速回升,咸淡水界线没有持续南侵。

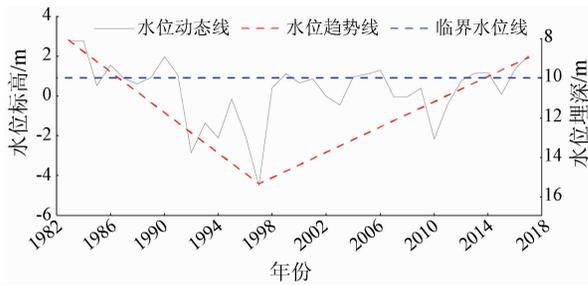


图 11 广饶县甄庙村多年水位动态曲线

Fig. 11 Multi-year dynamic curve of the water level in Zhenmiao Village of Guangrao County

由甄庙村监测点地下水水位动态及地下水矿化度变化曲线可知:当水位埋深大于 10 m 时,石村及肖家监测点矿化度多大于 2 g/L;当水位埋深小于 10 m 时,水质监测点矿化度会有所下降,小于 2 g/L。由此推断,石村甄庙附近的咸水入侵临界水位为 10 m。

3.2 地面沉降

广饶县地面沉降较为严重,为本区主要环境地质问题之一。沉降中心位于广饶县北部,沉降中心 14 a 累计沉降量达 1.605 m,平均沉降速率为 114.6 mm/a。深层地下水大量开采,地下水水位持续下降是本区不均匀沉降发生的主要诱因^[11-15]。对广饶县 2002 年至 2016 年地面沉降量与地下水水头埋深监测数据分析结果显示,地面沉降量与深层地下水水头高度相关(相关系数为 0.98)。两者之间的关系表示为

$$y = 0.213x^2 - 11.772x + 296.94 \quad (1)$$

式中: y 为沉降中心地面累计沉降量,mm; x 为沉

降中心深层地下水位埋深,m。

分析表明,沉降量随水位埋深的变化而变化,且水位埋深越大,地面沉降量越大。如图 12 所示,存在一个临界值 m ,当水位埋深大于 m 时,地面沉降速率随着水位埋深的增加而急剧增大。根据现有数据分析, m 取值应为 60 ~ 80 m,因此,区内深层地下水开采最大允许水位埋深不应大于 80 m。

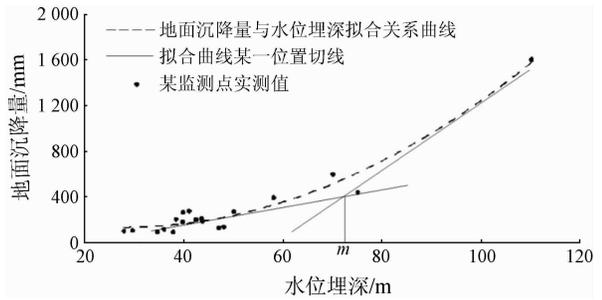


图 12 广饶县地面沉降量与深层地下水位关系

Fig. 12 The correlation curve between land subsidence and deep groundwater level in Guangrao County

4 结论

本文通过分析广饶县地下水多年动态监测资料及其与地质环境问题的关系,得出以下结论。

(1) 由于地下水的过量开采,广饶县已形成了浅层、深层地下水降落漏斗,引发了咸水入侵、地面沉降等地质环境问题,目前浅层地下水降落漏斗已基本稳定,无加重趋势。

(2) 根据对咸淡水界线附近测点浅层地下水水位与地下水矿化度和氯离子浓度监测资料的分析推断,在石村甄庙附近发生咸水进一步入侵的地下水临界水位为 10 m。

(3) 通过深层地下水与地面沉降拟合曲线,推测本区深层地下水开采最大允许埋深不应大于 80 m。

参考文献 (References):

[1] 甘华阳,林进清,夏真,等. 华南西部火山岛地区滨海浅层地下水的地质现状研究[J]. 中国地质调查,2017,4(4):80-87.
Gan H Y, Lin J Q, Xia Z, et al. Study on current state of shallow underground water quality along shoreline of volcanic islands in western South China[J]. Geol Surv China, 2017, 4(4): 80-87.

[2] 杨丽芝,杨雪柯,刘春华. 山东平原地区浅层地下水有机污染特征分析[J]. 中国地质调查,2015,2(8):25-30.
Yang L Z, Yang X K, Liu C H. Characteristics of organic pollution

of shallow groundwater in the Shandong plain[J]. *Geol Surv China*, 2015, 2(8): 25 - 30.

[3] 景佳俊, 陶文杰, 管祯. 对江苏沛县新庄铁矿富水性规律的初步认识[J]. *中国地质调查*, 2016, 3(6): 68 - 74.
Jing J J, Tao W J, Guan Z. A preliminary understanding of water - rich regularity in Xinzhuang iron mining area, Peixian, Jiangsu Province[J]. *Geol Surv China*, 2016, 3(6): 68 - 74.

[4] 苏春田, 潘晓东, 李兆林, 等. 云南广南岩溶区水文地质环境地质调查进展[J]. *中国地质调查*, 2015, 2(8): 9 - 16.
Su C T, Pan X D, Li Z L, et al. Progress of hydrogeology and environmental geology survey in Guangnan karst area, Yunnan Province[J]. *Geol Surv China*, 2015, 2(8): 9 - 16.

[5] 梁永平, 赵春红, 唐春雷, 等. 北方岩溶区水文地质环境地质调查进展——以北京西山岩溶区为例[J]. *中国地质调查*, 2015, 2(8): 1 - 8.
Liang Y P, Zhao C H, Tang C L, et al. Progress of hydrogeology and environmental geology survey in karst area of Northern China: an example from karst area in western hills of Beijing[J]. *Geol Surv China*, 2015, 2(8): 1 - 8.

[6] 刘志涛, 沙福建, 蒋书杰. 广饶县浅层地下水水化学演化分析研究[J]. *山东国土资源*, 2017, 33(3): 48 - 51.
Liu Z T, Sha F J, Jiang S J. Water chemical evolution analysis of Guangrao shallow groundwater [J]. *Shandong Land Resour*, 2017, 33(3): 48 - 51.

[7] 张波, 刘桂仪, 范立芹, 等. 黄河三角洲南部地下水环境问题与对策[J]. *山东国土资源*, 2004, 20(5): 51 - 54.
Zhang B, Liu G Y, Fan L Q, et al. Environmental problems and its prevention countermeasures of underground water in south of Huanghe Delta[J]. *Shandong Land Resour*, 2004, 20(5): 51 - 54.

[8] 杨丽芝, 王雪琼, 刘春华. 黄河下游平原地质环境退化及与地下水开采关系研究[J]. *西北地质*, 2015, 48(4): 226 - 233.
Yang L Z, Wang X Q, Liu C H. Research on the causality between geological environment degenerating and groundwater sustainable exploitation in the Yellow River downriver plain [J]. *Northwest Geol*, 2015, 48(4): 226 - 233.

[9] 康凤新, 徐军祥, 张中祥. 山东省地下水资源及其潜力评价[J]. *山东国土资源*, 2010, 26(8): 4 - 12.
Kang F X, Xu J X, Zhang Z X. Groundwater resources and its potential in Shandong Province [J]. *Shandong Land Resour*, 2010, 26(8): 4 - 12.

[10] 冯颖, 吴清华. 山东省博兴县浅层咸水入侵研究[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(12): 17 - 21.
Feng Y, Wu Q H. Study on shallow salt water intrusion in Boxing County of Shandong Province [J]. *Shandong Land Resour*, 2018, 34(12): 17 - 21.

[11] 王明珠, 万军伟. 山东省德州市地面沉降控沉分析及建议[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(3): 96 - 103.
Wang M Z, Wan J W. Analysis and suggestions on land subsidence control in Dezhou of Shandong Province [J]. *Geol Surv China*, 2020, 7(3): 96 - 103.

[12] 张伟伟, 邵明, 肖敏. 山东省地面沉降监测与防治工作进展[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(8): 62 - 66.
Zhang Y W, Shao M, Xiao M. Progress in monitoring and prevention of land subsidence in Shandong Province [J]. *Shandong Land Resour*, 2018, 34(8): 62 - 66.

[13] 段晓飞, 孙晓晓, 杨亚宾, 等. 鲁北平原地面沉降现状与机理分析[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(10): 86 - 92.
Duan X F, Sun X X, Yang Y B, et al. Present condition and mechanism analysis on land subsidence in Northern Shandong Plain [J]. *Shandong Land Resour*, 2018, 34(10): 86 - 92.

[14] 胡彩萍, 张景燕, 郝梦圆, 等. 黄河三角洲生态区孔隙热储地热开发对地面沉降的影响分析[J]. *山东国土资源*, 2017, 33(2): 39 - 42.
Hu C P, Zhang J Y, Hao M Y, et al. Impact analysis of geothermal development on land subsidence in the Yellow River Delta [J]. *Shandong Land Resour*, 2017, 33(2): 39 - 42.

[15] 张乐, 赵景蒲, 王浩, 等. 广饶县地面沉降成因及预测分析[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(8): 56 - 61.
Zhang L, Zhao J P, Wang H, et al. Analysis on the origin and prediction of ground subsidence in Guangrao County [J]. *Shandong Land Resour*, 2018, 34(8): 56 - 61.

Dynamic monitoring of the groundwater in Guangrao County in Shandong Province and the analysis of its geological environmental effect

LIU Shuai^{1,2}, LIU Zhitao^{1,2}, DUAN Xiaofei^{1,2}, FENG Ying^{1,2}, JIANG Shujie^{1,2}, HUANG Song^{1,2}

(1. No. 2 Hydrogeology and Engineering Team of Shandong Geology and Mineral Exploration Bureau & Mineral resources, Shandong Dezhou 253072, China; 2. Lubei Geo-engineering Exploration Institute in Shandong, Shandong Dezhou 253072, China)

Abstract: Guangrao County is rich in underground water resources, which is an important source of industrial and agricultural water for production and domestic use. And there are some geological environmental problems such as groundwater depression funnel, saltwater intrusion and land subsidence, due to the long - term large - scale ex-

exploitation of groundwater. Through the collection and analysis of the multi-year monitoring data of groundwater level, the authors in this paper have revealed the evolution law of groundwater level and predicted the change trend. The results show that the shallow groundwater depression funnel has been basically stable without aggravating trend under current mining conditions. Considering the developing trend of the land subsidence and saltwater intrusion, the authors have concluded that the restricted depth of deep groundwater is no more than 80 m, and the restricted depth of saltwater intrusion in Shimiao area is 10 m, which has provided the technical basis for the rational exploitation of local groundwater and the prevention of geological environmental problems.

Keywords: groundwater level; dynamic monitoring; change trend; restricted depth

(责任编辑: 刘丹)