

苏锡常地区微承压水开采地面沉降效应研究

陶 芸

(江苏省地质调查研究院 江苏 南京 210018)

[摘要] 根据苏锡常地区微承压含水层的基本特征与地下水开采诱发地面沉降的机理,采用对比分析方法,确定开采微承压水的主要压缩层位,以及开采微承压水诱发地面沉降的影响因素,从定性的角度分析开采微承压水对诱发地面沉降的影响程度。结合微承压水开采示范工程,假定水位埋深降至微承压含水层顶板条件下定量计算地面沉降量,并从示范工程地面沉降实测数据分析了开采微承压水诱发地面沉降的影响程度。

[关键词] 地下水开采,地面沉降效应,微承压水,苏锡常地区

[中图分类号] P641 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1672-1292(2012)02-0080-07

Study on the Land Subsidence by the Micro-Confined Groundwater Mining in Suzhou-Wuxi-Changzhou Area

Tao Yun

(Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: According to the basic characteristics of micro-confined groundwater aquifer and the mechanism of the ground subsidence bringing out groundwater mining, this paper defines the main compression soil horizon and brings out the ground subsidence influence factors by mining the micro-confined groundwater with a contrastive analysis method, and proves the influence degree on bringing out ground subsidence by adopting the qualitative analysis method. Combining with the micro-confined groundwater mining demonstration engineerings, this paper gains the ground subsidence value by adopting quantitative calculating supposing the groundwater level under the micro-confined aquifer roof-to-floor, and analyses the influence degree on bringing out ground subsidence by mining the micro-confined groundwater by using ground subsidence practical measurement datas.

Key words: groundwater mining, ground subsidence effect, micro-confined groundwater, Suzhou-Wuxi-Changzhou area

根据水文地质调查结果,苏锡常地区分布有丰富的微承压地下水。在该地区因超采深层地下水诱发严重地面沉降的情况下,人们对于微承压地下水的开采也存在很多忧虑,一些人认为微承压含水层岩性较细,很松散,径流条件比较差,开采微承压水会导致砂层压密固结,产生更为严重的地面沉降问题;另外一些人的观点则相反,认为浅层地下水埋藏较浅,在地表水资源丰富的苏锡常地区易于得到补给,是可恢复资源,开采微承压地下水不会诱发严重的地面沉降问题,导致地面高程资源损失与地面形变^[1-7]。

针对以上两种观点,论文结合苏锡常地区水文地质条件(主要为Ⅱ承压含水层及微承压含水层),分析影响地面沉降量的因素。在定性分析的基础上,通过对开采微承压水所引起的土层压缩量的计算,并结合实测资料进行分析,研究微承压水开采与地面沉降的关系。

1 地面沉降影响因素分析

开采地下水在一个地区是否会发生地面沉降,会产生多大的沉降量,这主要取决于两大因素:一是开采地下水引起的孔隙水压力降低;二是易压缩土层的存在。其中地下水水位持续下降是产生地面沉降的外

收稿日期: 2012-05-04.

基金项目: 国家“863”计划(2009AA12Z223)。

通讯联系人: 陶 芸,高级工程师,研究方向: 水文地质、环境地质与地质灾害。E-mail: 654848610@qq.com

在动力, 而易压缩土层是产生地面沉降的内在基础。

据土力学原理 粘性土(层) 最终沉降量计算公式为:

$$S = \frac{a}{1 + e_1} \Delta h \cdot \gamma_w \cdot H. \quad (1)$$

砂层的沉降量计算公式为:

$$S = \Delta h \cdot \gamma_w H / E_s. \quad (2)$$

式中 e_1 为土的孔隙比; a 为土的压缩系数 /MPa⁻¹; γ_w 为水的容重 / (kN/m³); E_s 为砂层的弹性模量 /MPa; H 为砂(粘性土) 层的厚度 /m; Δh 为水位降 /m。

由式(1) 与式(2) 可以看出, 土层厚度、压缩性的强弱、水位降是影响地面沉降量的主要因素。

2 微承压含水层(组) 特征

除基岩山区及江阴、常熟等地残丘周围微承压含水层缺失外, 苏锡常地区微承压含水层皆有分布。含水层岩性多为灰、灰黄色粉砂和粉砂夹亚粘土薄层, 其顶板埋深 4 ~ 12 m, 底板埋深在 25 ~ 50 m 间。受沉积环境控制, 含水砂层在平面分布上具有条带状展布规律, 可分为太湖—常州市区—圩塘—硕放—北桥—辛庄—沙家浜—梅李、无锡硕放东—东桥—苏州—郭巷—角直—千灯 3 个条带(如图 1 所示)。在垂向上, 大部分地区呈上、下两层分布, 20 m 以浅含水层岩性多为粉细砂、粉土、粉质粘土夹薄层粉砂, 基本上全区发育, 分布较为稳定; 除武进横林至无锡市西部地区发育较差外, 其他地区均较稳定, 厚度为 5 ~ 25 m 左右; 在 35 ~ 50 m 区段内, 含水砂层多呈夹层状发育, 层次较多, 岩性较细, 平面上变化复杂, 分布很不稳定。两层砂之间岩性在区域上也呈现规律性变化, 太湖平原区以粉质粘土为主, 长江三角洲地区主要为粉质粘土夹薄层粉砂、粉土(千层饼状结构) 等, 局部地区上下两含水层与下部 I 承压含水层连通, 含水层厚度较大。



图 1 微承压含水层空间分布图

Fig.1 The map of micro-confined aquifer spatial distribution

3 地面沉降定性分析

根据微承压含水层(组) 基本特征与土工试验结果, 微承压含水层顶板岩性以粘土、亚粘土、亚砂土为主, 孔隙比为 0.643 ~ 1.245, 含水量为 23.0% ~ 43.1%, 压缩系数为 0.16 MPa⁻¹ ~ 0.59 MPa⁻¹, 压缩模量为 3.72 MPa ~ 10.31 MPa, 均为中—高压缩性土, 具备了产生地面沉降的内在因素, 开采后微承压水位下降, 必然导致地面沉降的发生。为研究微承压开采后是否诱发更大的地面沉降量, 将微承压含水层与第 II 承压含水层(区内主采层) 的地面沉降影响因素对比, 对开采浅层地下水是否诱发严重地面沉降问题进行定性分析。

3.1 压缩层位确定

受区域深层地下水开采的影响, 浅部承压水由浅到深逐级补给深层地下水, 水位埋深也相应逐渐增大, 因此, 微承压水开采时, 接受来自下部含水层的越流补给较少, 含水层底板的沉降量在此不予考虑。从常州分层标(土层结构及分层标位置如图 2 所示) 往年的监测数据显示, 常州市第 II 承压水含水层及其顶板(第二粘土层、第二砂层) 的累计压缩量高达 450.97 mm, 占总沉降量的 68% (见表 1)。因此, 在进行微承

压地下水开采地面沉降效应定性分析时 压缩层位只考虑含水层及其顶板^[8 9].

表 1 1984~2011 年各土层压缩监测数据表
Table 1 Soil horizon compression monitoring datas from 1984 to 2011

层次	第一粘土层	第一砂层	第二粘土层	第二砂层	第三粘土层	第三砂层	第四粘土层	合计
压缩量/mm	+0.64	10.51	373.89	77.08	42.29	131.78	28.31	663.22
百分比	+0.10	1.58	56.38	11.62	6.38	19.87	4.27	100.00

注: + 表示回升

孔位	常州市天宁区清凉山小学			孔 号		大 地 座 标	X=3519475.0 m		
				标 高	4.69m		Y=20780140.0 m		
钻 孔 土 层 结 构 及 岩 性						土 层 空 间 位 置 特 征			
层底标高 (m)	层底深度 (m)	厚度 (m)	柱 状 图 (1：1000)	岩 性 简 述	土层类型	代号	土层空间特征 (m)		
-0.79	5.48	5.48		粉质粘土	第 一 粘土层	NTC1	层顶深度	0.00	
-13.86	18.55	13.07		粉砂			层底深度	5.48	
-23.97	28.66	10.11		粉土及软塑粉质粘土			厚 度	5.48	
-30.71	35.40	6.74		粉质粘土底见粉砂	第 一 砂 层	STC1	层顶深度	5.48	
-33.91	38.60	3.20		粉质粘土			层底深度	18.55	
-39.80	44.49	5.89		粉质粘土			厚 度	13.07	
-45.91	50.60	6.11		粉质粘土	第 二 粘土层	NTC2	层顶深度	18.55	
-56.91	61.60	11.00		粉质粘土			层底深度	92.80	
-66.65	71.32	9.72		粉质粘土			厚 度	74.25	
-88.11	92.80	21.48		软塑状粉质粘土	第 二 砂土层	STC2	层顶深度	92.80	
-90.81	95.50	2.70		粉细			层底深度	107.80	
-103.11	107.80	12.30		细砂			厚 度	15.00	
-112.96	117.65	9.85		粘土及粉质粘土	第 三 粘土层	NTC3	层顶深度	107.80	
							层底深度	117.65	
							厚 度	9.85	
-138.91	143.60	25.95		粉细砂，底部中砂夹数层粘性土	第 三 砂土层	STC3	层顶深度	117.65	
-148.31	153.00	9.40					层底深度	143.60	
-159.11	163.80	10.80		硬塑状粉质粘土			厚 度	25.95	
				粉细砂	第 四 粘土层	NTC4	层顶深度	143.60	
							层底深度	153.00	
							厚 度	9.40	

注: ↓ - 分层标位置, ▲ - 孔隙水压力测头位置。

图 2 常州市清凉山小学土层结构及分层标位置图

Fig.2 Qingliang shan primary school soil horizon structure and layering staff position map

3.2 影响因素对比

(1) 土层压缩性

将微承压含水层与第Ⅱ承压含水层的顶板粘性土层的压缩系数及含水砂层的弹性模量进行统计,如表2所示,微承压含水层顶板岩性为中—高压缩性,第Ⅱ承压含水层顶板岩性为低—中压缩性,微承压含水层的压缩性较第Ⅱ承压含水层大。

(2) 水位降

第Ⅱ承压含水层在开采初期(1970年代以前)水位埋深10 m以浅,长期以来开采量远大于补给量,造成含水层水位持续下降,目前50 m水位埋深等值线已包括全区,中心水位埋深达80多m,部分地区已呈疏干开采,水位降很大。

微承压含水层开采后,其水位降低将激发上部潜水含水层的垂向补给,潜水位也将下降,但由于潜水含水层直接接受大气降雨或地表水的入渗补给,水位降深不大。这一点可以从同里及福山浅层地下水开采示范工程长期抽水试验监测结果得到证明。

如图3所示,同里示范工程从2008年6月开始正常使用,一直进行潜水、微承压水位测量,每天测量3次,同时记录降雨时间。开采后,微承压含水层水位埋深一直保持在6.8 m左右(观测孔2),水位降低了约5.5 m;潜水含水层水位也相应降至2.5 m,水位降低约2.0 m,两者存在约4 m的水位差,但降雨后,潜水位又得到大气降雨的补给而迅速回升至初始水位。

如图4所示,福山示范工程也表现出相同的特征,在整个抽水过程中,出现一次降雨过程,距开采井群中心5 m处的民井水位变化明显。

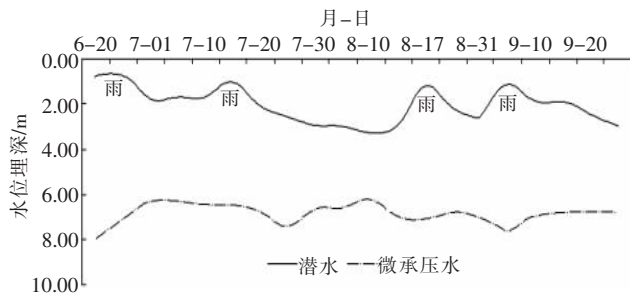


图3 同里微承压含水层开采期间潜水、微承压水水位变化对比图
Fig.3 Tongli groundwater level changes contrast map of the phreatic and micro-confined water in the mining period

表2 土层压缩性对比表

Table 2 Contrast table soil horizon compression function			
项目	微承压含水层	第Ⅱ承压含水层	
顶板	岩性	亚粘土、亚砂土	
	压缩系数/ MPa^{-1}	0.16~0.59	
砂层	岩性	亚砂土、粉砂	
	压缩模量	10~15	
	压缩性	中—高压缩性	
		低—中压缩性	

注:第Ⅱ承压含水层土力学参数来自以往区域工勘资料。

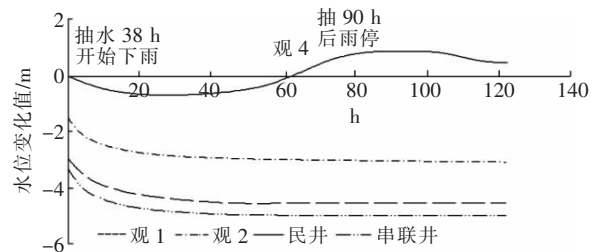


图4 福山示范工程抽水期间观测孔与抽水井水位变化对比图
Fig.4 Fushan demonstration engineering groundwater level changes contrast map of the observation hole and pumping well in the pumping period

(3) 压缩土层厚度对比

受区域深层地下水开采的影响,承压水由浅到深逐级补给,水位埋深也相应逐渐增大,因此,微承压水开采时,不会接受来自下部含水层的越流补给,也不会引起微承压含水层底板的沉降,压缩层位为微承压含水层及其顶板。

如表3所示,区内微承压含水砂层厚度一般介于5~15 m之间,大于15 m的砂层主要分布在沿江地区,含水层顶板粘性土层厚度6~10 m;第Ⅱ承压含水层顶板埋深80~110 m,厚度为10~60 m不等,含水砂层厚度在古河床地带可达30~50 m,在边缘地带为10~25 m;第Ⅱ承压含水层压缩层的厚度远大于微承压含水层。

表3 压缩土层厚度对比表

Table 3 Thickness contrast map of the compression soil horizon

	微承压含水层	第Ⅱ承压含水层
顶板/m	4~8	10~60
砂层/m	5~15(腹地)	30~50(古河床)
	>15(沿江地区)	10~25(边缘地带)

3.3 定性分析

如前所述,地面沉降量的大小由土层的压缩性、厚度及水位降等多方面因素决定,缺一不可。微承压含水层的压缩性大于第Ⅱ承压含水层,在相同水位降深及压缩土层厚度的情况下,微承压含水层沉降量大于第Ⅱ承压含水层。但事实上,微承压含水层埋藏浅,其顶板即为潜水含水层,垂向补给资源量(地表水、大

气降水、灌溉用水) 较为丰富,微承压水开采后,潜水含水层不会引起过大的水位降,且微承压含水层压缩土层的厚度远小于第Ⅱ承压含水层,由此可以初步判断开采浅层地下水不会诱发严重的地面沉降。

由于微承压含水层及顶板均为中—高压缩性土,在开采初期,产生的沉降量占总沉降量的比例较大,即沉降初期沉降速率大,随着开采进行,粘性土层压缩,地面沉降速率将逐渐减小。

4 地面沉降量计算

根据试验资料,微承压含水层抽水稳定后,潜水含水层水位将降低,但由于潜水含水层接受大气降水与地表水的入渗补给,二者存在约 4 m 的水头差(如图 5 所示),造成潜水水位下降深度范围内(图中 h_2 指示深度)粘性土由饱和和土变为非饱和土,水、土两相转变为水、土、气三相,而目前对于非饱和土压缩量的计算还较为困难。其下部分仍为饱和土,土中水位是随深度的增加而连续变化的,所产生的附加应力也是随深度而逐渐增加。

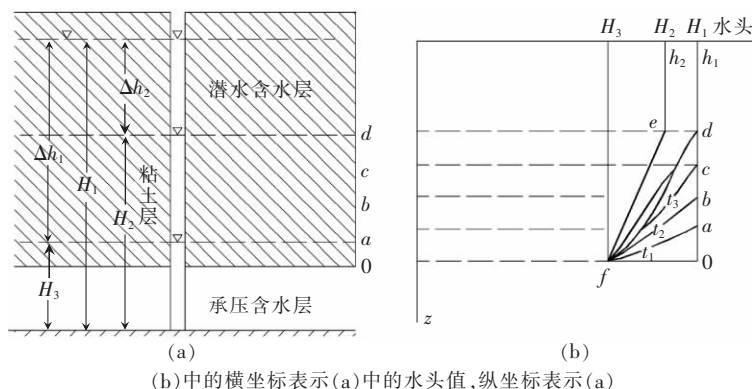


图 5 粘性土释水压密示意图

Fig.5 Releasing groundwater and compaction sketch map of the clay band

随着时间的推移,微承压及潜水的水位趋近于稳定,含水层顶板粘性土中的水头分布如图 5 中 b 所示。上部粘性土层的最终沉降量对应于图中的梯形 $efod$ 与矩形 edh_1h_2 的面积之和。

4.1 假定条件

为简化计算,假定:

(1) 一般情况下,水位降越大,其激发的越流补给量越大,但对于微承压含水层而言,若水位降至含水层中,承压流变为无压流,含水层中的水流状态会发生明显的变化,松散的粉砂层产生的压缩变形会造成较大的地面沉降。因此,为保护地质环境,保证微承压水的可持续开发利用,水位降深以微承压水位下降至含水层顶板作为其水位降的下限,分别对各示范工程进行沉降量计算。

(2) 将潜水水位下降深度范围内(图 5 中 Δh_2 指示深度)以非饱和土进行计算。

(3) 潜水、微承压水初始水位埋深相同,在此假定各示范工程微承压水的初始水位埋深均为 2 m。

(4) 抽水稳定后,潜水、微承压水的水头差值取为 4 m。

4.2 沉降量计算结果

根据土工试验获取的计算参数,利用土层压缩量计算公式,在微承压水位埋深降至含水层顶板的假定条件下,湖塘、龙虎塘、同里、福山、黄埭、梅李与冶塘 7 个微承压地下水开采示范工程处的地面沉降量预测结果如表 4 所示^[10]。

表 4 假定水位埋深降至含水层顶板条件下地面沉降量预测表

Table 4 Ground subsidence value forecasting table supposing the groundwater level under the micro-confined aquifer roof-to-floor

示范工程	顶板厚度/ m	含水层厚度/ m	压缩系数/ MPa^{-1}	孔隙比	砂层弹性模量/ MPa	最终沉降量/mm		
						顶板	砂层	累计
湖塘	8.40	22.10	0.30	0.77	12.00	36.68	114.18	150.86
龙虎塘	7.20	28.70	0.23	0.73	13.00	18.93	114.80	133.73
同里	7.00	17.40	0.38	0.80	15.00	27.44	58.00	85.44
福山	10.60	14.50	0.28	0.79	18.00	74.39	69.27	143.66
黄埭	11.00	7.50	0.23	0.78	12.00	60.30	56.25	116.55
梅李	6.80	10.60	0.30	0.99	17.00	17.77	29.93	47.70
冶塘	7.10	6.40	0.28	0.82	12.00	21.0	27.20	48.20

5 示范工程地面沉降实测结果分析

在各个微承压水开采示范工程处,对监测墩及分层标进行定期的地面形变测量,测量数据为相对高程.对测量数据研究分析后认为:与开采深层地下水不同,开采微承压水诱发的地面沉降有自己的特点.本文以同里微承压水开采示范工程为例说明其特点:

(1) 地面沉降在微承压水开采后即有反映,两者之间无明显的滞后性,且地面沉降影响范围较小.同里示范工程2011年6月份开始正常使用,至12月产生的最大沉降量为20.9 mm,距示范井越近(如 J_1 标),沉降量越大(见表5).距示范工程较远的 J_7 、 J_8 、 J_9 、 J_{10} 监测墩产生的地面沉降量基本为零,地面沉降影响范围约150 m,如图6所示.

表5 同里示范工程各监测墩6~12月份沉降量

Table 5 Ground subsidence value of the demonstration engineering monitor mound in Tongli

监测墩编号	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}
距 J_1 的距离/m	0.0	21.2	41.1	72.9	92.6	112.6	162.2	212.0	261.6	311.1
至10月沉降量/mm	11.7	11.5	13.2	4.6	4.0	1.9	-0.9	0	-1.1	-0.5
至12月沉降量/mm	20.9	15.6	16.8	8.1	8.8	4.1	2.2	2.9	2.1	4.9

(2) 开采初期,微承压顶板沉降量大于含水砂层,含水砂层不再为瞬时沉降,而是与粘性土一样,沉降量表现为逐渐增大的趋势.根据地面标、分1标、分2标的建标深度,地面标与分1标控制微承压顶板的沉降量,分1标、分2标控制含水层的沉降量.开采初期(2011年6月~10月)地面沉降测量结果见图7.

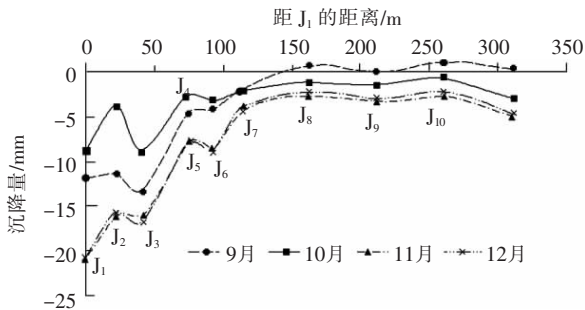


图6 同里示范工程6月~12月份监测墩累计地面沉降量统计图

Fig.6 Accumulative ground subsidence value statistics map of the demonstration engineering monitor mound from the 6th month to the 12th month in Tongli

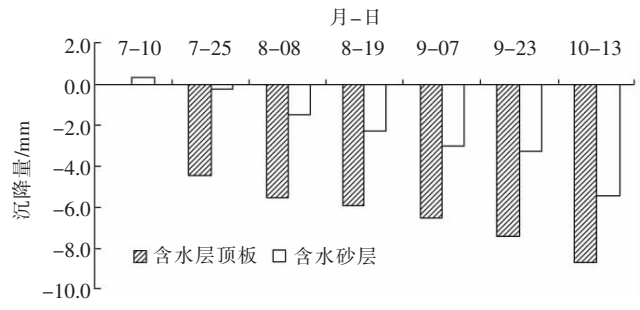


图7 同里示范工程7月~10月微承压含水层顶板及砂层沉降量对比图

Fig.7 Micro-confined aquifer roof-to-floor and sand layer ground subsidence value contrast map of the demonstration engineering from the 7th month to the 10th month in Tongli

由图7分析可知,至2011年10月(累计抽水4个月)总的沉降量为14.0 mm,与监测墩的测量结果基本一致(最大沉降量为13.4 mm),其中微承压含水层顶板的沉降量为8.6 mm,含水砂层的沉降量为5.4 mm.开采初期,顶板沉降量大于含水层自身的沉降量.

另外,从理论上讲,由于砂层渗透性强,水位降低时,砂层中的水在压力作用下迅速析出,孔隙水压力减小,有效应力迅速增加到与降低后的水位相平衡的程度,变形几乎瞬时发生.但实测结果表明,微承压含水砂层的沉降同粘性土一样,其渗透变形是一个逐渐增加的过程,分析认为,这主要与含水层岩性含较多粘性土有关.

(3) 地面沉降与微承压水开采量呈较明显的相关关系.如图8所示,同里示范工程6月~10月,开采量基本保持在 $500 \text{ m}^3/\text{d}$,沉降初期,地面沉降速度为5 mm/月;之后逐渐减缓,为2.4 mm/月;10月工厂用水量增加至 $655 \text{ m}^3/\text{d}$,水位埋深下降至10 m,沉降速率也相应增加,反映较为迅速.

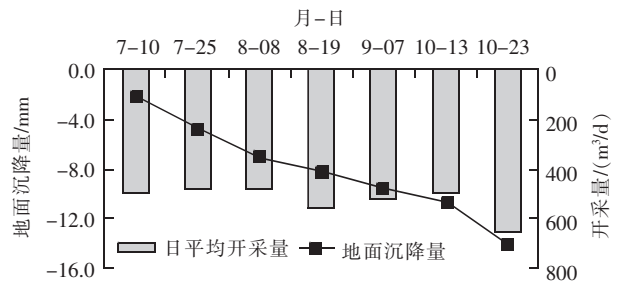


图8 同里分层标地面沉降量与日开采量对比图

Fig.8 Contrast map of layering staff ground subsidence value and groundwater mining values every day in Tongli

6 结语

通过对常州市天宁区清凉山小学地面沉降监测基岩标与分层标及其长期监测数据、微承压水开采示范工程试验与监测数据的分析,开采微承压水的压缩层位主要为微承压含水层及其顶板,微承压含水层具备了地面沉降的内在基础,开采后,水位下降,必定会引起地面沉降。微承压含水层的压缩性大于第Ⅱ承压含水层,但由于微承压含水层埋藏浅,其顶板即为潜水含水层底板,微承压水开采后,可得到潜水的越流补给,且微承压含水层压缩土层的厚度远小于第Ⅱ承压含水层,由此可以判断开采浅层地下水不会诱发严重的地面沉降。

开采微承压水诱发的地面沉降与开采深层地下水诱发的地面沉降不同,存在以下3个特点:第一,地面沉降在微承压水开采后即有反映,两者之间无明显的滞后性,且地面沉降影响范围较小;第二,开采初期,微承压含水层顶板沉降量大于含水砂层,含水砂层不再为瞬时沉降,而是与粘性土一样,沉降量表现为逐渐增大的趋势;第三,地面沉降与微承压水开采量呈较明显的相关关系。

[参考文献](References)

- [1] 陈锁忠,陶芸,潘莹. 苏锡常地区地下水超采引发的环境地质问题及其对策[J]. 南京师大学报:自然科学版,2002,25(2):67-72.
Chen Suozhong, Tao Yun, Pan Ying. Environmental geological problems caused by excess drawing groundwater and counter-measures in the Suzhou, Wuxi and Changzhou area[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 2002, 25(2):67-72. (in Chinese)
- [2] 顾阿明,王彩会. 苏锡常地区浅层地下水资源保护和合理开发利用试验研究报告[R]. 南京:江苏省地质调查研究院,2002.
Gu Aming, Wang Caihui. Study and experiment report on reottection and rational development and use of the shallow groundwater resource in Su-Xi-Chang area[R]. Nanjing: Institute of Geological Survey of Jiangsu Province 2002. (in Chinese)
- [3] 胡建平,隋兆显,陈杰. 苏锡常地区地下水禁采后的地质环境效应研究[J]. 江苏地质,2006,30(4):261-264.
Hu Jianping, Sui Zhaoxian, Chen Jie. Study on geological environmental effect after banning groundwater pumping in Su-Xi-Chang area[J]. Jiangsu Geology, 2006, 30(4): 261-264. (in Chinese)
- [4] 王彩会,朱锦旗,陈杰. 苏锡常地区浅层地下水开采技术研究及环境效应分析[J]. 地质灾害与环境保护,2004,15(1):42-45.
Wang Caihui, Zhu Jinqi, Chen Jie. Study on the shallow groundwater mining technique and its environmental effect in Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation 2004, 15(1):42-45. (in Chinese)
- [5] 顾阿明,王彩会,朱锦旗. 苏锡常地区浅层地下水开发利用前景分析[J]. 水文地质工程地质,2003(4):90-92.
Gu Aming, Wang Caihui, Zhu Jinqi. Analysis of the prospect of development and exploitation of shallow groundwater in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology 2003 20(4):90-92. (in Chinese)
- [6] 姜洪涛. 苏锡常地区地面沉降及其若干问题探讨[J]. 第四纪研究,2005,25(1):29-33.
Jiang Hongtao. Problems and discussions in the study of land subsidence in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. Quaternary Sciences, 2005 25(1): 29-33. (in Chinese)
- [7] 解晓南,许朋柱,秦伯强. 太湖流域苏锡常地区地面沉降若干问题探析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(1):127-130.
Xie Xiaonan, Xu Pengzhu, Qin Boqiang. Analysis on problems and countermeasures of land-surface subsidence in Tailake basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(1):127-130. (in Chinese)
- [8] 施小清,薛禹群,张云. 常州地区粉质粘土的蠕变模型[J]. 工程勘察,2006(5):16-19.
Shi Xiaoqing, Xue Yuqun, Zhang Yun, et al. Creep model of Changzhou silty clay[J]. Journal of Geotechnical Investigation and Surveying, 2006(5): 16-19. (in Chinese)
- [9] 李军世,林咏梅. 上海淤泥质粉质粘土的 Singh-Mitchell 蠕变模型[J]. 岩土力学,2000,21(4):363-366.
Li Junshi, Lin Yongmei. Singh-mitchell creep model of Shanghai very soft silt clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 363-366. (in Chinese)

(下转第92页)

- [5] 迟文学,吴信才,于海洋,等. 张力样条函数在雨量等值线光滑中的应用研究[J]. 水文, 2007, 27(1): 22-25.
Chi Wenxue, Wu Xincan, Yu Haiyang et al. Application of the tension spline function in rainfall isoline smoothing[J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(1): 22-25. (in Chinese)
- [6] Yu Kiyun. Performance improvement of bezier spline fitting for more accurate approximation of natural linear entities [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 1999(6): 181-193.
- [7] Liu Fang. New algorithm of complex curve spline interpolation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009(5): 834-836, 846.
- [8] Zeng Yong. A distance-based parameter free algorithm for curve reconstruction[J]. CAD Computer Aided Design, 2008(2): 210-222.
- [9] 张凤蛟. 快速曲线拟合的方法[J]. 延边大学学报: 自然科学版, 2006, 32(3): 208-211.
Zhang Fengjiao. Fast curve fitting method[J]. Journal of Yanbian University: Natural Science Edition, 2006, 32(3): 208-211. (in Chinese)
- [10] 和正民. 关于计算机自动绘制光滑曲线的数学方法的探索[J]. 北京地质, 1998(1): 18-23.
He Zhengmin. Discussion on the mathematical methods of curvesmoothing in automatic drawing with a computer[J]. Beijing Geology, 1998(1): 18-23. (in Chinese)
- [11] 邓曙光,李婉. 曲线光滑的张力样条插值法 VC 实现[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(5): 387-390.
Deng Shuguang, Li Wan. Realization of smoothing curve with tension spline interpolation under visual C++ [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(5): 387-390. (in Chinese)
- [12] 王延亮,王明爽. 新型曲线光滑法——切线抹角法[J]. 测绘通报, 2005(3): 52-54.
Wang Yanliang, Wang Mingshuang. The method of the new-type line smoothing—the tangent erased cape method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005(3): 52-54. (in Chinese)
- [13] 文敏,唐新民,闫浩文,等. 一种改进型曲线光滑算法[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 181-183.
Wen Min, Tang Xinmin, Yan Haowen et al. An innovatory algorithm for curve smoothing[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(5): 181-183. (in Chinese)
- [14] De Boor C. High accuracy geometric hermite interpolation[J]. Computer Aided Geometric Design, 1987, 4(4): 269-278.
- [15] Randal E Bryant, David R O' Hallaron. 深入理解计算机系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Randal E Bryant, David R O' Hallaron. Computer Systems—A Programmer's Perspective[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]

(上接第86页)

- [10] 顾阿明,王彩会,徐玉琳,等. 苏锡常地区浅层地下水资源前景调查与开发利用示范[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院, 2006.
Gu Aming, Wang Caihui, Xu Yulin. Prospect investigation and development and exploitation demonstration of the shallow groundwater resource in Su-Xi-Chang area[R]. Nanjing: Institute of Geological Survey of Jiangsu Province, 2006. (in Chinese)
- [11] 张云,薛禹群. 一维非线性地面沉降模型参数敏感性分析[J]. 水文地质工程地质, 2005(3): 1-4.
Zhang Yun, Xue Yuqun. Sensitivity of parameters in one-dimensional nonlinear model for land subsidence[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005(3): 1-4. (in Chinese)
- [12] 叶淑君,薛禹群. 应用沉降和水位数据计算上海地区弱透水层的参数[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 256-260.
Ye Shujun, Xue Yuqun. Stress-strain analysis for storage coefficients and vertical hydraulic conductivities of aquitards in Shanghai area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 256-260. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]