doi:10.3799/dqkx.2014.148

黄河三角洲地下水动态变化及其与地面沉降的关系

刘 勇1,李培英1,丰爱平1*,黄海军2

1. 国家海洋局第一海洋研究所,山东青岛 266061
 2. 中国科学院海洋研究所,山东青岛 266071

摘要:为了分析黄河三角洲地下水动态及其与地面沉降的关系,利用多年地下水和地面沉降监测数据,发现黄河三角洲广饶 县和东营区的地下水动态变化剧烈且地面沉降严重,含水层多处于超采状态,浅、深层地下水降落漏斗先后出现.深层地下水 降落漏斗中心水位下降速度达 2~3 m/a.近年来,东营和广饶地面沉降漏斗中心沉降量和速率分别为 155.1 mm、28.2 mm/a 和 356.0 mm、64.7 mm/a.借助 GIS 技术及数理统计法,发现深层地下水降落漏斗与沉降漏斗空间耦合良好,深层地下水位与 地面高程呈线性正相关,相关系数为 0.92,深层地下水过度开采已成为影响沉降的最根本因素.井灌区第三粘性压缩层成为 地面沉降主要贡献层,且深层地下水降落漏斗中心的地下水位已低于第三承压含水层临界水位,沉降趋于严重. 关键词:黄河三角洲;水位;地下水降落漏斗;地面沉降;环境地质.

中图分类号: P736.5 **文章编号:** 1000-2383(2014)11-1555-11 **收稿日期:** 2014-02-14

Groundwater Dynamic Evolutions and Relationship between Groundwater Level and Land Subsidence in the Yellow River Delta

Liu Yong¹, Li Peiying¹, Feng Aiping^{1*}, Huang Haijun²

1. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: To analyze the groundwater dynamic and the relationship between groundwater level and land subsidence in the Yellow River Delta, drastic groundwater level depression and serious land subsidence have been researched by monitoring data of groundwater level and land subsidence for years. Persistent groundwater overexploitation has resulted in groundwater depression cones in both shallow and deep aquifers successively. The deep groundwater level decline rate of cone centers is 2 to 3 m/a. In recent years, Dongying and Guangrao exhibit a typical subsidence area with cumulative settlement and subsidence rates of 155.1 mm, 28.2 mm/a and 356.0 mm, 64.7 mm/a, respectively. Using GIS and mathematical statistics, it is found that configuration of the subsidence cone is basically identical to the shape of the deep groundwater depression cone, and there exists a significant linear positive correlation between deep groundwater level and elevation in deep groundwater depression cone, with the correlation coefficient of 0.92. The deep groundwater overexploitation has been the most essential factor to land subsidence. The third compressed layer has become the main contribution layer of land subsidence in well-irrigated area. Because water level at centers of deep groundwater depression cone has fallen below critical water level of the third confined aquifer, land subsidence is becoming more and more serious.

Key words: the Yellow River Delta; water level; groundwater depression cone; land subsidence; environmental geology.

与开采地下水有关的地面沉降遍布世界各国, 如墨西哥的墨西哥城(Ovando-Shelley *et al.*,

2007)、美国新泽西州(Sun *et al.*, 1999)、意大利拉 文纳和威尼斯(Carbognin *et al.*, 2004; Teatini *et*

* 通讯作者:丰爱平, E-mail: fengap@fio. org. cn

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(No. GY0214G17);国家自然科学基金项目(No. 40676037);海洋公益专项 "我国典型海岛地质灾害监测及预警示范研究"(No. 201005010).

作者简介:刘勇(1981一),男,博士后,主要从事海岸带环境地质灾害机理及 RS 和 GIS 在海岛海岸带资源环境中的应用研究. E-mail: liuyong @fio. org. cn

al.,2005)和泰国曼谷(Yamanaka et al.,2011). 中国的华北平原(胡惠民和沈永坚,1991; Yi et al.,2011)、长江三角洲(Chai et al.,2004; Xue et al.,2005)和黄河三角洲(Liu and Huang,2013)等 地区沿海大、中城市地面沉降尤为严重(王若柏等, 1994;张云等,2003),亦都与地下水开采关系密切. 近代黄河三角洲(即通常意义上的黄河三角洲)面积 约为5400 km²,97%的区域位于东营市内.东营全 市人均占有当地水资源量仅为全国人均水平的 10.98%,集中在夏季的降水绝大部分排入海洋,很 少能被利用,更加剧了水资源短缺.随着工、农业的 发展,黄河上游地表水拦蓄加剧,下游黄河三角洲地 下水开采愈发严重,地下水位大幅下降,出现了浅、 深层地下水降落漏斗,由此产生了不少环境地质问 题,其中地面沉降最为典型.

地下水动态是地下水系统对多种外界因素变化 的响应,水位是最重要的地下水动态要素,地下水位 波动可以反映含水层水量增减和孔隙水压力改变过 程,含水层孔隙水压力的减小必然引起地层厚度的 压缩而发生地面沉降. 研究区分布有胜利油田和国 家级自然保护区,地下水位下降和地面沉降会引发 一系列环境地质灾害,甚至形成危害更大的灾害链. 现有研究多是定性分析地下水与地面沉降之间的关 系(别君等,2006;秦伟颖等,2008),尚未对三角洲 地区的地下水动态尤其是深层地下水与地面沉降之 间的定量关系进行详细而深入的探讨.因此,本文根 据鲁北地质工程勘察院和广饶县水利局长时间序列 地下水观测与地面沉降监测及已有研究资料,借助 GIS技术及回归分析法研究黄河三角洲地下水动态 及其与地面沉降的关系,对研究区地下水资源科学 管理和地面沉降防治具有重要现实意义.

1 研究区概况

1.1 地理概况

黄河三角洲地形的主要特征是以黄河为主要分 水岭向河道两侧及东部入海口倾斜,中间高、两侧 低,西南高、东北低,呈扇状向海微倾(图 1).小清河 以南地区地势最高,地面高程为 10~30 m;环渤海 沿岸地势最低,地面高程低于 2 m;地面坡降由南向 北逐渐变小,小清河以南坡度约 1/1 000,小清河以 北仅约 1/10 000.

东营市属温带大陆性季风气候,雨热同季,多年 平均降水 574.8 mm,年际变化大.1966—2010年, 1990 年降水最多为 968.1 mm,2000 年降水最小为 327.0 mm,两者相差 641.1 mm.2006—2010 年各 区县年降雨量 426.9~625.6 mm,年均 533.0 mm (图 2a).年内降水分布极不均匀,主要集中在 7、8 月份,两月平均共降雨 262.8 mm,占全年的 49.3% (图 2b).降水量空间分布差异较小,广饶县稍大于 其他区域,5年平均降水 569.6 mm,利津县降水最 少为 508.9 mm,两者相差 60.7 mm.

1.2 水文地质概况

在全新世海浸旋回和构造沉降的背景下,通过 黄河和潮流的共同作用而形成的地层沉积造就了黄 河三角洲独特的水文地质特征,垂向上呈现砂土、粉 土、粉质粘土和粘土相间出现的地层结构,含水层颗 粒从上到下由细变粗.黄河三角洲地下水属于松散 岩类孔隙水,含水层以细砂和粉细砂为主,弱透水层 则以粘土、砂质粘土和粉土为主.以广饶县石村一颜 徐一稻庄一线为界,以南为山前冲积洪积平原全淡 水区 I1,以北为黄泛平原咸水区 I2(图 1).黄泛平原 咸水区以利津一东营一广饶盐场一线为界,以南为 "上咸下淡"亚区 I2-1,以北为黄河三角洲"全咸"亚 区 I2-2.

从南到北由粗变细,含水层由单一结构逐渐变 成层状结构,地下水埋深由深变浅,水力性质由潜水 逐步过渡为承压水.根据地层的沉积年代、成因类 型、土的物理力学性质、土层变形和强度等特征,自上 而下划分为8个工程地质层,第二、三承压含水层是 地下水主要开采层位,底板埋深分别为85~118m和 600~650m,覆于相应含水层之上的第二、三粘性压 缩层底板埋深分别为36~78m和150~460m.

2 黄河三角洲地下水动态

2.1 黄河三角洲地下水开采评估

东营市含水层的分布及富水程度有很大差别, 各地的开采条件也不相同,不同地段利用地表水的 条件也不一样,特别是引黄条件的不同很大程度上 影响着对地下水的开发利用.因此,造成地下水开采 的区域不平衡,既存在超采区,又有基本不开采区. 地下水开发利用程度可用以下公式计算:

 $P = Q_{3\%}/Q_{\Pi R}$, 式中:P为地下水开采潜力系数; Q_{3R} 为地下水现状 实际开采量(万 m³); $Q_{\Pi R}$ 为地下水可利用 量(万 m³).

上式计算结果按照表1所示评价标准,可将地



图 1 黄河三角洲地形和水文地质分区 Fig. 1 Topographic map and hydrogeology partition of the Yellow River Delta



a. 年际降水量变化; b. 月均降水量变化

表1 地下水开采程度评价标准



<i>P</i> 值	$<\!\!80\%$	$80\% \sim 120\%$	$120\% \sim 150\%$	>150%
开采程度	有潜力	基本平衡	超采	严重超采

下水开采程度分为5种程度.

(1)浅层地下水开采评估.黄河三角洲地区最南端的广饶县南部浅层地下水资源最丰富,主要用于农业灌溉及工业生产,可采资源量5570万m³/a,多年来开采程度一直较高.由图3知,2006—2010年,

年均开采量7088万m³/a,平均开采程度127.3%, 属超采,超采量平均为1518万m³/a.除2010年以 外其他年份开采程度均超过了120%,2006年甚至 接近160%,超采量达3320万m³,属严重超采.东 营区和利津县浅层地下淡水分布范围小,且被咸水 包围,不宜大规模开采,故开采程度不高.

(2)深层地下水开采评估. 广饶县深层地下水 资源在黄河三角洲地区亦最丰富,开采量也最大,广 饶县经济开发区、大王镇、稻庄镇等地为主要开采 区,深层地下水主要用作工业用水,还有城镇和农村 生活供水.由图 3 知,2006—2010 年,广饶县深层地 下水 年均开采量 3 224 万 m³,平均开采程度 161.2%,属严重超采,年均超采1224 万 m³/a.东营 区深层地下水主要用于油田注水采油,年均开采程 度为 15.5%,利津县深层地下水基本不开采.

2.2 黄河三角洲地下水位动态变化

2.2.1 浅层地下水动态 (1)黄泛区和山前平原区 浅层地下水位变化.黄泛区(I2)浅层地下水位埋深 较浅,年内水位波动较大,2010 年水位埋深为 1~ 3 m,8、9 月最小,2、7 月最大(图 4a).东营区和利津 县年内水位最大变幅为 1.17 m,广饶县为0.53 m. 2000—2010 年,黄泛区浅层地下水位埋深大多小于 2 m,山前平原区广饶县陈官乡水位埋深均大于 2 m.浅层地下水年际间水位变化微小,变幅最大的 利津县上升了 1.83 m,水位下降地区主要分布在垦 利县西部、东营区西部以及小清河沿岸地区,降幅小于 0.5 m(图 4b).该区上部土壤渗透性良好,地下水 位明显受降雨和蒸发等气象因素影响,还受到灌溉 引水时间、引水量和灌溉定额等因素的影响,地下水 位埋藏浅,水位动态表现为降雨 一灌溉入渗 一蒸发 型.根据鲁北地质工程勘察院水文观测资料,受不同 季节降水和农业生产特点的影响,黄泛区浅层地下 水位年内动态变化过程呈现降一升一降一升一降的 形式(图 4c).

山前平原区(I1)全部位于广饶县内,2000— 2010年,年内水位起伏较小,夏季水位最低,之后逐 渐回升,春季最高,年内水位变幅为1.79~3.97 m. 同期年际间水位呈现明显的逐年下降趋势,下降速 率约1m/a(图5a).山前平原区东南的大王镇水位 波动具有代表性,年内波动相对更加剧烈,夏季有明 显的波谷.该区为农业井灌集中区,地下水埋藏较 深,受蒸发作用影响很小,主要排泄途径是人为开 采,主要补给源为大气降水,还有微弱的径流补给. 地下水动态为降雨入渗一径流一开采型,水位动态 曲线呈升一降一升一降一升的趋势(图5b).近年 来,随着农业结构变化,地下水开采集中时段亦随之 改变,水位动态变化趋于复杂.

黄河三角洲黄泛区与山前平原区浅层地下水位 动态对比显见,由于山前平原井灌区地下水大量开 采集中于夏季,虽然此时段降水丰富,但巨大的开采





Fig. 3 The extraction volumes and exploitation degree of both shallow and deep groundwater in the typical areas of the Yellow River Delta



图 4 黄泛区浅层地下水位动态及 2006—2010 年利津县盐窝镇北坝村地下水位监测曲线

Fig. 4 The dynamic of shallow groundwater in a year (a) and in different areas (b) of the Yellow River flooding area, the shallow groundwater level monitoring curve in Beiba Village, Yanwo Town, Lijin County between 2006 and 2010 (c)
a. 黄泛区 2010 年内浅层地下水位动态; b. 黄泛区 2000—2010 年际浅层地下水动态; c. 2006—2010 年利津县盐窝镇北坝村地下水位监测曲线



图 5 山前平原区浅层地下水位动态及 2006—2010 年广饶县大王镇陈官村地下水位监测曲线 Fig. 5 The dynamics of shallow groundwater level in piedmont plain (a) and the shallow groundwater level monitoring curve in Chenguan Village, Dawang Town, Guangrao County between 2006 and 2010 (b) a. 山前平原区浅层地下水位动态; b. 广饶县大王镇浅层地下水位年内动态

量还是造成水位标高的逐年大幅下降,形成了标高 低于海平面的地下水降落漏斗.黄泛区浅层地下水 埋深浅,开采量极少,年内和年际间水位呈韵律型起 伏,波动较小.

(2)山前平原区浅层地下水降落漏斗演化.山前 平原井灌区浅层地下淡水富集度高,水质好,分布面 积约 353 km²,可采资源量为 5 570 万 m³/a. 自 1980 年,井灌区出现以石村镇西高村和稻庄镇东水村为 中心的 2 个浅层地下水降落漏斗,中心水位分别为 -0.75 m(埋深 11.3 m)和-0.09 m(埋深 8.06 m), 面积为 32 km²,之后漏斗呈现逐年扩大趋势(图 6a).1991—2003 年,井灌区浅层地下水年均开采 9 472 万 m³,开采程度大于 140%(于治通, 2006); 2006—2010 年,年均开采 7 088 万 m³,开采程度大 于 120%,为超采甚至严重超采程度,已形成大范围 的地下水降落漏斗(图 6b),至 2010 年漏斗面积达 350 km²,是 1980 年的 10 倍,基本遍布整个井灌区. 漏斗区水位下降速率 0.8 m/a,埋深超过 20 m(刘青 勇等, 2006). 由图 6b 漏斗中心年均水位变化曲线 知,1991—2010年,漏斗中心李鹊镇苏家水位下降 了 13.86 m,下降速率为 0.73 m/a,至 2010 年降至 -15.45 m.期间水位仅有小幅回升(小于0.30 m), 浅层地下水开采已近极限.1997—2010年,另一漏 斗中心大王镇陈官水位下降了 13.03 m,速率为 1.00 m/a,2006年后减缓至 0.83 m/a,2010年水位 降至-15.97 m.

2.2.2 深层地下水动态 (1)深层地下水位变化分析.黄河三角洲深层淡水砂层顶板埋深自南往北逐渐变深,随着黄河三角洲地下水需求量的日益增加, 20世纪70年代后期开始开采深层地下水,开采井 主要分布在广饶县,其次是东营区的牛庄和军马四 分场等地.



图 6 广饶县井灌区浅层地下水降落漏斗演变分布与水位动态

Fig. 6 The evolution of shallow groundwater depression cones in the well irrigation area of Guangrao County (a) and the distribution of shallow groundwater depression cones and water level dynamics in the cone centers (b) a. 广饶县井灌区浅层水降落漏斗面积变化;b. 广饶县井灌区浅层地下水降落漏斗中心水位动态

黄河三角洲北部东营区深层地下水开采层位埋 深 400~600 m. 史口镇和胜利电厂区域深层地下水 位埋深分别达到 68.2 m 和 62.1 m. 由东营区六户 镇深层地下水位多年监测资料知,其水位在 20 世纪 90 年代中不到 7 年的时间下降了约 30 m,下降速率 很快,超过 4 m/a.

黄河三角洲南部广饶县井灌区亦是深层地下水 开采高度集中地,近年来建成的深水井深度多为 300~500 m,取水段位于 350~450 m 之间.1986— 2010 年,广饶县深层地下水开采量呈逐年增加的趋 势,特别是 2006 年后开采量剧增,已处于严重超采 状态.广饶县大王镇、花园镇、丁庄镇等工业集中区 深层地下水开采量大,水位下降明显.广饶县城区深 层地下水理深约为 55 m,花官乡和大码头乡地区约 为 45 m,丁庄镇地区约为 16.5 m,较 20 世纪 90 年 代均有大幅下降,其中广饶县东南部的大王镇和稻 庄镇深层地下水位埋深分别由 1997 年的 33 m 和 30 m,下降到 2010 年的 61 m 和 63 m,下降速率分 别为 2.54 m/a 和 2.15 m/a(图 7a).

广饶县稻庄镇深层地下水位波动规律较典型, 可分为2个时间段分析其动态变化.1996—2006 年,稻庄镇深层地下水位呈下降状态,累计下降 25.94 m,年均下降2.36 m,仅在较短时段内有小幅 回升.1996—2006年,该地段深层地下水位1996— 1998年,水位下降速度较大,达到了5.60 m/a; 2000—2006年,水位下降7.97 m,年均下降1.33 m, 下降速度明显变小.稻庄镇水利站院内一深井水位 埋深已达63.5 m,年均下降约2.5 m.2006—2010 年,稻庄镇深层地下水年均水位为-45.95~ -37.98 m,平均埋深为52.58~60.55 m,水位年变 化幅度为12.80~17.70 m(图7b).稻庄镇深层地下 水位下降趋势明显,速率为1.60~2.68 m/a.根据 水文地质条件,结合开采现状,对比深层地下水资源 量的计算成果,发现当前深层地下水的开采量已远 远超过补给量,地下水开采主要消耗弹性储存量,如 此继续,水位下降势必进一步加剧.

(2)深层地下水降落漏斗演化.广饶县深层地下 水年均开采 3 224 万 m³,2000 年后形成了遍布整个 井灌区的多个深层地下水降落漏斗,漏斗分布与地 面沉降漏斗分布基本吻合,地下水位剧烈下降的漏 斗中心主要有广饶县城、大王镇政府驻地、稻庄镇政 府驻地、石村镇辛桥和大码头乡等(图 9).东营区近 5 年深层地下水年均开采量较小,为 338 万 m³,主 要用于油田注水采油.利津县基本不开采深层地下 水.东营区-50 m 等水压线所围面积为 434 km²,已 形成以东营区史口化工总厂和胜利电厂为中心的深



图 7 黄河三角洲南部深层地下水降落漏斗中心深层地下水位动态及 2006—2010 年稻庄镇深层地下水位监测曲线 Fig. 7 The dynamics of deep groundwater level in cone centers in south of the Yellow River Delta (a) and the deep groundwater level monitoring curve in Daozhuang Town of Guangrao County between 2006 and 2010 (b)





Fig. 8 The subsidence rate (a) and dynamic evolution (b) of the typical subsidence area in the Yellow River Delta

层地下水水位降落漏斗,漏斗中心水位最大埋深最 大达 72.3 m.

黄河三角洲深层地下水具有埋藏深、水力坡度 小的特点,自然状态下,深层地下水与浅层地下水水 力联系极弱,水平径流为主要补给源(主要为西部上 游同层补给和南部基岩裂隙水补给),但补给能力十 分微弱(刘桂仪,2001).因此,强封闭性的黄河三角 洲深层地下水属于储量消耗性资源,开采后很难恢 复.随着开采规模的扩大,深层地下水降落漏斗不仅 自相连通,还与相邻的滨州、博兴深层地下水降落漏 斗相连,且有与华北平原的天津一沧州一德州地下 水降落漏斗群合并扩展之势.

3 黄河三角洲地下水动态对地面沉降 的影响

3.1 黄河三角洲地面沉降分布演化

20世纪70年代后期,随着黄河三角洲需水量 不断增加,机井成为主要水利设施并不断向深部发 展,数量由1986年的6494眼增加到2009年的 9310眼,年均开采量超过9000万m³,致使黄河三 角洲大部分地区发生了不同程度的地面沉降(任美 锷,1993;李广雪等,2000).2002年鲁北工程地质 勘察院在研究区布设了每千米测量高差中数的偶然 中误差不超过1mm的二等精密水准点监测地面沉 降,通过 ArcGIS 进行空间插值获的如图 8 所示的 沉降分布图.

由图 8a,发现小清河以南井灌区一直是地面沉 降速率最大的区域,东营区西城的沉降速率要比东 城区大.广饶县和东营区 2002—2008 年累计沉降量 及沉降速率分布为 356.0 mm、64.7 mm/a 和 155.1 mm、28.2 mm/a.21 世纪初期,黄河三角洲地 面沉降空间范围扩大,主要由广饶县小清河以南向 外扩展,东营市西城区和广饶县城区成为沉降中心.

由图 8b 知,2004 年沉降量大于 50 mm 的区域 面积为 444 km²,主要集中在广饶县城及东营西城 城区和龙居镇;2005 年沉降量大于 50 mm 的区域扩 至 1 369 km²,包括西城区、龙居镇、史口镇、油郭镇 及花官镇以南大部分地区,较之 2004 年,范围扩大 $3.0\sim3.5$ km,面积增加 935 km²;2008 年,沉降量大 于 50 mm 的区域已达 2 393 km²,比 2005 年增加 1024 km²,扩张速率为 341 km²/a.50 mm 等量沉降 线从沉降中心向外逐渐扩张是地面沉降动态演化的 主要特征.

3.2 地下水降落漏斗与地面沉降的空间分析

利用 GIS 空间分析技术,得到如图 9 所示的地



图 9 黄河三角洲南部深层地下水动态与沉降空间分析

Fig. 9 Spatial analysis of deep groundwater depression cones and land subsidence in south of the Yellow River Delta

面沉降漏斗与深层地下水降落漏斗叠加图,可见两漏斗中心基本吻合. 广饶县已形成了遍布整个井灌区的多个深层地下水降落漏斗,-50 m 等水位线与2002—2008 年 200 mm 沉降等值线所圈闭的区域大部分重叠,漏斗中心基本都位于广饶县城. 东营沉降区2002—2008 年 150 mm 沉降等值线所圈闭的区域完全包含于-50 m 等水位线所封闭的范围内,100 mm 沉降等值线圈闭范围与其部分重合,漏斗中心都分布在东营区西城.可见,黄河三角洲典型区域广饶县和东营区深层地下水降落漏斗与地面沉降漏斗空间耦合度极高.

3.3 地下水位与地面沉降关系的定量分析

据山东省鲁北地质工程勘察院在稻庄镇布设的 地下水长观孔资料得到同一监测点深层地下水位和 地面高程数据(图 9 之稻庄镇高程与深层地下水位 变化图),深层地下水降落漏斗中心稻庄镇地面高程 与深层地下水位都表现出逐年下降的趋势,1996— 2006 年深层地下水位下降 22.1 m,1963—2003 年 地面高程降低 1 224 mm. 深层地下水降落漏斗中心 广饶县城区、大王镇和稻庄镇等地下水位每年下降 1.0 m,沉降约 20~30 mm. 据统计,稻庄镇深层地下 水位与地面高程之间存在显著的线性正相关(y= 0.069 2*x*+17.1),相关系数为 0.92.按照当前地下 水位下降趋势,当稻庄镇深层地下水漏斗中心水位 下降至-60 m时,高程将会较之 2000 年下降 2 m. 显见,深层地下水过度开采是地面沉降最根本 的因素.

当压缩层厚度与沉降范围相比较小时,根据有 效应力原理,可以把抽水引发的地面沉降问题按一 维固结问题处理,据土力学原理,井灌区深层承压地 下水主要开采含水砂层Ⅲ及其相邻粘性弱透水层 Ⅱ 的最终压缩量可利用以下公式分别进行计算:

$$S = rac{\gamma_{\mathrm{w}} \cdot \Delta h \cdot H_{\ell b}}{E} ,$$

 $S_{\infty} = rac{a}{2(1+e_{\mathrm{o}})} \cdot \gamma_{\mathrm{w}} \cdot \Delta h \cdot H_{\mathrm{fl}} ,$

式中:S 为砂层压缩量(mm), γ_w 为水的容重(kN/m³), Δh 为砂层水位下降值(m), H_{ψ} 为砂层厚度(mm),E 为砂层的弹性模量(kPa); S_{∞} 为粘性弱透水层压缩量(mm),a 为粘性弱透水层的压缩系数(kPa⁻¹), e_o 为粘性弱透水层初始孔隙比, H_{k} 为粘性弱透水层厚度(mm).

计算中采用部分实测参数并参考了上海(Shen and Xu, 2011)和天津地区的参数,在地下水漏斗中

心水位下降速率为2m/a的条件下,根据上式计算 得到黄河三角洲地区各测孔深层地下水主要开采层 第二、三深层承压含水层和相邻粘性压缩层的沉降 量.黄河三角洲第二、三粘性压缩层沉降量为36~ 63mm和98~138mm,是相邻第二、三含水砂层沉 降量的2~4倍,且深度较大的第三压缩层沉降量占 总量的47.6%~57.1%,已成为地面沉降主要贡献 层.这是由于300~460m深的第三粘性压缩层为第 四系滨海相沉积层,富含85~90%的高压缩性粘性 土成分.

据实验室分析,天津市第二承压含水组的临界 水位值为-30~-40 m(牛修俊,1998),根据土层动 态监测资料确定上海市第四含水层临界水位为 -28~-32 m(魏子新,2002).黄河三角洲地面沉降 越靠近地下水降落漏斗中心,沉降速率就越大,当深 层地下水位埋深大于 60 m 时,沉降漏斗中心沉降速 率明显变大.据此,将 60 m 作为广饶县南部井灌区 第三承压含水层的最大允许埋深,进而可得该含水 层临界水位为-30~-50 m,与天津市第二承压含 水组临界水位大致相同.显然,黄河三角洲深层地下 水降落漏斗中心的地下水位埋深已大于最大允许埋 深,必须严格控制深层地下水的开采以防治地 面沉降.

4 结论

黄河三角洲黄泛区和山前平原区地下水位动态 呈现不同特点.山前平原区广饶县井灌区浅层地下 水动态类型为降雨入渗一径流一开采型,地下水大 量开采集中于降水丰富的夏季,造成水位波动剧烈, 变幅达 1.8~4.0 m;过度开采造成水位标高的逐年 大幅下降,下降速率达1m/a,形成了标高低于海平 面的地下水降落漏斗. 黄泛区浅层地下水水位动态 类型为降雨-灌溉入渗-蒸发型,水位埋深多为 2m,开采量极少,年内和年际间水位呈韵律型起 伏,波动较小. 过量开采浅层地下水,致使 1980-1995年浅层地下水漏斗面积不断扩张.随着地下水 开采层位的调整,1996—2010年,深层地下水位持 续下降,井灌区深层地下水漏斗与浅层地下水漏斗 重合,深层地下水漏斗在工业集中城镇亦有分布,漏 斗不仅自相合并,还有与相邻的滨州、博兴地下水漏 斗甚至与天津一沧州一德州地下水降落漏斗连通的 演化趋势.

黄河三角洲典型沉降区是东营区西城和广饶县

城,与深层地下水降落漏斗空间耦合度高,且深层地 下水降落漏斗中心稻庄镇的地面高程与深层地下水 位间呈显著线性正相关(相关系数达 0.92),深层地 下水超采成为地面沉降的最根本因素.井灌区深层 地下水开采致使第三粘性压缩层成为地面沉降主要 贡献层,其沉降量占总量的一半左右.当前广饶县深 层地下水降落漏斗中心的地下水位埋深已大于最大 允许埋深,地面沉降有进一步加剧的趋势.

References

- Bie, J., Huang, H. J., Fan, H., et al., 2006. Ground Subsidence of the Modern Yellow River Delta and Its Causes. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(4):29-35 (in Chinese with English abstract).
- Carbognin, L., Teatini, P., Tosi, L., 2004. Eustacy and Land Subsidence in the Venice Lagoon at the Beginning of the New Millennium. *Journal of Marine Systems*, 51(1-4):345-353. doi:10.1016/j.jmarsys.2004.05.021
- Chai, J. C , Shen, S. L. , Zhu, H. H. , et al. , 2004. Land Subsidence Due to Groundwater Drawdown in Shanghai. *Géotechnique*, 54(2):143-147.
- Hu, H. M., Shen, Y. J., 1991. The Developing of Ground Subsidence in Main Cities of North China. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2(4):1-9 (in Chinese with English abstract).
- Li,G. X., Zhuang, K. L., Jiang, Y. C., 2000. Engineering Instability of the Deposition Bodies in the Yellow River Delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(2): 21-26 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. Y., 2001. Exploitation and Environmental Problems of Deep Groundwater in Lubei Plain. Hydrogeology and Engineering Geology, (3): 43-45 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Y., Pan, S. B., Wu, X. F., et al., 2006. Technology of Groundwater Recharge against Saltwater Intrusion: A Case Study on Guangrao County, Shandong Province. *Journal of Natural Disasters*, 15(3):96-100 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Huang, H. J., 2013. Characterization and Mechanism of Regional Land Subsidence in the Yellow River Delta, China. *Natural Hazards*, 68(2):687-709. doi: 10.1007/s11069-013-0648-4
- Niu, X. J., 1998. Characteristics of Strata Consolidation and Land Subsidence Controlling by Critical Water Level. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 9(2):68-74 (in Chinese with English abstract).
- Ovando-Shelley, E., Ossa, A., Romo, M. P., 2007. The Sink-

ing of Mexico City: Its Effects on Soil Properties and Seismic Response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27 (4): 333 – 343. doi: 10. 1016/j. soildyn. 2006. 08. 005

- Qin, W. Y., Zhuang, X. G., Huang, H. J., 2008. Mechanism Analysis of Land Surface Subsidence in the Modern Yellow River Delta. *Marine Sciences*, 32(8):38-43 (in Chinese with English abstract).
- Ren, M. E., 1993. Relativer Sea Level Rise in Huanghe, Changjiang and Zhujiang (Yellow, Yangtze and Pearl River) Delta over the Last 30 Years and Predication for the Next 40 Years (2030). Acta Geographica Sinica, 48 (5):385-393 (in Chinese with English abstract).
- Shen, S. L., Xu, Y. S., 2011. Numerical Evaluation of Land Subsidence Induced by Groundwater Pumping in Shanghai. *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (9): 1378 – 1392. 9(2):68-74. doi:10.1139/T11-049
- Sun, H., Grandstaff, D., Shagam, R., 1999. Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal: Potential Damage of Subsidence and Sea Level Rise in Southern New Jersey, USA. Environmental Geology, 37 (4): 290 - 296. doi: 10.1007/s002540050386
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., et al., 2005. A Century of Land Subsidence in Ravenna, Italy. *Environmental Geology*, 47 (6): 831 – 846. doi: 10. 1007/s 00254-004-1215-9
- Wang, R. B., Sun, D. P., Geng, S. C., et al., 1994. Dynamics of Ground Subsidence and Its Effects on Geographical Environment in the Tianjin Area. Acta Geographica Sinica, 49 (4):317-323 (in Chinese with English abstract).
- Wei,Z. X., 2002. Stress-Strain Analysis of the Fourth Confined Aquifer in Shanghai. *Hydrogeology and Engineering Ge*ology, (1):1-4 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. Q., Zhang, Y., Ye, S. J., et al., 2005. Land Subsidence in China. *Environmental Geology*, 48(6): 713 – 720. doi:10.1007/s00254-005-0010-6
- Yamanaka, T., Mikita, M., Lorphensri, O., et al., 2011. Anthropogenic Changes in a Confined Groundwater Flow System in the Bangkok Basin, Thailand, Part []: How Much Water Has Been Renewed? *Hydrological*

Processes, 25(17): 2734-2741. doi: 10.1002/hyp. 8014

- Yi, L. X., Zhang, F., Xu, H., et al., 2011. Land Subsidence in Tianjin, China. *Environmental Earth Sciences*, 62 (6):1151-1161. doi:10.1007/s12665-010-0604-5
- Yu,Z. T. ,2006. Investigation and Study of Salt Water Intrusion on the South Coast Plain of Laizhou Bay (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Xue, Y. Q., Li, Q. F., 2003. Current Prominent Subsidence Layer and Its Deformation Properties in Shanghai. Hydrogeology and Engineering Geology, (5):6-11 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 别君,黄海军,樊辉,等,2006.现代黄河三角洲地面沉降及其 原因分析.海洋地质与第四纪地质,26(4):29-35.
- 胡惠民,沈永坚,1991.华北地区及其主要城市地面沉降的演 变和发展.中国地质灾害与防治学报,2(4):1-9.
- 李广雪,庄克琳,姜玉池,2000.黄河三角洲沉积体的工程不 稳定性.海洋地质与第四纪地质,20(2):21-26.
- 刘桂仪,2001.鲁北平原深层地下水开发与环境问题.水文地 质工程地质,(3):43-45.
- 刘青勇,潘世兵,武晓峰,等,2006.地下水回灌补源防治咸水 入侵技术研究——以山东省广饶县为例.自然灾害学 报,15(3):96-100.
- 牛修俊,1998. 地层的固结特性与地面沉降临界水位控沉. 中 国地质灾害与防治学报,9(2):68-74.
- 秦伟颖,庄新国,黄海军,2008. 现代黄河三角洲地区地面沉 降的机理分析. 海洋科学,32(8):38-43.
- 任美锷,1993.黄河长江珠江三角洲近 30 年海平面上升趋势 及 2030 年上升量预测.地理学报,48(5):385-393.
- 王若柏,孙东平,耿世昌,等,1994. 天津地区地面沉降及其对 地理环境的影响. 地理学报,49(4): 317-323.
- 魏子新,2002. 上海市第四承压含水层应力一应变分析. 水文 地质工程地质,(1): 1-4.
- 于治通,2006. 莱洲湾南岸淄河下游咸水入侵调查与研究(硕 士学位论文). 青岛:中国海洋大学.
- 张云,薛禹群,李勤奋,2003. 上海现阶段主要沉降层及其变 形特征分析.水文地质工程地质,(5):6-11.