

沧州地区土层固结特征与地面沉降临界水位研究

王云龙, 陈 晔, 郭海朋, 孟 静, 王海刚, 臧西胜, 朱菊艳

A study of the critical groundwater level related to soil consolidation characteristics of land subsidence in Cangzhou

WANG Yunlong, CHEN Ye, GUO Haipeng, MENG Jing, WANG Haigang, ZANG Xisheng, and ZHU Juyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162-171

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 198-206

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

何健辉, 张进才, 陈勇, 闫星光, 施斌, 魏广庆, 贾立翔, 刘苏平 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 146-153

超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 138-145

季冻区草炭土固结特性研究

Consolidation characteristics of the turfy soil in seasonally frozen area

韩伶敏, 徐燕, 高康 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 109-116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208040

王云龙, 陈晔, 郭海朋, 等. 沧州地区土层固结特征与地面沉降临界水位研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 185-192.
WANG Yunlong, CHEN Ye, GUO Haipeng, *et al.* A study of the critical groundwater level related to soil consolidation characteristics of land subsidence in Cangzhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 185-192.

沧州地区土层固结特征与地面沉降临界水位研究

王云龙^{1,2}, 陈晔³, 郭海朋^{1,2}, 孟静⁴, 王海刚^{1,2}, 臧西胜^{1,2}, 朱菊艳^{1,2}

(1. 河北沧州平原区地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 河北沧州 061000; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 沧州市长期以来面临严重的地面沉降问题, 在控制沉降发展的前提下, 为合理利用地下水资源, 需要确立开采水位埋深警戒线。针对地面沉降综合防治如何确定临界水位这一科学问题, 以沧州 3 个典型沉降区土样为研究对象, 分析了地层固结特征, 通过关联地层厚度的方式改进了以先期固结压力求解临界水位的方法, 结合多年来地面沉降与地下水水位监测数据, 对沧州市临界水位进行了综合定量评估。研究表明: 沧州地区 0 ~ 150 m 以内多为正常固结或欠固结土, 150 m 以下普遍为超固结土, 非弹性释水变形是影响该地区地面沉降速率变化的重要因素。运用改进后的方法计算出沧州市区、肃宁县及东光县的临界水位埋深分别为 66.8, 67.5, 67.8 m。综合分析沧州市区累计地面沉降与地下水水位变化资料, 得出两者之间的指数函数关系, 并以沉降速率为指标, 求得 65 ~ 70 m 为沧州市区临界水位区间范围。在验证了两种方法计算结果一致性的基础上, 最终将 65 m 作为沧州市区采取地面沉降防控措施的参考临界水位, 为地方政府制定合理的地下水开采方案提供可靠依据。

关键词: 沧州; 地面沉降; 临界水位; 超固结土; 形变机理

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0185-08

A study of the critical groundwater level related to soil consolidation characteristics of land subsidence in Cangzhou

WANG Yunlong^{1,2}, CHEN Ye³, GUO Haipeng^{1,2}, MENG Jing⁴,

WANG Haigang^{1,2}, ZANG Xisheng^{1,2}, ZHU Juyan^{1,2}

(1. Hebei Cangzhou Groundwater and Land Subsidence National Observation and Research Station, Cangzhou, Hebei 061000, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Land subsidence has become a serious issue in Cangzhou for a long time. In order to make reasonable use of groundwater resources, it is necessary to establish a warning groundwater level under the premise of controlling the development of land subsidence. How to quantitatively determine the critical groundwater level (CWL) for comprehensive control of land subsidence? In allusion to this scientific problem, this paper takes the

收稿日期: 2022-08-16; 修订日期: 2022-12-04

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877294); 中国地质调查局地质调查项目(DD202304039; DD20190679; DD20160235)

第一作者: 王云龙(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地面沉降与地裂缝等地质灾害防治研究工作。E-mail: wangyunlong@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 郭海朋(1979-), 男, 博士, 教授级高工, 从事水文地质与地面沉降调查研究工作。E-mail: guohaipeng@mail.cgs.gov.cn

soil samples of three typical settlement areas in Cangzhou as the research object, and analyzes the formation consolidation characteristics. By correlating the stratum thickness, we improve the method of calculating the CWL with the previous consolidation pressure. Based on the monitoring data of land subsidence and groundwater level in Cangzhou for many years, the comprehensive quantitative evaluation of the CWL in Cangzhou are carried out. The results show that the soil within a depth ranging from 0 to 150 m in Cangzhou is normally consolidated or under-consolidated, and the soil below the depth of 150 m is generally over-consolidated. The inelastic water release deformation is an important factor affecting the change of land subsidence rate in this area. Using the improved method, the CWL in Cangzhou, Suning and Dongguang is 66.8 m, 67.5 m and 67.8 m, respectively. Based on the data of the cumulative land subsidence and groundwater level change in the urban of Cangzhou, we obtain the exponential function relationship between the cumulative land subsidence and groundwater level. The subsidence rate is taken as the index, and the critical groundwater level in the urban of Cangzhou ranges from 65 to 70 m. On the basis of verifying the consistency of the calculation results of the two methods, we determined 65 m as the critical groundwater level for the prevention and control measures of land subsidence in Cangzhou. The results provide a reliable basis for the local government to formulate a reasonable groundwater exploitation plan.

Keywords: Cangzhou; land subsidence; critical groundwater level; over-consolidated soil; mechanism of deformation

华北平原近年来因长期持续开采地下水资源,引发的地面沉降问题日益严峻。沧州市作为华北平原地面沉降典型地区,与 20 世纪 70 年代相比,地下水位平均下降了 80 m,地面平均沉降量为 2.4 m^[1]。鉴于地面沉降发展的严峻形势,当地政府已采取了一系列限制地下水开采的措施。近年来,沧州地面沉降发展趋势有所减缓,故合理的调控地下水开采量,规划符合当地经济可持续发展的地下水水位,是沧州地面沉降防控工作的研究重点之一。

区域地面沉降的发展与地下水开采之间存在密切联系,近年来国外学者通过对地下水位与沉降速率的相关性研究,提出一系列针对性的控沉方案^[2-5]。Conway 等^[6]在对亚利桑那州地面沉降研究中,提出了地下水位下降至 150 m 以下是导致该地区产生显著沉降与地裂缝的重要因素,Miller 等^[7]通过对亚利桑那州 InSAR 监测数据的分析,研究了不同地下水位动态对该区域地面沉降的影响。华北平原持续开采地下水导致的地面沉降致灾过程具有持续性、渐进性的特点^[8],针对沉降发展规律,牛修俊^[9]1998 年提出了地面沉降防控中超固结地层临界水位的概念,并利用超固结值确定了天津第二承压含水层组的临界水位值。白晋斌等^[10]通过对大量的室内试验和实测数据的分析,总结了天津地区新生界固结特征与地面沉降的关系。王家兵等^[11]通过分析天津市地下水位和地面沉降监测数据,认为水位稳定在地面沉降临界水位附

近,是深层地下水资源持续利用,控制地面沉降的有效措施。赵慧等^[12-13]对西安地区地面沉降临界水位进行了研究并尝试利用超固结值计算临界水位,证明了不同土层的临界水位与储水系数存在关联。李国和等^[14]在对京沪高速铁路沿线地面沉降的对比研究中,论证了地面沉降与地下水位呈线性相关的北京地区不存在明显临界水位,而呈指数相关的廊坊、沧州等地存在较明显的临界水位。姜媛等^[15]借助北京顺义地区多年地下水位与地面沉降监测数据,从地面沉降速率阈值的角度定义了北京市地面沉降的控制水位。张文杰^[16]通过分析沧州市地面沉降与开采地下水关系,论证了地面沉降量在时空分布上与地下水开采量基本一致,且地面沉降速率与地下水位呈明显的相关性。

2004 年,邢忠信等^[17]根据沧州市地下水位与地面沉降量相关性确立了地下水警戒水位值和限制降深值。如何定量确定临界水位,是近年来地面沉降防控探索的难点问题。本文通过分析该地区超固结地层变形机理,考虑不同地层固结特性,运用分层加权求和的模式,改进先期固结压力计算临界水位方法,同时利用该地区地面沉降地下水监测资料,综合评估沧州市区地面沉降的临界水位。

1 区域地面沉降与地层固结特征

1.1 区域地质背景

沧州市位于华北平原腹地,濒临渤海,地势平坦,

整体处于西南向东北倾斜的滨海平原地形。全市面积 13 491 km², 平均海拔 8.7 m, 最大高程差仅 12.7 m, 区内存在较多河道、洼淀, 成因类型自西向东逐渐由河湖相向滨海相过渡, 沉积厚度达 350 ~ 550 m, 属华北平原典型的巨厚松散砂黏土互层的地质结构。在这一沉积结构中, 地下水总体可分 4 个含水层组: 第 I 含水层组底界埋深 40 ~ 60 m, 潜水性质, 以大气降水补给为主, 水位受季节影响显著; 第 II 含水层组底界埋深 120 ~ 170 m, 微承压-承压性质, 由弱入渗、径流补给; 第 III 含水层组底界埋深 250 ~ 350 m, 承压性质, 由径流、越流补给, 为沧州市深层地下水主要开采层; 第 IV 含水层组底界埋深 350 ~ 550 m, 承压性质, 由缓慢径流、越流补给。

沧州第四纪的沉积历史受海侵、河流改道等影响显著, 地质结构复杂, 砂质沉积物多以透镜体形式赋存, 各含水层埋深界线在平面上极不统一。故本次研究选取了沧州市 3 个不同地区的钻孔数据, 其中, 肃宁地区靠近内陆, 第四系以河湖相沉积为主; 东光地区的沉积受河流影响相对较少, 以湖相沉积为主; 市中心地区处于河湖相往滨海相过渡地带。3 个地区均为近年来沧州地面沉降发展显著区域, 并且形成了地面沉降漏斗中心。

所选 3 个钻孔孔深均为 400 m, 其中, 沧州市区钻孔(CZ-1)取心率为 91.22%, 肃宁县钻孔(SNDC-2)取心率为 94.89%, 东光县钻孔(SK-3)取心率为 97.84%。各钻孔具体位置见图 1。

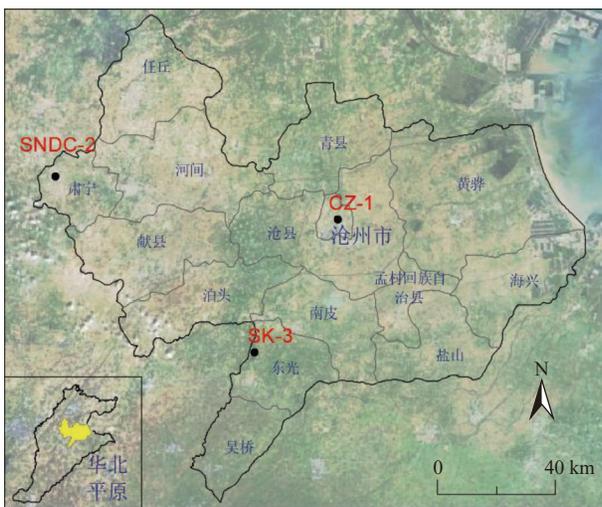


图 1 钻孔位置分布图

Fig. 1 Distribution of the drilling positions

1.2 沧州地面沉降发展与地层固结特性

沧州地面沉降起始于 20 世纪 70 年代早期, 21 世

纪初, 迫于地面沉降的快速发展, 该地区落实了一系列限制开采地下水的措施, 使得地面沉降速率明显变缓, 但仍未能有效遏制沉降区域不断扩大的趋势。截至目前, 沧州市已形成多个地下水降落漏斗和地面沉降漏斗区。

沧州地区地面沉降主要由于过量开采地下水资源所致, 地下水开采后, 地层释水有效应力增加而导致土层压缩引发地面沉降。在开采地下水过程中, 以砂土为主的含水层因渗透性良好而快速释水, 以黏性土为主的弱透土层因渗透性差普遍存在滞后释水现象; 该地区黏性土层累计厚度占 70% 以上, 具有高压缩性, 在水位下降过程中相对产生较大变形, 故该地区地面沉降主要来自于黏性土层的压缩, 且相对于地下水位变化呈现显著的滞后性。

在沧州第四纪沉积形成的地质历史过程中, 由于气候变化、历经多次海侵事件、风化作用等多种因素, 使得该地区地层存在明显的固结状态差异, 这种差异可由先期固结压力(P_c)表征, P_c 即指地层在地质历史上所受到的最大固结应力。根据 P_c 值与土体自重应力(P_0)之间的比值关系, 可将土的固结状态用超固结比(ORC)描述, 即 $ORC = P_c/P_0$, 并将其分为正常固结($ORC=1$)、欠固结($ORC<1$)与超固结土($ORC>1$)。

在沧州地区巨厚松散的第四系地层中, 沉积物类型、成因复杂, 以冲积、洪积为主, 多为陆相堆积及海陆交互相堆积, 普遍存在着超固结土。通过现场取样后的土工实验研究结果表明(图 2), 沧州地区 0 ~ 150 m 以内多为正常固结或欠固结土, 150 m 以下地层普遍为超固结土。随着埋深增加, 土的固结程度亦逐渐增加。综上所述, 作为沧州地区主要地下水资源开采层的第 III 含水层组, 其黏性土层因过量开采地下水导致压缩变形, 是主导当地沉降发展的关键因素。

为进一步分析沧州市第 III 含水层组的固结特性在不同区域的分布规律, 绘制沧州市区、肃宁县、东光县 3 个区域的地层的先期固结压力和 ORC 值随深度变化曲线(图 3)。由图 3(a)可知, 3 个区域的 ORC 值主要分布范围在 1.05 ~ 1.30 之间, 沧州市区的地层沉积环境受海平面变化影响, 在 -170 ~ -210 m 略大于其他 2 个区域, 且 ORC 值变化幅度更大。图 3(b)则进一步验证, 在 -170 ~ -210 m 地层范围内, 沧州市区的土样具有更大的先期固结压力。

图 3(b)中, 在 -250 ~ -290 m 内, 3 个区域均出现 1 次 P_c 加速增大的过程。对照各地沉积环境, 沧州市区受海积、河湖积影响, 肃宁受河湖积影响, 东光主要

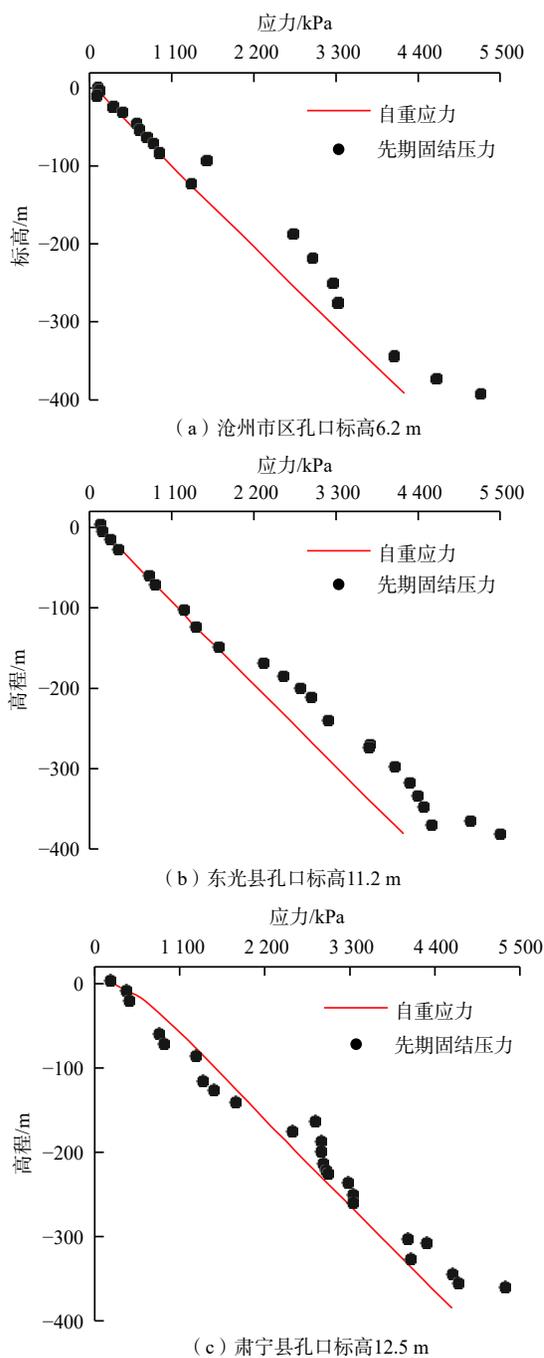


图 2 沧州地区土样自重应力与先期固结压力关系图

Fig. 2 Relationships between P_o and P_c of the soil samples at different depths in Cangzhou

由湖积影响。初步判断为海平面变化，逐次改变了河湖沉积环境，导致了 3 地区 P_c 的相继增加。综合判断，沧州市各区域的土层的固结特征与其所处的沉积环境存在关联。

2 沧州地面沉降临界水位研究

2.1 基于土层固结状态的临界水位研究

研究区域上地面沉降变形时，土层的固结变形可

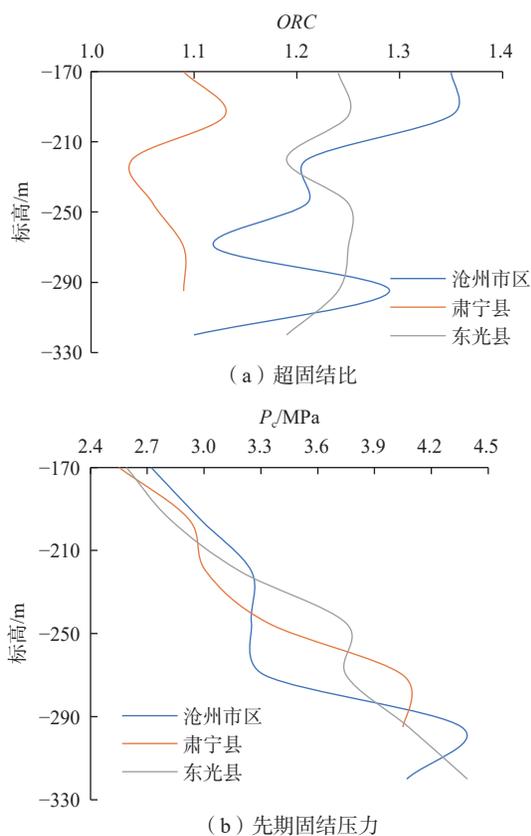


图 3 沧州地区 ORC 与先期固结压力对比图

Fig. 3 Comparison of ORC and P_c in different areas of Cangzhou

忽略水平方向上的变形，地面沉降可以用太沙基一维固结方程概括，即土的总应力(σ)与有效应力(σ')以及孔隙水压力(p)满足如下方程：

$$\sigma = \sigma' + p \tag{1}$$

根据伯努利方程，当忽略流速水头时，孔隙水压力变化由地层的地下水水位引起，当不考虑总应力变化，由含水层水位下降造成的有效应力变化可以用以下形式表示为^[18](以下公式均取水位下降为正值)：

$$\Delta\sigma' = \rho_w g \Delta H \tag{2}$$

式中： ρ_w ——水的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)；

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)；

ΔH ——水位降深/m。

单一土层因水位变化产生土层压缩可分为弹性释水变形与非弹性释水变形两部分^[19]，当有效自重应力(σ_z)与有效应力增量之和小于先期固结压力时，土层发生弹性释水变形，反之则发生非弹性释水变形。可由下式概括：

$$\Delta Z = \begin{cases} S_{ske} Z_0 \Delta H, & \sigma_z + \Delta\sigma' < P_c \\ S_{skv} Z_0 \Delta H, & \sigma_z + \Delta\sigma' \geq P_c \end{cases} \tag{3}$$

式中： ΔZ ——土层的压缩量/m；

Z_0 ——土层厚度/m;

S_{ske} ——土层的弹性释水因子/ m^{-1} ;

S_{skv} ——土层的非弹性释水因子/ m^{-1} 。

对于根据土样物理力学性质可划分为多个土层的第四系而言,由于有效应力变化产生于地面上的总沉降量,可以用式(4)进行求和计算,总沉降量(Z)可用以下公式表示:

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i \begin{cases} Z_i = S_{ske} Z_{0i} \Delta H, \sigma_z + \Delta \sigma' < P_c \\ Z_i = S_{skvi} Z_{0i} \Delta H, \sigma_z + \Delta \sigma' \geq P_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: n ——土层数量;

Z_i ——第*i*层土层沉降压缩量/m;

Z_{0i} ——第*i*层土层层厚/m;

S_{ske} ——第*i*层弹性释水因子/ m^{-1} ;

S_{skvi} ——第*i*层非弹性释水因子/ m^{-1} 。

由土层固结特征分析可知,沧州地面沉降主体部分为第Ⅲ含水层组中的黏性土层。而当地面沉降经历长期发展后,土层的非弹性形变量将远大于弹性形变量^[20]。故忽略初期因弹性变形引起的沉降量后,总沉降量 Z 可用以下公式近似表示:

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i \{Z_i = S_{skvi} Z_{0i} \Delta H, \sigma_z + \Delta \sigma' \geq P_c\} \quad (5)$$

通过式(2)和式(5)可知,当 $\sigma_z + \gamma_w \Delta H \geq P_c$ 时,土层以非弹性形变为主,求和所得的总沉降量将明显增加。又因地面沉降临界水位的定义可知,当地下水降深超过临界水位时,地面沉降量将显著增加。故得出单一土层地面沉降临界水位降深 ΔH 与先期固结压力的关系式为:

$$H_0 - H_c = \Delta H = \frac{P_c - \sigma_z}{\rho_w g} \quad (6)$$

式中: H_0 ——计算自重应力时的观测水位/m;

H_c ——临界水位/m;

$P_c - \sigma_z$ ——超固结值,即先期固结压力与自重应力差值/kPa。

2.2 根据先期固结压力计算地面沉降临界水位

根据钻孔的土样物理力学性质,参考土样的粒径、土层厚度,选取了沧州市区、肃宁县、东光县3个地区沉降变形比较显著的24个土层,编号分别为C1—C6、S1—S9、D1—D9。采用Casagrande法求出各土层对应的先期固结压力。参考沧州地区地下水位长期观测数据计算了沧州地区各土层的临界水位值,其结果见表1。

通过表1求得各地临界水位降深 ΔH 分别为:沧州

市区37.6~99.9 m;肃宁县12.4~51.7 m;东光县41.2~78.3 m。其中东光地区临界水位取值随土层埋深大致呈正相关规律,而肃宁地区 ΔH 取值差异则介于沧州市区与东光之间。上述现象与图3(b)中沧州各地 P_c 值随沉积环境影响存在一定的关联,即沉积环境相对单一(湖积)的东光地区相较于沉积环境复杂(滨海积、河湖积)的沧州市区,其临界水位在垂向上的分布稍具规律性。

从式(6)知,各土层临界水位是通过 σ_z 与 P_c 的差值计算,该差值为图2中 P_c 点相对自重应力曲线偏移的大小。从图2可知,位于-170~-350 m的偏移量有显著的垂向分布差异,且呈非线性。另外,研究区内各土层的粒径组分、力学性质差别大,其厚度分布不均,因此通过式(6)计算出的各层临界水位存在较大差别(表1)。在过去求解沉降临界水位时,一般选取各土层中临界水位最小值作为参考。而当各层临界水位值差别较大时,这一方法将存在较大误差。

例如表1中沧州市区C4、C6层位的 ΔH 不足40 m,其余土层的 ΔH 均超过50 m,其中C5为99.9 m,因此水位下降40 m时,仅在沧州市区占总层厚29.8%的C4、C6会发生相对明显的压缩。因此,对于研究区含水层组的整体沉降变形,必须在各土层临界水位的基础上,考虑其厚度占比。

故而对于复合土层的总沉降量对应的临界水位,宜采用各土层临界水位与土层层厚的加权值求得,即:

$$H_c = \frac{\sum_{i=1}^n H_{ci} \cdot Z_{0i}}{\sum_{i=1}^n Z_{0i}} \quad (7)$$

最终,根据表1与式(6)(7)计算得出沧州市区、肃宁县及东光县的临界水位分别为66.8, 67.5, 67.8 m(表2)。

2.3 基于地下水位与沉降监测资料综合分析临界水位

根据先期固结压力计算地面沉降临界水位时,因不同地区观测水位不同,含水层结构不同,自重应力的大小存在差异。目前采用的Casagrande绘图计算先期固结压力较为繁琐,需要充足的取样和实验资料才可求得临界水位值。而从临界水位的定义可知,通过长期地下水水位和地面沉降观测资料,利用地下水水位变化与地面累计沉降量之间的关系,可近似判断临界水位值。

以沧州市区的地面沉降发展为例,绘制地下水水

表 1 沧州地区第Ⅲ含水层组土样基本情况及临界水位降深统计表

Table 1 Statistics of critical groundwater level drawdown and basic information of soil samples from the third aquifer group in Cangzhou

地名	土层	层厚/m	取样与测试					临界水位降深/m
			取样点高程/m	前期固结压力/MPa	超固结比	压缩指数	回弹指数	
沧州市区	C1	22.0	-186.1	2.72	1.35	0.1	0.03	71.3
	C2	31.1	-217.2	2.98	1.27	0.3	0.04	64.8
	C3	32.6	-249.8	3.25	1.21	0.3	0.03	57.9
	C4	25.1	-274.9	3.32	1.12	0.2	0.05	37.6
	C5	40.0	-314.9	4.36	1.29	0.2	0.05	99.9
	C6	28.3	-343.1	4.07	1.10	0.3	0.03	39.2
肃宁县	S1	16.8	-175.6	2.55	1.22	0.4	0.05	21.3
	S2	12.0	-187.6	2.92	1.31	0.2	0.03	44.6
	S3	11.8	-199.4	2.92	1.24	0.2	0.05	32.7
	S4	15.2	-214.6	2.95	1.17	0.3	0.05	19.6
	S5	12.0	-226.6	3.01	1.14	0.3	0.03	12.4
	S6	10.3	-236.9	3.27	1.19	0.3	0.03	27.1
	S7	14.5	-251.4	3.34	1.14	0.3	0.04	18.0
	S8	52.2	-303.6	4.05	1.16	0.3	0.04	32.8
	S9	4.5	-308.1	4.29	1.21	0.2	0.04	51.7
东光县	D1	9.0	-166.5	2.32	1.22	0.2	0.03	41.2
	D2	17.3	-183.8	2.59	1.24	0.2	0.03	50.0
	D3	14.4	-198.2	2.82	1.25	0.2	0.02	57.3
	D4	11.3	-209.5	2.96	1.25	0.2	0.03	59.0
	D5	29.0	-238.5	3.19	1.19	0.3	0.03	50.5
	D6	30.0	-268.5	3.75	1.25	0.2	0.03	75.1
	D7	28.0	-296.5	4.08	1.24	0.3	0.03	78.0
	D8	19.5	-316	4.29	1.22	0.3	0.03	78.3
	D9	16.7	-332.7	4.39	1.19	0.3	0.03	70.5

表 2 沧州地区第Ⅲ含水层组临界水位埋深表

Table 2 The critical groundwater level depths of the third aquifer group in Cangzhou

地区	临界水位降深/m	观测水位埋深/m	观测孔地面高程/m	临界水位埋深(高程)/m
沧州市区	64.3	2.5	6.2	66.8(-60.6)
肃宁县	28.2	39.3	12.5	67.5(-54.7)
东光县	64.7	3.1	11.2	67.8(-56.6)

位与水位变化时段内的平均沉降速率关系曲线(图 4), 根据图 4 中地下水埋深与累计沉降量之间关系曲线, 建立两者基于指数函数的经验公式:

$$Z = \alpha \cdot e^{\beta h} \quad (8)$$

式中: Z ——累计沉降量/mm;

h ——地下水埋深/m, 水平面以下取正值;

α 、 β ——经验系数, 通过最小二乘法拟合出其值, 分别为 4.293 与 0.066。

通过图 4 可知: 沧州市区在地下水水位埋深 50 m 范围内引发的累计沉降量, 仅占目前总沉降量的 3%

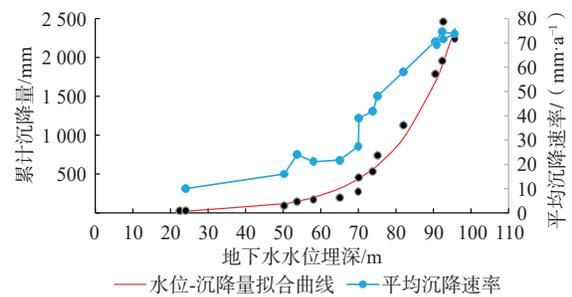


图 4 沧州市区平均沉降速率、累计沉降量与地下水水位关系曲线图
Fig. 4 Curves of the subsiding rate, accumulative subsidence and groundwater level in Cangzhou

左右。当地下水水位埋深在 50~80 m 变化范围内, 地面沉降由前期平稳发展过渡到加速发展阶段, 当地下水埋深接近 90 m 时, 平均沉降速率已经达到峰值。通过计算图 4 中 50~70 m 区间内相邻两点间沉降速率随水位变化值, 可知地下水水位下降范围在 50~54 m 和 65~70 m 时, 水位每下降 1 m 对应的沉降速率增量分别为 2.34 mm 与 3.36 mm, 显著大于整个水位区间的增幅均值(1.01 mm)。又通过观测数据可知, 在 54~

65 m 的地下水降深区间内,平均沉降速率增幅较小。因此,通过观测资料判定沧州市区的临界水位埋深取值范围为 65 ~ 70 m。

上述结论与通过先期固结压力计算的沧州市区临界水位埋深在 66.8 m 的结果大抵相同,最终,保守评估沧州市区地面沉降临界水位埋深为 65 m。对比邢忠信等^[17]研究的沧州地区水位限制降深值 70 m 也基本一致。因此,在缺乏充足土样实验数据的情形下,可通过该地区沉降发展与地下水水位变化关系求取地面沉降临界水位,为制定合理的地下水开采方案提供可靠建议。

3 结论与建议

(1)沧州市区、肃宁及东光地区钻孔土层固结分析表明,以土样埋深 150 m 左右为界限,其上多为正常固结土与欠固结土,其下普遍分布超固结土。沧州地区超固结土在有效应力变化超过超固结值时,其非弹性释水变形是影响该地区地面沉降速率变化的重要因素。

(2)研究区内各土层存在先期固结压力差异大、土层厚度分布不均的特点,在原有临界水位计算的方法基础上,引入土层层厚关联加权,求出研究区第Ⅲ含水层组地面沉降的临界水位为 66.8 ~ 67.8 m。结合沧州市区地面沉降与地下水长期监测资料,以沉降速率为指标,综合分析得出 65 ~ 70 m 为临界水位取值范围。在两种方法所求出临界水位结果一致基础上,最终评估沧州市区地面沉降临界水位为 65 m。

(3)建议在地面沉降防控工作中,将临界水位作为限制地下水资源开采的一项重要指标,最大程度上减少因地下水资源开发而引发的地面沉降问题。对于已发生严重地面沉降的地区,考虑将水位控制在临界值以内,以达到资源开发与环境保护相平衡;对未进入沉降加速发展阶段的地区,宜采用先期固结压力直接计算临界水位的方法,以合理规划该地区的水资源利用。

鉴于目前已有的数据,未考虑地下水水位反复下降和回升条件及土的蠕变等因素对临界水位的影响,后续可开展更为深入的研究。

参考文献 (References) :

- [1] 房浩,何庆成,徐斌,等. 沧州地区地面沉降灾害风险评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 159 - 164. [FANG Hao, HE Qingcheng, XU Bin, et al. A study
- of risk assessment of the land subsidence in Cangzhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 159 - 164. (in Chinese with English abstract)]
- [2] PHIEN-WEJ N, GIAO P H, NUTALAYA P. Land subsidence in Bangkok, Thailand[J]. Engineering Geology, 2006, 82(4): 187 - 201.
- [3] MADANI K, AGHAKOUCHAK A, MIRCHI A. Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation[J]. Iranian Studies, 2016, 49(6): 997 - 1016.
- [4] FAUNT C C, SNEED M, TRAUM J, et al. Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(3): 675 - 684.
- [5] 马峰,王贵玲,张薇,等. 古潜山热储开发对地面沉降的影响机制研究[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 40 - 51. [MA Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Influence mechanism of ancient buried hill geothermal development on land subsidence[J]. Geology in China, 2021, 48(1): 40 - 51. (in Chinese with English abstract)]
- [6] CONWAY B D. Land subsidence and earth fissures in south-central and southern Arizona, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(3): 649 - 655.
- [7] MILLER M M, SHIRZAEI M, ARGUS D. Aquifer mechanical properties and decelerated compaction in Tucson, Arizona[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(10): 8402 - 8416.
- [8] 袁伟民,张金平. 地面沉降成灾临界水位的识别及意义[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 67 - 69. [YUAN Weimin, ZHANG Jinping. Identification of disaster-causal critical water table of land subsidence and its significance[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(2): 67 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 牛修俊. 地层的固结特性与地面沉降临界水位控沉[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 68 - 74. [NIU Xiujun. Characteristics of strata consolidation and land subsidence controlling by critical water level[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(2): 68 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 白晋斌,牛修俊. 天津新生界固结特征与地面沉降[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 42 - 46. [BAI Jinbin, NIU Xiujun. Cenozoic consolidation characteristics and land subsidence in Tianjin[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 42 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王家兵,李平. 天津平原地面沉降条件下的深层地下水资源组成[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(5): 35 -

37. [WANG Jiabing, LI Ping. Composition of groundwater resources in deep-seated aquifers under the condition of land subsidence in Tianjin Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(5): 35 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 赵慧, 钱会, 彭建兵. 超固结土层垂向变形机理及临界水位控沉分析——以西安南郊钻孔土样研究为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(1): 124 – 127. [ZHAO Hui, QIAN Hui, PENG Jianbing. Deformation mechanism of over-consolidation soil and land subsidence controlled by critical water-level[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2008, 19(1): 124 – 127. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 赵慧, 冉兴龙, 李渊. 根据地面沉降与地下水头的关系求地面沉降临界水位[J]. *勘察科学技术*, 2005(2): 19 – 23. [ZHAO Hui, RAN Xinglong, LI Yuan. To determine critical water level by correlation between land subsidence and groundwater drawdown[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2005(2): 19 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李国和, 荆志东, 许再良. 京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(6): 90 – 94. [LI Guohe, JING Zhidong, XU Zailiang. A discussion of the correlation between land subsidence and groundwater level variation along the Jinghu high speed railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(6): 90 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 姜媛, 田芳, 罗勇, 等. 北京地区基于不同地面沉降阈值的地下水位控制分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(1): 37 – 42. [JIANG Yuan, TIAN Fang, LUO Yong, et al. Groundwater control target under different threshold of land subsidence in Beijing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(1): 37 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张文杰. 沧州市地面沉降与开采地下水关系初探 [J]. *地下水*, 2010, 32(6): 41 – 42. [ZHANG Wenjie. Preliminary study on the relationship between land subsidence and groundwater exploitation in Cangzhou City[J]. *Ground Water*, 2010, 32(6): 41 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 邢忠信, 李和学, 张熟, 等. 沧州市地面沉降研究及防治对策 [J]. *地质调查与研究*, 2004, 27(3): 157 – 163. [XING Zhongxin, LI Hexue, ZHANG Shu, et al. Surface subsidence and its countermeasures in Cangzhou city[J]. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(3): 157 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [18] POLAND J F, DAVIS G H. Land subsidence due to withdrawal of fluids[C]//Reviews in Engineering Geology. Boulder: Geological Society of America, 1969: 187 – 270.
- [19] GALLOWAY D L, BURBEY T J. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(8): 1459 – 1486.
- [20] GAO Mingliang, GONG Huili, CHEN Beibei, et al. Regional land subsidence analysis in eastern Beijing plain by InSAR time series and wavelet transforms[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 365.

编辑: 王支农