

# 无砂混凝土沉井在尾矿坝降水工程中的应用

汪火来

(福建省龙岩市龙腾地质矿业有限公司,福建 龙岩 364000)

**摘要:**通过岩土工程勘察,查明了尾矿库坝体的物理力学性能、渗透系数等,进行坝体稳定性分析计算。尾矿库浸润线过高会造成坝体不稳定,导致坝体破坏。无砂混凝土作为沉井井壁,采用有效的沉井施工方法达到设计深度。通过抽水试验和多年降水排渗运行情况,无砂混凝土作为沉井井壁,有良好的透水性和反滤层的作用,有效地降低坝体浸润线,增强坝体的稳定性。

**关键词:**无砂混凝土;反滤层;渗透系数;沉井;浸润线

**中图分类号:**TU46<sup>+</sup>3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)11-0055-05

**Application of Caisson with Concrete without Sand in the Dewatering Engineering of Tailing Dam/WANG Huo-lai**  
(Fujian Longyan Longteng Geology and Mining Co., Ltd., Longyan Fujian 364000, China)

**Abstract:** Physical and mechanical properties and permeability coefficient of the tailing dam were found out by geo-technical engineering investigation and analysis calculation on dam stability was carried out. High would cause instability. Concrete without sand was taken as the caisson wall and the proper construction method was adopted to reach the designing depth. Pumping test and dewatering discharging operation proved that taking concrete without sand as caisson wall could have good permeability and filtration function, effectively lower the saturation line and increase stability of the dam.

**Key words:** concrete without sand; inverted filter; permeability coefficient; caisson; saturation line

## 0 前言

上游式尾矿筑坝方法,由于其工艺简单,管理方便,能节省一次性建坝费用,已成为我国矿山企业尾矿筑坝的传统模式。

在进行尾矿坝抗滑稳定性分析中,发现尾矿坝抗滑稳定性随着坝体的逐渐加高而缓慢降低;坝体浸润线位置的高低对尾矿坝稳定性影响巨大,其影响程度远超过坝体增高对抗滑稳定性的影响。众所周知,通过降水降低坝体的浸润线可提高坝体的稳定性,尾矿坝降水对提高坝体的稳定性极其重要。

尾矿坝降排水的方法有很多,如水平管排渗、管沟式排渗、褥垫式排渗和墙式排渗,细粒尾矿砂堆积坝体的平均渗透系数一般在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$  cm/s,一般是采用土工布作反滤层,降水效果起初较明显,使用一定年限后易产生机械淤堵或化学淤堵,影响降水效果。

无砂混凝土是由粗骨料、水泥和水拌制而成的一种多孔混凝土,它不含细骨料,由粗骨料表面包覆一薄层水泥浆相互粘结而形成孔穴均匀分布的蜂窝状结构,它除具备普通集料作反滤层具有良好的透水性、过滤性特点外,另外自身还具备一定的强度,不发生渗透破坏,不需设多层反滤层,还可以作为支

撑结构,施工简便等优点。

用无砂混凝土制作的沉井,通过有效的施工方法达到设计深度后,具有井径大,降水效果明显,施工方便、经济。在尾矿坝的降水排渗中成功地降低坝体浸润线,从运行情况来看,效果不错,对同类尾矿库的降水工程有借鉴、推广意义。

本文以紫金山金矿尾矿库采用无砂混凝土沉井降水为例,介绍作为井壁材料的无砂混凝土配合比试验,以及沉井施工方法和降水效果等。

## 1 尾矿库基本情况

该尾矿库属山谷型尾矿库,位于福建省闽西,汇水面积约 $0.2 \text{ km}^2$ ,设计库容 $127.81 \text{ 万 m}^3$ ,最终设计堆积标高为 $370 \text{ m}$ ,子坝设计坡度 $1:4$ ,采用上游式筑坝。由于矿山选矿厂工艺和生产规模的扩大,拟进行增高设计至 $375 \text{ m}$ 标高。初期坝坝长约 $60 \text{ m}$ ,高约 $13.5 \text{ m}$ ,为碾压土坝,土料为含碎石粉质粘土,碎石成分主要为花岗岩,透水性较差。尾矿库初期坝现状中轴线横剖面见图1。

根据尾矿堆积坝的岩土工程勘察成果报告,尾矿堆积坝主要由尾粉土组成,夹有尾粉砂、尾粉质粘土透镜体,依据试验成果,结合经验值,尾矿坝各层

收稿日期:2009-07-26

作者简介:汪火来(1963-),男(汉族),福建泉州人,福建省龙岩市龙腾地质矿业有限公司工程师,水文地质工程地质专业,从事岩土工程勘察与施工及矿山水文地质工程地质工作,福建省龙岩市罗桥闽西地矿大厦6楼,WHL669869@126.com。

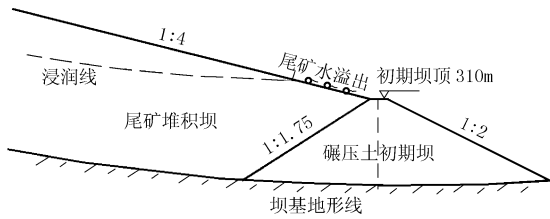


图1 尾矿库初期坝现状中轴线横剖面示意图

土的物理力学指标见表1。

## 2 尾矿坝稳定性分析

表1 尾矿坝各层土物理力学指标

土层名称	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和重度 $\gamma_s / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	渗透系数 $/ (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		直剪强度(固结快剪)	
			垂直	水平	粘聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
尾粉土	19.7	20.5	$3.12 \times 10^{-4}$	$8.28 \times 10^{-4}$	10	28.5
尾粉砂	18.0	18.8	$2.65 \times 10^{-3}$	$7.21 \times 10^{-3}$	5	31.8
尾粉质粘土	17.8	18.2			15	20
碾压土坝	18.4	19.0			20	20

说明:堆积坝主要由尾粉土组成,次为尾粉砂、尾粉质粘土薄层透镜体分布在尾粉土中。

表2 尾矿坝稳定性计算结果

工程内容	安全系数			
	现状坝顶 340 m 标高		预估堆至 375 m 标高	
	正常运行	洪水运行	正常运行	洪水运行
不采取降水措施,浸润线逸出	1.03	0.86	/	/
降低浸润线,使初期坝之上第一子坝浸润线埋深 $> 5.0 \text{ m}$ ,初期坝前块石贴坡,控制干滩长度	1.35	1.18	1.27	1.14

目前初期坝顶至第一级子坝的坝面有尾矿水溢出,局部出现管涌现象。坝体现状稳定分析的安全系数在正常运行状况下已不满足规范[4]要求的最小安全系数1.20,加高后稳定性更不能满足规范的要求,有失稳的可能性,将成为“险库”。

## 3 降水设计

根据稳定性分析计算结果,应在初期坝上游设置具有较大降深的排渗设施。经技术、经济比较后决定采用无砂混凝土沉井加水平排水管进行降水。其主要目的是解决坝体310~313 m标高的渗流溢出问题和降低坝体的浸润线,保证尾矿库加高扩容后的稳定性。

根据尾矿库水文地质、工程地质条件,按照设计浸润线控制标高以及每口沉井的降水影响半径,经设计计算应在315 m标高设置8口沉井,在平行坝轴线方向依次布置。井外直径1.30 m,每口井均用水平钻孔施工往下游方向2%~3%坡降的排水管,与沉井设计降水动水位的位置对接,实现自然排水。相邻井点的间距均为6.6 m,井深9~11 m,要求排

尾矿坝由初期坝、堆积坝体两部分组成,使得它与普通边坡有一定差别。因此,尾矿坝稳定性分析不同于一般的边坡稳定分析。根据北京理正边坡稳定性分析软件,以垂直坝轴线的主纵向工程地质剖面图经适当简化做为瑞典圆弧条形法稳定计算的地质模型,采用总应力法、复杂土层土坡计算,以自动搜索最危险的滑裂面计算安全系数。考虑现状尾矿坝,以及尾矿砂堆至375 m标高时正常运行和洪水运行两种情况下,降水工程措施采用与否进行稳定性分析(见表2)。

渗降水设施启动后保证初期坝顶之上第一子坝的浸润线埋深稳定在5.0 m之下。沉井平面布置详见图2。

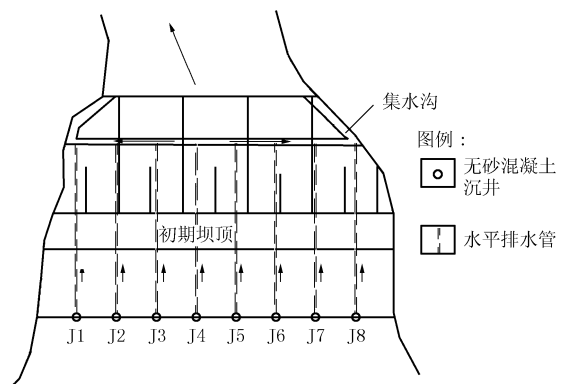


图2 沉井排水系统平面布置示意图

## 4 无砂混凝土透水性、强度配合比试验

无砂混凝土配合材料的选择主要是水泥强度等级、粗骨料的类型、粒径及级配。在粗骨料相互接触而形成的双凹逆转结面上,水泥浆越厚,粘结点越多,粘结越牢固。因此,无砂混凝土作为降水沉井井

壁宜采用高强度的等级水泥及较大粒径范围的卵石骨料配制。水灰比既是影响无砂混凝土的强度,又影响其透水性。无砂混凝土的水灰比一般是随水泥用量的增加而减少,但只是在一个较小的范围内波动。对确定的某一级配骨料的水泥用量,有一最佳水灰比,此时的混凝土才会具有最大的抗压强度。当水灰比小于这一数值时,水泥浆难以均匀地包裹所有骨料颗粒,达不到适当的密实度,不利于强度的提高。反之,如果水灰比过大,易产生离析,水泥浆会从骨料颗粒上淌下,形成不均匀的混凝土组织,既不利于透水,也不利于强度提高。

一般无砂混凝土的水灰比介于0.25~0.40之间,在实际工作中常常根据经验来判定水灰比是否合适。取一些拌合好的拌合物进行观察,如果水泥浆在骨料颗粒表面包裹均匀,没有水泥浆下滴现象而且有类似金属光泽,则说明水灰比较为合适。

该尾矿库降水排渗的含水层为尾粉土,次为尾粉砂、尾粉质粘土薄层透镜体。根据有关文献<sup>[1,2]</sup>,采用5~13 mm的卵石骨料,可使无砂混凝土具有良好透水性,对尾矿砂可起到良好反滤作用。

因此,通过多次试验对比,最后选定强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥在不掺合外加剂的情况下,选用灰:水:骨料的配合为1:0.3:5.6进行试件制作,试件经自然养护28天后,分别在万能试验机上测试混凝土抗压强度,在自制的渗透仪用常水头测定渗透系数,结果见表3。

表3 无砂混凝土用于透水沉井推荐配合比及性能

骨料粒径 /mm	C/S (质量比)	W/C (质量比)	水泥 等级	抗压强度 /MPa	渗透系数 /(cm·s <sup>-1</sup> )
5~13	1: 5.9	0.3	42.5	25	0.28

根据上述配合比试验结果,无砂混凝土可作为尾矿坝降水排渗的反滤层,同时具备沉井结构设计所需的强度。

施工时应注意以下几点:

(1)采用强制性搅拌,由于水泥浆的稠度较大,且数量较少,为了保证水泥浆能均匀地包裹在骨料上,搅拌时间适当延长。投料顺序:水泥+水,搅拌均匀后加入卵石骨料。

(2)无砂混凝土是干硬性的混凝土,在浇筑前,用水湿润模板,防止混凝土水分流失加速水泥凝结。由于无砂混凝土中水泥量有限,只能包裹骨料颗粒,因此在浇筑时不得采用强烈振捣,否则将会使水泥浆沉积,破坏混凝土结构均匀性,并在底部形成不透水层。

(3)无砂混凝土由于存在大量孔隙,易失水、干燥很快,所以早期养护非常重要。浇筑后用塑料薄膜覆盖表面,并开始洒水养护。

## 5 沉井施工

沉井施工是在现场根据室内无砂混凝土配合比和设计配筋先预制井筒,然后进行吊装。在浸润线水位之上先用人工挖土,挖出来的土倒入土筐内,借助卷扬设备提出井外,利用沉井自重和助沉措施,使沉井下沉。

### 5.1 沉井工艺

浸润线以下的沉井采用水力排土沉井,其工艺原理是:水力排土沉井下施工工艺系使用高压水(水泵出口压力宜为1.0 MPa)通过水枪将土体破碎并与水枪的出水混和成一定浓度的泥浆,然后潜水砂泵经由输泥管路吸排出沉井送至泥浆沉淀池或低洼处沉淀。沉井设计和施工时应满足以下几个条件:

(1)沉井下沉系数及稳定系数是衡量是否采用水力排土沉井的两项指标。

沉井下沉系数:

$$K_0 = (G_k - F_k) / T_f$$

式中: $K_0$ ——下沉系数; $G_k$ ——井体自重标准值,kN; $F_k$ ——下沉过程中地下水浮力标准值,kN; $T_f$ ——井壁总摩阻力,kN。

沉井稳定性系数:

$$K' = (G_k - F_k) / (T_f + R)$$

式中: $K'$ ——稳定系数; $R$ ——沉井刃脚下等的地基土总反力,kN。

当下沉系数>1.30,稳定系数<0.80,宜采用水力排土沉井。

(2)施工时使高压水枪冲击井底,所造成的泥浆量和渗入的水量与潜水砂泵吸入的水量保持平衡。

(3)施工场地应在尾矿库之外设置潜水砂泵排出的泥浆沉淀池,沉淀晒干后外运,以免造成环境污染。

(4)施工场地周边应拥有充足的供水点,以保证高压水枪的用水来源,在高压水泵边设储备水池。

水力排土沉井施工工艺流程见图3。

### 5.2 主要施工设备

尾矿土介于粘性土和砂性土之间,粘聚力小,主要体现砂性土的特征。位于浸润线之下尾矿土在高压水流作用下易被冲切,采用小型水力机械设备系统。高压水泵扬程在100 m左右,单机流量为7~

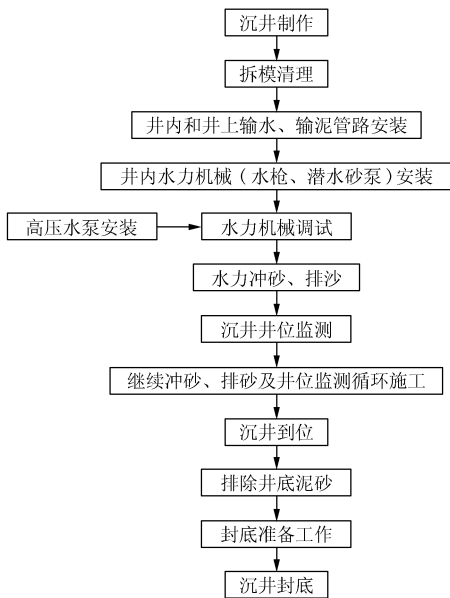


图3 水力排土沉井施工工艺流程图

10 m<sup>3</sup>/h;小型水枪(用单管旋喷嘴头,两个眼,直径2.6 mm);可移动立式潜水砂泵;输水和泥浆管路有时使用软管。

### 5.3 水力排土沉井施工操作要点

(1)按照施工组织设计规定安装好水力机械设施:高压水泵、低压取水泵、调节水箱、潜水砂泵、水枪、井下及井上的高压进水管和低压排泥浆管路、水枪操作平台等。

(2)施工时随时观测井内水位,低于井外水位时,往井内注水,水力排土所造成的泥浆量和渗入的水量与潜水砂泵吸入的水量保持平衡。这样在不排水条件下,避免沉井内水位与浸润线水位的水头差,防止下沉过程中产生流砂、涌土等现象,有效控制沉井周围环境和地面沉降。

(3)沉井中部冲底深度,一般应控制在1~2 m为宜。锅底过深则易产生突沉,使沉井下陷量和倾斜度无法控制,同时井外土体也易流入井内,引起井周地面过多沉降。

(4)在沉井过程中,要连续进行下沉,尽量不要在沉井过程中停工。当中间有停工时,停工时间尽量不要超过24 h,这样减少尾矿砂对井壁的摩擦力。

### 5.4 沉井封底

采用水下封底。封底前,井内水位不应低于井外的地下水浸润线水位。封底混凝土采用水下不分散混凝土,水泥用量宜为350~400 kg/m<sup>3</sup>,砂率为45%~50%,宜采用中、粗砂,水灰比不宜大于0.60,骨料粒径以5~40 mm为宜。封底前在用测绳测定井底沉砂厚度<10 cm后,先灌入碎石,其厚

度以20~30 cm为宜。浇注井底混凝土采用水下混凝土灌注,浇注时导管插入混凝土深度不宜小于1.50 m,导管直径以25~30 cm为宜。待水下混凝土达到所需的强度后,方可从井内抽水。

## 6 抽水试验

用潜水泵降低井内水位达到稳定要求连续抽水8 h,当排水1 h后,相邻两井内的水位已基本下降至预定深度,且井底淤砂厚度<100 mm;井壁垂直达到设计要求,井壁渗水无砂,说明施工质量合格。为检验降水效果,现场进行了3组相隔一井的双井抽水试验,试验结果见表4。

表4 抽水试验成果表

抽水井组、号	降深/m	涌水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	相邻井(观测井)水位埋深/m					
			井号	静止水位埋深	稳定动水位埋深			
J2、J4	6.11、6.83	68.81	J1	$\frac{1.90}{6.25}$	J3	$\frac{2.21}{7.31}$	J5	$\frac{2.30}{6.90}$
			J2	$\frac{2.15}{7.45}$	J4	$\frac{2.21}{8.23}$	J6	$\frac{2.21}{7.66}$
J3、J5	7.10、7.31	96.103	J4	$\frac{2.21}{6.90}$	J6	$\frac{2.21}{7.81}$	J8	$\frac{1.76}{7.11}$
J5、J7	6.72、6.06	75.63	J4	$\frac{2.21}{6.90}$	J6	$\frac{2.21}{7.81}$	J8	$\frac{1.76}{7.11}$

从现场抽水试验成果看,主井动水位埋深稳定后的降深在6.06 m。最大降深在7.31 m,平均降深值6.69,降水效果明显。当全部沉井降水启动后,由于降水降漏漏斗的叠加,降深还增加,可达到设计降水深度要求。

## 7 水平排水管施工

为实现自流排水,节省电源,便于施工管理,在每个沉井下游方向施工水平排水管。

(1)钻探设备采用水平钻孔钻机或GXY-1型钻机改进而成,水平排水管在沉井位置往下游方向按2%~3%的坡度施工,开挖和浇筑反力墩;

(2)用硬质合金钻头带 $\varnothing 146$  mm套管送水钻进成孔,达到设计深度后,反复用小径钻具在套管内送水排渣,导向孔即告完成,并逐段上好套管和进行下一段施工,直至达到沉井外壁;

(3)用 $\varnothing 108$  mm钻具送高压清水反复清洗,将套管内尾矿砂洗净,然后换新的硬质合金钻头钻穿沉井壁;

(4)逐段下入水平排水管,直至对接到沉井中,必要时抽水降低井内水位后,用人工下入井内将 $\varnothing 108$  mm水平排水管导入井内,并在管口焊接固定措施;

(5)用顶杆固定排水管,逐根拔出套管,水平排水管即施工完成,形成自流排渗系统。

## 8 降水效果

无砂混凝土沉井降水设施投入使用至今已有3年,总的排水量基本不变,排出的尾矿水不含砂,沉井内的动水位稳定在坝面下7.30 m左右;在初期坝之上第一级子坝上利用勘察钻孔成井的水位观测井进行水位观测,浸润线埋深在5.0 m之下,满足浸润线标高的最低控制要求。目前该尾矿坝仍在正常运行中。该尾矿坝在没有采用无砂混凝土沉井降水之前曾施工包裹土工布的水平排渗管,起初有一定排水量,但降水效果不明显,1年以后排水量渐渐减少,出现前面介绍的初期坝顶至第一级子坝的坝面有尾矿水溢出,局部有出现管涌现象。因此说明该方法降低坝体浸润线效果良好。

## 9 结语

采用无砂混凝土沉井加水平排水管降水排渗具有造价省、降水效果好,不消耗电源、便于管理等优点。无砂混凝土作为沉井井壁,有良好透水性和反滤层的作用,有效地降低坝体浸润线,加速尾矿的固结,提高尾矿坝的稳定,是尾矿坝降低浸润线切实可行的方法,在类似尾矿坝降水工程中具有借鉴、推广应用的价值。

## 参考文献:

- [1] 付贵海,张洪林,等.无砂混凝土作反滤层的试验研究[J].中南公路工程,2005,(6):4,19.
- [2] 付贵海,张洪林,等.无砂混凝土试验研究[J].交通科技,2004,(5):5-6.
- [3] 黄文熙.土的工程性质[M].北京:水利电力出版社,1983.116-122.
- [4] AQ 2006-2005,尾矿库安全技术规程[S].

## 我国第三次获国际大陆科钻计划支持

**中国地质调查局网站消息** 近日,从国际大陆科学钻探计划(ICDP)总部——德国地学中心(GFZ)传出喜讯,中国地质大学(北京)教授王成善等人联合美国、奥地利等国科学家申请的“白垩纪松辽盆地大陆科学钻探项目”获得批准。这是我国继东海和青海湖大陆科学钻探之后,第三个获得国际大陆科钻计划支持的项目。

该项目的开展将有助于对地球历史上在陆地上发生的快速气候变化过程研究的进一步深入,并通过对快速气候变化成因、过程及其对环境、生物的影响等综合研究,为未来全球气候变化趋势判断提供依据。

白垩纪距今约6500万年至1.4亿年,是离现今人类生活最近的典型温室气候时期。当时,全球平均温度比现在高10℃左右,大气中的二氧化碳浓度是现在含量的4~10倍。松辽盆地是世界上最大的白垩纪陆相含油气盆地,有完整的白垩纪沉积,实施这项科学计划的地质条件极具优势。此次

申报的国际大陆钻探项目有20项,“白垩纪松辽盆地大陆科学钻探项目——连续高分辨率陆相沉积记录与温室气候变化”项目经国际大陆科学钻探委员会专家委员会、执行委员会、董事会审批,成为最终获批的3个项目之一。

此前,由中国地质大学(北京)王成善教授担任首席科学家的“973计划项目”,已经于2006年、2007年在松辽盆地完成了松科一井(SK-1)科学钻孔,并获得2485.89 m的岩心,取心率达96.46%,取心层位包括中-上白垩统(SK-1)。

“白垩纪松辽盆地大陆科学钻探项目——连续高分辨率陆相沉积记录与温室气候变化”的推进将进一步深化白垩纪温室世界气候变化和重要地层界线的识别和海-陆地层对比、生物对陆地环境变化响应的的原因、陆相沉积环境对白垩纪大洋缺氧事件的响应、陆相烃源岩的形成和白垩纪正极性超时的(CNS)的机制等气候变化与碳循环有关的地质事件间联系等问题。

## 首都地面沉降研究与预防成果吸引业内关注

**中国地质调查局网站消息** 北京市地勘局在北京市地面沉降监测、研究和预防工作已走在世界前列,一系列成果吸引了业内同行的关注。

据悉,从2002年起,北京地勘局先后在顺义区天竺、朝阳区望京工业开发区、王四营乡建成3个地面沉降监测站和北京市地面沉降监测研究中心,建设工程地质孔、基岩标、分层标、地下水动态观测井、孔隙水压力观测孔共计53个,分别安装了自动化监测设备,实现地面沉降自动化监测;开展了平原区3000 km<sup>2</sup>地面沉降调查。同时,新建外围地下水动态观测井39眼,进一步完善了外围地下水动态监测网,初步建立了北京市地面沉降监测系统框架,为北京市地面沉降防治以及全市防灾减灾工作提供了有力的技术支持和保障。

后来,北京市地勘局承担的预警预报系统(二期)工程全部建设完成并正式投入使用。这一地面沉降监测体系由7个监测站、7个基岩标、55个分层标、37个地下水位观测孔、16个孔隙水压力观测孔、315个外围地下水观测孔、114个GPS监测点及100个专门监测点共同构成,能对北京4000 km<sup>2</sup>平原区地面沉降状况进行实时化、可视化、网络化监测。同时,也使北京首次实现了以城区为中心的整个平原区地面沉降的实时监测。北京首次实现了对地面沉降的量化描述,而通过这些海量数据的分析处理,更可能对地面沉降的发展趋势进行预测,通过实施针对性的防控措施,使地面沉降灾害的防治由被动型转变为主动型。