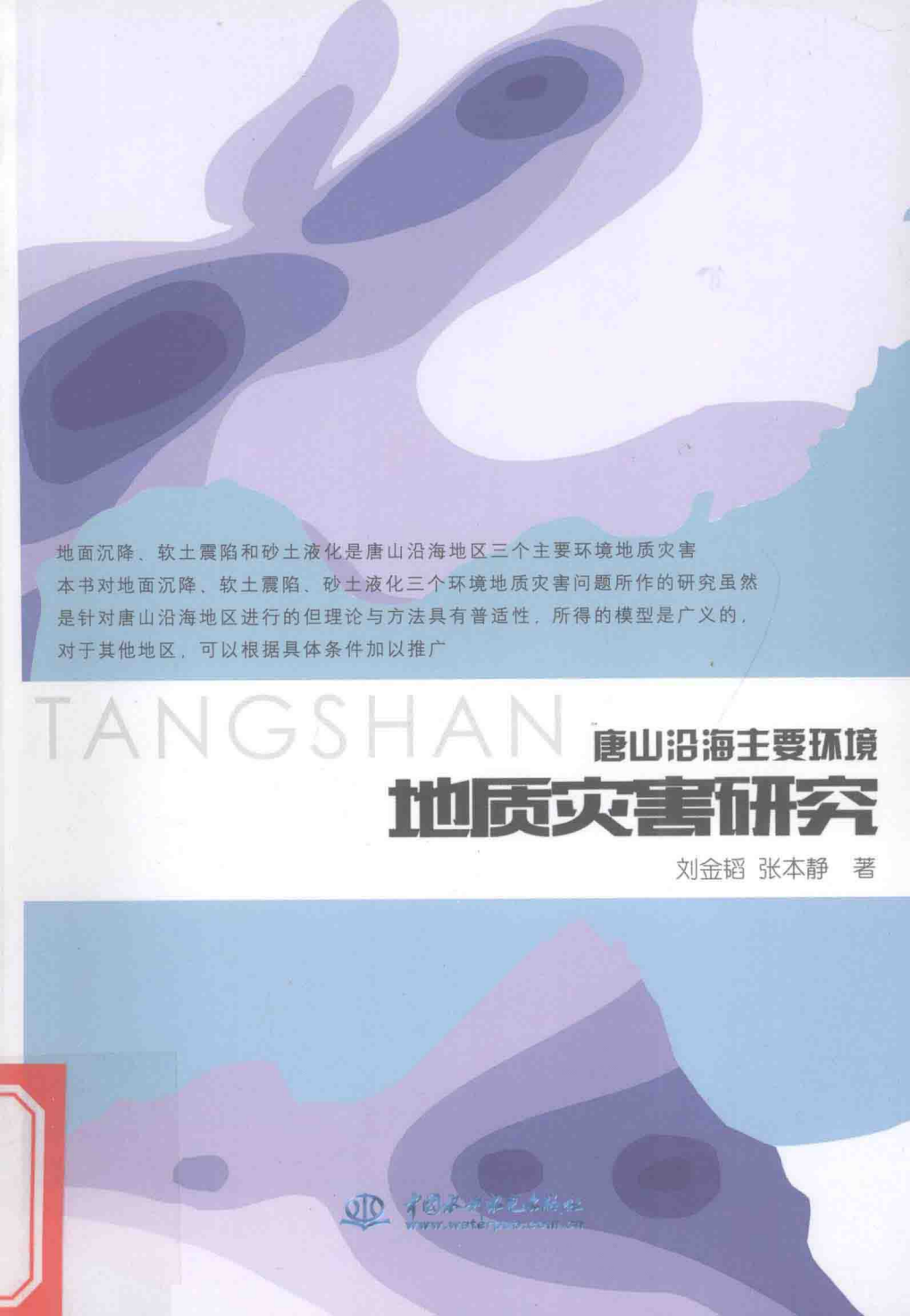




地面沉降、软土震陷和砂土液化是唐山沿海地区三个主要环境地质灾害
本书对地面沉降、软土震陷、砂土液化三个环境地质灾害问题所作的研究虽然
是针对唐山沿海地区进行的但理论与方法具有普适性，所得的模型是广义的，
对于其他地区，可以根据具体条件加以推广

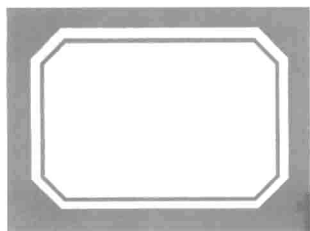
TANGSHAN

唐山沿海主要环境 地质灾害研究

刘金韬 张本静 著



中国水利水电出版社
WWW.WATERELECTRICPRESS.COM



唐山沿海主要环境 地质灾害研究

刘金韬 张本静 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



内 容 提 要

本书通过对地面沉降、软土震陷、砂土液化三个环境地质灾害问题的研究,提出了利用长期释水系数计算因开采地下水引起的地面沉降量、利用排水量等于固结量计算往复荷载作用下软土的震动固结(震陷)量、地震作用下饱和砂土液化域条件判别的方法,并利用这些方法对相关问题进行了计算、判别,取得了良好的效果。

本书可供大学生、研究生及相关专业人士在学习和工作中参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

唐山沿海主要环境地质灾害研究 / 刘金韬, 张本静
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013.8
ISBN 978-7-5170-1116-3

I. ①唐… II. ①刘… ②张… III. ①沿海—地质环
境—研究—唐山市②沿海—地质—自然灾害—研究—唐山
市 IV. ①X141②P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第182436号

书 名	唐山沿海主要环境地质灾害研究
作 者	刘金韬 张本静 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	140mm×203mm 32开本 5.75印张 154千字
版 次	2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

地面沉降、软土震陷和砂土液化是唐山沿海地区三个主要环境地质灾害，本书选择这三个问题进行研究，旨在为这一地区的开发决策规划提供依据。

当承压含水层组（包括弱透水层）受到开采，其水位下降并不意味着含水层组疏干，只是说明水头（孔隙水压力）下降，则原来含水层组中由水承担的那部分上覆介质的压力（水头减少部分）就转移到骨架上，由于土颗粒不可压缩，则因水头下降而导致的含水层组中部分可压缩孔隙产生压缩，导致地面沉降。本书根据地下水动力学的原理，建立了地下水承压含水层开采降落漏斗的水位降模型，并提出了一种利用长期释水系数计算地面沉降量的方法，并用该方法对唐山沿海地区目前地面沉降量及今后几年可能产生的地面沉降量进行了计算与预测。

沿海地区近海地带淤泥质软土较为发育，淤泥质软土具有含水量高，孔隙比大，压缩性高，灵敏度高，强度低，透水性差，高蠕变等特点，尤其是具有触变性，即在动荷载下，强度突然降低的特性。震陷就是软土这种触变性的表现。本书从软土震陷产生的机理入手，建立了往复荷载作用下软土震陷的震动固结模型，并在震陷量计算过程中，采用对地震时间离散化的方

法，得出了一种地震期间软土产生震陷量的计算方法，并利用这一方法，对沿海地区 1976 年唐山地震产生的震陷量进行了计算，同实测值进行了对比。

砂土液化是沿海地区另一个比较严重的震害，主要发生在饱和松散的粉细砂土层中。在地震或其他外部动力荷载作用下，饱水砂土层强度突然消失，呈现液态化的现象，出现喷水冒砂的液化灾害。作者通过对液化机制的研究，建立了液化临界超静孔隙水压力模型及超静孔压随地震持续时间变化的关系式，提出了砂土液化的域条件判别，并利用该方法概括了沿海地区砂土层产生液化与否的全方位的条件域范围。

本书对地面沉降、软土震陷、砂土液化三个环境地质灾害问题所作的研究虽然是针对唐山沿海地区进行的，但理论与方法具有普适性，所得的模型是广义的，对于其他地区，可以根据具体条件加以推广。

本书共分 6 章，其中第 3、4、5 章由刘金韬撰写，第 1、2、6 章由张本静撰写。

本书撰写过程中，张民（作者刘金韬的妻子）在外文参考资料的翻译及稿件录入方面给予了无私的奉献，并在生活上给予无微不至的关心和照顾，在此，向她致以深深的谢意！

在本书的基础资料收集过程中，曾得到河北省环境地质勘察院张洪波、郭润瑞、姜先乔等先生和地矿部海洋地质研究所科技处郭玉贵先生的大力支持，在此，向这些同志表示真诚的谢意！

本书出版过程中，水利部水利水电规划设计总院勘

测处司富安、鞠古斌两位处长给予了热情的帮助，在此，向两位处长表示诚挚感谢！

最后，要感谢所有对本书提出过宝贵意见的专家学者，谢谢您的指教！

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请指正。

作者

2013 年 3 月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地面沉降的产生背景与灾害	2
1.2 软土特性及沿海地区软土分布	11
1.3 唐山沿海地区砂土液化灾害特征	12
第 2 章 唐山沿海地区基本地质概况及环境背景	21
2.1 自然地理	21
2.2 区域地质	21
2.3 水文地质及工程地质条件	31
2.4 沿海地区环境背景	41
第 3 章 地面沉降	53
3.1 引言	53
3.2 成因机理及数学模型	57
3.3 利用模型对天津地区地面沉降进行拟合	69
3.4 唐山沿海地区地面沉降量计算与预测	76
3.5 治理措施建议及面临的问题	90
第 4 章 软土震陷	97
4.1 引言	97
4.2 震动固结模型建立	98
4.3 唐山沿海地区震陷量计算	112
4.4 软土震陷的主要影响因素	116
4.5 今后研究方向	122

第 5 章 饱和砂土液化	124
5.1 引言	124
5.2 传统液化判别方法述评	124
5.3 液化临界超静孔压模型	138
5.4 模型的主要用途及意义	141
5.5 对唐山沿海地区砂土液化的研究结果	142
5.6 砂土层液化的影响因素分析	145
5.7 近似确定孔压消散井间距	153
5.8 小结	160
第 6 章 总结	163
6.1 主要研究结果	163
6.2 研究展望	166
参考文献	169

第 1 章 绪 论

唐山市是一座具有百年历史的沿海重工业城市。唐山市地处环渤海湾中心部位，南临渤海，北依燕山，东与秦皇岛市接壤，西与北京市、天津市毗邻，地理位置十分优越，是河北省最大的经济增长点——京津唐经济圈的重要组成部分，也是连接华北、东北两大地区的咽喉要道和走廊。唐山市总面积 13472km^2 ，人口 700 多万，其中市区面积约 3900km^2 ，人口约 300 万，是全国城市中较大的市之一。

唐山沿海位于环渤海地区中部，地处滦河三角洲，集陆、河、海资源于一体，自然资源丰富，组合良好，位置优越，亟待综合开发与利用。1992 年，京唐港及北港被国务院批准为国家一类开放口岸，南堡经济开发区将建设成为国家级经济开发区和现代化滨海化工城市，曹妃甸滩将建设成中国北方 20 万吨级深水大港。为此，河北省制定了“两环带动外向”和“开发沿海，带动内地经济”的总战略，唐山市制定了国民经济和社会发展“九五”计划及 2010 年远景目标纲要，提出以港口建设为龙头，加快唐山—海港—南堡“新三角”开发与建设。

为了把唐山市建设成现代化的沿海大城市，在“十一五”规划中，唐山市主要经济发展方向定位在沿海地区，“十二五”期间，唐山市加快推进京津冀的区域经济一体化以及由秦唐沧组成的河北沿海地区发展，打造环首都经济圈。唐山南部沿海地区已经初步形成了海港开发区、南堡开发区和曹妃甸工业区的沿海经济带。近年来，该地区的建设日新月异，大唐集团建设的我国北方最大的精密薄板基地、北京焦化厂和中钢工贸集团京唐港物流中心、首钢公司搬迁后新建成的曹妃甸精品钢材基地等大型企业

均落户在海港开发区，并已初具规模；国家最大的煤炭码头已经正式投入使用。从目前的国家和地方远景规划来看，唐山沿海地区在今后仍然是经济发展的热点地区。

一个地区的开发，首要项目就是各种工程与基础设施建设，地区的地质条件就成为工程建设的第一自然制约因素。唐山沿海地区既有着巨大的开发潜力，同时又是一个环境脆弱的敏感地区，不合理无序化的资源滥采使得沿海地区地质环境日趋恶化，严重地影响了这一地区的综合开发。长期过量开采地下水使得地下水位逐年下降，从而导致区域性地面沉降，减弱了海岸带抗御风暴潮的能力，而且会引发海水倒灌入侵等区域环境问题；该地区同时又是一个地震多发地区，1976年唐山地震“震惊世界”，地震灾害尤为突出，其引起的一系列地面、地下破坏效应，对海岸带地质环境具有相当大的破坏力，造成的损失是无法估量的。软土震陷和砂土液化就是其中较为严重的两种震害。虽说短时间内这一地区很难再聚集起如此大的能量，产生如此强烈的地震，但根据这一地区地震频度分析，未来几十年内发生中强级地震的可能性还是有的。因此，对唐山沿海地区过量开采地下水引起的地面沉降、地震产生的软土震陷和砂土液化等主要环境地质灾害进行研究具有突出的现实意义。

1.1 地面沉降的产生背景与灾害

1.1.1 地面沉降引起的灾害效应

地面沉降是一种累进性地质灾害，会给受灾地区的防洪排涝、土地利用、城市规划建设、市政工程建设、航运交通、农田灌溉系统等造成严重危害。尤其是沿海低平原地区，当海平面上升与地面沉降叠加时，其影响更加严重。

20世纪70年代后，地面沉降带来的灾害，对河北省东部沿海地区的经济建设、生态环境及民生等很多方面影响很大，由于沿海地区地面较低，地面沉降将会进一步丧失地面标高，造成抵

御风风暴潮能力下降；地面沉降还导致地面开裂、地下井管变形、防洪工程功能降低、国家测量标志失效、下水管道排水不畅、桥梁净空减少、水质恶化、海水入侵等；地面建筑如高楼、公路、铁路、码头、机场等也都会受到不同程度的影响；滨海地区由于温室效应已经导致海平面上升，如果与地面沉降叠加，则沿海大片低地可能会被海水淹没。

以天津市塘沽地区为例，塘沽地区由于地面沉降造成地面标高损失，沉降中心的地面高程已不足 1m，而遇风暴潮时海水上涨 5~6m，现有防潮堤不足以阻挡海水，造成大面积海水倒灌。1985 年 8 月 2~9 日，高潮位达到 5.50m，新港造船厂、东大沽一带被海水淹没，直接经济损失达 1.2 亿元；1992 年 9 月 1 日，高潮位达到 5.93m，天津港的前方库房、码头、客运站等全部被海水淹没，损失惨重；新港造船厂、北塘修船厂、救助站、部分村庄、上万亩虾场、农田也受到不同程度的损害，直接经济损失达 3 亿元。虽然风暴潮是由台风引起的，表面上与地面沉降没有直接关系，但是塘沽如果没有因过量开采地下水产生了近 3m 的地面沉降，那么当风暴潮来临时，现有的防潮堤就能阻挡比现在高 3m 的潮水，显然，造成的损失也会比现在的情况小得多。1997 年 8 月 2 日，受 1997 年 11 号台风影响，河北省沧州、唐山、秦皇岛沿海发生特大风暴潮，海水向内地人入侵达 10km，许多村庄被淹，虾池、铁路、公路、电力、通信、水利设施遭到严重破坏，沧州直接经济损失达 3.2 亿多元，唐山直接经济损失 4.1 亿多元，秦皇岛直接经济损失 3.3 亿多元，全省经济损失超过 10 亿元。2003 年 10 月 11 日，河北沿海地区再次遭受特大风暴潮侵袭，许多村庄进水，大量房屋被冲毁，而且还冲毁了大量的船只、虾池、蟹池、盐场、农田及交通、电力、水利设施，全省直接经济损失再次超过 10 亿元。从这些触目惊心的数字可以看出，近些年风暴潮造成的经济损失越来越大，发生频率越来越高，这其中除其他原因外，该地区地面沉降是主要因素之一。2004 年印度洋海啸和 2011 年太平洋海啸更是给我们敲响了警

钟，地震引起的大海啸虽然是罕见的，但其造成的危害是灾难性和毁灭性的，河北省东部滨海地区是地面沉降发生较为普遍的地区，应尽早建立地面沉降监测预警机制。

综上所述，地面沉降的基本危害主要包括以下几方面：

(1) 损失地面标高造成雨季地表积水、防洪能力下降。有地面沉降问题的城市普遍存在着比较严重的滞洪积涝问题，一些城市由于地面沉降使得沉降地区内涝加剧，滨河城市由于地面沉降造成河道两岸防洪堤挡水高程下降，降低了防洪标准，造成洪涝灾害更加频繁。其主要危害是雨季地表积水和加重洪水的破坏程度，不仅影响城市交通，而且地下室和低层建筑物在汛期还会被水淹没，造成经济损失。

(2) 沿海地区抵御风暴潮的能力降低。在滨海地区，地面沉降造成陆地地面高程下降，海平面相对上升，与此同时，海岸防潮堤由于地面沉降降低了防潮标准，甚至由于不均匀沉降造成防潮堤损坏而失去防潮能力，这些结果都会导致海水侵袭和风暴潮灾害加剧，不但潮位越来越高，而且高潮频次也不断增加。

(3) 城市管网遭到破坏。城市的给水、供暖、供气、电缆等管线设施均埋于地下，地面沉降会造成这些管线设施变形甚至破坏，从而导致管道漏水、漏气、供电中断等，直接影响市民生活及生产，并对人民的生命财产安全造成巨大威胁。

(4) 铁路安全受到威胁。由于地面沉降造成铁路路基不均匀下沉，铁路安全受到威胁。地面沉降的持续发展还会给正在兴起的高速铁路带来不利影响。

(5) 河床下沉、河道防洪除涝能力降低、桥下净空减小影响泄洪和航运。地面沉降对本来就低洼的沿海地区所产生的负效应和危害表现为降低了泄洪功能和抵御洪涝灾害的能力，大幅度增加了低洼湿地面积，使耕地沼泽化，恶化了生态环境。地面沉降还造成河床下沉，影响引水工程的正常运行，而且地面沉降造成桥梁断裂，桥下净空减小等，严重影响了河道航运和交通安全。

(6) 浅层地下水位相对变浅引起一系列环境问题。在滨海地

区，地面沉降使得地面高程下降，海平面相对上升，海水入侵，浅层地下水位变浅，水质恶化，带来的主要危害有：

- 1) 市区建筑物地基承载力下降，造成建筑物地基破坏。
- 2) 混凝土及金属管线的腐蚀速度加快。
- 3) 降低交通干线路基的强度，缩短了使用寿命。
- 4) 影响城市绿化，树木成活率低。
- 5) 加大了城市建设成本。
- 6) 土地盐碱化，工农业生产用水紧张。

(7) 地面高程资料大范围失效。地面沉降还导致观测和测量标志失效。地面高程资料是国民经济建设和发展的重要基础资料，在水文、地质、环境、市政建设等行业广泛应用，且必不可少，而大范围的高程损失及其不均衡动态变化，会给相关工作带来严重的影响和干扰，如使河流水位、海洋潮位、地形高程失真，给城市规划和建设造成困难，同时也加大了相关工作的经费投入。

(8) 地裂缝频发危及城乡安全。地面沉降和地裂缝在成因上有因果联系，地面不均匀沉降诱发地裂缝，因此在许多地区伴生出现，两者的叠加，其危害性更大，地裂缝主要危害是造成房屋开裂，破坏地面设施、城市地下管线等基础设施，还会造成农田漏水。

- (9) 油田油水井套管上窜影响油田的正常开发。

1.1.2 唐山沿海地区地面沉降可能引起的灾害类型

根据唐山沿海具体环境条件，综合目前已出现地面沉降地区的危害情况，海岸带产生地面沉降带来的主要灾害有以下几类：

(1) 降低抵御风暴潮能力。渤海湾地区是风暴潮的多发区，有时甚至比较严重，由于地面沉降造成地面标高损失，使防潮堤降低了抗风暴潮能力，风暴潮灾害频率有增加趋势，灾情也会更严重。

(2) 造成海水倒灌入侵陆地。由于地面高程的降低，会造成海水溢入或沿河流上溯入侵，其危害具有空间影响范围大、时间

漫长、不易察觉、一旦发现则灾情严重、难以人工消除恢复等特点，这是一个潜在的全局性灾害。

(3) 城镇建设方面的危害。由于地面下沉，对城镇建设、工业生产、人民生活等方面都会造成很多麻烦和损失。比如，房屋基础下沉使得建筑物的正常使用受到影响；地面下沉，排水困难，造成雨后积水；井管上升，影响正常使用等。

(4) 对农业的影响。由于地面沉降，使浅层地下水位相对抬高，农田排涝困难，加重了土地的次生盐渍化，影响农田肥力，减少亩产量。由于沿海地区浅层地下水为咸水，这一问题就显得尤为突出。另外，农田灌溉渠道形成倒坡，需加大泵站的排灌能力，增加农业投入。

1.1.3 唐山沿海地区产生地面沉降的背景条件

过量开采地下水是唐山沿海地区产生地面沉降的根本原因。自 20 世纪 70 年代中后期，特别是唐山地震后恢复重建，唐山沿海地区开始大量开采地下水以来，淡水资源不断衰减，水位持续下降，开采降落漏斗不断形成扩大，并有逐渐加重的趋势。

1.1.3.1 1995 年以前地下水开采状况

1. 基本概况及开采量

唐山沿海地区浅层地下水多为咸水，局部存在浅层淡水，由于近年来浅层淡水水质恶化，地下水开采来源主要是咸水体下面的深层淡水，仅乐亭县有少量浅层淡水开采。据 1996 年唐山市地质环境监测报告提供的资料，沿海 4 县 1991~1995 年地下水年平均年开采量为 1.71 亿 m^3 ，各县开采量见表 1.1。

表 1.1 唐山市沿海各县地下水开采量统计 单位：亿 m^3

年份		1991	1992	1993	1994	1995
县别	开采层位					
丰南	深层淡水	0.5631	0.5390	0.5531	0.6131	0.6184
滦南	深层淡水	0.1230	0.1277	0.1716	0.1683	0.1633
唐海	深层淡水	0.3600	0.3787	0.3553	0.3700	0.3700

续表

县别	年份 开采层位	1991	1992	1993	1994	1995
乐亭	浅层淡水	0.5014	0.5262	0.5170	0.3070	0.3367
	深层淡水	0.1980	0.2037	0.2508	0.2220	0.2340
合计		1.7455	1.7753	1.8478	1.6804	1.7224

2. 开采程度

多年监测资料统计表明,沿海地区地下水开采程度都处于超采,只是程度不同,各县超采程度见表 1.2。

表 1.2 唐山市沿海各县地下水开采程度

县别	开采层位	可采资源量 (万 m ³)	地下水开采量 (万 m ³)	开采程度 (%)
丰南	深层淡水	4800	5773	120.3
滦南	深层淡水	1496	1508	100.8
唐海	深层淡水	2348	3668	156.2
乐亭	浅层淡水	4309.3	4377	101.6
	深层淡水	1720	2217	128.9

从表 1.2 可见,丰南、乐亭两县深层淡水开采程度属中超采,乐亭县浅层淡水开采程度属弱超采,滦南县深层淡水开采程度属弱超采,唐海县深层淡水开采程度属强超采。

1.1.3.2 地下水动态分析

1. 地下水侧向补给量动态

唐山沿海地区地下水补给除少部分浅层淡水受降水入渗直接影响外,其余咸水区深层淡水均不受降水直接补给,其补给主要来源于北面邻区侧向补给,据现有资料分析,1985~1995 年,地下水侧向补给量平均以每年 461 万 m³ 的速度减少。

2. 开采量动态

唐山沿海地区开采的地下水主要是咸水体下部深层淡水,

1986~1995 年统计资料表明, 每年开采量平均增长 266 万 m^3 , 其中, 农业用水开采量呈减少趋势, 工业及乡村生活、人畜用水均有增长。

由表 1.3 中可以看出, 1991~1995 年, 唐山沿海各县地下水开采量逐年递增, 每年平均比上一年多开采 464 万 m^3 。

表 1.3 1991~1995 年各县地下水开采统计表 单位: 亿 m^3

县 别		丰南	滦南	唐海	乐 亭	
开采层位		深层淡水	深层淡水	深层淡水	浅层淡水	深层淡水
1991 年	工业用水	0.2531	0.0140	0.2250	0	0.0150
	农业用水	0.2500	0.1000	0.0550	0.4914	0.1700
	生活用水	0.0600	0.0090	0.0800	0.0100	0.0130
1992 年	工业用水	0.2350	0.0140	0.2419	0	0.0180
	农业用水	0.2405	0.1048	0.0551	0.5163	0.1708
	生活用水	0.0635	0.0089	0.0817	0.0099	0.0149
1993 年	工业用水	0.2450	0.0141	0.2206	0.0020	0.0190
	农业用水	0.2525	0.1492	0.0555	0.5056	0.2146
	生活用水	0.0556	0.0080	0.0797	0.0100	0.0170
1994 年	工业用水	0.2500	0.1440	0.2154	0.0050	0.0320
	农业用水	0.2601	0.1380	0.0419	0.5000	0.1780
	生活用水	0.1030	0.0159	0.1123	0.0020	0.0120
1995 年	工业用水	0.2400	0.0144	0.2185	0.0050	0.0330
	农业用水	0.2666	0.1330	0.0499	0.5303	0.1880
	生活用水	0.1118	0.0159	0.1131	0.0014	0.0130

3. 水位动态

唐山沿海地区对地下水大规模开采始于 20 世纪 70 年代中后期, 随着地下水开采量的不断增加, 地下水位持续下降。

(1) 浅层淡水。唐山沿海地区仅乐亭县局部有浅层淡水, 据唐山市水资源年鉴(1989 年) 资料表明, 1989 年末, 平原区浅层地下水位与 1974 年同期比较, 平均下降 2.94m, 乐亭县浅水水位

降小于 2m。据《唐山沿海环境地质调查与评价》（1991~1995 年），1995 年平原区浅层淡水平均水位比 1990 年平均水位下降 2.64m，乐亭县西部浅层淡水水位下降 3~4m，东部下降小于 1m，南部仅坨里及聂庄南部两处为水位上升区，上升幅度 0~1m。

（2）深层淡水。深层淡水多年来水位一直处于下降趋势，1995 年平均水位埋深比 1990 年平均水位埋深下降 7.39m，平均年下降速率 1.48m。水位变幅深层水比浅层水大，1991~1995 年年平均变幅 3.77m，乐亭县东部地区变幅较小，一般为 1~2m。

水位变差 1995 年与 1990 年末水位相比以下降为主，下降区分布面积约占全区总面积的 98%，仅在尖字沽乡一带有零星上升区，1995 年末比 1990 年平均水位变差 -6.97m，唐海县大部及丰南县南部水位下降幅度大于 10m，南堡开发区下降幅度最大处达 -22.8m，上升区上升幅度达 0.47~1.69m（见图 1.1）。

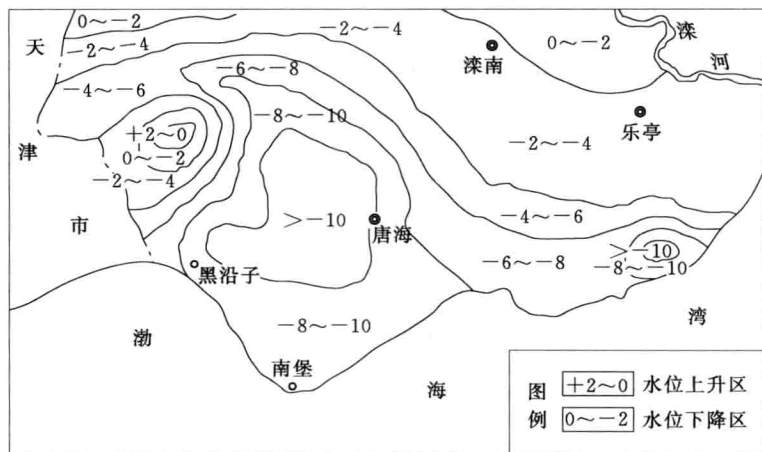


图 1.1 唐山沿海地区 1990 年末至 1995 年末
深层地下水水位变差图（单位：m）

唐山沿海地区自 20 世纪 80 年代初期发现地下水降落漏斗以来，漏斗面积不断扩大。1985 年，尖坨子地区附近及唐海地区