

天津地面沉降区土水比论述

董克刚,王 威,于 强,周 俊,陆 阳,易长荣,郑玉萍
(天津市控制地面沉降工作办公室,天津 300061)

摘要: 天津市地面沉降分布广,沉降速率大。本文针对当前地面沉降研究和防治过程中所遇到的勘查资料严重缺乏、禁采难以全面实现等难题,提出了土水比指标量。通过概念分析和对多年数据的分析,认为土水比可以检验地下水开采量数据的统计精度,指示地下水资源补给及土层释水条件,并表明沉降的严重程度,反映地下水资源的保障程度。建议在沉降防治工作中,以土水比作为指标,通过相关分析模型来制定压采量。

关键词: 天津市;地面沉降;土水比

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)05-0076-06

1 引言

天津市是我国北方典型的地下水开采型地面沉降区。20世纪80年代中期开始,中心市区和塘沽城区便开展了全面沉降防治工作,效果明显,沉降速率控制在10~15mm/a以内^[1]。但随着20世纪90年代工业向郊县地区的外移,以及乡镇企业的迅速发展,郊县和农村地区的地下水开采量大幅度增长,并形成了较为明显的地面沉降漏斗,局部沉降速率超过80mm/a。

在大区域的郊县和农村地区,由于难以深入开展水文地质勘探工作,同时也不具备大规模禁限采地下水的条件,导致地面沉降研究和防治管理面临极大的困难。土水比分析正是基于当前形势,利用天津丰富的沉降监测数据和地下水开采量统计资料,再综合水文地质条件,对整个沉降区进行的地面沉降研究。

2 土水比的概念

2.1 土水比的概念

土水比是指在某一水文地质条件相对独立的单元内,地面沉降所造成的土方损失量与地下水开采量的比值,表征地下水开采引发地面沉降的难易程度,具体公式为:

$$P = \frac{E}{Q} \quad (1)$$

式中: P ——土水比,无量纲;

E ——土方损失量($\times 10^4 \text{ m}^3$);

Q ——相应时段的地下水开采量($\times 10^4 \text{ m}^3$)。

本文中均以 Q 表示开采量,如果存在地下水回灌, Q 值为开采量与回灌量的差值,即为从地层中开采地下水的净值,由于外调水源不足和粘性地层结构难以完全回灌的原因,故 $Q \geq 0$ 。

从平面上看, P 计算区域要求其水文地质条件相对独立,即单元内外的水力联系微弱,单元外地下水的开采不会导致单元内水文地质条件的改变,也不会导致单元内地面沉降的发生,单元内地面沉降的发生完全由单元内地下水开采所致。理论上讲,地下水开采量为0,即在单元内尚未开采地下水的情况下,不会发生由地下水开采所引起地面沉降。一旦单元内地下水开采引起了地面沉降,如果缺少地下水补给,则地下水开采量几乎等于土方损失量, $P \approx 1$;如果具有部分地下水补给, $P = 0 \sim 1$;若单元内有充分的地下水补给来源,则 $P \approx 0$ 。

从垂向上看,沉降介质的垂向计算深度应该包括所有沉积地层。当地下沉降介质可以划分为多个沉降压缩层时,则可利用分层沉降监测数据和分层开采量来分析同一区域不同沉积压缩层的土水比。计算公式为:

$$P_i = \frac{E_i}{Q_i} \quad (2)$$

$$P = \frac{E}{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (3)$$

式中: P 、 E 、 Q 含义同式(1);

收稿日期: 2007-12-21; 修订日期: 2008-04-30

基金项目: 天津市水利局科研项目(KY2007-16)

作者简介: 董克刚(1951-),男,高级工程师,主要从事地面沉降的管理与研究工作。

E-mail: dkg2004a@yahoo.com.cn

n ——沉降压缩层的层数;

E_i ——第 i 压缩层土体损失量 ($\times 10^4 \text{ m}^3$);

Q_i ——第 i 压缩层地下水开采量 ($\times 10^4 \text{ m}^3$);

P_i ——第 i 沉降压缩层土水比,无量纲。

具体到公式(1)~(3)中, E 、 Q 计算则可进一步细分。

2.2 土水比的计算

依据公式,土水比的计算主要在于单元内土体损失量和地下水开采量的计算。

2.2.1 土体损失量(E)

土体损失量(E)为沉降损失的地面高程与沉降区范围之积,是各个沉降压缩层土体损失量(E_i)之和,即:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = M \cdot \sum_{i=1}^n S_i = M \cdot S \quad (4)$$

式中: S ——地表监测的沉降量(mm);

S_i ——地表以下各压缩层的沉降量(mm);

M ——计算单元的面积(km^2)。

2.2.2 地下水开采量(Q)

地下水开采量一方面可依据水量均衡法来计算:

$$Q = Q_{\text{补}} - Q_{\text{排}} - \Delta Q_{\text{储}} = Q_{\text{补}} - Q_{\text{排}} - \mu \cdot M \cdot \Delta H \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{补}}$ ——补给资源量($\times 10^4 \text{ m}^3$);

$Q_{\text{排}}$ ——自然排泄量($\times 10^4 \text{ m}^3$);

$\Delta Q_{\text{储}}$ ——储存资源变化量($\times 10^4 \text{ m}^3$);

M ——计算区内含水介质给水度(无量纲);

ΔH ——计算时段内的平均水位变动值(m)。

上述各补给项、排泄项均需要详尽的水文地质参数,诸如含水层导水系数、水力梯度、弹性释水系数、孔隙度以及断面面积等。

另一方面,地下水开采量可依据开采井的计数统计。

2.3 天津地区土水比的应用

参照土水比的概念分析,可以发现,土水比计算的基本假设条件是研究区必须为水文地质条件相对独立的单元。这种相对独立的水文地质单元多存在于隔水边界明显的山间盆地,对于地下水开采程度较高的平原区,含水组分布广泛,水文地质条件相对独立的单元一般不存在。

人为划定的研究区,区外地下水开采可以影响到区内水文地质条件的改变,尤其是地下水位,从而影响区内地面沉降的发展。在该类地区开展土水比计算,

可增加区外对区内的沉降影响项 F ,即:

$$P = \frac{E}{Q} + F \quad (6)$$

F 为经验修正值,只要存在水力联系,区外开采对区内地面沉降的影响项均为正值。研究区的大小,直接决定了区外地下水开采对区内地面沉降影响程度的大小,当区外影响足够大时,区内计算的土水比值 P 可能大于1。

天津平原地区地面沉降严重,而沉降区内深厚的松散含水介质间水力联系紧密,在人为划定区域内开展土水比计算,宜选用公式(6)。天津沉降土体损失方面,由于当前天津地面沉降监测手段主要以地表一、二等水准监测为主,辅以GPS和InSAR等空间技术,同时建设有十余个分层标组来监测分层沉降情况^[2],故天津沉降区沉降量监测精度高,土体损失量的计算结果准确度高;天津地下水开采量方面,鉴于广大郊县和农村地区地下水均衡计算所需的水文地质参数难以达到要求,故采用区(县)、镇、村各级水利部门提供的地下水开采量计数值,一般情况下,计数中收费的工业自备井计量比较准确,人畜和农业用水为估算值,存在一定的偏小性。

3 土水比对地下水资源分析的指示意义

从土水比的概念和天津地区土水比计算结果来看,发现土水比研究对沉降区地下水资源的分析具有一定指示意义。

3.1 对地下水开采量数据的检验

一般认为,地层土体的减少,主要是由于粘性土中等量水体的释出,含水介质的颗粒弹性压缩占相对少的比例,机理上则可用效应力原理和砂层颗粒的压碎移动来解释,故地下水资源评价过程中,往往用地面沉降量来代替粘性土释水量^[3]。

依据上述假设,土水比 P 计算值范围为0~1之间,即地面沉降损失的土体量应该小于或等于从地层中抽出地下水的体积量。当然,对于某些孔隙度明显大于含水率的局部回填土、淤泥质土等,土层在上部高层建筑荷载的作用下,土体损失量可能会略大于地下水开采量,但在区域土水比计算过程中,这些局部现象并不会改变整体的土水比值。

本文认为,考虑到开采量和沉降量的统计和测量误差,当区域土水比 P 大于120%时,即偏差大于20%,就可以认定存在开采量统计偏少的现象,这也为检验各区(县)、乡镇所提交的地下水开采量数据是否明显偏小提供了间接的证据。

3.2 对地下水资源补给及土层释水条件的指示

理论上, P 值为 $0 \sim 1$, 如果 $P \approx 0$, 即地下水开采量远大于土体损失量, 依据公式 (5), 说明研究区地下水的补给条件相对于开采量来说好得多, 沉降基本上只是局部过于密集开采造成的, 区域平均沉降量可以忽略不计; 但如果 $P \approx 100\%$, 即抽出水量与损失土量大体相等, 则可以理解为: 这时开采的地下水, 基本上由土体压缩释水置换而来, 外部补给条件差, 对于深部含水层而言, 就是侧向径流条件差, 侧向流入量难以满足人工开采量。

此外, 粘性土中弱束缚水是否流出导致土层压缩释水, 可能也会影响土水比值大小和地下水资源补给条件的分析。但即便如此, 由于弱结合水的密度约为 1.1g/cm^3 , 即粘性土地层中释出的水量可为粘性土相应压缩量的 110% , 而到土水比本身存在有约 20% 的允许误差, 故弱束缚水是否在一定水力梯度下释水将不会明显影响土水比的大小和补给条件分析结果的正确性。

对天津市南部平原区的各个区(县)进行土水比计算, 由于区(县)辖区为人为划定区域, 各区(县)并非相对独立的水文地质单元, 土水比计算宜选用公式 (6), 而公式 (6) 中的影响项 F 难以确定。即使难以确定各区(县)的 F 值, 但可以明确的一点是, 各区(县)之间的影响是相互的, 且由于各区(县)松散岩层结构相近, 故 F 大小相近。本次仅以各区(县)内土体损失量和地下水开采量比值来表示土水比, 如图 1 所示, 靠近天津北部地下水补给区的武清区和汉沽区 2003~2006 年期间逐年土水比均为 20% 左右, 距离较远的北辰区、东丽区、津南区、塘沽区和大港区则逐年土水比为 $40\% \sim 70\%$ 之间, 远离补给区的静海县和西青区土水比为 $80\% \sim 120\%$, 侧向补给条件最差。此外, 值得注意的一点是, 北辰区、东丽区、津南区、塘沽区和大港区土水比值相近, 这一弧形区域可能具有相同的地下水补给条件。而来自北部山区补给的强度自北向南递减, 这就表明, 上述弧形的下半段(即津南区和大港区)有可能存在有来自于渤海湾方向的侧向补给。

4 土水比对沉降区地质环境保护的指示意义

土水比研究对地质环境保护而言, 可以作为参数来确定地面沉降的危害性大小, 以及确定沉降区地下水资源在保证程度, 此外, 土水比也可作为地下水开采控制指标, 解决长期以来天津地区开采量即使低于允许开采量也会产生地面沉降的问题, 制定更加合理的

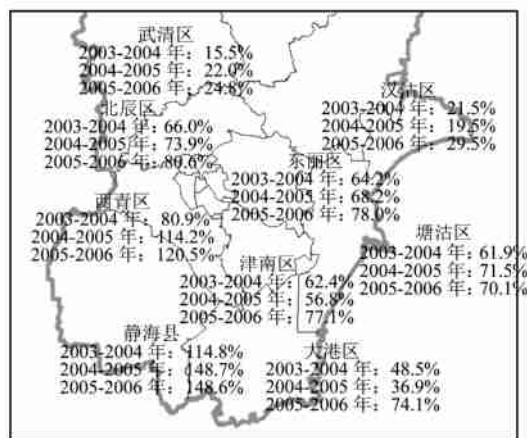


图 1 天津市南部各区县土水比值分布图
(2003~2006 年)

Fig. 1 Ratio of soil loss to groundwater-exploitation in southern Tianjin (from 2003 to 2006)

控制性开采方案。

4.1 确定地面沉降灾害的相对大小和地下水资源保证程度

当前的地质灾害评估中, 地面沉降灾害主要是针对城市基础设施和地下管线而言, 评价体系以年沉降速率为标准, 对于天津地区: 年沉降速率小于 20mm 为危险性小; 年沉降速率 $20 \sim 50\text{mm}$ 为危险性中; 年沉降速率大于 50mm 为危险性大^[4]。此外, 重要交通干线的地面沉降灾害评估多注重于不均匀沉降可能产生的危害^[5]。

实际上, 天津沉降区绝大部分为郊县和农村地区, 这些地区沉降相对均匀、灾害损失相对较小, 开展地面沉降灾害评估, 完全依据年沉降速率还不够全面。本文参照天津市地下水系统分区图^[6] (图 2), 认为各地下水子区间地下水水力联系相对微弱, 即公式 (6) 中的影响项 $F \approx 0$, 计算各子区的土水比, 结果如表 1 所示。

表 1 天津市各水文地质子区 2003~2006 年土水比

Table 1 Ratio of soil loss to groundwater-exploitation in different groundwater sub-systems (from 2003 to 2006)

水文地质子区	土水比 (%)		
	2003~2004	2004~2005	2005~2006
1-2	0.1	12.9	9.4
2-2	7.6	28.1	17.1
3	26.4	20.5	27.5
2	61.2	48.8	61.8
3	4.8	1.1	11.4
2	90.5	102.1	117.7
3+ 3+ 3	88.9	91.3	113.9
3	43.2	34.8	58.2

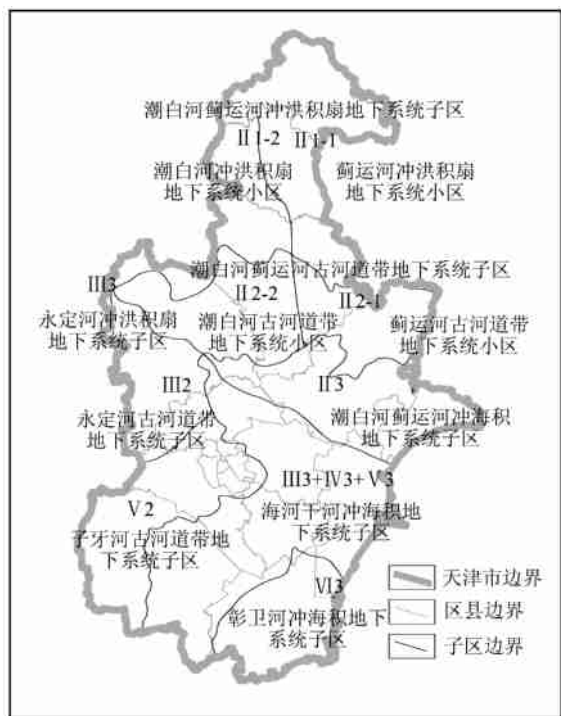


图2 天津市各水文地质子区分布示意图

Fig.2 Distribution of groundwater sub-systems in Tianjin

平面上,将各子区的土水比分布特征与天津市2005~2006年地面沉降分布情况对比分析(图3),可以发现,土水比一方面反映整体沉降速率的相对大小,即沉降速率与土水比值相关性极好,例如南部复合沉降漏斗所在的子牙河古河道带子系统和海河干河冲海积地下系统子区,土水比为90%~120%,永定河古河道带地下系统子区为60%左右,均远远高于其他地区的0~30%。另一方面,土水比大小还可以反映沉降区的地下水资源保证率,例如,年沉降速率20~30mm/a的北部大部分地区,各子系统土水比 $P \leq 20\%$,即开采 5m^3 地下水,产生 1m^3 的沉降土体损失,其余 4m^3 地下水来自于外部补给,显示有充沛的补给条件,由此,可将 $P = 20\%$ 定为天津地区地下水系统资源保证率高与保证率中等的界线;彰卫河冲海积子系统和永定河古河道子系统部分处于沉降速率30~50mm/a地区,部分位于50mm/a的一级沉降漏斗中,土水比 $P \leq 50\%$,即开采 2m^3 地下水,在等量置换出 1m^3 水之外,只能从含水层中获得另外 1m^3 的地下水,显示侧向补给已经很有限,故将 $P = 50\%$ 定为保证率中等与保证率低的界线;天津南部数千平方公里的地区,土水比接近或等于100%,即从地下开采出来的水,基本上完全是由地层压缩置换而来,这无疑是地下水资源枯竭的警示信号。

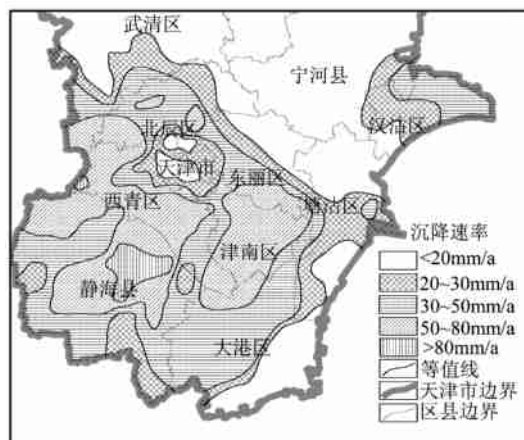


图3 天津市2005~2006年年沉降速率等值线图

Fig.3 Distribution of land subsidence
in Tianjin from 2005 to 2006

由此,本文建议在天津地区开展沉降损害危险性评估过程中,采取表2中参数体系。

表2 天津沉降损害危险性评估参数体系

Table 2 Parameters of land subsidence assessment in Tianjin

评价因子	指标	等级
沉降速率(mm/a)	> 50	损害危险性大
	20 ~ 50	损害危险性中等
	< 20	损害危险性小
土水比(P) (%)	100	地下水资源枯竭警示
	50 ~ 100	地下水资源保证率低
	20 ~ 50	地下水资源保证率中等
	< 20	地下水资源保证率高

4.2 制定合理压采量,完全控制地面沉降

4.2.1 开采控制的土水比指标

此前,天津地面沉降区压采量的制定,主要参照地下水允许开采量^[7],认为地下水开采量不超过允许开采量就能够防止地面沉降的发生,而实践结果表明该标准仍不能完全控制沉降,例如中心城区,其允许开采量为 $1\,000 \times 10^4 \text{m}^3$ 左右,1998年以来开采量均低于允许开采量,并且逐年减少至2006年的400余万立方米,然而,近些年来的年沉降速率仍为20~25mm/a,除去构造运动引起的1.3~2.5mm/a沉降^[8],剩余沉降依然由人为因素引起。究其原因,在于一方面允许开采量是从地下水资源平衡角度计算所得,用作区域水资源量评价,计算时所要求的水文地质参数较多,而实测参数少导致总体误差较大;另一方面,由于计算参数获取的难度,允许开采量往往是在各轮次水资源评价中计算所得,并不能获取各地区逐年的允许开采量,而实践中随着人为开采强度的变化,允许开采量会随之改

变;此外,即便总开采量低于允许开采量,但集中开采容易造成局部地面沉降,沉降灾害仍然存在。总之,仅以允许开采量作为开采控制指标,难以准确制定类似于天津多重沉降漏斗分布地区的局部允许开采计划。土水比指标,可以实现逐年和各区域计算,如前所述,其精度主要在于地下水开采量统计数据的准确度,这就克服了以允许开采量作为开采控制指标时所面临的更新周期长、计算区域被限定的难题。并且,从土水比的定义来看,只要开采地下水,就会引起地面沉降,符合当前已多年持续地面沉降的天津地区实际情况。

4.2.2 土水比指标的控制条件

结合表2中的危险性评估参数体系,天津土水比指标的控制条件因区而异,主要分为中心市区及低海拔滨海地区、郊县城镇地区和农村地区三类。

中心市区和滨海地区是天津土水比安全级别最低、沉降危害敏感度最高的地区,中心市区是政治文化中心,滨海地区内海拔低,即便各年土水比不大,但只要开采地下水即损失土体和地面标高,其累计损失量就严重威胁着陆地资源,并可能与天文大潮灾害相叠加,造成海水大范围倒灌现象,灾害严重。土水比指标宜控制为0,即必须全面禁采。首先从行政区域内部来保证沉降不因内部开采而发生,减缓地面沉降,至于禁采之后仍然存在的地面沉降,要求必须采取进一步的影响区域分析,完全禁采影响区域内的地下水。

郊县城镇地区沉降危害大,在具备可替代地表水源的前提下,要求尽量减少地下水开采,土水比指标控制在20%以下,确保地下水资源保证率。

农村地区沉降灾害相对较小,土水比安全级别高。建议土水比指标控制为 $P < 50\%$,以保证地下水不枯竭、不引起显著生态地质灾害,区域地面沉降将不会造成大的危害。

4.2.3 土水比控制条件下的开采量计算

制定合理开采量,以保证土水比维持在目标水平,可利用多年的开采量和土水比值累计进行相关分析计算:

$$\sum_{i=1}^n P_i = a \cdot \sum_{i=1}^n Q_i + b \quad (7)$$

式中: i ——年份序列,第1年为1;

n ——年份序列的总长度,要求 $n \geq 5$;

P_i ——相应顺序年份的土水比;

Q_i ——相应顺序年份的开采量($\times 10^4 \text{ m}^3$);

a, b ——分析计算参数, a 量纲($\times 10^{-4} / \text{m}^3$)。

尽管上式中土水比值(P)理论上要求是必须包含影响项 F ,即必须考虑研究区外地下水开采对区内地

面沉降的影响,但考虑到周边区域地下水开采对区内地面沉降的影响程度在较短年份内相差不大,可视为定值,并且,公式(6)和公式(7)中 Q 以及最终预测值均为研究区内开采量,故 F 值对相关分析计算和预测结果没有影响,可不考虑区外地下水开采对区内沉降的影响。

天津某区1996~2006年累计开采量和累计土水比值的相关分析结果见图4,相关系数 R 达0.995,超过临界相关系数,限定2007年土水比为20%,计算出2007年的开采量应控制为 $490 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

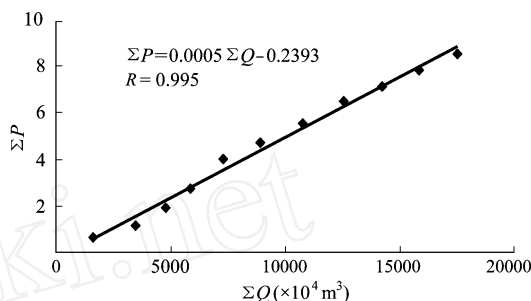


图4 天津某区累计开采量与土水比相关分析图

Fig. 4 Regression analysis of accumulative exploitation and ratio of soil loss to groundwater exploitation

5 结论

针对天津地面沉降分布范围广、沉降持续时间长、沉降速率大的特点,本文提出了土水比概念。在实际工作中直接利用精确的地面沉降监测数据和各级水利部门地下水开采量统计资料来计算。

天津沉降区的计算结果显示,土水比可以检验地下水开采量数据的统计精度,指示地下水资源补给及土层释水条件和地面沉降的严重程度,并且土水比值范围可以反映地下水资源的保障程度,由此可建立郊县和农村沉降地区的地质灾害评价参数体系。

在天津地面沉降的防治工作中,控制地下水开采是最主要的措施。利用土水比作为指标来界定控沉所需的地下水压采程度,改进了以往仅参照地下水允许开采量的工作思路。对中心市区及低海拔滨海地区、郊县城镇地区和农村地区分别制定土水比指标的控制条件,并通过建立累计土水比和开采量的相关分析模型来计算开采量,可直接指导地下水开采规划。

参考文献:

- [1] 吴铁钧,金东锡.天津市地面沉降防治效果及措施[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(2):6-12.

(下转第91页)

Comparison of Kriging interpolation precisions in different topographical units and number of samples : a case study of spatial distribution of soil total nitrogen in the Shucheng County

LEI Neng-zhong¹, WANG Xin-yuan², JIANG Jin-gang¹, HUANG Da-peng³

(1. Department of Urban Construction and Environment Science, West Anhui University, Lu'an 237012, China;

2. College of National Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

3. Institute of Geographical and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: A total of 611 soil samples were taken from top soil (0 ~ 20cm deep) for examining the concentration of soil total nitrogen in Shucheng County, Anhui Province. Our objectives were to analyze the variation in the precision of Kriging interpolation in different topographical units and number of samples. Semivariograms of geostatistics indicate that the total soil nitrogen had a relatively good spatial autocorrelation in the study area. With the increasing sampling densities, the Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) decreased, and precision of Kriging interpolation increased. Under the same sampling density, the accuracy of Kriging interpolation in the mountain area, hilly land, mound area and plain area increased orderly, indicating that the accuracy decreased with the increase in complicated degree of the topography. An analysis of the value of average development of the NRMSE shows that the growth of precision of Kriging interpolation differed significantly among four topographical units, with the highest value in the mountain area and the lowest in the plain. It can be concluded that topography and sampling densities are important factors affecting the accuracy of Kriging interpolation in large land areas.

Key words: Kriging; interpolation accuracy; total soil nitrogen; topography; Shucheng County

责任编辑:汪美华

(上接第 80 页)

- | | |
|--|---|
| [2] 景悦. 控制地面沉降, 保障经济社会和谐发展[J]. 工程地质学报, 2005, 13(S1): 1-3. | [6] 王家兵. 天津深层地下水资源持续利用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2006. |
| [3] 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. | [7] 王亚斌. 天津市塘沽区地下水资源开发区划报告[R]. 天津: 天津市环境地质研究所, 2000: 50-51. |
| [4] 应耀明. 天津市地质灾害危险性评估技术规程[R]. 天津: 天津市地质环境监测总站, 2007: 11-12. | [8] 王若柏. 天津和临近地区构造沉降及控沉远景问题的研究[R]. 天津: 天津市控制地面沉降工作办公室, 2002: 6-8. |
| [5] 孟庆文, 闫澍旺. 开采浅层地下水对高速铁路工程的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(4): 37-39. | |

Ratio of soil loss to groundwater-exploitation in the Tianjin land subsidence area

DONG Ke-gang, WANG Wei, YU Qiang, ZHOU Jun, LU Yang, YI Chang-rong, ZHEN Yur-ping

(Land Subsidence Control Office of Tianjin City, Tianjin 300061, China)

Abstract: Land subsidence in Tianjin occurs in a wide region and at a great rate. Since the lack of reconnaissance and the impossibility of groundwater-exploitation forbid have been the major problems and can not be solved at present, a new term called the "ratio of soil loss to groundwater-exploitation" is recommended in this article. From the conception and calculation of the ratio, it is clearly seen that the ratio can be used to test the veracity of statistical data on groundwater-exploitation, indicate the condition of groundwater recharge and drainage from clay soil, and reflect the seriousness of land subsidence and the guarantee of groundwater resources. In addition, it is an advocate to use the ratio to achieve the rational amount of groundwater exploitation with correlation analysis.

Key words: Tianjin; land subsidence; ratio of soil loss to groundwater-exploitation

责任编辑:汪美华