

土水比指标在天津沉降区地下水资源管理中的应用

董克刚,王 威,于 强,易长荣,周 俊

(天津市控制地面沉降工作办公室,天津 300061)

摘要 天津地面沉降形势严峻,加强地下水资源管理是控制地面沉降的关键。理论和实践证明,可开采量和临界水位等地下水资源管理指标,其可操作性不强。为此,在综合分析沉降区内地下水开采量和地面沉降所引起的土方损失情况的基础上,提出了一种新的地下水资源管理指标——土水比。研究结果表明,土水比能够指示地面沉降相对于地下水开采的易发性以及沉降区内的地下水资源保障程度,将土水比作为沉降区地下水资源管理的指标,就可以确定出不同级别的沉降易发区域以及地下资源的保障程度,了解开采条件下地下水资源的补给能力,从而可保证地下水开采不消耗地下水储存资源,有效监控和防治地面沉降。

关键词 地面沉降;地下水资源管理;地下水环境容量;土水比;天津市

中图分类号:P641.8 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2009)06-0051-05

Application of ratio of soil loss to groundwater-exploitation in groundwater management of Tianjin land subsidence area

DONG Ke-gang, WANG Wei, YU Qiang, YI Chang-rong, ZHOU Jun

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

Abstract: Land subsidence occurs at a high rate and with a wide distribution in Tianjin City. Strengthening the management of groundwater resources is the key to controlling land subsidence. It was proved theoretically and practically that the exploitable groundwater and critical water level used as the indexes of environmental capacities of groundwater were not the operational parameters in groundwater management. For this reason, based on comprehensive analysis of the soil loss due to the quantity of exploited groundwater and subsidence of the land, a new index for water environmental capacity is proposed: the ratio of soil loss to groundwater exploitation. The results from this study show that the ratio can indicate the land subsidence readily resulting from groundwater exploitation, and also the guarantee degree of exploration of groundwater resources in the land subsidence area. Using the ratio of soil loss to groundwater-exploitation as a reference index for groundwater management, areas with different degrees of vulnerability to land subsidence and guarantee degrees of extracting groundwater resources can be determined, the supply capacity of groundwater resources under exploitation can be quantified, and therefore extraction of groundwater without consumption of the storage of groundwater resources, can be ensured, enabling the effective monitoring and control of land subsidence.

Key words: land subsidence; groundwater resources management; environmental capacity of groundwater; ratio of soil-loss and groundwater-exploitation; Tianjin City

地面沉降是一种自然和人为因素引起地面标高缓慢降低的环境地质现象。人为因素包括地下水超采、地下油气开发和地表荷载加大等^[1]。天津是我国北方典型的资源型缺水城市,用水很大程度上依赖于地下水资源的开采,区内超采地下水已导致南

部地区发生严重的地面沉降^[2]。社会经济发展形势要求天津地面沉降区必须加强地下水开采的管理,实现地下水资源的可持续利用,避免进一步引发地面沉降。目前,天津沉降区地下水资源管理大多采用地下水环境容量指标作为控制因子^[3-5],而理论

和实践证明,可开采量和临界水位等地下水环境容量指标,其可操作性不强。为此,笔者在综合分析沉降区内地下水开采量和地面沉降所引起的土方损失情况的基础上,提出了一种新的地下水资源管理指标——土水比。

1 地下水环境容量指标

天津地面沉降区地下水环境容量指标包括地下水可开采量和地下水临界水位。

1.1 地下水可开采量

地下水可开采量是指在经济合理、技术可能、整个开采期间不产生严重的水位下降、水质恶化及地面沉降等环境地质问题的条件下,可允许开采的地下水资源量^[4]。对天津市塘沽区 1990~2000 年的累积地面沉降量与累积开采量进行一元相关分析可得出相关方程,根据相关方程可计算出不同沉降速率条件下的可开采量,见表 1。

表 1 塘沽区不同地面沉降速率下的地下水可开采量^[4]

沉降速率/ (mm·a ⁻¹)	10	15	20	25	30
可开采量/万 m ³	854	1282	1709	2137	2565

一般的,以 15 mm/a 地面沉降速率条件下的开采量计算值作为可开采量。

1.2 地下水临界水位

天津地面沉降区临界水位是指不引起地面沉降或不引起明显地面沉降的地下水位值^[5]。临界水位仅存在于超固结地层中,当前的附加应力大于前期固结压力时所对应的静水水位值即为临界水位值。参照天津市西青分层标工程地质孔内不同深度土体的前期固结压力,比较当前附加应力与前期固结压力的大小,可得出西青区各含水组的临界水位,天津市其他区县临界水位与西青区相近,临界水位埋深值一般为 35~60 m,见表 2。

表 2 西青区和中心市区临界水位埋深值^[5] m

含水层	II	III	IV	V
西青区	40~50	50~60	40~50	40
中心市区	30~40	50~60	40~50	45~55

1.3 地下水环境容量指标存在的问题

地下水环境容量指标在天津沉降区地下水资源管理应用中存在一些问题,主要原因在于其理论基础的局限性以及沉降区域地下水资源管理的特殊性^[6]。

从理论上讲,上述地下水环境容量指标沿袭了以行政区域和含水层为评价单元的思维模式,未体现地下水系统的整体性,其中,可开采量未考虑各行政单元间地下水资源的相互袭夺,地下水临界水位的定义也忽略了各含水组之间存在的水力联系。此外,

可开采量和临界水位计算所要求的水文地质参数较多,而实测参数少,地表水与地下水转化问题的复杂性也将导致不同部门提交的结果不尽相同,并且指标值的确定依赖于若干年才开展一次的地下水资源评价工作,各地区难以获取逐年的参考指标值。因此,计算所得的地下水环境容量指标值存在较大误差,允许开采量和临界地下水水位只是一种基准量和静态量,不宜作为地下水资源动态管理的基本依据^[6]。

在地下水开采对地面沉降敏感性强的天津地区,仅将可开采量和临界水位作为地下水开采的限定性指标,成效不足。原因在于,可开采量和临界水位为区域性参数,均难以指示局部沉降演化特征,即便区域开采量低于可开采量、区域水位高于临界水位,但局部集中开采也极易造成局部地面沉降,沉降灾害仍然存在。例如,中心市区允许开采量为 1000 万 m³/a 左右,1998 年以来年开采量均低于允许开采量,并且逐年减少至 2006 年的 400 余万 m³,各含水组地下水位埋深保持在 40 m 以内,均高于临界水位,然而,近些年来年沉降速率仍为 15~25 mm/d^[6]。

2 土水比指标

2.1 土水比的定义

土水比是指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,可以表征地下水开采引发地面沉降的难易程度^[7],其计算公式为

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

式中: P 为土水比; E 为土体损失量; Q 为相应时段的地下水开采量。如果存在地下水回灌, Q 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黏性地层结构难以完全回灌,故 $Q \geq 0$ ^[7]。

从理论上讲, P 计算区域的水文地质条件必须相对独立,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。地下水开采量为 0 时,不会发生由地下水开采所引起地面沉降。如果单元内地下水开采引起了地面沉降而没有地下水补给,则地下水开采量几乎等于土方损失量, $P \approx 1$;有部分地下水补给, $P = 0 \sim 1$;有充分的地下水补给,则 $P \approx 0$ ^[7]。

由于地下水开采程度较高的平原区内含水组分布广泛,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,尤其是地下水位,进而影响区内地

面沉降的发展。计算该类地区的土水比时,可增加区外对区内的沉降影响项,即

$$P = \frac{E}{Q} + F \quad (2)$$

式中: P 为人为划定的研究区的土水比; F 为研究区外地下水开采对区内地面沉降的影响项。 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。研究区大小的确定,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,区内土水比 P 可能大于 $1^{[7]}$ 。

2.2 土水比的计算

2.2.1 E 的计算

E 为沉降损失的地面高程与沉降区面积的乘积,是各个沉降压缩层土体损失量 E_i 之和 $^{[7]}$,即

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = M \sum_{i=1}^n S_i = MS \quad (3)$$

式中: E_i 为第 i 压缩层土体损失量; S 为地表监测的沉降量; S_i 为第 i 压缩层的沉降量; M 为计算单元的面积。

由式(3)可知,土体损失量的计算精度与地面沉降监测数据的精度密切相关。目前,天津地面沉降监测主要以地表一、二等水准监测为主,辅以GPS和InSAR等空间技术,同时通过10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。

2.2.2 Q 的计算

Q 的计算可采用水量均衡法 $^{[7]}$:

$$Q = Q_{补} - Q_{排} - \Delta Q_{储} = Q_{补} - Q_{排} - \mu M \Delta H \quad (4)$$

式中: $Q_{补}$ 为地下水补给资源量; $Q_{排}$ 为地下水天然排泄量; $\Delta Q_{储}$ 为地下水储存资源变化量; μ 为计算区内含水介质给水度; ΔH 为计算时段内的平均水位变动值。

天津地区地下水补给主要来源于大气降水、侧向径流补给、黏性土释水和含水介质弹性释水等,地下水天然排泄主要为侧向径流流出量。上述各补给或排泄项计算均需要详尽的水文地质参数,实际一般采用区(县)、镇、村各级水利部门提供的地下水开采量数据来统计沉降区的地下水开采量。

2.3 土水比指标的应用

由土水比的定义可知,土水比值的计算精度与沉降监测和地下水开采量的精度关系密切。天津地面沉降区实现了逐年一、二等水准监测 $^{[2]}$,地下水开采量统计大多采用各级水利部门提供的地下水开采量数据,故土水比值的计算可以自行选定空间和时间尺度,并能够得到较为可信的结果。这样的计算

结果能反映地下水开采对地面沉降的影响。因此,在地下水资源管理中,可先根据土水比指标确定沉降区内各局部地下水开采引起地面沉降的难易性,再结合地下水资源保障情况来制定具体的地下水开发利用策略。

综上所述,土水比指标可以克服可开采量和临界水位指标在理论和实际应用中存在的误差大、不具备动态性等缺陷。

2.3.1 在沉降易发区确定中的应用

如图1和表3所示,天津南部沉降区内各区、县2004~2006年的土水比值不尽相同,西青区和静海区明显处于土水比高值区。对比2006年沉降区内的地面沉降分布(图2)可以发现,土水比值分布特征和地面沉降空间发展情况基本相近,局部存在一定的差异。例如:津南区和东丽区处于开采强度最大的地面沉降区,而其土水比为全市中等水平;汉沽区沉降形势严峻,但土水比值仅20%左右。这种差异表明,不同区域相同地下水开采强度所引起的地面沉降程度不相一致。总体上,根据土水比值和地面沉降速率的空间分布特征,可以规定:土水比值小

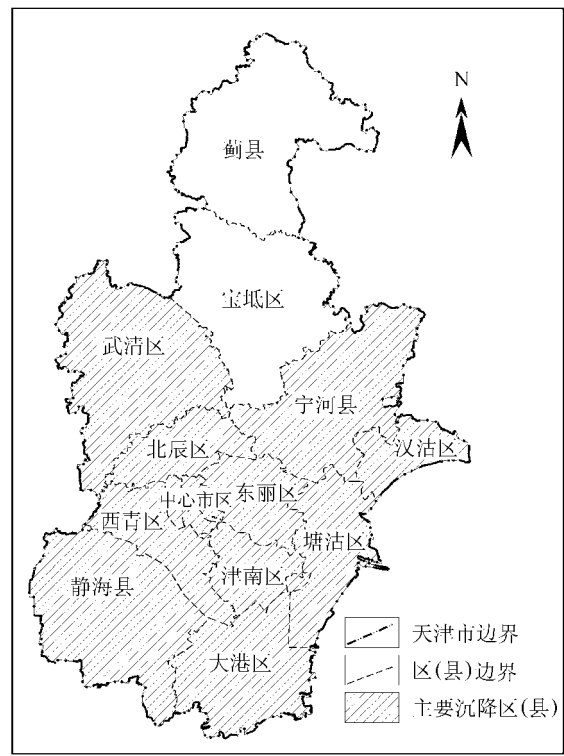


图1 天津南部主要沉降区(县)分布

表3 主要沉降区(县)2004~2006年土水比

区(县)	土水比/%			区(县)	土水比/%		
	2004年	2005年	2006年		2004年	2005年	2006年
武清区	15.5	22.0	24.8	西青区	80.9	114.2	120.5
汉沽区	21.5	19.5	29.5	塘沽区	61.9	71.5	70.1
北辰区	66.0	73.9	80.6	大港区	48.5	36.9	74.1
东丽区	64.2	68.2	78.0	静海区	114.8	148.7	148.6
津南区	62.4	56.8	77.1				

于 20% 的区域属于一般沉降区 ; 土水比值在 20% ~ 50% 之间的区域属于沉降较易发区 ; 土水比值在 50% ~ 100% 之间的区域属于沉降易发区 ; 土水比值大于 100% 的区域属于沉降极易发区。

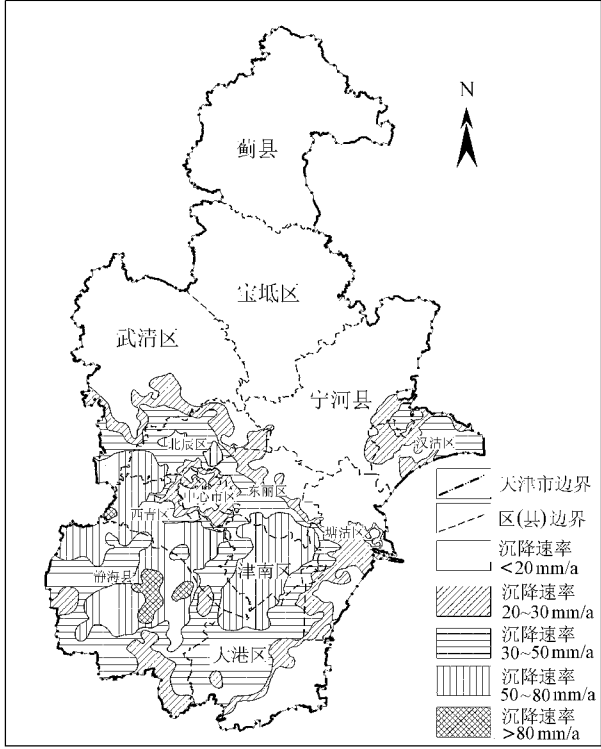
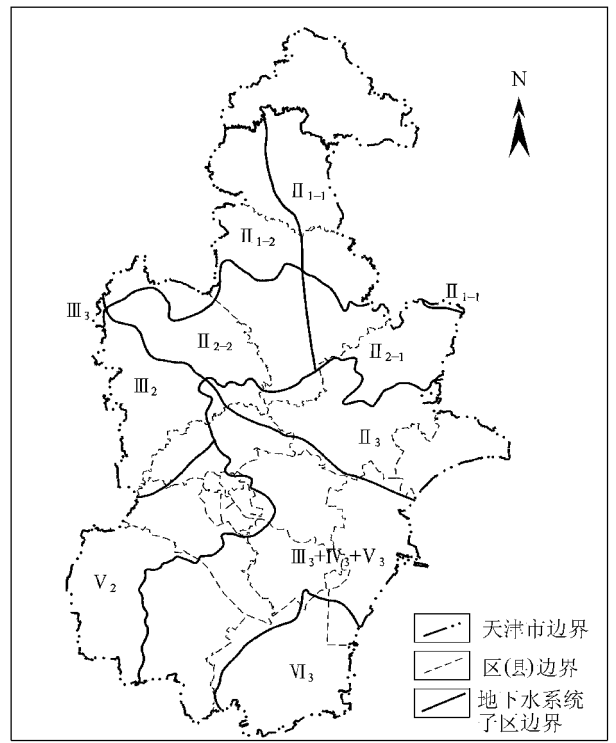


图 2 天津南部各区(县) 2006 年地面沉降速率^[7]

2.3.2 在地下水资源保障率确定中的应用

在进行不同易发程度沉降区的地下水资源管理时,还必须考虑地下水资源的保障率,才能确定合理的地下水开采量,保证地下水储存资源的不消耗。

天津地下水流动系统可分为多个地下水子系统^[8](图 3),各个地下水子系统深层地下水补给包括浅层越流补给、侧向流入量、弹性释水量和土体压



II₁₋₁—蓟运河冲洪积扇地下水系统小区; II₁₋₂—潮白河冲洪积扇地下水系统小区; II₂₋₁—蓟运河古河道带地下水系统小区; II₂₋₂—潮白河古河道带地下水系统小区; II₃—潮白河运河冲海积地下水系统小区; III₂—永定河古河道带地下水系统小区; III₃—永定河冲洪积扇地下水系统小区; III₃+IV₃+V₃—海河干流冲海积地下水系统小区; V₂—子牙河古河道带地下水系统小区; VI₃—彰卫河冲海积地下水系统小区

图 3 天津各水文地质子区分布

缩引起的黏性土释水量,而地下水资源保障率的大小主要取决于侧向流入量和弹性释水量。天津 2004 ~ 2006 年各个地下水子系统侧向流入量和弹性释水量在地下水开采量中所占比例计算结果如表 4 所示。结合 2004 ~ 2006 年的土水比值,可以发现:各个地下水子系统的侧向流入量为开采量的 15%

表 4 天津部分水文地质子区地下水补给量、开采量及土水比^[7-8]

水文地质子区	W/%			S'/%		
	2004 年	2005 年	2006 年	2004 年	2005 年	2006 年
II ₃	多年平均值为 28.2			多年平均值为 33.2		
III ₃						
III ₂	24.0	15.6	18.3	41.8	27.3	31.9
V ₂	19.1	19.3	21.1	30.7	31.0	33.9
III ₃ +IV ₃ +V ₃	15.8	15.9	16.8	20.1	20.3	21.4
VI ₃	25.5	23.6	24.2	27.8	25.9	26.6
水文地质子区	P/%			K/%		
	2004 年	2005 年	2006 年	2004 年	2005 年	2006 年
II ₃	26.4	20.5	27.5	26.4	23.4	24.7
III ₃	1.8	1.1	11.4	1.8	1.4	4.0
III ₂	61.2	48.8	61.8	61.2	53.7	56.4
V ₂	90.5	102.1	117.7	90.5	96.3	103.0
III ₃ +IV ₃ +V ₃	88.9	91.3	113.9	88.9	90.1	97.7
VI ₃	43.2	34.8	58.2	43.2	38.8	45.3

注:W 为侧向流入量/开采量;S' 为(侧向流入量+弹性释水量)/开采量;K 为累积土体损失量/累积开采量。

~20% ,侧向流入量和弹性释水量之和也仅占地下水开采量的30%左右 ;Ⅱ₃和Ⅵ₃子系统土水比值接近区内侧向流入量和弹性释水量之和所占开采量的比例 ,这2个子系统的沉降速率也明显小于其他地区 ;Ⅲ₂、Ⅴ₂和Ⅲ₃+Ⅳ₃+Ⅴ₃子系统内 ,开采量中除去侧向流入和含水介质弹性释水部分外 ,仍有30%~70%来源于黏性土压缩及其他方面。上述现象表明 :当土水比值较小时 ,侧向流入量和弹性释水量不小于土方损失量 ,地下水系统本身的补给保障程度高 ,人为开采地下水所引起的地面沉降速率小 ;当土水比值大时 ,地下水开采量大部分来源于土体的压缩释水 ,含水系统本身的水资源保障程度低。北辰区至东丽区一线以北地区 ,各个地下水子系统 $P \leq 20\%$,即开采 5m^3 的地下水 ,产生 1m^3 的沉降土体损失 ,其余 4m^3 地下水来自于外部的补给 ,说明有充沛的补给条件 ,彰卫河冲海积子系统和永定河古河道子系统 $P \leq 50\%$,即在等量置换出 1m^3 水之外 ,只能从含水层中获得另外 1m^3 的地下水 ,说明侧向补给很有限 ;北辰区至东丽区一线以南地区 ,包括北辰区和东丽区 , P 接近 100% ,即从地下开采出来的水 ,基本上完全由地层压缩置换而来 ,地下水资源保障率极低 ,这发出了地下水资源枯竭的警示信号^[7]。由此 ,可利用 P 来建立天津沉降区地下水资源保障率评价指标体系 ,如表5所示。

表5 天津沉降区地下水资源保障率评价指标体系

$P/\%$	地下水资源保障率
≥ 100	极低
$50 \sim 100$	低
$20 \sim 50$	中等
< 20	高

3 以土水比为控制指标的地下水资源开发

通过对多年地下水累积开采量和土水比累积值的回归分析 ,可以计算出一定土水比目标水平下的地下水合理开采量。

天津某区 1996~2006 年累积开采量和累积土水比值的相关分析结果如图4所示 ,其相关系数 r 可达 0.995 ,超过临界相关系数。如果限定 2007 年

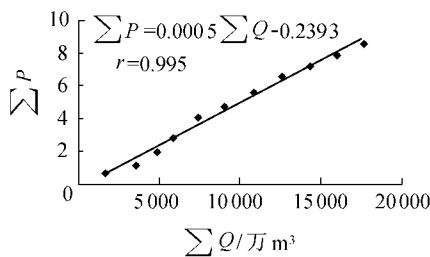


图4 天津某区累积开采量与土水比的相关分析结果

土水比为 20% ,则 2007 年的开采量应控制在 $490\text{万}\text{m}^3$ 以内^[6]。

4 结论

a. 防治天津地面沉降的主要手段是加强沉降区地下水开采量的管理。以往的地下水开采 ,大多依据地下水可开采量和临界水位等环境容量指标来进行调控 ,而理论和实践证明 ,在天津这种地面沉降对地下水开采强度极其敏感的地区 ,仅依据可开采量和临界水位则不能有效地进行地下水资源动态管理。

b. 通过地面沉降监测值和地下水开采量数据 ,可以计算出沉降区内各局部地区的土水比。将土水比作为沉降区地下水资源管理的指标 ,就可以确定出不同级别的沉降易发区域以及地下水资源的保障程度 ,了解开采条件下地下水资源的补给能力 ,从而可保证地下水开采不消耗地下水储存资源 ,有效监控和防治地面沉降。

参考文献 :

- [1]王大纯 ,张人权 ,史毅虹 ,等 .水文地质学基础 [M].北京 :地质出版社 ,1994 24-25.
- [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(S):1-3.
- [3]张瑞 ,吴林高 .地下水资源评价与管理 [M].上海 :同济大学出版社 ,1997 249-250.
- [4]王亚斌 ,崔小东 ,庞玉奎 ,等 .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 ,1997.
- [5]吴铁均 ,崔小东 ,牛俊修 .天津市地面沉降研究和综合治理 [J].水文地质工程地质 ,1998 25(5):17-20.
- [6]董克刚 ,王威 ,于强 ,等 .海河流域沉降区地下水资源承载力评价指标体系 [J].地下水 2008 30(4):12-15.
- [7]董克刚 ,王威 ,于强 ,等 .天津地面沉降区土水比论述 [J].水文地质工程地质 2008 35(5):76-80.
- [8]王家兵 .控制地面沉降条件下天津深层地下水资源可持续利用研究 [D].北京 :中国地质大学 2006.

(收稿日期 2008-01-24 编辑 陈吉平)

