

地下水超采的经济损失计算方法及其在典型地区的应用

李晓凯¹, 石海峰²

(1. 世界银行驻中国代表处, 北京 100027; 2. 水利部水利水电规划设计总局, 北京 100011)

摘要:在分析我国地下水超采灾害、人口分布和社会经济发展情况的基础上, 将地下水超采区划分为轻微灾害区、一般灾害区、经济不发达的严重灾害区和经济发达的严重灾害区四类, 根据各类型区的实际统计资料, 采用回归分析方法, 建立各类型区的地下水超采经济评估模型, 应用该模型分析天津市控制超采地下水的经济效益及利用南水北调工程供水作为替代水源的经济可行性。

关键词:地下水; 超采; 直接经济损失

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)06-0013-04

地下水管理作为水资源统一管理的重要组成部分日益受到各级政府和组织的重视。目前地下水管理中突出的问题是如何控制地下水超采和减轻地下水超采产生的不利影响。随着工农业发展和人民生活水平的提高, 需水量不断增加, 地下水开发利用也随之增加。特别是在干旱、半干旱地区, 地下水开采量很大, 许多地区的地下水开采量占总用水量的一半以上。1997 年全国拥有机井 343 万眼, 地下水实际开采量 968.78 亿 m^3 , 占全国当年实际供水量的 17.4%, 其中深层地下水 213 亿 m^3 , 地下水的平均开发利用程度达到 48.6%。据统计, 目前全国地下水超采区共有 164 片, 超采区总面积 18.13 万 km^2 , 其中严重超采区面积 7.76 万 km^2 , 多年平均超采地下水 71.36 亿 m^3 。从行政分区看, 全国有 24 个省(自治区、直辖市)存在地下水超采问题, 河北、甘肃、河南、山西、山东等省超采情况都比较严重, 超采面积都超过 10 000 km^2 。地下水严重超采造成大量环境地质问题。在以地下水供水为主的城镇及某些井灌区出现大面积的地下水位下降, 地下水枯竭, 全国已经形成了 50 多个漏斗区。地下水的超采引起地面沉降、地裂缝和地面塌陷。地面沉降造成了城市地面积水、房屋与道路开裂、河面上升、桥梁房屋下沉、污水倒灌、机井水泵下卧等危害。另外, 沿海地区的地下水超采使海水入侵, 造成水浇地废弃, 企业产品质量受损, 海港区工厂企业设备损坏严重。因此, 越来越多的人开始从环境的角度研究地下水超采所带来的后果, 近年完成的世界银行援助项目——中国黄淮海地区水行业行动计划研究就是一个比较突出的例子。

目前, 在世界银行的援助下开展了多项与地下

水管理有关的项目。为了更好地说明通过控制地下水超采来改善地下水管理的经济效益, 有必要研究地下水超采造成的经济损失的计算方法, 定量评价控制地下水超采的经济效益。

地下水超采的经济损失(直接损失, 下同)的评估是一项涉及面广、关系十分复杂的系统工作。到目前为止, 对地下水超采所造成的经济损失的评估, 前人所做的工作还不多, 资料也非常有限, 经常引用的数字是有关人士通过分析典型地区的资料后得出的数字。

评估地下水超采经济损失的方法主要分为两类, 一是直接统计方法, 即直接逐次统计和直接统计计算。直接统计方法需要的资料一般比较详细, 研究范围通常较小。如徐中民、程国栋、王根绪^[1]及张志忠、于礼^[2]采用直接统计计算方法评价了张掖地区的生态环境损失和徐州市的超采岩溶水损失; 二是间接方法, 即抽样统计外推法和建立在经济区划基础上的模型法。间接方法要有典型的、有代表性的统计数字, 并须充分掌握宏观上的灾害分布规律, 即灾害的危害程度区划。如中国保险研究所建立的地震损失估算函数^[3]、温善章等的黄河洪水灾害损失计算^[3]、Heinrich 的间接损失计算方法^[3]、Hailong Liu, Jiu Jimmy Jiao^[4]等都采用了间接方法。本文采用的也是一种间接估算方法。

1 地下水超采危害程度区划

评价地下水超采的危害首先需要对其危害程度进行界定。根据地下水超采情况, 可将地下水超采区划分为严重超采区、一般超采区和轻微超采区 3 类。

a. 符合下列条件之一的划为严重超采区:实际开采系数(用 K 表示,即某地域内多年平均实际开采量与该地域的多年平均可开采量的比值)大于 1.2;地下水水位下降速率超过 5.0 m/a;地下水超采引起了地面沉降,沉降速率大于 15 mm/a 或累计沉降量大于 500 mm;地下水超采引起了海水入侵.

b. 符合下列条件之一的划为一般超采区:实际开采系数大于 0.8,小于 1.2;地下水水位下降速率大于 1.0 m/a,小于 5.0 m/a;地下水超采引起地面沉降,沉降速率大于 5 mm/a,小于 15 mm/a.

c. 其他的地下水超采区划为轻微超采区.根据人口密度,将研究区域划分为人口稠密区(人口密度大于 700 人/km²)、人口适中区(人口密度大于 500 人/km²,但小于或等于 700 人/km²)和人口较少区(人口密度小于或等于 500 人/km²).另外,根据经济发达程度,划分为经济发达区(地均 GDP 大于 1500 万元/km²)、经济中等发达区(地均 GDP 大于 800 万元/km²,但小于或等于 1500 万元/km²)和经济不发达区(地均 GDP 小于或等于 800 万元/km²).

按上述指标和等级,可以组合出 27 类地区.通过对全国不同地区的地下水超采经济损失统计资料的分析,选择了 96 组可靠性较高的统计资料,并分别确定其超采程度、人口分区和经济分区.根据统计数据实际出现的几率,在组合的 27 类地区中,仅有 16 类地区有统计资料,且只有 3 类地区的统计资料出现的几率大于 10%.因此,根据资料的实际情况,进一步将地下水超采区划分为 4 种综合类型,即轻微灾害区、一般灾害区、经济不发达的严重灾害区和经济发达的严重灾害区,见表 1.

2 地下水超采经济评估模型

影响地下水超采的经济损失的因素有很多.通过分析每一个影响因素,详细地评估地下水超采的经济损失是一项非常复杂的系统工作.由于时间和能够收集到的统计资料等的限制,本文中仅以灾害程度、经济发展水平和人口密度为参数,按照灾害程度区划,分区研究地下水超采的经济损失,模型的基本形式如下:

$$M = f(E_p, N) \times A \quad (1)$$

式中: M 为计算区域的地下水超采的经济损失,万元; f 为单位面积的经济损失函数; E_p 为计算经济损失的复合参数; N 为分区系数; A 为计算面积, km².其中, N 根据表 1 的分类标准确定.

复合参数 E_p 可以根据下式计算:

$$E_p = \frac{2}{3} G_{\text{GDP}} + \frac{1}{3} P_{\text{人口}} \quad (2)$$

表 1 地下水超采灾害分区

类型区	地点	灾害类型	地均损失 ^①	地均 GDP ^②	人口密度 ^②	分类		
						GDP	人口	灾害
轻微灾害区	福建永定坎市镇	地面塌陷	2.3	81	190	1	1	1
	福建武平十方镇	地面塌陷	1.7	42	126	1	1	1
	贵州坪坝县	地裂缝	0.83	63	303	1	1	1
	江西吉安安塘	地面塌陷	0.76	59	122	1	1	1
	江西瑞金沙洲坝	地面塌陷	0.78	58	232	1	1	1
一般灾害区	河北池城	地面塌陷	1.2	14	51	1	1	2
	广西玉林柴油机厂	地面塌陷	4.67	185	623	1	2	2
	河北徐水	地面塌陷	3.8	377	732	1	2	2
	河南濮阳胡伏乡	地裂缝	3.2	181	718	1	2	2
	湖北省盐矿	地面沉降	5	476	594	1	2	2
	山东临邑临盘镇	地裂缝	3.4	251	495	2	2	2
	浙江嘉兴	地面沉降	11.2	826	774	2	3	2
经济不发达的严重灾害区	安徽铜陵	地面塌陷	9.8	1346	1332	3	3	2
	河南桐柏县牛镇卫山村	地面塌陷	2.4	89	219	1	1	3
	江苏大丰	地面沉降	3.4	205	252	1	1	3
	江苏大丰	地面沉降	3.6	216	254	1	1	3
	广西海角街	海水入侵	6.1	548	503	1	2	3
	广西侨港镇	海水入侵	6.4	548	503	1	2	3
	安徽阜阳	地面沉降	5.28	324	945	1	3	3
经济发达的严重灾害区	浙江宁波	地面沉降	17.8	2780	1113	3	3	3
	河北沧州	地面沉降	11.2	2621	2312	3	3	3
	江苏徐州	地面沉降	17.2	4816	2667	3	3	3
	江苏无锡	地面沉降	17.5	5717	2068	3	3	3
	江苏常州	地面沉降	16.1	4707	2967	3	3	3
	江苏苏州	地面沉降	19.2	6310	2640	3	3	3
	浙江宁波	地面沉降	15	2509	1091	3	3	3
	浙江宁波	地面沉降	15.6	2641	1102	3	3	3

注:资料来源于文献[5~9].①单位为万元/km²;②单位为人/km².式中: G_{GDP} 为地均 GDP, 万元/km²; $P_{\text{人口}}$ 为人口密度, 人/km².

根据《2000 年中国县(市)社会经济统计年鉴》,计算出以县为单位的地均 GDP 和人口密度,按照各灾害统计数据的发生地点,计算出相应的 E_p .将不同分区的 E_p 和单位面积地下水超采的经济损失通过线性回归方法建立相关关系,可以得出如图 1 所示的相关关系.

由此,可以得出地下水超采经济损失评估模型的计算方程:

$$M = \left\{ \begin{array}{l} 0.0067 E_p + 0.5 \\ (30 \leq E_p \leq 180, \text{适用于轻微灾害区}) \\ 0.0075 E_p + 1.13196 \\ (200 \leq E_p \leq 1400, \text{适用于一般灾害区}) \\ 0.008 E_p + 1.5168 \\ (100 \leq E_p \leq 600, \text{适用于经济不发达的严重灾害区}) \\ 0.0011 E_p + 12.434 \\ (1000 \leq E_p \leq 6000, \text{适用于经济发达的严重灾害区}) \end{array} \right\} \times A \quad (3)$$

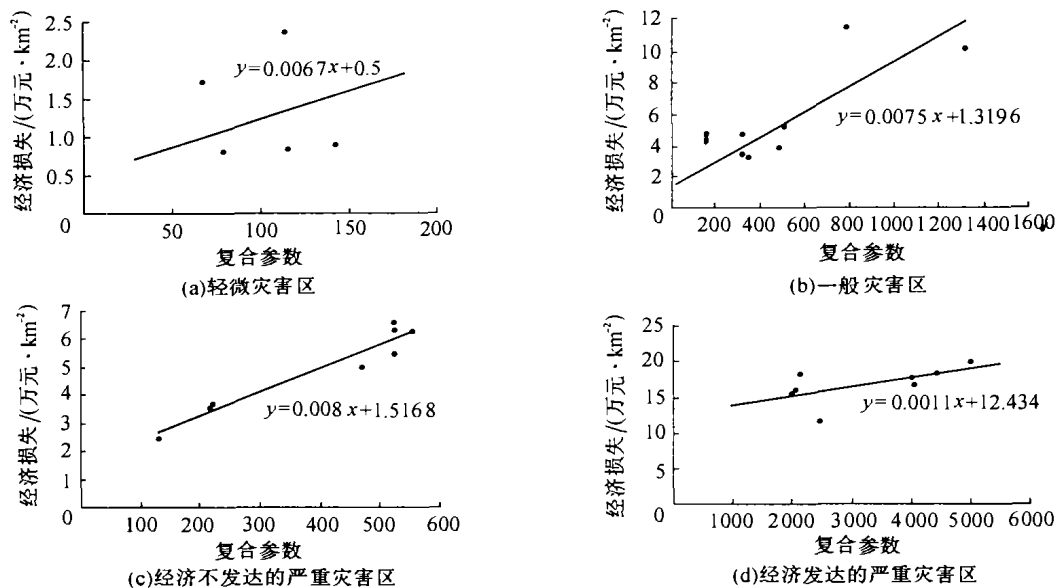


图1 单位面积地下水超采经济损失与影响因素的相关关系

其中,复合参数 E_p 可由式(2)求得.

为了验证模型的合理性,笔者比较了不同地区地下水超采经济损失的实际统计数据与模型计算成果.

实例1.上海市地面沉降是1921年近代工业形成以后开始出现的,至1949年前夕,市区平均沉降量已有0.639 m.1949年后,逐步建立了全市统一高程控制网,定期与余山国家水准基点进行联测,比较全面准确地掌握了上海地面高程的变化,得出了地面沉降的主要原因是大量开采地下水.据统计,1997年上海市监测的350 km²范围内,经济损失约为7000万元.地均GDP和人口密度分别为8257万元/km²和3229人/km².由式(3)计算得出,年平均经济损失约为6895万元,两者十分吻合.

实例2.西安市由于水资源先天不足,近年来城市用水一直紧张.人们大量使用地下水,由于部分地区地下水严重超采,一系列环境地质问题也随之而来.有的地区地下水漏斗面积达40~50 km²,并且还在不断扩大.到1985年底,市区沉降量大于100 mm的面积已达200 km²,最大累计沉降量达到1800多mm.西安现有13条东西走向的地裂缝,裂缝总长度超过50多km,其展布范围超过150 km².地裂缝和地面沉降区内的道路和建筑物部分受到破坏,供排水管出现断裂.象征西安古代文明的钟楼也因此下沉了395 mm,而唐代的大雁塔竟向西北倾斜了1100多mm^[10].王景明、王春梅、刘科等^[11]计算了1959~1998年地面沉降和地裂缝的经济损失为16.71亿元(年均损失5万元),见表2.

根据统计资料计算,西安地下水超采灾害区面积约为290 km²,地均GDP和人口密度分别为1928万元/km²和1832人/km².由式(3)计算得出,

表2 西安地面沉降和地裂缝经济损失统计 万元

建筑物破坏	降低土地使用价值	停工误工损失	其他损失	总损失
73 000	14 090	35 000	45 000	167 090

年平均经济损失约为4210万元.

实例3.天津市地下水超采的主要灾害是地面沉降.天津的地面高程较低,市区、塘沽、汉沽和大港的地面高程一般在3~5 m.由于不合理开采地下水,造成并加速了地面沉降.从1959年到1990年,天津除北部蓟县山区外,广大平原地区均有不同程度的沉降,沉降量超过100 mm的范围达1万 km².据统计,1997年天津市外环线内334 km²范围内,平均沉降值超过15 mm,经济损失约为4600万元.经计算,天津市地均GDP和人口密度分别为2193万元/km²和1349人/km².由式(3)计算得出,年平均经济损失约为4855万元.

实例4.大连市从20世纪70年代开始,以超过可开采量1~2倍的速度开采地下水,引起海水入侵.1970年大连市海水入侵面积仅为4.2 km²,到1992年底,沿海地区25处发生了海水入侵,总面积超过400 km²,其中金州区的面积最大.大面积海水倒灌使这座著名的开放城市正面临地下水咸化的困境.一些地方的地下水已不能饮用;由于金属设备受海水侵蚀和农田逐渐盐碱化,许多工业和农业用水井不得不停止使用甚至报废.据不完全统计,至1993年海水入侵的经济损失累计达1亿元,经综合有关资料分析,1993年大连市海水入侵的年平均损失约为5200万元.经计算,大连市的地均GDP和人口密度分别为1977万元/km²和1023人/km².由式(3)计算得出,年平均经济损失约为5704万元.

由以上计算结果可以看出,计算值与实际统计值比较接近,其中,计算海水入侵的经济损失差值最大,计算值与实际统计值相差 9.6%,表明模型计算结果具有一定的可靠性。

3 天津控制地下水超采的效益分析

控制地下水超采可以遏制水环境恶化,实现水资源和生态系统的良性循环,以水资源的可持续利用支撑经济社会的可持续发展.但在像华北这样的资源型缺水地区,要真正控制地下水超采,在加强需求和开采管理、建立节水型社会基础上,还需要积极寻找替代水源,使正常的生产和生活用水得到保障,才能控制地下水超采.控制地下水超采的效益主要表现为减少因超采地下水带来的损失,包括直接损失和间接损失.以下以天津市为例,对控制地下水超采的效益和经济可行性进行了初步分析。

根据天津市年平均地面沉降量、地下水年平均开采强度与平均水位的统计资料(见表 3^[3]),可以建立地下水年平均开采强度和年平均地面沉降量的关系,如图 2 所示。

表 3 天津市年平均地面沉降量、地下水年平均开采强度与平均水位统计

年份	平均地面沉降量 /mm	地下水年平均开采强度 /(m ³ ·km ⁻²)	平均水位 /m
1985	87.0	265 100	67.60
1986	66.3	253 800	68.46
1987	43.0	211 900	65.12
1988	21.4	170 500	61.47
1989	14.6	130 600	57.19
1990	10.5	120 600	54.06

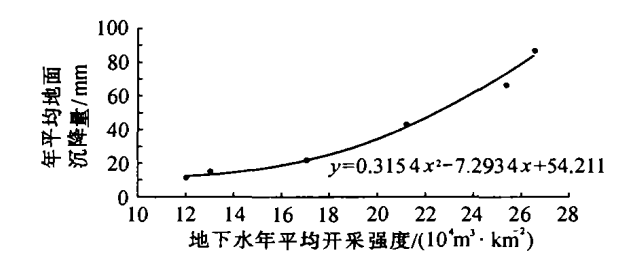


图 2 天津市年平均地面沉降量与地下水年平均开采强度相关关系

1995 ~ 1998 年天津年平均超采地下水 2.5 亿 m³,按表 3 和图 2 所建立的关系式计算,目前市区、近郊区、塘沽区、汉沽区、大港区、海河下游工业区和官港地区监测的 1 635 km² 范围年平均沉降 16 mm.根据天津市城市水资源规划,天津市将采取措施逐步控制地下水超采,到 2005 年将减少超采地下水 0.85 亿 m³,到 2010 年再减少超采地下水 0.88 亿 m³,到 2015 年再减少 0.79 亿 m³,最终实现地下水采补平衡.按所建立的地下水开采强度和平

均地面沉降量的关系计算,到 2005 年平均沉降量大于 15 mm 的面积将减小到 1 130 km²,到 2010 年平均沉降量大于 15 mm 的面积将减少到 527 km²,到 2015 年,将全面消除大于 15 mm 的沉降面积。

按 2000 年底的价格水平,根据式(3)计算,通过逐步控制地下水超采,年平均可减少经济损失 2.52 亿元.根据国内外对灾害损失评估的经验^[12],按 Heinrich 的方法进行计算,灾害所致的间接损失一般是直接损失的 2 ~ 5 倍.偏于保守估计,年平均减少总经济损失(直接和间接)7.56 亿元,即每减少超采 1 m³ 地下水,可减少经济损失约 3 元。

目前天津市的当地水资源开发利用程度已经接近极限,达到 95% 以上.很难通过建设新的水资源工程来进一步提高当地水资源的供水量.通过节水和加大污水处理力度等措施,虽可以减少部分用水和增加再生水,但仍难以满足生产和生活的正常用水.因此,只有通过跨流域调水解决.根据有关分析^①,南水北调至天津的供水成本约 1.2 元/m³,与控制地下水超采减少的损失相比,在经济上是可行的。

4 结 语

定量评价地下水超采经济损失,可以更加直观地反映地下水超采的灾害损失程度,有助于社会各方面积极参与控制超采地下水.本研究通过灾害分区和实际统计回归分析的方法,建立了不同分区社会经济复合参数与地下水超采经济损失的定量关系.经过与实际资料对比验证,说明该计算方法具有一定的精度和可靠性.地下水超采经济损失评估是一项十分复杂的工作,影响因素很多,但由于资料和时间限制,本次研究没有能够充分反映各种因素的影响,方法还有待于进一步改进和完善。

参考文献:

[1] 徐中民,程国栋,王根绪.生态环境损失价值计算初步研究——以张掖地区为例[J].地球科学进展,1999(5):498 ~ 504.
[2] 张志忠,于礼.徐州市岩溶水的开发及环境地质问题[J].工程勘察,1999(6):28 ~ 31.
[3] 范宝俊.灾害管理文库[M].北京:当代中国出版社,1999.
[4] Hailong Liu, Jiu Jimmy Jiao. Tidal groundwater level fluctuations in L-shaped leaky coastal aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 2002,268:234 ~ 243.
[5] 国家科委全国重大自然灾害综合研究组.中国重大自然灾害及减灾对策(年表)[M].北京:海洋出版社,1995.

①水利部.南水北调工程总体规划,2002. (下转第 20 页)

• 16 •

由表4可以看出,当 $\gamma_d = 1.45$ 时,按式(8)设计的构件可靠指标比原规范校准的可靠指标略高一些.当 $\gamma_d = 1.40$ 时,按式(8)设计的构件可靠指标比原规范校准的可靠指标略低,但总体变化不大.考虑到目前各规范可靠指标应适当提高的建议^[7],本文将 γ_d 暂定为1.45.

4.2 用钢量的比较

为了保证修订规范的连续性,按式(8)设计时的用钢量 A_2 应与按现行闸门设计规范设计时的用钢量 A_1 相当或差别不大,根据文献[2]的计算方法可得两者的用钢量之比.

静水压力作用时:

$$Q235, \gamma_d = 1.40 \text{ 时: } A_2/A_1 = 0.974$$

$$Q235, \gamma_d = 1.45 \text{ 时: } A_2/A_1 = 1.009$$

$$Q345, \gamma_d = 1.40 \text{ 时: } A_2/A_1 = 0.961$$

$$Q345, \gamma_d = 1.45 \text{ 时: } A_2/A_1 = 0.996$$

由上述结果可以看出,当 $\gamma_d = 1.40$ 时,按式(8)设计的用钢量与按原规范设计的用钢量相比差值为 -2.6% (Q235), -3.9% (Q345).当 $\gamma_d = 1.45$ 时,用钢量之比差值为 -0.4% (Q235), 0.9% (Q345).图3给出了在 Z_s 和 Q 组合下的两者用钢量之比.

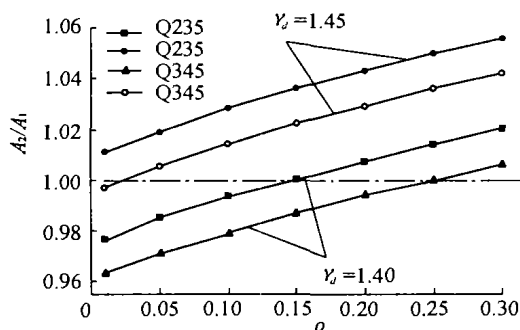


图3 Z_s 和 Q 组合下构件用钢量的比较

从图3可以看出,当 $\gamma_d = 1.40$, $\rho = 0.01 \sim 0.30$ 时,用钢量之比差值为 $-2.4\% \sim 2.0\%$ (Q235), $-3.7\% \sim 0.6\%$ (Q345).当 $\gamma_d = 1.45$ 时,用钢量之比差值为 $1.1\% \sim 5.6\%$ (Q235), $-0.3\% \sim 4.2\%$ (Q345). $\gamma_d = 1.40$ 时用钢量减少,这将导致可靠指标降低.考虑到可靠指标应适当提高的建议^[7],再结合可靠指标的比较,建议将结构系数最终定为 $\gamma_d = 1.45$.

由上述计算结果可以发现,本文确定的结构系数与文献[4]确定的结构系数相同,说明尽管闸门所受的荷载不同,目标可靠指标不同,但是其结构系数却是相同的.进而可以推论,对于其他类型工作闸门的结构系数也可取为1.45.

5 结 论

a. 相对来说,受剪破坏时的可靠指标较低,这与一般钢结构的分析结果是一致的.虽然在实际闸门结构设计中,剪切往往不起控制作用,但是从所有构件可靠指标应一致来说,今后修订规范时应提高剪切时的可靠指标.

b. 建议以后修订闸门设计规范时可将目标可靠指标确定为:大型工作闸门为4.1(Q235), 4.3(Q345),中型工作闸门为3.4(Q235), 3.6(Q345),小型工作闸门为3.1(Q235), 3.3(Q345).总体来讲,闸门设计规范的可靠指标大于钢结构设计规范的目标可靠指标3.2,其原因是闸门设计规范所采用的安全系数大于原钢结构设计规范的安全系数.

c. 各类闸门分项系数设计表达式中的结构系数可统一取为1.45.

参考文献:

- [1] 周建方,周美英,李典庆.水工钢闸门可靠度校准分析[J].金属结构,2001(3):12~17.
- [2] 周建方,李典庆.水工钢闸门结构系数的确定[J].长江科学院院报,2002,19(5):34~37.
- [3] 许萍,周建康,费勤贵.水闸上游水位变化规律统计分析[J].扬州大学学报,2001,4(3):34~37.
- [4] 周建方.《水利水电工程钢闸门设计规范》可靠度初校[J].水利学报,1995(11):24~30.
- [5] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [6] 周建方,李典庆.用层次分析法对弧形钢闸门主框架可靠性评估[J].水运工程,2002(7):13~16.
- [7] 唐美树.关于结构安全度与耐久性的思考和意见[J].建筑结构,2000,30(12):58~59.

(收稿日期:2003-05-22 编辑:傅伟群)

(上接第16页)

- [6] 地质矿产部,国土资源部.全国地质灾害情况通报[R].1995~1999.
- [7] 段永侯.中国地质灾害[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [8] 国土资源部.我国主要城市和地区地下水水情通报[R].1997~2000.
- [9] 高建国.中国减灾史话[M].北京:大众出版社,1999.
- [10] 王园,王沁,何蕴龙,等.西安地裂灾害问题数据本构分析[J].西安工程学院学报,1998,20(1):41~45.
- [11] 王景明,王春梅,刘科.地裂缝及其灾害研究的新进展[J].地球科学进展,2001,16(3):303~313.
- [12] 任鲁川.区域自然灾害风险分析研究进展[J].地球科学进展,1999,14(3):243~246.

(收稿日期:2003-04-28 编辑:傅伟群)