

地下水封石洞油库对地下水的影响数值模拟分析

刘青勇¹, 万 力², 张保祥¹, 曹国亮², 张 欣¹

(山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 中国地质大学, 北京 100083)

摘要 根据钻孔提水试验数据求出影响半径和渗透系数,按照地下水动力学方法求出了洞库涌水量,采用三维地下水数值模拟模型 MODFLOW 对山东某地地下水封石洞油库涌水对地下水位的下降影响规律和地下水漏斗进行了数值模拟和预测,分析石洞油库涌水对区域地下水的影响。分析结果表明:洞库涌水量较小,在施工 3 a 期间涌水主要来自岩石的弹性释水,对地下水位基本无影响,不考虑储油的情况下,模拟洞库运行 50 a,地下水位在垂向随时间线性下降,平面上影响范围不大。

关键词 地下水封石洞油库;地下水;数值模拟;山东省

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2009)02-0061-05

Numerical simulation analysis on influence of water-sealed underground oil storage in rock caverns on groundwater/LIU Qing-Yong¹, WAN li², ZhANG Bao-Xiang¹, CAO Guo-Liang², ZhANG Xin¹(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The influence radius and the permeability coefficient of rock caverns are obtained according to drilling water lifting test. The cave water inflow is obtained according to groundwater dynamics. The influence of water-sealed underground oil storage in rock caverns on the groundwater and groundwater funnel in Shandong province are simulated and predicted using MODFLOW. The influence of rock cavern water inflow on regional groundwater is analyzed. The results show that the cave water inflow is relatively smaller, originates from the elastically released water of rocks over a three-year period of construction, and has little influence on the groundwater level. Without consideration of the oil storage, the groundwater level was observed to decline vertically at a rate that was linear with time over 50 years of simulation, with little horizontal influence.

Key words: water-sealed underground oil storage in rock cavern; groundwater; numerical simulation; Shandong Province

石油是重要的战略物资和化工原料,同时又是目前应用最广泛,运输、储存最方便的一种能源,素有“工业血脉”之称。在我国尽快建立石油战略储备,可确保石油供应安全。因此,建立国家石油储备,提供稳定安全的能源供应对经济的健康发展是必要的和迫切的。目前世界上主要有地面钢罐油库、地下水封石洞油库和地下盐穴油库等几种储存石油的方式。地下水封石洞油库是利用地下水的天然埋藏条件进行人工开挖的储油石洞,是洞库周围岩体和储存于其中的裂隙水共同组成的储油容器^[1-2]。地下水封石洞油库作为储存石油的一种方式,在技术上已经很成熟,在国外投入生产使用的较多,最早的技术出现在瑞典。目前世界上有很多的地下水封石洞油库在运行,如韩国已建的容积为 1830 万 m³的地下水封石洞油库^[2-4]。山东省是中国石油高消费和石油消费高增长的主要地区之一,

该地区原油加工,特别是进口原油加工相对集中,石油安全问题较为突出。经地质勘察,位于该区的某库址区工程地质条件较好,建设地下水封洞库具有效益好、安全性好、投资省、污染小、使用寿命长等优点。山东某地地下水封石洞油库对地下水的影响数值模拟分析的目的就是在区域水资源现状评价的基础上,对洞库涌水量进行分析与评价,通过区域地下水的补给、径流、排泄条件分析,阐明地下水降落漏斗的形成、发展情况,并对实施建设项目造成的地下水资源衰减情况进行分析,提出措施以减少建设项目洞库涌水及退水对区域水资源及其他用水户的影响。

项目区具备区域、山体和围岩三大稳定条件和必备的水封条件。根据可用岩体的分布状况,该项目洞罐按长方形平行摆放,并置于相同的深度,洞罐中心轴线垂直于节理,并将竖井设置在靠近地面操作区一

侧,一期洞库库容为 300 万 m³,共分 9 个洞室,按北偏西 5°平行设置。9 个洞室的断面尺寸均为 20 m 宽、30 m 高,由于受地质条件的限制,9 个洞室长度各不相同,每 3 个洞室之间通过施工巷道相连组成 1 个罐体,同一罐体的 2 个洞室之间净间距为 30 m,不同罐体的 2 个相邻洞室之间净间距为 58 m。

1 地质与水文地质条件

山东某地位于鲁中大断裂以东,属于鲁东地盾区。从地层构造看,下元古界胶南群的片岩、片麻岩、燕山晚期侵入岩等主要分布在小珠山山麓,中生界白垩系青山组砂岩、砂砾岩夹粉砂岩、页岩分布于薛家办事处东部、北部,新生界第四系冲积砂层主要分布在辛安东部平原,第四纪覆盖层厚不超过 10 m,海滩为海蚀地形。区内冻土深度为 0.5 m,地震烈度为 6 级。

库址区为低山丘陵区,具有变质岩、花岗岩裂隙水,水位埋藏浅,且随季节性动态变化明显,年变幅为 0.5~5 m。地下水以大气降水为主要补给来源,但因花岗岩裂隙细小且不发育,地形较陡,变质岩虽裂隙发育但地面坡度大,使大气降水多以地表径流的形式排泄,渗入量很小,补给贫乏。

2 洞库涌水量计算

2.1 钻孔提水试验

选取 5 个钻孔进行提水试验,从中选取精度较高的 ZK₁、ZK₄ 与 ZK₅ 3 个孔的数据进行分析,除 ZK₁ 孔反映出 2 个小型透水断裂不具代表性外,ZK₄ 与 ZK₅ 2 个孔所得试验参数比较符合实际。

该次勘察勘探孔孔径为 56 mm,由于孔径小、水量微,因此选择提桶进行简易提水试验。提水过程中采用万能表测量水位降深,按提水量确定涌水量,确保每一落程的提水量与降深稳定,提水试验结束 3 d 后测量钻孔内的稳定静止水位。各勘探孔提水试验主要数据如表 1 所示。

表 1 山东某地地下水封石洞油库工程提水试验数据

孔号	静水位埋深/m	动水位埋深/m	水位降深/m	涌水量/(m ³ ·d ⁻¹)	稳定时间/h
ZK ₁ (第 1 落程)	5.25	25.47	20.22	10.11	5.5
ZK ₁ (第 2 落程)	5.25	19.01	13.76	6.39	8.5
ZK ₁ (第 3 落程)	5.25	14.22	8.97	4.67	8.0
ZK ₄	13.72	55.60	41.88	0.78	10.0
ZK ₅	5.55	30.88	25.33	0.78	8.5

注:数据引自中国地质大学(北京)地下工程研究所完成的工程地质勘察报告,2005。

根据提水试验结果,按下列公式计算渗透参数:

$$K = 0.733 \frac{Q(\lg R - \lg r)}{H'^2 - h^2} \quad (1)$$

其中 $R = 2S\sqrt{KH'}$
式中: K 为渗透系数,m/d; Q 为涌水量,m³/d; R 为影响半径,m; r 为钻孔半径,m; H' 为含水层厚度(稳定水位至洞库底板),m; h 为孔内水位,m; S 为水位降深,m。

经试算求得 K 平均值为 9.577×10^{-5} m/d, R 平均值为 6.71 m^[5]。

2.2 洞库涌水量计算

计算出的洞库涌水量正确与否,不仅可以反映洞库岩体有否大的透水裂隙存在,而且可以间接地反映洞库断裂的发育程度。

洞库涌水量按照地下水动力学法进行计算(式(2)),洞库涌水量计算示意图图 1。

$$Q = LK \frac{H_0'^2 - h^2}{R} \quad (2)$$

其中

$$h = \Delta h' + h_0$$

$$\Delta h' = 0.9863S_0 - 6.4310$$

已知洞库长度 $L = 5\,537$ m, $K = 9.577 \times 10^{-5}$ m/d, $R = 6.71$ m。经计算得 $H_0' = 172.001$ m, $S_0 = 157.001$ m(取设计地下水位至洞高的 1/2 进行计算), $h_0 = 15.00$ m(取洞高的 1/2 进行计算), $h = 163.419$ m, $Q = 227.49$ m³/d。

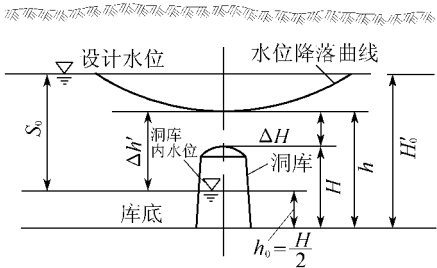


图 1 地下水动力学法洞库涌水量计算示意图

研究区 15 万 m³ 库容的原石洞库于 1976 年建成,经过不断实测得出该库的涌水量为 21 m³/d。其断面尺寸为跨度 16 m、高度 25.5 m。这次设计的大型石洞库尺寸又增加至跨度 20 m、高度 30 m,经计算,300 万 m³ 库容的油库涌水量为 227.49 m³/d。该涌水量系主洞室未加封堵时的涌水量,符合文献[6]中的“洞库的涌水量每 10 万 m³ 库容不宜大于 50 m³/d”的规定。与 15 万 m³ 库容量原油库比较,这一结果是比较符合实际的。

3 洞库涌水的影响分析

3.1 对地下水的影响

拟选库址区为低山丘陵区,具有变质岩、花岗岩裂隙水,水位埋深浅并动态地随季节性呈明显变化,年变幅为 0.5~5 m。地下水以大气降水为主要补给

源,但因花岗岩裂隙细小且不发育,地形较陡,变质岩虽裂隙发育但地面坡度大,使大气降水多以地表径流排泄,渗入量很小,补给贫乏。由于岩体较厚,下部地下水具有半承压性质。对某剖分网格来说:当地下水水位在网格顶板以上时,作为承压水处理,即水位下降引起的释水根据储水系数计算;当水位继续下降,降到网格顶板标高以下时,作为潜水处理,即释水根据给水度计算;水位低于网格底板时则单元格发生疏干,后续计算过程中作为无效单元处理。模型垂直向上分层较多,但未划分不同的含水层(因为是花岗岩山体,并不是一个连续的储水结构),使用的参数也为均一参数。

采用地下水动力学数值模拟计算方法和MODFLOW软件对地下水封石洞油库涌水对地下水位的下降规律和地下水漏斗进行预测,目的是分析地下水封洞库施工期涌水对区域地下水位的影响。

3.1.1 模型区范围

由于洞室开挖后的影响范围未知,模型区范围比洞室开挖区范围大。模型区东西向长2600 m、南北向宽1800 m、高600 m(海平面以上330 m,海平面以下270 m)。模型区x轴方向近东西向。模型区内地面标高由现有地形高程点高程数据插值得出。洞库位置如图2所示。

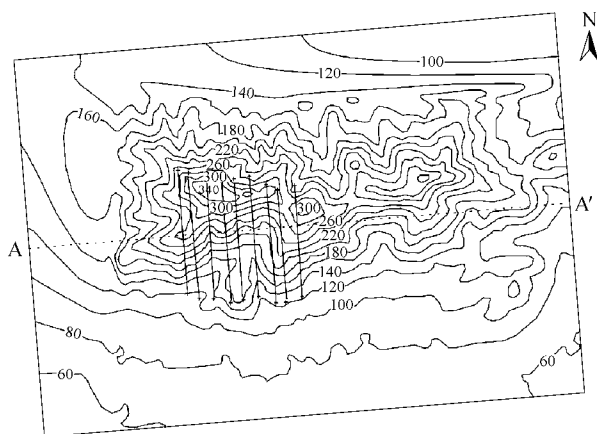


图2 洞库位置及地面高程示意图(单位:m)

3.1.2 模型网格剖分

在满足计算效率和精度的前提下,模型网格剖分如下:单元格东西向长40 m、南北向宽20 m、高30 m,并对洞室开挖区适当加密,网格加密后洞室所在单元格东西向长20 m、南北向宽20 m、高30 m,其尺寸与洞室横剖面尺寸吻合,最后剖分为90行、102列、20层。

3.1.3 模型概化及边界条件

洞室开挖区为花岗岩山区,水文地质参数较为均一。要对洞室开挖期和运行期进行模拟,因此模型可概化为均质各向异性非稳定流来模拟。

洞室开挖后,洞壁地下水与大气相通,因此模型中可将洞室按照定水头处理,水头值取洞室中心标高(-45 m)。洞室施工期(3 a)分3次计算以模拟洞室分别开挖的过程。自西向东将9个洞室划分为3组,每组3个洞。施工期分别开挖3组洞室。

模型区水平面两侧边界及垂向底部边界为隔水边界,上部边界接受降水入渗。

3.1.4 数学模型

根据以上所建概念模型,采用数学模型^[7-8]为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q_s \\ h(x, y, z, 0) |_{\Omega} = h_0' \\ h(t) |_{\Gamma_1} = h_1 \\ K_n \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(t) \end{cases}$$

式中: Ω 为模型区; h_0' 为模型区天然条件下的水头分布; Γ_1 为水头边界; Γ_2 为流量边界; K_x 和 K_y 为水平向的渗透系数,对于该模型 $K_x = K_y$; K_z 为垂直向的渗透系数; S_s 为储水率; q_s 为降水入渗量。

3.1.5 模型参数及运行时间

由于模型区地处山区,地形及地下水水位变化较大,因此模型区洞室开挖前的潜水面分布按照地表标高减去模型区地下水观测孔地下水平均埋深(5.42 m)处理。以此为基础进行稳定流模拟,得出洞室开挖前的地下水位初始水头分布。

根据模型区提水试验资料和经验数据可知,含水层水平渗透系数为 10^{-4} m/d,储水系数为 10^{-5} ,给水度为0.01。

整个模拟过程分4次进行,模拟时间共50 a。其中包括油库施工期3 a,分3次计算,模拟时间各为1 a;油库运行期47 a。第1次计算以稳定流模拟得到的水头分布为初始水头,并只设置3条定水头边界来代表第1组(3个)洞室;第2次计算以第1次计算结束时刻得到的水头分布作为初始水头,并将定水头边界增加到6条,新增3条定水头边界代表第2组(3个)洞室;第3次计算以第2次计算结束时刻得到的水头分布作为初始水头,并将定水头边界增加到9条,新增3条定水头边界代表第3组(3个)洞室;第4次计算以第3次计算结束时刻得到的水头分布作为初始水头,保持9条定水头边界不变,代表3组共9个洞室同时运行。

3.2 计算结果

3.2.1 洞室中心水头变化

图2中洞室中心A-A'剖面上的计算结果表明洞室开挖阶段,洞室上部地下水位下降不明显,近洞室周围地下水水头明显降低,说明在洞室开挖阶段

涌水量主要来自洞室围岩的弹性释水。模型采用上述渗透系数等水文地质参数,短时间内洞室开挖不会造成洞室上方地下水位的明显下降。甚至在洞室开挖 10 a 后(图 3),地下水位虽发生一定程度的下降,但仍未形成大范围的降落漏斗。

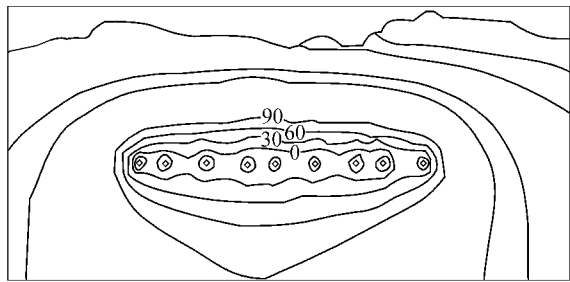


图 3 洞室开挖 10 a 后洞库剖面水头分布示意图(单位:m)

3.2.2 地下水降落漏斗发展情况

由于模型网格在垂向上划分为 20 层,随洞室上部地下水降落漏斗的发展,地下水位低于模型网格单元底板高程后网格单元则发生疏干,因此从洞室上部模型网格单元的疏干情况也可看出地下水降落漏斗的发展情况。图 4 为洞室开挖 40 a 后洞库的剖面水头分布。

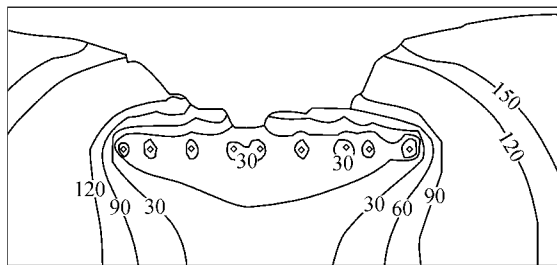
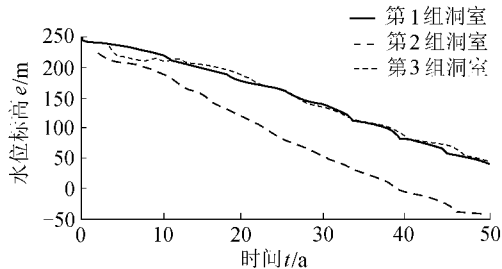
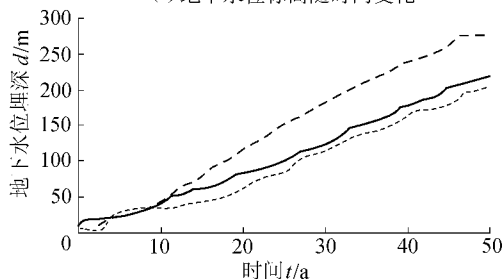


图 4 洞室开挖 40 a 后洞库剖面水头分布示意图(单位:m)

图 5 为各组(每组 3 个)洞库的中心上方地下水位标高和埋深随时间变化情况。由图 5 可以看出,



(a) 地下水位标高随时间变化



(b) 地下水位埋深随时间变化

图 5 洞库中心地下水位随时间变化关系

在前 3 a 施工期中,第 1 组洞室先开挖,因此从第 1 年开始第 1 组洞室中心的地下水位持续下降,而其余 2 组洞室中心地下水位基本无变化;第 2 组和第 3 组洞室中心地下水位分别从第 2 年和第 3 年开始持续下降。3 组洞室中,第 2 组洞室的地下水位最低,下降速度也最快,预测至 50 a 后地下水位标高为 -45 m,埋深为 275 m。

图 6 为平面上地下水降落漏斗(地下水降深大于 1 m 地区)扩展面积随时间变化情况。图 6 表明洞室开挖后地下水降落漏斗平面上展布范围变化较慢,在洞室开挖区基础上扩展面积也较小。前 10 a 是平面上降落漏斗面积扩展最快的时期,10 a 以后漏斗平面面积扩展速度明显变慢,且有趋于稳定的趋势。这也说明 10 a 以后洞室涌水量主要来自洞室上部岩体的弹性释水以及地下水位下降引起的重力排水,两侧来水量都很小。

根据模拟计算结果,在洞室开挖区基础上,东、西两侧扩展最大距离分别为 200 m 和 300 m,南、北两侧扩展最大距离分别为 300 m 和 250 m。模拟结束时近东西向漏斗扩展长度最大为 1 100 m,南北向长度最大为 1 200 m,平面漏斗扩展面积为 1.4 km²。

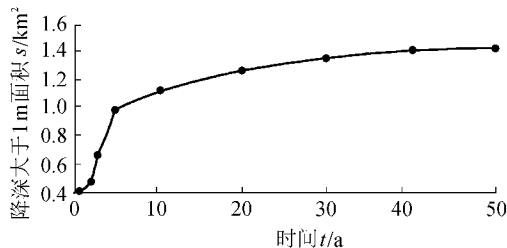


图 6 降落漏斗扩展面积随时间变化曲线

4 结 论

a. 采用提水试验资料求得渗透系数并按照地下水水力学法计算得出山东某地库容为 300 万 m³ 的石洞油库涌水量为 227.49 m³/d。该涌水量系主洞室未加封堵时的涌水量,符合文献[5]中洞库涌水量每 10 万 m³ 库容不宜大于 50 m³/d 的规定。

b. 采用三维地下水数值模拟模型 MODFLOW 进行了水封石洞油库涌水对地下水位影响的数值模拟分析,阐明了地下水封石洞油库施工期和运行期洞库涌水对地下水的影响和发展规律。结果显示,由于洞室位于花岗岩山区,渗透系数较小,洞室开挖后洞库涌水中的大部分来自洞室上部岩体的弹性释水和重力排水,两侧来水量较少。

c. 在不考虑水平水幕和储油的情况下,模拟地下水封石洞油库 50 a 后降落漏斗虽在垂向上发育深度很大,但在平面上展布范围并不大,主要位于洞室

开挖区,在洞室开挖区基础上东、西两侧最大扩展距离分别为 200 m 和 300 m,南、北两侧最大扩展距离分别为 300 m 和 250 m,洞室中心处地下水位下降最大,降深为 270 m。该工程参考国内外洞库的建设经验,考虑到北方地区干旱缺水,为保证安全,在洞顶上 30 m 处设置了水平水幕系统,项目实施后地下水最大降落位置为水幕系统所在的标高 0.000 m 处。

d. 洞库涌水量较小,该项目在施工 3 a 期间涌水主要来自岩石的弹性释水,对地下水位基本无影响,不考虑水平水幕和储油的情况下,模拟 50 a,地下水位在垂向上随时间线性下降,平面上影响范围不大。

参考文献：

[1] 张秀山. 地下油库岩体裂隙处理及水位动态预测[J]. 油

(上接第 60 页)

的引进与应用,有助于弥补我国在宏观政策研究理论、方法和技术上的薄弱环节,提高我国宏观策略研究水平。鉴于我国水系复杂,各流域之间情况各异,开展洪水风险情景分析宜以流域为研究对象,可以选择经济发展迅速、水事关系复杂的太湖流域先行试点,借鉴国外先进经验,针对流域的具体特点设计情景、拟定技术方案、研发模型,待积累经验后可以在其他流域逐步推广。

参考文献：

[1] EVANS E, ASHLEY R, HALL J. Foresight future flooding [M]. London : Office of Science and Technology 2004.

[2] 周魁一, 谭徐明. 洪水灾害的双重属性及其实践意义 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 1997, 1(1) : 45-52

[3] 万庆, 魏一鸣, 陈德清, 等. 洪水灾害系统分析与评估 [M]. 北京 : 科学出版社, 1999.

[4] 程晓陶. 关于洪水管理基本理念的探讨 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 8(1) : 36-43.

[5] 徐乾清. 浅议防洪减灾与可持续发展的关系 [J]. 水利规划与设计, 2000(1) : 1-3.

[6] CARTER T R, PARRY M L, HARASAWA H, et al. IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations [M]. Geneva : Intergovernmental Panel on Climate Change, 1994.

[7] HERMAN K, WIENER A J. The year 2000 : a framework for speculation on the next thirty-three years [M]. London : Macmillan Publishing Company, 1967.

[8] Van DER HEIJDEN K. Scenarios : the art of strategic conversation [M]. Chichester : John Wiley & Sons, 1996.

[9] 岳真, 赖茂生. 国外情景分析方法的进展 [J]. 情报方法, 2000(7) : 60-64.

气储运, 1995, 14(4) : 24-27.

[2] 杨明举, 关宝树, 钟新樵. 水封式地下储油洞库的应用及研究 [J]. 地下空间, 2000, 20(3) : 171-175.

[3] 彭振华, 李俊彦, 孙承志, 等. 地下水封石洞油库规模经济性研究 [J]. 炼油技术与工程, 2006, 36(7) : 51-53.

[4] 杨森, 于连兴, 杜胜伟. 地下洞库作为国家原油储备库的可行性分析 [J]. 油气储运, 2004, 23(7) : 22-24.

[5] 中国地质大学(北京)地下工程研究所. 山东某地地下水封油库可研阶段工程地质勘察报告 [R]. 北京 : 中国地质大学(北京)地下工程研究所, 2005.

[6] GB 50455—2008, 石油储备地下水封石洞油库设计规范 [S].

[7] 刘贯群, 韩曼, 宋涛, 等. 地下水封石油洞库渗流场的数值分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(5) : 819-824.

[8] 薛禹群. 地下水动力学原理 [M]. 北京 : 地质出版社, 1986.

(收稿日期 2008-08-08 编辑 高建群)

[10] 刘曼明. 英国的洪水管理与防洪计划 [EB/OL]. [2005-06-16]. [http://co. 163. com/neteaseivp/zhuant/200506161504/down/028. doc](http://co.163.com/neteaseivp/zhuant/200506161504/down/028.doc).

[11] 太湖流域内各省(市)统计局. 太湖流域内各省(市)统计年鉴 [M]. 北京 : 中国统计出版社, 2000 ; 2001 ; 2002 ; 2003 ; 2004 ; 2005.

[12] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域防洪规划 [R]. 上海 : 太湖流域管理局, 2006.

[13] DEFRA(Department of Environment, Flood and Rural Affairs). Flood and Coastal Erosion Risk Management in England [R]. London : DEFRA, 2006.

[14] 吴建华, 徐海林. 对我国如何开展洪水保险的思考 [J]. 水利经济, 2007, 25(1) : 40-41.

(收稿日期 2008-08-14 编辑 高建群)

· 简讯 ·

全国水资源工作会议在桂林召开

2009 年 2 月 14 日上午,全国水资源工作会议在广西桂林召开。会议由水利部部长陈雷主持,全国政协副主席、中国工程院院士钱正英,水利部原部长、全国人大财经委副主任委员汪恕诚出席会议并讲话,广西壮族自治区党委副书记陈际瓦到会致辞,广西壮族自治区政府副主席陈章良、水利部副部长胡四一、水利部党组成员办公厅主任陈小江、水利部水资源司司长高而坤等参加了会议。会议的主要任务是,全面贯彻党的十七大、十七届三中全会和中央经济工作会议、中央农村工作会议精神,深入贯彻落实科学发展观,按照全国水利工作会议的要求,总结工作,交流经验,分析形势,部署当前和今后一个时期的水资源管理工作,努力开创水资源管理工作的新局面。(本刊编辑供稿)