应用模糊模式识别模型计算分析辽河中下游水安全状况

聂保持[1],王　耕[2],吴　伟[3]

(1.沈阳市水利局,辽宁 沈阳　110013;2.辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁 大连　116029;3.大连理工大学管理学院,辽宁 大连　116024)

摘要:采用陈守煜模糊模式识别模型对辽河流域水安全状况进行了计算与分析。结果表明,从 1995 至 2005,辽河流域总体水安全状况均在较不安全程度向较安全程度过渡,尤其是 2005 年水安全级别特征值都处于 2 ~3 级之间,其中沈阳、鞍山、抚顺、本溪和辽阳水安全级别值越来越大,变化趋势较好,辽阳水安全程度提升较快,但是鞍山和抚顺水安全程度较低,属于较不安全区。大石桥 2000 年水安全级别特征值为 2.69591,比 1995 年和 2005 年稍低一些,但还是较安全的。盘锦 2005 年水安全级别值特征值为 2.9505,比 1995 年和 2000 年稍低一些,但一直是较安全的。1995 年和 2000 年铁岭水安全级别值特征值在 1.5 左右,水安全状况较差,但是近年来水安全级别特征值都有所上升,水安全程度有所提升。最后从压力-状态-响应框架分析了水安全的变化原因。

关键词:辽河流域;水安全;模糊模式识别

中图分类号:O235,X171.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1004-6933(2008)06-0031-05

Application of fuzzy pattern recognition model to water security analysis in the lower and middle sections of the Liaohe River

NIE Bao-chi[1], WANG Geng[2], WU Wei[3]

(1. *Shenyang Bureau of Water Resources*, *Shenyang* 110013, *China*; 2. *College of Urban and Environmental Sciences*, *Liaoning Normal University*, *Dalian* 116029, *China*; 3. *School of Management*, *Dalian University of Technology*, *Dalian* 116024, *China*)

Abstract: The fuzzy pattern recognition model developed by Chen Shouyu was applied to the analysis of the water security of the Liaohe River. The results show that the water security status in the Liaohe River changed from insecure to secure from 1995 to 2005, and the characteristic values of water security in 2005 ranged from Grade 2 to Grade 3. The characteristic values of the water security of Shenyang City, Anshan City, Fushun City, Benxi City and Liaoyang City gradually increased. The water security degree of Liaoyang was rising rapidly, but the water security degree of Anshan City and Fushun City were still low and insecure in 2005. The characteristic value of Dashiqiao City in 2000 was 2.69591, lower than that in 1995 and 2005, but the water security degree in 2000 was still secure. The characteristic value of Panjin City in 2005 was 2.9505, lower than that in 1995 and 2000, but the water security degree in 2005 was still secure. The water security degree of Tieling City, whose characteristic value in 1995 and 2000 was about 1.5, was insecure, but the characteristic value of water security had gradually increased more recently, and the water security degree had increased accordingly. Finally the reasons of water security variation are analyzed based on the pressure-state-response concept.

Key words: the Liaohe River Basin; water security; fuzzy pattern recognition

---

基金项目:国家自然科学基金(70573018);国家教育部科技司资助项目(105054)

作者简介:聂保持(1975—),男,辽宁葫芦岛人,助理会计师,主要从事水资源调查与管理工作。E-mail:lnnu_wg@hotmail.com

所谓水安全是指，在现在或将来，由于自然的水文循环波动或人类对水循环平衡的不合理改变，或是二者的耦合，使得人类赖以生存的区域水状况发生对人类不利的演进，并正在或将要对人类社会的各个方面产生不利的影响，表现为干旱、洪涝、水量短缺、水质污染、水环境破坏等等方面；并由此可能引发粮食减产、社会不稳、经济下滑及地区冲突等[1]。因此，水安全是国家或区域安全的基础条件之一，是战略资源安全的重要组成部分[2]。

关于水安全评价方法与评价模型，近年来国内外许多学者从不同的学科背景针对不同区域的水安全进行了热烈的讨论[2-3]，其中比较成熟的评价指标体系就是由联合国可持续发展委员会（UNCSD）提出的“压力-状态-响应”（P-S-R，Pressure-State-Response）概念框架[4]。本文采用陈守煜在文献[5-6]中提出的模糊模式识别模型，针对辽河流域水安全状况，建立特定流域评价指标体系进行探索性评价。辽河流域在东北地区占有重要的经济地位，流域的水安全及流域经济的生态化发展对于‘振兴东北老工业基地’有着关键性的作用，本文的实证研究试图为流域的水环境建设提供警示信息，确定合理的资源开发利用方式，降低经济发展作用于自然环境的负荷。

1 研究地区

辽河是东北地区南部第一大河，流经河北、内蒙古、吉林、辽宁四省区，总长 1 390 km，流域总面积（含浑河、太子河）22.9 万 km^2，其中辽河中下游占 31.1%。辽河干流（从辽宁省昌图县福德店以下称辽河干流）流经辽宁省的昌图、开源、铁岭、新城子、法库、新民、辽中、台安、盘山等 59 个县市区（图 1），在盘山县境注入渤海。辽河流域水安全状况是很严峻的，目前除少数河流生物耗氧量（BOD）低于Ⅴ类

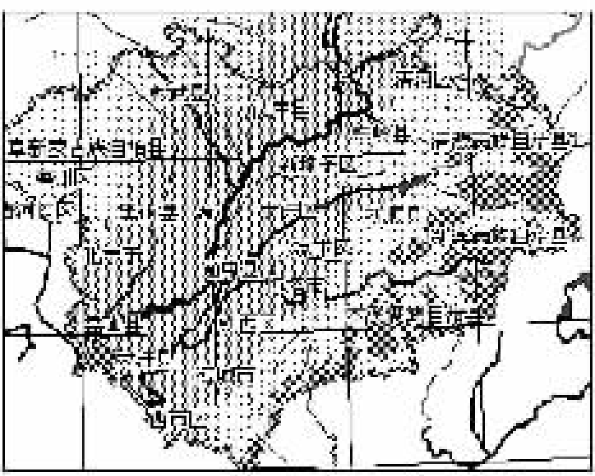

图 1　辽河流域水安全研究范围

水体标准外，其余河流化学耗氧量（COD）和氨氮都超过了Ⅴ类水体标准。另外，与中国北方的其他省份一样，辽宁省的水资源严重短缺[7]。全国水资源的人均占有量大约是 2 000 m^3/a，而辽河流域仅为 603 m^3/a，水资源的匮乏加重了流域干流水污染的趋势。另外，下游河床不断淤高，旱涝灾害频繁。可见，辽河中下游生态系统正在退化，水土保持能力日益减弱，可持续发展的潜力濒临枯竭，正处于生态系统不健康状态，对整个流域的经济安全造成了极大的威胁。

2 研究方法

模糊模式识别模型是以相对隶属度和相对隶属度函数的概念与定义为基础[6]，以参考连续系统上的两极及中介的线性变化作为相对统一的参照系，它不但能够继承隶属度的优点，而且还能克服最大隶属度原则的不适用性，全面反映各指标对评价结果的综合作用，更客观地反映事物的真实状态。

2.1 模糊模式识别模型简介[5]

设系统的指标特征值向量为

$$X = (x_1, x_2, x_3, \cdots, x_m)$$

水安全系统按 c 个级别进行识别，c 个级别的指标标准特征值为

$$Y = (y_1, y_2, y_3, \cdots, y_c)$$

水安全的 m 个指标特征值的相对隶属度 R、水安全基准指标特征值的相对隶属度 S 分别按公式(1)，(2)计算。

$$R = \begin{cases} 0 & x_i < y_c, x_i > y_c \\ \dfrac{(x_i - y_c)}{(y_1 - y_c)} & y_1 > x_i > y_c, y_1 < x_i < y_c \\ 1 & x_i > y_1, x_i < y_1 \end{cases} \tag{1}$$

$$S = \begin{cases} 0 & \\ \dfrac{(y_h - y_c)}{(y_1 - y_c)} & y_1 > y_h > y_c, y_1 < y_h < y_c \\ 1 & y_h = y_1 \end{cases} \tag{2}$$

式中：y_h 为系统指标 i 对级别 h 的标准值；x_i 为指标 i 的特征值。

将流域水安全系统的 m 个指标对水安全基准相对隶属度 $R(r_1, r_2, r_3, \cdots, r_m)$ 分别与 $S(s_1, s_2, s_3, \cdots, s_m)$ 进行比较，可得系统指标 i 的级别上限值 b，级别下限值 a。

设流域水安全系统 m 个指标的权向量为

$$w = (w_1, w_2, w_3, \cdots, w_m) \quad \sum_{i=1}^{m} w_i = 1$$

样本与级别 h 之间的差异，用广义欧氏距离（距离参数 $p = 2$）表示为

$$d_h = \left[\sum_{i=1}^{m}(r_i - s_i)^2\right]^{1/2}$$

由于各指标间权重不等，因此样本与级别 h 之间的差异，用加权广义欧氏距离表示为

$$d_h = \left[\sum_{i=1}^{m} w_i(r_i - s_i)^2\right]^{1/2}$$

则文献[5]距离参数 $p=2$ 时的模糊模式识别模型为

$$u_h = \begin{cases} 0 & h < a, h > b \\ \dfrac{1}{\sum\limits_{i=1}^{m}[w_i(r_i - s_h)]^2 \sum\limits_{h=a}^{b}\left\{1/\left\{\sum\limits_{i=1}^{m}[w_i(r_i - s_h)^2]^{1/2}\right\}\right\}} & a \leqslant h \leqslant b \\ 1 & d_h = 0 \end{cases} \quad (3)$$

级别特征值公式为

$$h = (1,2,3,\cdots,c) \times (u_1,u_2,u_3,\cdots,u_c)^{\mathrm{T}} \quad (4)$$

式中：h 为流域水安全基准级别特征值，用以衡量系统的安全程度。

2.2 评价指标体系的确立

水安全评价的一项重要工作就是对影响水安全的相关因素予以筛选、分类，以便客观地描述同类因子内部或非同类因子之间的耦合关系，解释各因素对水安全的影响过程、结果和调控方式，即研究水安全调控机理和保障体系。流域水安全状况是人为因子和自然因子共同影响的结果，根据系统性、指标选择的独立性、可比性、真实性和实用性，考虑到资料收集的可能性，在仔细研究 P-S-R 指标框架和国内外水安全评价指标体系案例基础上[2,8]，本文依据 2005 年辽河流域野外考察和收集的最新资料，针对辽河流域存在的主要问题，紧扣社会经济发展的现状与趋势，以维护生态系统功能为主线，按照层次分析法的方法，选取影响辽河流域水安全的各方面指标，构筑了辽河流域水安全多层次评价指标体系如图 2 所示。

2.3 水安全评价指标标准

在评价数学模型中，通常评价标准选择需要设定判别基准与理想状态，以是否达到标准要求作为安全与否的基本度量。所谓评价标准的确定，也可以说是要建立起一套衡量水安全状态的定量参照系，使人们能通过与参照系的比较来找出自身的差距，明确其发展的目标。但目前尚无统一标准可循，各国的评价标准差异较大，原因是除了选用的基准不同外，很大程度取决于各国的政治、文化、技术、经济条件。即使在国内，也由于地域的差异，环境目标、生态类型的不同，所选择的评价标准也不尽相同。本研究根据国家已发布的环境质量标准，行业发布的评价规范、规定、设计要求等，地方政府颁布的标准和规划区目标、河流水系保护要求、特别区域的保护要求等 辽河流域生态环境的背景值和本底值 以及流域内各地区各指标的最大值、最小值和均值，初步设定了辽河流域水安全 4 个级别基准，如表 1 所示。

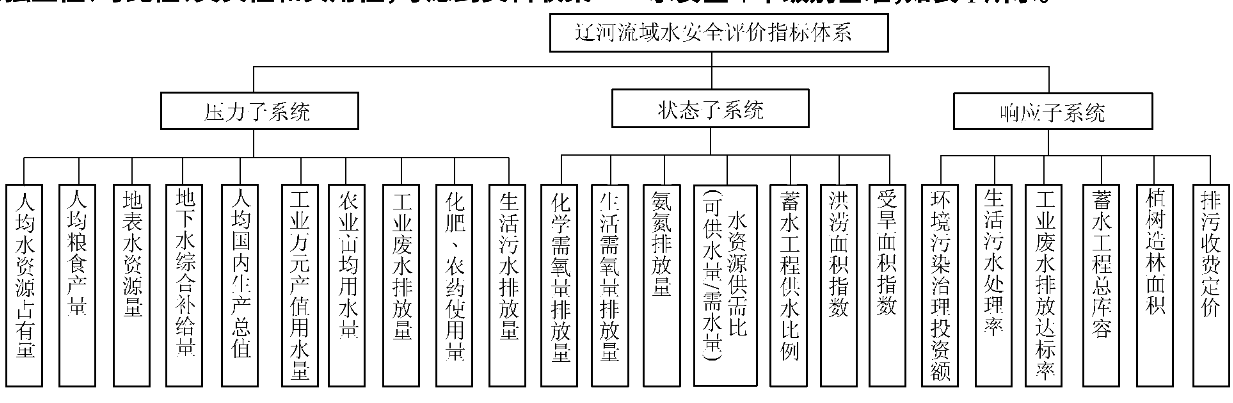

图 2 辽河流域水安全评价指标体系

表 1 辽河流域水安全指标安全级别标准

水安全指标	人均水资源占有量/亿 m^3	人均粮食产量/kg	地表水资源量/亿 m^3	地下水综合补给量/亿 m^3	人均国内生产总值/元	工业万元产值用水量/m^3	农业亩均用水量/m^3	工业废水排放量/万 t	化肥农药使用量/t	生活污水排放量/万 t	COD 年排放量/t	BOD_5 年排放量/万 t
级别 1 不安全	500	100	1	0.5	2000	10	100	5000	20	5000	25	10
级别 2 较不安全	1000	200	5	5	5000	30	150	3000	15	3000	20	8
级别 3 较安全	1500	300	15	8	10000	50	200	2000	10	1000	15	5
级别 4 安全	2000	400	30	10	15000	100	250	1000	5	500	10	1

水安全指标	NH_4-N 年排放量/万 t	水资源供需比(可供水量/需水量)/%	蓄水工程供水比例/%	洪涝面积比/%	受旱面积比/%	环境污染治理投资额/万元	生活污水处理率/%	工业废水排放达标率/%	蓄水工程总库容/亿 m^3	植树造林面积比/%	排污收费定价/元
级别 1 不安全	6	0.5	5	100	100	5000	0.2	0.2	0.3	30	0.2
级别 2 较不安全	4	0.7	10	75	75	100000	0.4	0.4	0.5	40	0.25
级别 3 较安全	2	0.9	20	50	50	300000	0.6	0.6	0.7	50	0.3
级别 4 安全	0.5	1	30	0	0	500000	0.8	0.8	1	70	0.35

级别 4 对应于水安全状况最佳，表明该地区在压力–状态–响应耦合作用下，能够维持水资源高级可持续利用，水环境质量总体保持稳定，工农业以及整个经济发展处于水资源承载力范围内，水资源综合管理已经达到相当高的水平。

级别 3 对应于水安全过渡状态，属于较安全状况，表明该地区在压力–状态–响应耦合作用下，水资源处于中级可持续利用阶段，工农业以及整个经济发展接近或稍超于水资源承载力范围内，水环境质量总体呈波动变化，水资源综合管理达到中级水平。

级别 2 对应于水安全过渡状态，属于较不安全状况，表明该地区在压力–状态–响应耦合作用下，水资源处于低级可持续利用阶段，工农业以及整个经济发展超过水资源承载力，但是响应能力强，水环境质量总体变化不大，水资源综合管理较差。

级别 1 对应于水安全状况最差，表明该地区在压力–状态–响应耦合作用下，水资源不可持续利用，工农业以及整个经济发展使水资源严重超载，水资源综合管理混乱。

2.4 水安全级别特征值计算

经多级模糊模式识别模型计算，分别得出 1995 年，2000 年，2005 年样本从属于级别 h 的相对隶属度。

1995 年

$$\boldsymbol{u}_h=\begin{bmatrix} 0.020\,830\,6 & 0.177\,9 & 0.062\,620\,9 & 0.222\,655 & 0.182\,298 & 0.182\,437 & 0.143\,76 \\ 0.007\,351\,93 & 0.689\,317 & 0.444\,93 & 0.279\,229 & 0.290\,571 & 0.287\,868 & 0.324\,079 \\ 0.011\,233 & 0.156\,326 & 0.218\,457 & 0.214\,374 & 0.196\,974 & 0.199\,324 & 0.134\,024 \\ 0.628\,479 & 0.036\,336 & 0.160\,574 & 0.311\,139 & 0.340\,625 & 0.337\,002 & 0.461\,095 \end{bmatrix}$$

2000 年

$$\boldsymbol{u}_h=\begin{bmatrix} 0.020\,441\,6 & 0.176\,757 & 0.062\,204\,5 & 0.222\,655 & 0.186\,412 & 0.163\,558 & 0.139\,587 \\ 0.007\,220\,49 & 0.683\,404 & 0.443\,148 & 0.278\,736 & 0.286\,727 & 0.292\,137 & 0.321\,19 \\ 0.011\,031\,3 & 0.161\,026 & 0.218\,998 & 0.214\,423 & 0.202\,029 & 0.185\,474 & 0.134\,585 \\ 0.636\,439 & 0.037\,559\,1 & 0.161\,328 & 0.311\,505 & 0.332\,49 & 0.363\,132 & 0.461\,923 \end{bmatrix}$$

2005 年

$$\boldsymbol{u}_h=\begin{bmatrix} 0.020\,344\,7 & 0.175\,366 & 0.062\,084\,4 & 0.222\,857 & 0.172\,477 & 0.157\,735 & 0.141\,255 \\ 0.007\,209\,11 & 0.671\,426 & 0.440\,74 & 0.278\,032 & 0.291\,48 & 0.292\,637 & 0.306\,107 \\ 0.011\,034\,4 & 0.168\,382 & 0.219\,908 & 0.214\,555 & 0.189\,534 & 0.180\,079 & 0.146\,764 \\ 0.640\,674 & 0.039\,326\,6 & 0.162\,104 & 0.311\,941 & 0.355\,823 & 0.374\,124 & 0.439\,185 \end{bmatrix}$$

关于权重的确定采用模糊 AHP 法，构造比较判断矩阵，经计算后将结果归一化处理，压力层指标权重依次为：$W_P=(0.009\,3, 0.016\,9, 0.016\,9, 0.016\,9, 0.041\,3, 0.018\,8, 0.02, 0.010\,5, 0.02, 0.02)$；状态层指标权重依次为：$W_S=(0.026\,3, 0.060\,2, 0.068\,9, 0.051\,8, 0.103\,6)$；响应层指标权重依次为：$W_R=(0.082\,2, 0.041\,1, 0.041\,1, 0.082\,2, 0.070\,5, 0.070\,5, 0.070\,5, 0.035\,3)$，采用公式(4)，计算得出水安全程度的级别特征值向量：

1995 年：$h=(1,2,3,4)\times(u_1,u_2,u_3,\cdots,u_c)^{\mathrm{T}}=(2.583\,25, 2.170\,85, 2.250\,15, 2.668\,79, 2.716\,86, 2.704\,15, 3.038\,37, 1.543\,75)$

2000 年：$h=(1,2,3,4)\times(u_1,u_2,u_3,\cdots,u_c)^{\mathrm{T}}=(2.613\,73, 2.176\,88, 2.250\,81, 2.669\,42, 2.695\,91, 2.756\,79, 3.033\,41, 1.473\,54)$

2005 年：$h=(1,2,3,4)\times(u_1,u_2,u_3,\cdots,u_c)^{\mathrm{T}}=(2.630\,56, 2.180\,67, 2.251\,7, 2.670\,35, 2.747\,33, 2.779\,74, 2.950\,5, 2.580\,19)$

根据水安全级别特征值分析(图 3)，1995 年辽河中下游水安全状态优劣排序为：盘锦 > 大石桥 > 辽阳 > 本溪 > 沈阳 > 抚顺 > 鞍山 > 铁岭；2000 年辽河中下游水安全状态优劣排序为：盘锦 > 辽阳 > 大石桥 > 本溪 > 沈阳 > 抚顺 > 鞍山 > 铁岭；2005 年辽河中下游水安全状态优劣排序为：盘锦 > 辽阳 > 大石桥 > 本溪 > 沈阳 > 铁岭 > 抚顺 > 鞍山。

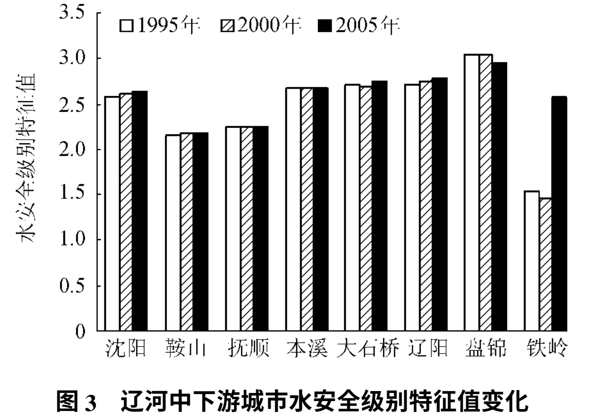

图 3 辽河中下游城市水安全级别特征值变化

从 1995 至 2005 年，辽河流域总体水安全状况

均从较不安全程度向较安全程度过渡，尤其是 2005 年水安全级别特征值都处于 2～3 级之间，其中沈阳、鞍山、抚顺、本溪和辽阳水安全级别值越来越大，变化趋势较好，辽阳水安全程度提升较快，但是鞍山和抚顺水安全程度较低，属于较不安全区。大石桥 2000 年水安全级别特征值为 2.695 91，比 1995 年和 2005 年稍低一些，但还是较安全的。盘锦 2005 年水安全级别值特征值为 2.950 5，比 1995 年和 2000 年稍低一些，但一直是较安全的。铁岭 1995 年和 2000 年水安全级别值特征值在 1.5 左右，水安全状况较差，但是近年来水安全程度有所提升。

3 水安全变化原因分析

根据 P-S-R 指标框架分析原因如下：

a. 从水安全压力看，辽宁省各城市水安全压力有所缓解，尤其是 1995 年以来辽宁省转变传统粗放型经济增长方式，以发展循环经济为目标，深化工业污染防治，在全省重点工业企业中实施清洁生产，在工业企业中实施水污染物排放浓度和总量“双向控制”，创建了铁法煤业集团等一批废水“零排放”企业，这些举措缓解了对辽河流域水环境的压力，但是大石桥地区 1995 年由于大规模开矿而造成水安全压力最大。

b. 从水安全状态来看，各城市水安全水量水质状态逐年有所改善。可见，随着社会经济的迅速发展，流域内的水环境状态保持稳定，人们已经意识到在发展的同时注意保护环境与资源，但是沈阳、鞍山和抚顺地区水安全状态变化不大。

c. 从水安全的响应来看，辽宁省政府实施《辽宁省辽河流域水污染防治“十五”计划》以来，流域内已建成污水处理厂 4 座，处理能力 65 万 t/d。同时，政府用于环境保护和改善的投资也逐年大额增加，仅 2002 年的环保投入就比前 5 年增加了 3 倍，占 GDP 的比例达到 1.93%，而据世界银行测算，超过 1.5%就可以改善环境质量。但从中下游流域来看，各城市的相应措施还是不够的。沈阳地区水安全程度有所提高，而鞍山和抚顺地区水安全程度提升较小。辽阳水安全程度提升较快，主要是由于太子河上游骨干工程观音阁水库于 1995 年 10 月竣工，并提前在汛期充分发挥了蓄水、泄洪作用，另外由于“引兰入汤”工程在 1998 年建成通水后也增加了沿途城市供水量，缓解水安全压力。

4 结 论

辽河流域在东北地区占有重要的经济地位，流域的生态安全及流域经济的生态化发展对于“振兴东北老工业基地”有着关键性的作用。本文根据水安全的内涵、准则和辽河流域的特点，提出了一套水安全评价的指标体系，并运用模糊模式识别理论和模型，进行了实证研究。结果表明与实际情况基本相符，评价结论能够为流域的生态环境建设提供警示信息，确定合理的资源开发利用方式，降低经济发展作用于自然环境的负荷，从而避免由决策失误而带来的重大经济损失。所建评价指标体系具有一般性，可用于其他中尺度流域地区水安全相对优劣程度的评价与比较。但流域水安全评价是一项庞大而复杂的工作，涉及流域的各个部门、各个行业、各个流域单元的利益，水安全评价中有些环节处理不太理想，一是在状态指标设计中，由于目前数据的不可得性，暂时舍去了一部分指标；二是水安全等级的阈值选取，主观性较强，应寻求一个较好的阈值划定方法。

参考文献：

[1] 韩宇平，阮本清，解建仓．多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]．资源科学，2003，25(4)：37-42．

[2] 方子云．提供水安全是二十一世纪现代水利的主要目标——简介斯德哥尔摩前年国际水会议及海牙部长级会议[J]．水利水电科技进展，2001，21(1)：9-10．

[3] 张巧显，欧阳志云，王如松，等．中国水安全系统模拟及对策比较研究[J]．水科学进展，2002，13(5)：569-577．

[4] 王韩民，郭玮，程漱兰，等．国家生态安全：概念、评价及对策[J]．管理世界，2001(2)：149-151．

[5] 陈守煜．工程模糊集理论与应用[M]．北京：国防工业出版社，1998：24-217．

[6] 陈守煜．系统模糊决策理论与应用[M]．大连：大连理工大学出版社，1994：1-101．

[7] 国家环境保护总局．“三河”“三湖”水污染防治计划及规划[M]．北京：中国环境科学出版社，2000：83-87．

[8] 韩宇平，阮本清．区域水安全评价指标体系初步研究[J]．环境科学学报，2003，23(2)：267-272．

（收稿日期：2007-05-09 编辑：高渭文）

（上接第 30 页）

[14] 谢新民，颜勇．浅析西北地区地表水与地下水的相互转化关系[J]．水利水电科技进展，2003，23(1)：8-10．

[15] 任立良，张炜，李春红，等．中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究[J]．河海大学学报：自然科学版，2001，29(4)：13-18．

[16] 芮孝芳．中国的主要水问题及水文学的机遇[J]．水利水电科技进展，1999，19(3)：18-21．

[17] 金向维．气候变化对辽宁省水资源的影响及对策[J]．水资源保护，2003(2)：35-38．

（收稿日期：2007-11-21 编辑：高渭文）