

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.008

区域水安全系统评价新方法探析

童 芳¹, 董增川¹, 邱德华²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 广东省水利厅, 广东 广州 510150)

摘要 基于可持续发展理论的压力-状态-响应概念框架, 探讨了区域水安全评价指标体系的建立, 并改进已有的遗传投影寻踪评价方法, 构造了基于多目标决策理想点法(TOPSIS)的相对贴近度概念的投影目标函数, 利用蒙特卡罗方法产生的大样本数据, 建立了一种适合于区域水安全系统评价的新方法(模型)——遗传投影寻踪-理想点插值模型(GPP-IPIM), 并将其成功地应用于我国广东省北江下游及其三角洲地区水安全系统评价, 评价结果具有直观性、合理性和通用性。对评价结果基于不确定性分析的敏感性进行分析, 结果表明 GPP-IPIM 是一种稳定、有效的区域水安全系统评价方法, 并可应用于各种水资源系统评价问题。

关键词 区域水安全; 水安全评价; 多目标理想点法; 投影寻踪; 遗传算法; 不确定性敏感性分析

中图分类号 TV213 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2008)02-0030-05

A new method for regional water security system assessment // TONG Fang¹, DONG Zeng-chuan¹, QIU De-hua² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Resources Department of Guangdong Province, Guangzhou 510150, China)

Abstract : Based on the pressure-state-response (PSR) framework, the establishment of a regional water security assessment index system was discussed and the existing genetic projection pursuit method was modified. Furthermore, the projection objective function reflecting the relative closeness to the ideal points of the TOPSIS method was established. Thus, a new comprehensive assessment method for regional water security—the genetic projection pursuit ideal point interpolation model (GPP-IPIM) was set up and applied to water security assessment of a downstream section of the Beijiang River and its delta region in Guangdong Province. The assessment results demonstrate that the model is intuitive and rational. The sensitivity study of the evaluation results based on uncertainty analysis shows that GPP-IPIM is a steady and effective regional water security assessment method, and it can be widely used for water resources system assessment.

Key words : regional water security; water security assessment; TOPSIS; projection pursuit; genetic algorithm; sensitivity analysis based on uncertainty analysis

水是区域社会经济协调健康发展的战略性基础资源,也是区域生态环境系统持续良性循环的控制性要素。水安全是水资源、水环境和水灾害的综合效应,兼有自然、社会、经济和人文的属性。目前水安全已经成为 21 世纪现代水利的主要目标,成为资源环境学科研究的重要前沿问题^[1-2]。

区域水安全系统评价旨在为区域水资源可持续开发利用以及合理的区域社会经济发展模式的确定提供决策依据,具有重要的理论和实践意义。区域水安全系统评价主要涉及两个关键问题:评价指标体系的建立以及合理的指标赋权方法。迄今为止,关于水资源可持续利用评价指标体系的建立有大量的研究^[3-4],但尚未形成一套广为认可的评价指标体系框架。而在评价方法方面,根据赋权方法的性质,现有

的系统评价方法主要有以层次分析法、模糊综合评价为代表的主观赋权法,以及以熵权法、投影寻踪法为代表的客观赋权法,而这些方法在实用中都有其局限性。为此,本文在区域水安全评价指标的选取问题上,基于可持续发展理论压力-状态-响应(PSR)概念框架,提出了区域水安全评价指标体系框架,在评价方法上,对现有的投影寻踪法^[5]进行进一步改进,构造基于多目标决策理想点法(TOPSIS)的相对贴近度概念的投影目标函数,从而融合了 TOPSIS 法具有直观的几何意义以及充分利用原始数据的优点,建立了区域水安全的新型等级评价模型——遗传投影寻踪理想点插值模型(GPP-IPIM)。该模型直接由样本数据驱动,客观决定各评价指标权重,建模方法简便有效,具有一定的推广应用价值。

作者简介:童芳(1982—),女,安徽合肥人,博士研究生,从事水资源可持续利用及水资源系统规划研究。E-mail: tongfang824@163.com

1 构建区域水安全评价指标体系

PSR 概念模型最初由加拿大学者于 20 世纪 90 年代早期提出,于 1995 年被联合国经济合作开发署和联合国环境规划署认可,并应用于联合国可持续发展委员会和联合国政策协调与可持续发展部联合组织的建立可持续发展指标体系的研究,近年来被广泛应用于可持续发展背景下的各类水资源、环境评价问题指标体系的建立。借鉴 PSR 概念框架在建立可持续发展评价指标体系及区域水环境安全、生态安全评价指标体系框架方面的应用成果^[6],选取 PSR 概念模型作为构建本文区域水安全评价指标体系的理论基础,可以清晰地反映人类活动对于“经济-社会-生态环境”复合系统所施加的压力、区域“复合水安全系统”的演化状态、管理者为应对区域水安全问题而做出的各类工程或非工程措施的响应之间的因果关系(见图 1)。

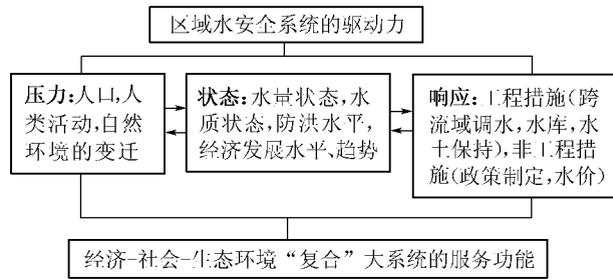


图 1 区域水安全评价的“压力-状态-响应”概念模型

构建水安全评价指标体系,可在借鉴可持续发展相关指标体系的基础上根据水安全的概念,针对具体区域的特点,遵循科学性、整体性、代表性、可比性等原则,在考虑其社会经济发展水平、现状及演变趋势的基础上构建。根据层析分析法(AHP)原理,将区域水安全系统采用自上而下、逐层分解的方法划分为 3 个层次:目标层、准则层和指标层。目标层用以综合表征区域水安全系统整体态势。准则层作为指标层的评判依据。指标层由可直接度量的指标构成:“压力”指标反映人类活动对“经济-社会-生态

环境”复合系统造成的负荷;“状态”指标表征区域水环境质量、水资源与水生态系统的状况;“响应”指标表征管理决策者面临水安全问题所采取的对策与措施。基于以上分析,构建区域水安全评价指标体系框架,如图 2 所示。

2 区域水安全等级评价的 GPP-IPIM 模型建模步骤

区域水安全等级评价的 GPP-IPIM 模型的建立包括 6 个步骤。

步骤 1:首先对评价指标进行一致化处理和无量纲化处理。根据区域水安全系统等级评价的评价标准搜集用于评价的原始数据,设区域水安全评价标准表产生的某样本的标准等级及评价指标分别为 $y(i)$ 及 $\{x^*(i, j) | i=1 \sim n, j=1 \sim p\}$,其中 n 和 p 分别为样本的数目和评价指标的数目。评价样本的属性指标有负向指标和正向指标之分,对于负向指标可采用一个较大的值减去对应指标的属性值,这样负向指标就可转化为正向指标。在这一步骤里采用 0-1 规划的形式对属性指标进行无量纲化,即

$$x(i, j) = \begin{cases} \frac{x^*(i, j)}{x_{\max}^*(j)} & (\text{处理越大越优型指标}) \\ 1.0 - \frac{x^*(i, j)}{x_{\max}^*(j)} & (\text{处理越小越优型指标}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_{\max}^*(j)$ 为样本集中第 j 个指标值的最大值。

步骤 2:确定多目标决策理想点法的正、负理想点。多目标决策理想点法是一种有效的多指标决策方法,这种方法通过构造多指标问题的理想解,并以靠近理想解和远离负理想点两个基准作为评价各可行方案的判据。正理想点是设想各指标属性都达到最满意值的解,负理想点是设想各指标属性都达到最不满意值的解。由规范化后的样本集 $x(i, j)$ 可得相应的正理想点 $v^+(j)$ 和负理想点 $v^-(j)$:

$$\begin{cases} v^+(j) = x_{\max}(j) \\ v^-(j) = x_{\min}(j) \end{cases} \quad (2)$$

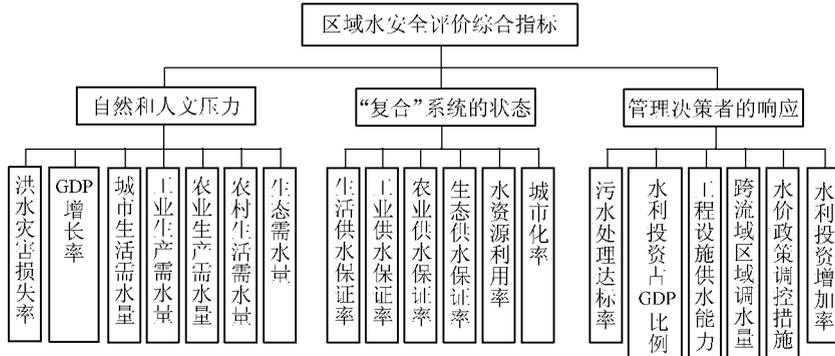


图 2 区域水安全评价指标体系框架

式中: $x_{\min}(j)$ 和 $x_{\max}(j)$ 分别为规范化后的样本集 $x(i, j)$ 中第 j 个指标值的最小值和最大值。

步骤 3: 建立投影目标函数^[7]。根据投影寻踪法的原理, 同时结合多目标决策理想点法以各评价样本值对理想点的相对接近度的概念, 把 p 维数据 $\{x_{ij}^* | j=1 \sim p, i=1 \sim n\}$ 综合成以 $w=(w(1), w(2), \dots, w(p))$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$, 从而根据 $\{z(i) | i=1 \sim n\}$ 的一维散布图进行分类。

$$z(i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p u(j) \{x(i, j) - v^-(j)\}^2}{\left[\sqrt{\sum_{j=1}^p u(j) \{x(i, j) - v^-(j)\}^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^p u(j) \{x(i, j) - v^+(j)\}^2} \right]}} \quad (3)$$

式中: $z(i)$ 为评价样本距离正理想点 $v^+(j)$ 和负理想点 $v^-(j)$ 的相对接近度; $u(j)$ 为第 j 个指标的权重, 满足:

$$\sum_{j=1}^p u(j) = 1 \quad (4)$$

基于对投影值 $z(i)$ 的散布特征要求, 即局部投影点尽可能密集, 整体各投影点团之间尽可能散开, 可构造投影目标函数为^[7]

$$f(w) = S_z D_z \quad (5)$$

其中 $S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - \bar{z})^2}{n-1}}$ (6)

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) u(t) \{R - r_{ij}\} \quad (7)$$

式中: S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差; D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度; \bar{z} 为 $z(i)$ 的均值, $i=1 \sim n$; R 为局部密度的窗口半径, 一般取 $R = 0.1 S_z$; r_{ij} 为距离, $r_{ij} = |z(i) - z(j)|$, $u(t)$ 为单位阶跃函数:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (8)$$

步骤 4: 优化投影方向。由于给定标准等级及其评价指标的样本数据 $\{y(i) | i=1 \sim n\}$ 和 $\{x^*(i, j) | i=1 \sim n, j=1 \sim p\}$ 时, 投影目标函数 $f(w)$ 只随投影方向反映不同的数据结构特征, 最佳投影方向 w^* 就是最大可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向, 可以通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向。即

$$\begin{cases} \max f(w) = S_z D_z \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^p w^2(j) = 1 \quad u(j) \in [0, 1] \end{cases} \quad (9)$$

此为一个以 $\{u(j) | j=1 \sim p\}$ 为优化变量的复杂的

非线性优化问题, 用实数编码的加速遗传算法 (RAGA) 可以方便地求解, 其计算步骤可参考相关文献^[7]。

步骤 5: 计算投影值。设 $w^*=(w(1), w(2), \dots, w(p))$ 为所求得的最佳投影方向, 代入式 (3), 即得第 i 个样本投影值的计算值 $z^*(i)$ 。

步骤 6: 建立区域水安全等级评价 GPP-IPIM 数学模型, 亦即建立 $\{z^*(i) | i=1 \sim n\}$ 与 $\{y(i) | i=1 \sim n\}$ 之间的数学关系表达式。可根据 $z^*(i)$ 与 $y(i)$ 的散点分布图, 利用线性内插方法建立区域水安全等级评价的分段插值数学模型。

3 GPP-IPIM 在北江下游及其三角洲地区水安全系统评价中的应用

北江下游及其三角洲地区面积为 3.2 万 km^2 , 约占全广东省的 18%, 是广东省社会发展的重要区域之一。水对该区域发展具有举足轻重的作用, 水安全成为该地区经济社会发展的重要影响因素^[8]。对该区域开展水安全评价, 可为进一步开发利用和优化配置水资源、解决水资源供需矛盾、走可持续发展道路提供科学的决策依据。基于上述区域水安全 PSR 评价指标体系框架和评价指标的选取原则, 并考虑资料的可得性, 对于其各现状年和规划水平年选取 9 个代表性指标, 并根据文献 [9] 的系统等级评价标准表构造准则, 构造了以区间形式表示的等级评价标准, 见表 1。

表 1 以区间形式表示的等级评价标准

评价指标	1 级区间	2 级区间	3 级区间	4 级区间
GDP 增长率	[2, 5]	[5, 8]	[8, 11]	[11, 15]
工业供水保证率	[50, 64]	[64, 78]	[78, 90]	[90, 100]
农业供水保证率	[50, 64]	[64, 78]	[78, 90]	[90, 100]
生态供水保证率	[50, 64]	[64, 78]	[78, 90]	[90, 100]
生活供水保证率	[95, 96]	[96, 97]	[98, 99]	[99, 100]
污水处理达标率	[2, 25]	[25, 48]	[48, 70]	[70, 100]
水利投资占 GDP 比例	[0, 1]	[1, 3]	[3, 5]	[5, 15]
水资源利用率	[60, 44]	[44, 28]	[28, 10]	[10, 5]
洪水灾害损失率	[30, 20]	[20, 10]	[10, 5]	[5, 1]

根据表 1, 用 Monte-Carlo 方法, 利用均匀随机数在各评价指标变化区间内随机产生 100 个标准评价对象, 得到了由 400 个样本点组成的样本系列。将这 400 个样本指标值 $\{x_{ij}^* | j=1 \sim 9, i=1 \sim 400\}$ 根据式 (1) 进行标准化, 转换成标准系列 $\{x_{ij} | j=1 \sim 9, i=1 \sim 400\}$, 并与 $\{y(i) | i=1 \sim 400\}$ 一起代入式 (2) 式 (3) 式 (5) 式 (6) 和式 (7), 得此例的投影目标函数。用 RAGA 优化该函数 (取群体规模为 300, 优秀个体数为 20, 加速循环 20 次), 求得最佳投影方向 $w^*=(0.2561, 0.2338, 0.2341, 0.2340, 0.3212,$

0.4578 0.2979 0.3967 0.4597) 把 w^* 代入式(2)后即可得出各样本投影值的计算值 $\{z^*(i) | i=1 \sim 400\}$, 用线性插值模型进一步得出区域水安全 GPP-IPIM 等级评价模型(见式(10)), 用该模型对该区域水资源综合规划的现状年及9个规划水平年进行水安全系统等级评价, 结果见表2。

$$y(i) = \begin{cases} 1.0 & z^*(i) \leq 2.014 \\ 1.0 + \frac{1.0-0.0}{3.032-2.014}(z^*(i)-2.014) & 2.014 \leq z^*(i) \leq 3.032 \\ 2.0 + \frac{2.0-1.0}{2.803-2.287}(z^*(i)-3.032) & 3.032 \leq z^*(i) \leq 5.921 \\ 3.0 + \frac{3.0-2.0}{7.125-5.921}(z^*(i)-5.921) & 5.921 \leq z^*(i) \leq 7.125 \\ 4.0 & z^*(i) \geq 7.125 \end{cases} \quad (10)$$

分析表2中2000年现状水平年到2050年规划水平年的水安全等级评价结果可得: 该区域水安全综合等级值在2005年之前为2.4级左右, 水安全水平较低, 其原因为该地区改革开放以来经济得到快速发展, 水利投资比较充足, 但污水处理前期投入明显不足, 对水生态环境保护重视不够, 而且节水工作做得不够, 用水效率较低。自2010年到2050年其水安全状态总体上呈上升趋势, 表明该地区以区域水生态环境安全为主要矛盾, 所以将规划重点定位于污水处理和水生态环境保护这两大主导因素, 从而保证了整体水安全战略措施的有效实施, 使得各规划水平年的水安全水平基本呈逐年升高趋势。从评价结果看, 提高用水效率, 建立节水型社会, 对该地区的水安全保障水平影响非常敏感, 是该研究区

表2 广东省北江下游及其三角洲地区水安全 GPP-IPIM 投影计算值和等级评价结果

现状年及规划水平年	各指标评价结果									GPP-IPIM 投影计算值	GPP-IPIM 等级计算值
	GDP 增长率	工业供水 保证率	农业供水 保证率	生态供水 保证率	生活供水 保证率	污水处理 达标率	水利投资占 GDP 比例	水资源 利用率	洪水灾害 损失率		
2000年	1.000	1.000	1.000	0.019	1.000	0.475	0.308	0.110	0.006	4.545	2.368
2005年	0.968	0.935	1.000	0.018	0.977	0.555	0.319	0.089	0.008	4.396	2.464
2010年	0.948	0.893	1.000	0.017	0.963	0.683	0.345	0.083	0.008	3.154	2.055
2015年	1.000	1.000	1.000	0.016	1.000	0.937	0.351	0.085	0.005	3.032	2.000
2020年	1.000	1.000	1.000	0.015	1.000	1.000	0.352	0.065	0.002	3.261	2.155
2025年	1.000	1.000	1.000	0.014	1.000	1.000	0.355	0.060	0.003	2.933	1.946
2030年	1.000	1.000	1.000	0.011	1.000	1.000	0.367	0.055	0.004	2.940	1.951
2035年	1.000	1.000	1.000	0.008	1.000	1.000	0.388	0.051	0.005	2.135	1.524
2040年	1.000	1.000	1.000	0.008	1.000	1.000	0.414	0.052	0.005	2.253	1.738
2045年	0.981	0.957	1.000	0.007	0.988	1.000	0.448	0.047	0.005	1.339	1.000
2050年	0.976	0.945	1.000	0.006	0.985	1.000	0.492	0.047	0.006	1.407	1.000

表3 应用3种一致无量纲化方法对于样本系列的等级计算误差分析对比

计算公式	误差绝对值落在不同区间的百分比/%				误差相对值落在不同区间的百分比/%				平均绝对误差	平均相对误差/%
	[0, 0.1]	[0, 0.2]	[0, 0.25]	[0, 0.3]	[0, 0.04]	[0, 0.07]	[0, 0.09]	[0, 0.15]		
式(11)	42.01	61.52	71.12	100.00	40.42	61.65	86.04	99.63	0.17	4.13
式(12)	5.63	15.96	36.85	40.21	3.65	10.53	22.63	30.36	0.45	17.85
式(13)	12.65	43.35	58.21	71.32	13.65	32.63	42.30	61.85	0.33	9.63

域应该优先重点考虑的具体水安全战略措施。

4 GPP-IPIM 基于不确定性分析的敏感性分析

GPP-IPIM 的建模过程本身带有其固有的不确定因素, 针对各类不确定因素造成的风险进行敏感性分析, 对于开展 GPP-IPIM 对不同区域的水安全评价具有十分重要的意义。

4.1 评价指标的一致无量纲化处理方法的敏感性分析

评价指标的一致无量纲化方法在理论上具有十分重要的意义, 但在各类评价问题的实际应用中人们却常常忽视其对评价结果的影响。选取3种常用的一致无量纲化方法, 计算公式如下:

$$x(i, j) = \begin{cases} x^*(i, j) \\ x_{\max}^*(j) \\ 1.0 - \frac{x^*(i, j)}{x_{\max}^*(j)} \end{cases} \quad (11)$$

$$x(i, j) = \begin{cases} \frac{x^*(i, j) - x_{\min}^*(j)}{x_{\max}^*(j) - x_{\min}^*(j)} \\ 1.0 - \frac{x^*(i, j) - x_{\min}^*(j)}{x_{\max}^*(j) - x_{\min}^*(j)} \end{cases} \quad (12)$$

$$x(i, j) = \begin{cases} \frac{x^*(i, j)}{\bar{x}(j)} \\ 1.0 - \frac{x^*(i, j)}{\bar{x}(j)} \end{cases} \quad (13)$$

将式(11)~(13)分别代入 GPP-IPIM 的计算程序中, 得到其试验误差计算结果如表3所示。对这3种评价方法的误差计算结果进行分析, 可知公式(12)扩大了原始样本系列数据之间的相对差异, 从

表4 主要评价指标变化对评价结果的敏感性分析结果

%

选取指标	变化率	北江流域现状年和规划水平年水安全评价等级值的相应变化率										
		2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年	2035年	2040年	2045年	2050年
GDP 增长率	10	-2.42	-3.17	-2.63	0.85	-2.85	-2.74	-1.96	-1.32	-1.85	-2.63	-1.08
	-10	1.99	1.72	2.32	1.78	2.63	1.78	1.96	0.85	1.36	1.64	1.29
污水处理 达标率	10	1.41	1.47	1.88	2.02	1.74	1.66	1.59	1.89	2.01	2.03	1.65
	-10	-1.30	-2.16	-1.42	-1.50	-2.18	0.99	-2.09	-1.85	-1.47	-1.63	-2.07
水资源 利用率	10	2.59	2.85	2.71	2.45	2.87	1.99	2.46	3.05	2.03	3.12	3.78
	-10	-2.92	-2.60	-2.11	-3.01	-2.96	-2.17	-3.00	-1.99	-2.65	-2.18	-2.09
洪水灾害 损失率	10	-5.86	-4.06	-4.56	-4.01	-3.01	-3.89	-2.96	-5.56	-2.64	-4.87	-3.65
	-10	4.63	3.78	3.41	3.10	3.85	4.14	4.33	2.99	3.18	3.89	4.67

而改变了样本系列的数据结构,这对于根据样本的数据结构特点客观赋权的投影寻踪方法而言无疑是敏感的,从而导致计算误差较另两种方法偏大。

4.2 主要评价指标值变化对模型稳定性的敏感性分析

主要评价指标值的变化对于模型评价输出结果稳定性的敏感性分析计算的试验设计如下:选取几个主要评价指标,将其数值变化 $\pm 10\%$,这时模型输出的评价等级值的相应变化率反映了其对于模型结果的敏感性。分析结果如表4所示。

由表4可知,对于各指标值 $\pm 10\%$ 的变化率,大部分的等级计算值的变化率都低于3%。GPP-IPIM较好的稳定性对于无资料或少资料地区的水安全评价问题具有重要意义,即使是在缺少资料的状况下,GPP-IPIM对误差程度在模型允许范围内的数据仍可以进行评价计算,并得出对进一步研究和决策具有一定建设性意义的计算结果。

5 结 语

a. 本文基于“压力-状态-响应”概念模型及其在可持续发展背景下的各类环境、生态综合评价指标体系问题中的应用,提出将其应用到区域水安全评价指标体系的构建上,为建立普遍适用的区域水安全评价指标系统提供了一定的发展思路。

b. GPP-IPIM引入TOPSIS理论中的相对贴近度改进其投影目标函数,从而将TOPSIS法具有直观的几何意义的优点融入其中,计算结果证明其具有可行性、直观性、高分辨率和良好的稳定性,在区域水安全系统评价中具有较好的应用前景,但是由于GPP-IPIM方法的赋权过程完全依赖于客观样本数据的结构特征,不能体现各指标自身价值的重要性以及决策者的主观判断,这一局限性并没有因为TOPSIS方法的引入而得到明显改善,故而考虑采用集成主观赋权和客观赋权两类综合评价方法的组合赋权评价方法^[10]是解决这一问题的可选途径,值得

进一步研究。

c. 针对目前国内在流域中下游及三角洲相对丰水地区的水安全问题研究不足的情况,探讨了GPP-IPIM在我国广东省北江流域水安全评价中的应用,从而丰富了针对我国经济相对发达的丰水地区水安全问题的研究。

参考文献:

- [1] 金菊良,王文圣,洪天求,等.流域水安全智能评价方法的理论基础探讨[J].水利学报,2006,37(8):918-925.
- [2] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002,17(3):262-269.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] FRIEDMAN J H, TURKEY J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Trans on Computer, 1974, 23(9):881-890.
- [6] HUGHEY K F D, CULLEN R, KERR G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70:85-93.
- [7] 金菊良,丁晶.水资源系统工程[M].成都:四川科学技术出版社,2002:123-135.
- [8] 邱德华.区域水安全战略的仿真评价[D].南京:河海大学,2006.
- [9] 陈守煜.复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M].长春:吉林大学出版社,2002:95-121.
- [10] 陈国宏,李美娟.基于方法集的综合评价方法集化研究[J].中国管理科学,2004,13(1):101-105.

(收稿日期:2007-03-12 编辑:高建群)

