

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.019

基于投影寻踪法的城市水生态文明建设评价

黄显峰, 贾永乐, 方国华

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于水生态文明城市建设的理念和要求, 从水安全、水生态、水管理、水景观、水文化 5 个方面, 构建了包含 29 项指标的城市水生态文明评价指标体系; 综合考虑国内外的经济社会发展水平和区域特征, 确立了理想、和谐、基本和谐、不和谐、极不和谐 5 个评价等级标准, 建立了基于实数编码的加速遗传算法(real coded accelerating genetic algorithm, RAGA)的投影寻踪评价模型, 并以安徽省马鞍山市为例, 对其 2012 年的水生态文明建设情况进行等级评价。结果表明, 马鞍山市 2012 年的水生态文明处于基本和谐的状态, 与实际情况相符。

关键词: 水生态文明; 投影寻踪; 指标体系; 等级评价

中图分类号: X826

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2016)06-0117-06

Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction based on projection pursuit method

HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the implications of and requirements for the construction of an urban aquatic ecological civilization, an evaluation index system composed of 29 indicators, which covers five aspects, including water security, aquatic ecology, water management, water landscape, and water cultures, was established. With full consideration of the economic and social development level and regional characteristics in China and abroad, five evaluation grades, including the ideal, harmonious, basically harmonious, inharmonious, and extremely inharmonious levels, were set up. The projection pursuit evaluation model based on the real coded accelerating genetic algorithm (RAGA) was built. This model was used to evaluate the level of aquatic ecological civilization construction in Maanshan City, in Anhui Province, in 2012. The results show that aquatic ecological civilization in the city in 2012 was at a basically harmonious level, which is consistent with reality.

Key words: aquatic ecological civilization; projection pursuit; index system; grade evaluation

20 世纪六七十年代, 生态文明理念开始萌芽^[1]。2012 年, 十八大首次把生态文明建设纳入“五位一体”总体布局。水生态文明是生态文明建设的重要组成部分^[2], 指人类在保护水生态系统、实现人水和谐发展方面创造的物质和精神财富的总和^[3]。我国水资源量不足, 水生态系统功能单一, 水资源管理缺乏制度保障, 水景观公益性偏低, 诸如此类问题在一定程度上的持续存在, 我国水生态文

明建设将是一项艰巨且极富挑战性的战略任务。

以前城市建设规划主要侧重点在城市结构调整、形态布局和艺术设计等方面, 直到 20 世纪 90 年代初, 城市水问题才逐渐得到重视^[4]。水利部于 2013 年和 2014 年分别发布了《关于加快开展全国水生态文明城市建设试点工作的通知》和《关于开展第二批全国水生态文明城市建设试点工作的通知》, 共选取 113 个试点城市开展水生态文明建设。

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20130849); 江苏省水利科技项目(2014064)

作者简介: 黄显峰(1980—), 男, 副教授, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: hxhuang2005@163.com

但是,目前国内外对城市水生态文明的研究仍处于初步阶段,存在的主要问题有:城市水生态文明的实质内容不够明确;缺乏统筹自然-人类-水体的系统建设模式;未形成全面的城市水生态文明评价体系^[5]。

本文通过分析水生态文明城市的内涵、特征和基本要求,构建相应的评价指标体系,并鉴于水生态文明系统的复杂性^[6],建立了基于投影寻踪(project pursuit, PP)法的等级评价模型,力求全面、客观、真实地反映我国城市水生态文明状态,旨在为我国城市水生态文明建设提供借鉴。

1 城市水生态文明评价指标体系

指标体系评价法是依据某种指标选取准则,并结合评价区域具体情况,选择一系列指标构成评价指标体系,然后采用合适的数学分析方法对这些指标数据进行分析和处理,从而得到一个综合参数,将此综合参数与相关标准进行比对,即可了解评价区域的现状或阈值^[7]。

笔者参照安徽省水利厅发布的《关于开展水生态文明城市和水环境优美乡村建设试点工作的通知》,遵循系统性、可操作性、层次性、定量和定性评价相结合的原则^[8],着眼于水安全、水生态、水管理、水景观、水文化5个方面,构建城市水生态文明评价指标体系(表1)。

2 城市水生态文明等级评价模型

城市水生态文明等级评价,就是根据一些具有代表性的指标值,建立数学模型,对某个地区水生态文明所属等级进行综合评判,为该地区的水生态文明建设提供决策依据。实际操作中采用的指标往往是多维、非线性、不可公度的,传统的数据分析方法易受到过于数字化的限制,难以找到数据的内在规律,而投影寻踪法是一种处理非正态总体分布高维数据的探索性方法。本研究建立基于实数编码的加速遗传算法(real coded accelerating genetic algorithm, RAGA)的投影寻踪等级评价模型,对城市水生态文明的和谐程度进行评价。

2.1 投影寻踪法的基本思想

投影寻踪法是一种针对常规系统综合评价方法存在的形式化、数学化等局限性,提出由样本数据驱动探索性数据的分析方法^[9],其基本思想是以某种组合将高维数据投影到低维(1~3维)子空间上,通过极大(小)化某个投影指标,寻找出能反映高维数据结构或特征的投影,在低维空间上对数据结构进行分析,以达到研究高维数据内在联系的目的^[10]。投影寻踪法能够很好地排除无关投影方向的干扰,

而且容易知道各项指标对整体综合评分的影响程度(通过最佳投影向量中各个分量的相对大小体现),避免了人为确定指标权重的不确定性和主观性。

表1 城市水生态文明评价指标体系

目标层	系统层(A)	状态层(B)	指标层(C)
城市水生态文明程度	水安全	防洪排涝	城市防洪达标率 C_1
			城市排涝达标率 C_2
		水质	城市水功能区水质达标率 C_3
	区域水环境		生态需水维持度 C_4
			水环境维护度 C_5
		城市水面率 C_6	
	水生态	河湖动植物	水生生物丰富度 C_7
			植物配置合理性 C_8
			迹地恢复治理率 C_9
		水土保持	水土流失治理率 C_{10}
			林草覆盖率 C_{11}
			万元GDP用水量 C_{12}
	水管理	水资源管理	规模以上工业万元增加值取水量 C_{13}
			废污水排放达标率 C_{14}
			城市污水处理回用率 C_{15}
			供水管网漏损率 C_{16}
			节水型社会普及情况 C_{17}
			水源地保护效果 C_{18}
			工程达到防洪排涝标准、供水标准情况 C_{19}
			工程设施完好程度 C_{20}
			生产建设项目水土保持“三同时”落实率 C_{21}
			规划编制
	政府职能	水利工程管理到位率 C_{23}	
		配套法规和制度建设情况 C_{24}	
水景观	自然水景观	自然水景观 C_{25}	
	城市水景观	水利风景区 C_{26}	
水文化	水文化体现	水域及周边景观观赏性、水文化特色 C_{28}	
		水文化宣传、教育	水文化普及情况 C_{29}

2.2 投影寻踪法的计算步骤

投影寻踪模型的建模过程主要包括原始数据归一化处理、构造投影指标函数、优化投影指标函数和等级评价几部分。其中,通过优化投影指标函数来寻求能最大程度暴露数据特征的投影方向是其核心内容。

步骤1:对样本评价指标集进行归一化处理。设评价指标的数目为 m ,样本的个数为 n ,由于各指标的单位不尽一致,为统一其变化范围都在0~1之间,可采用式(1)和式(2)进行归一化处理。

对于效益型指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}^* - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

对于成本型指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}^*}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为第*i*个样本第*j*个指标值归一化处理后的值, x_{ij}^* 为第*i*个样本的第*j*个指标原始值; $x_{j\max}$ 和 $x_{j\min}$ 分别为第*j*个指标的最大值和最小值。

步骤2:构造指标函数。投影寻踪法就是把*m*维数据综合成以 $a=(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 为投影方向的一维投影值 z_i ,从而完成高维数据向低维数据的转化,即,

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

综合投影指标时,要求投影值 z_i 的散布特征应为局部尽可能密集,整体上投影点团之间尽可能散开。因此,投影指标函数可以表达为

$$Q(a) = S_z D_z \quad (4)$$

其中

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - E_z)^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}) \quad (6)$$

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; E_z 为投影值序列的平均值; R 为局部密度的窗口半径,其值可以根据试验确定,取值范围为 $r_{\max} + \frac{m}{2} \leq R \leq 2m$; r_{\max} 为样本之间距离的最大值,在实际应用中,一般取为投影样本方差的10%,以使投影指标偏离正态分布的程度最高^[11]; r_{ij} 为样本之间的距离, $r_{ij} = |z_i - z_j|$; $u(t)$ 为单位阶跃函数(当 $t \geq 0$ 时, $u(t) = 1$; 当 $t < 0$ 时, $u(t) = 0$)。

步骤3:优化投影指标函数。从投影指标函数 $Q(a)$ 的计算公式可知,对于同一个样本集, $Q(a)$ 只与投影方向 a 有关,因此,可以通过求解 $Q(a)$ 的最大值来估计最佳投影方向,即

$$\max Q(a) = S_z D_z \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1$$

这是一个复杂的非线性有约束优化问题,本文拟采用RAGA来进行求解。RAGA采用实数编码,先初始化父代群体,并行进行选择、交叉、变异操作,再用第一次、第二次演化迭代所产生的优秀个体这一子群体所对应的变量变化区间作为变量新的初始变化区间,重复前面的过程,如此加速循环直到最优个体的目标函数值小于某一设定值,或算法运行达到预定加速次数,这时把当前群体中最佳个体或优秀个体的平均值指定为RAGA的结果^[12]。

步骤4:等级评价。把步骤3中求得的最佳投

影方向 a^* 代入式(3)中,可得到评价等级样本点的投影值 z_i^* ,根据各等级值及其对应的投影值建立评价模型 $y^* = f(z_i^*)$,再把待评价样本的投影值 z^* 代入 $y^* = f(z_i^*)$,即可得到待评价样本的所属等级。

3 实例研究

以马鞍山市2012年城市水生态文明状况为研究对象,应用投影寻踪等级评价模型对其进行评价。马鞍山市位于安徽省最东部,属长江中下游冲积平原的芜湖-马鞍山丘陵水网平原区,地处东经117°53'~118°52'、北纬31°24'~32°02',多年平均降雨量1096mm,平均气温15.6℃,区域内长江东西贯穿,河道纵横,湖泊众多,试点区内主要水系包括长江右岸、采石河、慈湖河、雨山河、博望河、丹阳新河、高潮河、永丰河等河流,以及石臼湖、雨山湖、秀山湖三大湖泊,具有生态功能的湿地总面积645196hm²。

就水生态文明现状而言,马鞍山市基本形成了3个相互独立的城市防洪堤圈,但堤防建设还未达标,现有城市防洪的内河慈湖河、采石河堤防只能防御10年一遇的洪水,城区水系普遍存在淤积,暴雨积水情况严重;饮用水源地水质达标率稳定保持在100%,过境长江水质基本处于Ⅱ类,但仍有较多市区河流水质属于Ⅴ类甚至劣Ⅴ类;用水效率总体不高,同时雨水、再生水等非传统水源的利用程度较低,城市污水处理能力不足,城市供水管道漏损率较高;初步建成了市区水雨情自动测报系统,但饮用水源地、水功能区等水量水质自动测报调度系统尚未完善,基层水资源管理服务水平低,专业技术力量薄弱;采石矶国家级风景区已经形成,并举办了具有本地特色的中国李白诗歌节等水文化活动,然而水文化载体建设相对滞后。

3.1 城市水生态文明等级划分

目前对城市水生态文明等级划分还没有明确的标准。本文立足国内外经济社会发展水平,结合马鞍山市的区位条件和自然地理环境,确定理想、和谐、基本和谐、不和谐、极不和谐等5个等级以及马鞍山市各项现状指标值(表2)。

为了能使本次研究更具普适性,对于可定量的指标($C_1, C_2, C_3, C_6, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{20}, C_{21}$)的现状值和等级标准值均使用具体数值。现状值来源于实地调查统计及地区水利普查等有关资料,等级标准值从相关研究文献^[3,13-16]获得。对于定性指标($C_4, C_5, C_7, C_8, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, C_{28}, C_{29}$),其现状值和等级标准值均采用相对于目标值的实现程度来表征,现状值是通过实地调查得到,目标值是根据马鞍山市水生态

表2 马鞍山市2012年现状值及评价指标等级划分

评价指标	评价指标值	不同等级样本标准值				
		I 理想	II 和谐	III 基本和谐	IV 不和谐	V 极不和谐
C ₁ (%)	80	100	80	65	50	0
C ₂ (%)	60	100	80	65	50	0
C ₃ (%)	70	95	80	60	50	0
C ₄ (%)	83	90	80	60	40	0
C ₅ (%)	85	90	80	60	40	0
C ₆ (%)	12	25	20	10	5	0
C ₇ (%)	75	90	80	60	40	0
C ₈ (%)	80	90	80	60	40	0
C ₉ (%)	84	90	80	60	40	0
C ₁₀ (%)	80	85	80	70	60	0
C ₁₁ (%)	42.5	50	40	30	15	0
C ₁₂ (m ³)	135	100	200	300	400	1000
C ₁₃ (m ³)	67	5	10	20	40	200
C ₁₄ (%)	87.5	95	80	60	40	0
C ₁₅ (%)	12	50	40	30	20	0
C ₁₆ (%)	21.2	10	15	20	25	30
C ₁₇ (%)	80	90	80	60	40	0
C ₁₈ (%)	85	90	80	60	40	0
C ₁₉ (%)	80	90	80	60	40	0
C ₂₀ (%)	83.4	85	75	65	50	0
C ₂₁ (%)	78	95	85	70	50	0
C ₂₂ (%)	0	90	80	60	40	0
C ₂₃ (%)	80	90	80	60	40	0
C ₂₄ (%)	80	90	80	60	40	0
C ₂₅ (%)	90	90	80	60	40	0
C ₂₆ (%)	65	90	80	60	40	0
C ₂₇ (%)	80	90	80	60	40	0
C ₂₈ (%)	85	90	80	60	40	0
C ₂₉ (%)	90	90	80	60	40	0

文明城市建设试点的预期目标并结合专家评分得到,评分标准参见《安徽省水生态文明城市和水环境优美乡村评价暂行办法》。实现程度 f 可参照式(8)计算:

$$f = \frac{C_i}{G_i} \times 100\% \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

式中: C_i 表示第 i 个指标2012年的现状值; G_i 为第 i 个指标在2016年应达到的预期目标值。

3.2 综合等级评价模型的应用

3.2.1 评价过程

按照前述的步骤,用 Matlab 编写投影寻踪模型程序,其中 C_{13}, C_{14}, C_{16} 属于成本型指标,其他的都为效益型指标。在 RAGA 优化过程中,确定初始种群规模为 400,加速次数为 20,变异概率为 0.8,交叉概率为 0.8。运行此程序,得到最佳投影向量 $a^* = (0.1790, 0.1712, 0.1796, 0.1927, 0.1944, 0.1923, 0.1841, 0.1976, 0.1990, 0.1825, 0.1756, 0.1808, 0.1833, 0.1726, 0.1963, 0.1829, 0.1860, 0.1709, 0.1877, 0.1860, 0.1989, 0.1894, 0.1887, 0.1875, 0.1895, 0.1836, 0.1955, 0.1827, 0.1695)$, I、II、III、IV、V 级对应的投影值分别为 5.3797、

4.6840、3.5896、2.5043、0,马鞍山市2012年现状投影值为 4.2665。

根据各等级最佳投影特征值,绘制投影特征值散点图(图1),建立城市水生态文明等级评价模型 y^* ,再对所建立的评价模型进行误差分析,见表3。

$$y^* = -0.001(z^*)^3 - 0.1042(z^*)^2 - 0.1477z^* + 5.0028 \quad (9)$$

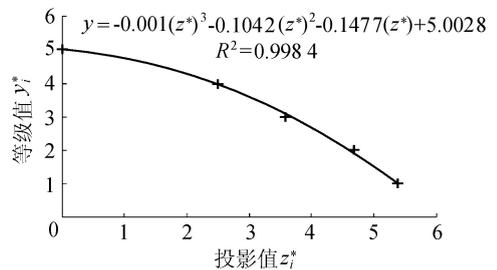


图1 各等级水生态文明投影特征值与等级关系

表3 投影寻踪模型误差分析结果

经验值	计算值	绝对误差	相对误差/%
1	1.0368	0.0368	3.68
2	1.9221	-0.0779	-3.89
3	3.0837	0.0837	2.79
4	3.9637	-0.0363	-0.91
5	5.0028	0.0028	0.06

从表3可以看出,依据投影特征值与等级值之间的关系拟合出的评价模型平均绝对误差为 0.0475,平均相对误差为 2.27%,表明所建立的等级评价模型精度较高,可以用来进行城市水生态文明程度的评价。将马鞍山市2012年现状投影值 $z^* = 4.2665$ 代入式(9)中,求得对应的 $y^* = 2.40$,即马鞍山市水生态文明现状等级为 III 级,处于基本和谐的状态,符合实际情况,也证明了该模型非常适于用来进行城市水生态文明评价。

另外,最佳投影方向各分量的大小,实质上反映了各参评指标对城市水生态文明等级的贡献度,值越大表示对应的指标对等级评价结果的影响程度越大(图2)。

3.2.2 评价成果分析

根据评价结果,马鞍山市2012年水生态文明总体上达到基本和谐,但部分指标的单项等级还很低,仍有较大的提升空间。迹地恢复治理率、生产建设项目水土保持“三同时”落实率、植物配置合理性、城市污水处理回用率4项指标对等级评价结果影响最大,在实际工作中应及时恢复城内既有工矿迹地植被,做好水土保持的方案申报、实施和验收工作,合理配置河道和塘库沿岸水生植物,新建污水处理厂、完善污水管网建设,以增强城市污水的处理能力,提高用水效率。水环境维护度、生态需水维持度、城市水面率、自然水景观这几项指标对等级评价

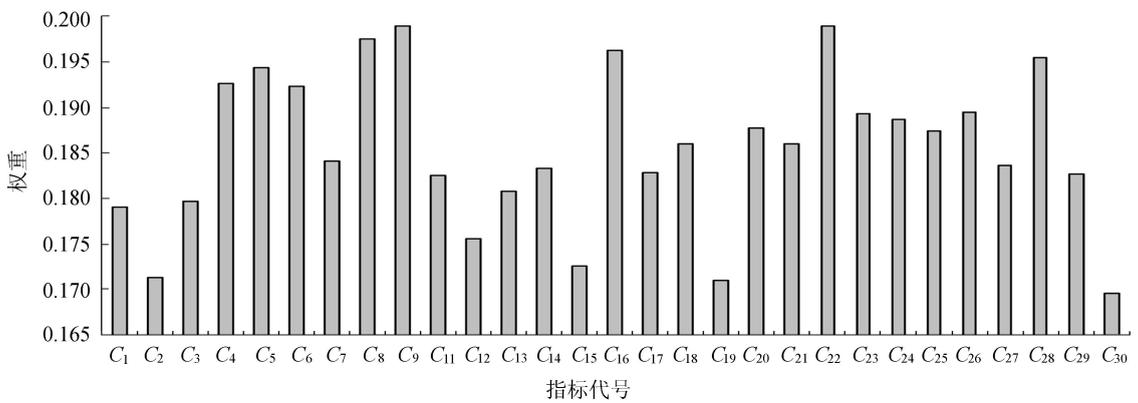


图2 各项指标对综合评价等级的贡献率

结果影响次之,说明水生态环境仍然是建设重点,要尽量维持原有的水域不被破坏,加强对生态湿地、湖泊等自然水景观的保护。

4 结 语

基于水生态文明城市建设的理念和基本要求,从水资源安全、水生态、水管理、水景观、水文化等5个方面,构建了29项指标组成的城市水生态文明评价指标体系,立足国内外的经济社会发展水平和国家有关短中期规划,制定了5个等级评价标准。构建了投影寻踪等级评价模型,由评价等级标准值样本计算得到的最佳投影方向,反映了各单项指标对水生态文明整体状态的影响程度,对实际工作有一定的参考价值和指导意义。通过将投影寻踪等级评价模型应用于马鞍山市2012年水生态文明现状评价,所得评价结果与现实情况相符,直接验证了模型是可行的,且精度较高,可以推广应用于同类区域城市水生态文明现状评价。

参考文献:

[1] 刘薇. 生态文明建设的基本理论及国内外研究现状述评[J]. 生态经济(学术版), 2013(2): 34-37. (LIU Wei. The basic theory of ecological civilization and the research status commentary [J]. Ecological Economy, 2013(2): 34-37. (in Chinese))

[2] 左其亨. 水生态文明建设几个关键问题探讨[J]. 中国水利, 2013(4): 2-3. (ZUO Qiting. Discussions on key issues of water ecological civilization construction [J]. China Water Resources, 2013(4): 2-3. (in Chinese))

[3] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 1-4. (TANG Kewang. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 1-4. (in Chinese))

[4] 王沛芳, 王超, 冯骞, 等. 城市水生态系统建设模式研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5):

485-489. (WANG Peifang, WANG Chao, FENG Qian, et al. Advances in research of urban water ecosystem construction mode [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(5): 485-489. (in Chinese))

[5] 户超, 褚俊英, 何素明, 等. 城市水生态文明内涵及指标体系构建综述[J]. 人民黄河, 2015, 37(12): 74-76. (HU Chao, CHU Junying, HE Suming, et al. A review of water ecological civilization connotation and index system construction [J]. Yellow River, 2015, 37(12): 74-76. (in Chinese))

[6] 付晓敏, 方国华, 黄显峰. 城市水生态文明建设协调度评价: 以马鞍山市为例[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 21-25. (FU Xiaoming, FANG Guohua, HUANG Xianfeng. Coordination degree evaluation of city aquatic ecological civilization: the case of Maanshan city [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 21-25. (in Chinese))

[7] 马峰, 王千, 蔺文静, 等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价: 以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 62-66. (MA Feng, WANG Qian, LIN Wenjing, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with Parameter Projection Pursuit Model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 62-66. (in Chinese))

[8] 王建华, 胡鹏. 水生态文明评价体系研究[J]. 中国水利, 2013(15): 39-42. (WANG Jianhua, HU Peng. Studies on evaluation system of water ecological civilization [J]. China Water Resources, 2013(15): 39-42. (in Chinese))

[9] 姚凯文, 崔洪梅, 王蕊. 基于RAGA的投影寻踪法在水利水电工程移民安置区选择中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2010(11): 167-168. (YAO Kaiwen, CUI Hongmei, WANG Rui. Application in resettlement for water conservancy and hydropower engineering based on RAGA projection pursuit method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(11): 167-168. (in Chinese))

- [10] 方国华,黄显峰.多目标决策理论、方法及其应用[M].北京:科学出版社,2011,162-168.
- [11] 何伟.基于投影寻踪法的江苏城市经济国际化水平评价[J].经济管理,2008(8):59-63.(HE Wei. Assessment of Jiangsu urban economic internationalization level based on project pursuit method [J]. Economic Management,2008(8):59-63.(in Chinese))
- [12] 金菊良,杨晓华,丁晶.基于实数编码的加速遗传算法[J].四川大学学报(工程科学版),2000,32(4):20-24.(JIN Juliang,YANG Xiaohua,DING Jing. Real coding based acceleration genetic algorithm [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2000,32(4):20-24.(in Chinese))
- [13] 褚克坚,仇凯峰,贾永志,等.长江下游丘陵库群河网地区城市水生态文明评价指标体系研究[J].四川环境,2015,34(6):44-51.(CHU Kejian,CHOU Kaifeng,JIA Yongzhi,et al. Evaluation indicator system of city water ecological civilization in-reservoir and river network region in hilly areas of the lower Yangtze River [J]. Sichuan Environment,2015,34(6):44-51.(in Chinese))
- [14] 刘海娇,黄继文,仕玉治,等.黄河下游典型城市水生态文明评价[J].人民黄河,2013(12):64-67.(LIU Haijiao,HUANG Jiwen,SHI Yuzhi,et al. Water ecological civilization evaluation on the typical urban of the lower Yellow River [J]. Yellow River,2013(12):64-67.(in Chinese))
- [15] 郭宇杰,王学超,周振民.我国城市污水处理回用调查研究[J].环境科学,2012,33(11):3881-3884.(GUO Yujie,WANG Xuechao,ZHOU Zhenmin. National survey of urban sewage reuse in China [J]. Environmental Science,2012,33(11):3881-3884.(in Chinese))
- [16] 姜帅,吴雪,刘书明.我国部分城市供水管网漏损现状分析[J].北京水务,2012(3):14-16.(JIANG Shuai,WU Xue,LIU Shuming. Leak study on some urban water supply pipe networks [J]. Beijing Water,2012(3):14-16.(in Chinese))

(收稿日期:2016-06-10 编辑:彭桃英)

(上接第109页)

参考文献:

- [1] 史正涛,刘新有,彭海英.气候变化对中国水安全的挑战[J].云南师范大学学报(哲学社会科学版),2008,40(2):11-16.(SHI Zhengtao,LIU Xinyou,PENG Haiying. The challenge of water safety to China under the climatic changes[J]. Journal of Yunnan Normal University (Humanities and Social Sciences),2008,40(2):11-16.(in Chinese))
- [2] 朱元生.水资源可持续发展的道路[J].水利水电科技进展,2015,35(1):54-56.(ZHU Yuansheng. The road of sustainable development of water resources[J]. Advances in Sciences and Technology of Water Resources,2015,35(1):54-56.(in Chinese))
- [3] 梁福庆.中国水利现代化的思考与对策[J].水利经济,2014,32(2):1-3.(LIANG Fuqing. Thoughts and countermeasures about modernization of Chinese water resources [J]. Journal of Economics of Water Resources,2014,32(2):1-3.(in Chinese))
- [4] 朱法君,王亚红.浙江省水资源可持续利用总体思路及对策研究[J].浙江水利科技,2010(4):1-4.(ZHU Fajun,WANG Yahong. Sustainable usage of water resources in Zhejiang Province: overall idea and strategy [J]. Zhejiang Hydrotechnics,2010(4):1-4.(in Chinese))
- [5] 陈甲球.PSR模型在资源环境保护中的应用分析[J].石材,2006(7):28-30.(CHEN Jiaqiu. Application of PSR model in resource environmental protection [J]. Stone,2006(7):28-30.(in Chinese))
- [6] 刘焱序,李春越,任志远,等.基于LUCC的生态型城市土地生态敏感性评价[J].水土保持研究,2012,19(4):125-130.(LIU Yanxu,LI Chunyue,REN Zhiyuan,et al. Land eco-sensitivity assessment based on LUCC in ecological city [J]. Research of Soil and Water Conservation,2012,19(4):125-130.(in Chinese))
- [7] 叶正伟,孙艳丽.基于PSR模型的江苏沿海大开发地区水环境安全评价:以盐城市为例[J].水土保持研究,2013,20(6):197-202.(YE Zhengwei,SUN Yanli. Assessment on water environment security in the coastal development region in Jiangsu based on PSR model[J]. Research of Soil and Water Conservation,2013,20(6):197-202.(in Chinese))
- [8] MASKREY A. Disaster mitigation: a community based approach[M]. Oxford:Oxfam,1989.
- [9] 崔明哲,杨凤海,李佳.基于组合赋权法的哈尔滨市耕地生态安全评价[J].水土保持研究,2012,19(6):184-187.(CUI Mingzhe,YANG Fenghai,LI Jia. Analysis of cultivated land ecological security assessment of Harbin City based on combination weighting method[J]. Research of Soil and Water Conservation,2012,19(6):184-187.(in Chinese))
- [10] 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(20):267-272.(HAN Yuping,RUAN Benqing. Research on evaluation index system of water safety[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2003,23(20):267-272.(in Chinese))
- [11] 吴舜泽,王金南,周劲松,等.国家环境安全评估报告[M].北京:中国环境科学出版社,2006.

(收稿日期:2016-03-16 编辑:彭桃英)