

佛山市水资源可持续利用的综合评价

邝远华^{1,2}, 汪丽娜³, 胡建文⁴, 陈晓宏^{1,5}, 刘丙军^{1,5}

(1.中山大学水资源与环境研究中心,广东 广州 510275; 2.佛山市水务局,广东 佛山 528000;
3.华南师范大学地理科学学院,广东 广州 510631; 4.广东省水文局,广东 广州 510150;
5.华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室(中山大学),广东 广州 510275)

摘要:本文以佛山市水资源条件和社会环境为背景,从水资源现状条件、水资源综合效益、水资源利用效率和水资源可持续利用压力等4个方面选取10项指标,综合分析佛山市的水资源可持续利用状况。结合人工鱼群优化的投影寻踪模型,对佛山市各区的水资源可持续利用程度的变化过程进行评价,并且对各区域的水资源可持续利用状况进行比对分析,评价结果符合佛山市水资源的实际情况,并针对比对分析的结果提出相应的缓解未来水资源压力的意见。

关键词:水资源;可持续;指标;方法

中图分类号:X751

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)06-0030-07

1 引言

全球气候变化对水资源量的影响,导致部分区域淡水资源供应不足。受气候变化和其它因素综合影响,一些流域近年来水资源量锐减^[1]。水资源面临着供需矛盾的加剧、水环境恶化的严重、淡水资源的短缺、用水效率的低下等一系列问题。水资源可持续利用是基于可持续发展理论以及水资源存在的问题应运而生的。可持续发展是指既要满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展^[2]。

佛山地处亚太经济发展活跃的东亚及东南亚的交汇处,东倚广州,南邻港澳,地理位置优越,是广东省第三大城市,中国古代四大名镇之一,2012年广东省GDP排名前三。佛山市水资源可持续利用的实现是支撑佛山市经济社会发展的基础,对比分析影响区域水资源可持续利用的因素,可以有针对性地提出相关的对策,这对佛山市的经济发展和社会稳定都具有十分重要的意义。目前,国内外对水资源可持续利用评价的研究较多,但没有标准评价指标和评价方法。例如:Beatrice(2007)^[3]在全球水资源稀缺的背景下,建立了

一套规范的标准,评价和分析流域水资源管理,以实现流域水资源的持续利用。Antonio等(2008)^[4]建立了涵盖环境、社会和经济的反应水资源可持续发展的管理指标体系,并获得了影响区域可持续发展的关键因素,为管理者提供科学的决策信息。黄林显等(2008)^[5]应用系统动力学方法,通过构建水资源承载力系统动力学模型,对山东省水资源可持续发展进行了对比分析。H.Kunstmann(2008)^[6]认为地表水的可利用量受水文状况的制约,并且与气候条件密切相关,提出可持续性指标应该体现出气候、水文和地表水循环等环节。K.Bithas(2008)^[7]认为水资源可持续发展的实现不仅与节约用水相关,还需要考虑水资源利用效率。韩卫滨等(2008)^[8]选用人均水资源量、每平方公里水资源量、人均用水量、万元GDP用水量、万元工业用水量、水资源利用率6个评价指标,评价福建省9个地市的水资源可持续性。Antonio等(2008)^[9]进行水资源可持续利用评价时,提出能够发现影响可持续发展的要素,并认为要从环境、社会、经济等因素出发,构建流域水资源管理指标体系。Andrew等(2010)^[10]评估了喀麦隆的水资源管理系统,并提出提高水系统的效率

收稿日期:2014-09-15

基金项目:国家自然科学基金(51210013,41501021,51479216);教育部高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20114407120006);
国家科技支撑计划(2012BAC21B0103);水利部公益项目(201201094,201301002-02,201301071);广东省水利科技创新项目(2011-11)
作者简介:邝远华(1978-),男,广州从化人,博士研究生,主要研究方向:城市化进程的水资源效应,E-mail:384797148@qq.com
通讯作者:汪丽娜(1981-),女,副教授,主要研究方向:城市化的水资源特征、水文过程模拟,E-mail:linawang2004@163.com

的相关意见,以实现水资源的可持续性。卢超等(2011)^[11]以水资源承载力为约束,利用系统动力学动态分析内陆缺水小城镇的可持续发展状况。吕芳等(2012)^[12]认为应选取人均水资源可利用量、人均供水量、耕地灌溉率、水资源利用率、万元工业产值需水量、需水模数、生活需水定额7个评价指标。可见,大部分学者认为水资源可持续利用评价指标体系既要体现社会经济、资源和环境协调发展的主导思想,又要使各评价指标成为表征水资源可持续利用系统的众多指标中最灵敏、最便于度量的主导性指标^[13]。使得水资源可持续利用评价体系,准确地分析出流域(区域)水资源可持续利用的现状和未来变化趋势。

关于水资源可持续性的评价方法,主要有模糊评判法、层次分析法、灰色聚类评价法、物元模型、主成分分析和因子分析等方法^[14-18]。例如,MAGHERI等(2007)^[19]提出水资源监控系统方法,以促进水资源的可持续发展。Croke等(2007)^[20]分享了澳大利亚评价水资源可持续性的集成方法。程瑶等(2008)^[21]运用GRNN神经网络水资源可持续利用评价模型,对文山州不同规划水平年水资源可持续性进行了综合评价。李丽等(2010)^[22]运用基于实数编码的加速遗传算法(RAGA)的投影寻踪分类(PPC)模型,对哈尔滨市水资源可持续性程度进行综合评价。何君等(2011)^[23]提出了用因子分析法计算评价子系统的因子综合得分,然后用基于加速遗传算法的层次分析法确定各评价子系统权重的多指标评价方法(FA-AHP),并得出在系统多指标评价中具有推广应用价值的结论。徐建新(2012)^[24]以陕西省某典型灌区为研究对象,通过建立TOPSIS模型,以熵权对评价指标进行客观赋权,评价陕西省某灌区地下水资源的可持续性。近年来,不少学者从系统的角度,运用系统动力学方法(SD法)分析水资源的可持续能力^[25]。本研究利用人工鱼群优化的投影寻踪模型,依据佛山市的实际情况选取反应佛山市水资源可持续利用的指标,对佛山市各区的水资源可持续利用进行分析。

2 实例分析

2.1 佛山市水资源环境背景

佛山市地处珠江三角洲中部河网区,西、北江分流的各水道贯穿其中,河流纵横交错,形成水网。除西北江及其主要分流河道外,集雨面积超过1000km²的河流只有高明河。佛山市属亚热带季风气候,年均降水

1490.6mm,年均气温22.1℃,佛山市域内多年平均径流深760.2mm,多年平均当地水资源总量为28.98×10⁸m³,其中地表水资源量27.93×10⁸m³,浅层地下水6.81×10⁸m³,中深层地下水0.19×10⁸m³。本市过境水资源十分丰富,流入市域的客水主要来自西江和北江。以马口和三水为控制站点,多年平均过境客水量2771.8×10⁸m³,其中84%的客水来自西江。根据2010年的第六次全国人口普查,全市常住人口为719.9万人。

2.2 评价指标的选取

水资源可持续利用评价指标的选取不仅要考虑区域的水资源状况、水资源开发利用程度,还要结合区域的经济、人口、社会环境背景。只有当水资源开发利用状况满足现状和将来较长时期内的需求,并未引起明显的或持久性的生态环境问题时,这种水资源利用才是可持续的^[26]。

本文在选取水资源可持续利用的评价指标时,依据系统性与层次性相结合的原则,建立子代指标与父代指标;根据全面性与概括性相结合的原则,建立具体的指标值;利用可行性与可操作性的准则,选取可量化的指标值;同时兼顾区域特征选出能较好地度量佛山市各区水资源可持续利用程度的指标。本文为了从不同角度、不同层面客观地反应佛山市各区的水资源状况,参考前人的研究成果,从水资源现状条件、水资源综合效益、水资源利用效率和水资源可持续利用压力4个父代指标考虑,这4个方面基本反应了水资源可持续利用的现状程度,具体见表1所示。其中,水资源现状条件包括4项子代指标值:年总降水量和产水系数反应气候条件对水资源本身的影响,水资源密度反应区域水资源的赋存条件,人均水量反应人口对于水资源的压力。水资源综合效益主要由GDP用水量、工业GDP产值用水量来表示,本文的指标对水资源可持续利用情况是正向的影响,因此GDP用水量、工业GDP产值用水量用表1中的计算方法得到。针对南方高强度用水的特点,本文选取的水资源利用效率的子代指标有单位面积农田灌溉量和水资源利用程度,反应水资源利用效率的子代指标对水资源可持续利用情况也是正向的影响,因此单位面积农田灌溉量、水资源利用程度也用表1中的计算方法得到。采用工业用水使用率和生活用水使用率反应工业和生活对于区域水资源可持续利用的压力。表1亦说明,本文所选的10项指标对水资源可持续利用情况均为正向的影响,即子代指标越大,水资源可持续利用情况越

表1 佛山市水资源可持续利用的评价指标

Table 1 The indicators of water resources sustainable utilization assessment for Foshan city

父代指标	子代指标	计算
水资源条件	年总降水量	\
	人均水资源量	水资源总量/总人口
	水资源密度	水资源总量/面积
	产水系数	水资源总量/降雨量
水资源综合效益	GDP用水量	1/(用水量/GDP)
	工业GDP值用水量	1/(工业用水量/GDP)
水资源利用效率	单位面积农田灌溉量	1/(农田灌溉用水量/农田灌溉面积)
	水资源利用程度	1/(用水量/水资源量)
水资源可持续利用压力	工业用水使用率	1-工业废水排放/工业用水
	生活用水使用率	1-生活废水排放/生活用水

强,反之子代指标越小,水资源可持续利用情况越低。

2.3 评价模型

2.3.1 投影寻踪模型

投影寻踪方法是把高维数据通过某种组合投影到低维子空间上,即可作探索性分析,又可作确定性分析的方法。该技术于20世纪60年代末提出,1974年Friedman和Tukey^[27]进行了深入的研究,随后在众多领域得到成功应用。

对于投影得到的构型,采用投影指标函数(即目标函数)来衡量投影暴露某种结构的可能性大小,寻找出使投影指标函数达到最优(即能反映高维数据结构或特征)的投影值,之后根据该投影值来分析高维数据的结构特征。其具体步骤如下:

(1)数据无量纲化。由于各聚类指标不相同,其量纲亦不尽相同,因此为了消除量纲的影响,在建模之前应对各个指标进行归一化处理。

设第*i*个样本第*j*个指标为 X_{ixj}^0 :

$$X_{ixj} = \frac{X_{ixj}^0 - X_{j_{\min}}^0}{X_{j_{\max}}^0 - X_{j_{\min}}^0} \quad (1)$$

式中: $X_{j_{\max}}^0$ 和 $X_{j_{\min}}^0$ 分别为第*j*个指标的样本最大值和最小值; X_{ixj} 为归一化的指标值。

(2)构造投影指标函数。投影就是从不同角度挖掘数据,寻找最大程度反映数据特征和数据信息的最佳角度,即最佳投影方向。通过将*p*维数据($X_{ixj}|j=1,2,\dots,p$)投影到一维线性空间 $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$,综合成某一投影方向的投影值 Z_i ,

$$Z_i = \sum_{j=1}^p (\alpha_j X_{ixj}) \quad (2)$$

式中: α 为长度向量。

在综合投影值时,要求投影值 Z_i 在整体上投影点尽可能散开。因此,投影指标函数可构造为:

$$Q_Z = S_Z D_Z \quad (3)$$

式中: S_Z 为投影值 Z_i 的标准差; D_Z 为位投影值 Z_i 的局部密度,即

$$S_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$D_Z = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f(R-r_{ik}) u(R-r_{ik}) \quad (5)$$

式中: \bar{Z} 为投影值 Z_i 的平均值; r_{ik} 为样本之间的距离,即 $r_{ik} = |Z_i - Z_k|$, ($i, k=1, 2, \dots, n$); R 为局部密度的窗口半径,其舍取既要使包含在窗口内的投影点的平均个数不太少,避免滑动偏差太大,又不能使它随着*n*的增大而增加太高,研究表明, $\max(r_{ik}) + \frac{m}{2} \leq R \leq 2m$ 一般取为 $R=m$; $u(R-r_{ik})$ 为随 r_{ik} 增加而下降的单调密度函数,当 $R > r_{ik}$ 时其值为1,反之为0。

(3)优化投影指标函数。通过求解投影指标函数最大问题来解决洪水分类的模型优化问题:

$$\begin{aligned} \text{MAX}(Q_Z) &= S_Z D_Z \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^p \alpha_j^2 &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

当样本确定时, Q_α 只随投影方向 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$ 的变化而变化。根据相应的投影值 Z_i 达到洪水分类的目的,本研究采用人工鱼群算法来求解。

(4)分类。根据步骤3求得的最佳投影方向 α ,并得出相应的 Z_i 值。将各样本投影值 Z_i 进行比较, Z_i 越大表示水资源可持续利用情况越好,根据 Z_i 的一维散

点图即可判别水资源可持续利用情况。

2.3.2 人工鱼群算法优化的投影寻踪模型

人工鱼群算法 (Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)是李晓磊博士^[28]于2002年提出的一种仿生智能优化算法。研究发现,湖水中的鱼类觅食时聚集成群的现象,与数据样本的聚类有着惊人的相似之处。

本文将人工鱼群算法与投影寻踪进行有机结合,提出的一种聚类算法,新算法细节介绍如下。

(1)人工鱼的个体表示。为了更好地将人工鱼群算法应用于投影寻踪,本文摒弃了把全部聚类中心揉合在一起,转化为一个向量(或染色体)的做法,而是将人工鱼群进行分组,构成所谓的 Fish Group,每一个 Fish Group 由 c 个人工鱼组成,它们分头寻找个食物源,每一个 Fish Group 用矩阵 G 来表示

$$G=[f_1, f_2, \dots, f_c] \quad (7)$$

若干个 Fish Group 就构成了所谓的 Fish Swarm,用矩阵 S 表示

$$S=\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \dots \\ G_k \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1c} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{k1} & f_{k2} & \dots & f_{kc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $f_{ij}(i=1,2, \dots, k, j=1,2, \dots, c)$ 表示第 i 个 Fish Group 的第 j 只人工鱼。整个人工鱼群规模为 kc 个人工鱼组成, k 为 Fish Group 的个数。

(2)初始人工鱼群的产生。人工鱼群的初始化,采用随机方式和样本抽样相结合的方式。随机方式是在归一化样本空间中,按照均匀分布的方式随机地产生人工鱼,样本抽样是直接将部分样本拿出来作为人工鱼的个体。由样本产生部分人工鱼,有助于算法的快速收敛,由随机方式产生人工鱼,有助于全局搜索覆盖。

(3)人工鱼的觅食行为。设人工鱼当前的状态为 X_i ,在其感知范围内随机选一个状态 X_j ,如果 $X_j > X_i$,即 X_j 状态下食物浓度大于当前位置,则向该方向前进一步;反之,再重新随机选择状态 X_j ,判断是否满足前进条件;反复几次后,如果仍不满足前进条件,则执行随机游动行为。

(4)人工鱼的聚群行为。设人工鱼当前状态为 X_i ,探索当前邻域内(即 $d_{i,j} < Visible$)的伙伴数目 n_f 及中心位置 X_c ,通过设立拥挤度因子 δ 来实现,如果 $X_c/n_f > \delta X_i$,表明伙伴中心有较多的食物,并且没有来自同一 Fish Group 的人工鱼,则朝伙伴的中心位置方向前进一

步;否则执行觅食行为。

(5)人工鱼的追尾行为。设人工鱼当前状态为 X_i ,探索当前邻域内(即 $d_{i,j} < Visible$)的伙伴中 Z_j 为最大的伙伴 X_j ,如果 $X_j/n_f > \delta X_i$,表明伙伴中心有较多的食物,并且该伙伴与该人工鱼不属于同一 Fish Group,则朝伙伴 X_j 的方向前进一步;否则执行觅食行为。

2.3.3 结果分析

本文利用人工鱼群优化的投影寻踪模型^[29-30],结合水资源可持续利用评价指标,评价佛山市5个区2005~2011年水资源可持续利用状况,并进行比对分析。该模型的参数设置为:迭代次数为50,鱼群规模为30,人工鱼的感知范围为0.3,用于程度的判断门限值设为0.3,觅食行为的试探次数为20,窗口半径系数为0.1。据此,得出佛山市禅城区、南海区、高明区、三水区 and 顺德区2005~2011年各年的投影值,如图1所示。

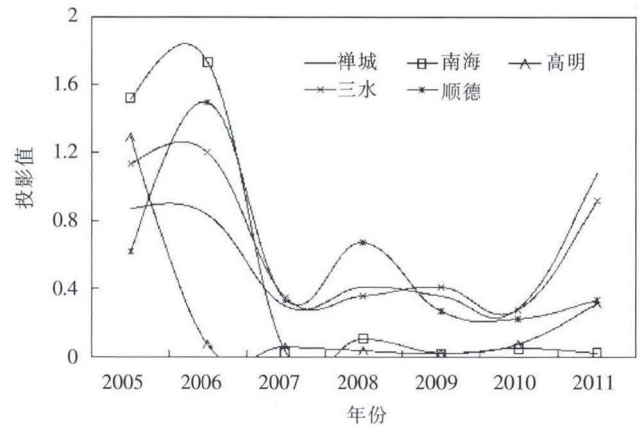


图1 佛山市各区2005~2011年各年的投影值
Fig.1 The projection values of the five districts in Foshan City from 2005 to 2011

图1表明在2005~2011年的时间跨度内,佛山市的高明区2005年的水资源可持续利用情况明显比其他年份好;而南海区、顺德区和三水区2006年的水资源可持续利用状况好于其他年份,禅城区2005年和2006年的水资源可持续利用情况较为接近。禅城2006年人均水资源量为260.45m³/人,其次是2005年人均水资源量为203.14m³/人,远高于其他年份。南海区在2006年的人均水资源量远大于其他年份,且2006年南海区产水系数最大,达50.14%。高明区在2005年的工业水使用率(30%)和生活水使用率(48.43%)远大于其余年份。三水区2006年的人均水

资源量最大,达 $2\,250.02\text{m}^3/\text{人}$,远大于其他年份,且2006年总降水量、水资源密度、产水系数均高于其他年份,因此三水区2006年的水资源可持续利用情况是最好的。2006年顺德区反应水资源条件的人均水资源量好于其他年份,同时产水系数和生活水使用率亦高于其他年份,因此顺德区2006年的水资源可持续利用状况较好。

佛山市各区整体上水资源可持续利用程度呈现减小的趋势。因为,反应各区水资源条件的人均水资源量呈现显著的减小趋势,年总降水量和水资源密度指标在波动变化特征的基础上有微弱的减小趋势;而产水系数指标各区各年大体相当。

本文对佛山市各区的水资源可持续利用情况进行综合对比分析,根据上述10项指标,计算2005~2011年各区各项指标的平均值,以10项指标的平均值为人工鱼群优化的投影寻踪模型的输入进行计算,结果如表2所示。尽管各区产水系数值接近(0.49~0.5之间),但由于其他指标差异较大,导致佛山市5个行政区的水资源可持续利用程度高低不一。

表2 各区的投影值及排序结果

Table 2 The projection values and sequencing results of five districts in Foshan city

行政区	禅城	南海	高明	三水	顺德
投影值	1.661	0.0572	0.0337	0.0717	0.1043
排序	1	4	5	3	2

表2表明,7年间禅城区的水资源可持续利用状况最好,顺德区和三水区分别排第二和第三,能满足目前的经济社会发展的水资源需求,高明区和南海区水资源可持续利用情况不及其他各区。具体分析来看:对于禅城区而言,尽管该区年总降水量远远小于其他各区($2.53\times 10^8\text{m}^3$),人均水资源量也远小于其他各区,仅为 $139.01\text{m}^3/\text{人}$,由于禅城区面积是佛山市5个行政区中面积最小的区域,因此子代指标值水资源密度值是最大的,达 $81.34\times 10^4\text{m}^3/\text{km}^2$,并且反映水资源综合效益指标值最高,且禅城区生活水使用率最大,因此整体上禅城区的水资源可持续利用情况较其他区好很多。

对于高明区而言,尽管高明区的人均水资源占有量最大,达 $2\,031.06\text{m}^3/\text{人}$,但该区的水资源密度较低,且反应水资源综合效益的2项指标和生活水使用率均最低,加上水资源利用效率亦不高,使得高明区的水

资源可持续利用情况较其他各区较低。对于南海区而言,尽管水资源现状条件中的年降水总量位居5区中的第一位,达 $17.63\times 10^8\text{m}^3$,但是人均水资源拥有量不够高仅高于顺德区,加上反应水资源利用压力的生活用水使用率指标值最低,仅为29.66%,使得南海区的水资源可持续利用情况不够好。为了缓解未来高明区和南海区水资源的压力,需要采取多方面的措施,保证水资源的可持续利用,如:大力倡导节约用水提高生活用水效率;强化水资源管理;进行产业结构布局调整,将高耗水产业从水资源不足地区搬离;由供水管理变为需水管理等。

3 结论

本文从不同角度、不同层面客观地反应佛山市各区的水资源状况,从水资源现状条件、水资源综合效益、水资源利用效率和水资源可持续利用压力4个方面选取10项指标,分析佛山市各区2005~2011年的水资源可持续利用状况,并综合对比分析各区之间的水资源可持续利用情况。结果表明:佛山市的高明区2005年的水资源可持续利用情况明显比其他年份好;而南海区、顺德区和三水区2006年的水资源可持续利用状况好于其他年份,禅城区2005年和2006年的水资源可持续利用情况较为接近。各区的水资源可持续利用情况为:禅城区的水资源可持续利用状况最好,顺德和三水区分别排第二和第三,而高明区和南海区的水资源可持续利用程度较其他几个区略显逊色,主要是因为,高明区的水资源综合效益较低,南海区的生活用水使用率指标值低下。因此,为使佛山市高明区和南海区实现水资源的可持续利用,要大力倡导节约用水提高生活用水效率,进行产业结构布局调整,将高耗水产业潜出水资源不足地区等。

参考文献:

- [1] <http://www.waterinfo.com.cn/xsgz/gndt/Document/67752/67752.html>
- [2] 牛文元.持续发展导论[M].北京:科学出版社,1994. (NIU Wen Yuan. Introduction of Sustainable Development [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese))
- [3] Beatrice Hedelin. Criteria for the assessment of sustainable water management [J]. Environmental Management, 2007,(39):151-163.
- [4] Antonio A.R. Ioris, Colin Hunter, Susan Walker. The development and application of water management sustainability indicators in Brazil and Scotland [J]. Journal of Environmental Management, 2008,88(4):1190-1201.

- [5] 黄林显,曹永强,赵娜,等. 基于系统动力学的山东省水资源可持续发展模拟[J]. 水力发电, 2008,34(6):1-4. (HUANG Linxian, CAO Yongqiang, ZHAO Na, et al. The sustainable development of water resources in Shandong based on system dynamics simulation [J]. Journal of Hydraulic Electrogenating, 2008,34(6):1-4. (in Chinese))
- [6] H.Kunstmann, G.Jung, S.Wagner, H.Clottey. Integration of atmospheric sciences and hydrology for the development of decision support systems in sustainable water management [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008,33(1-2):165-174.
- [7] K.Bithas. The sustainable residential water use: sustainability, efficiency and social equity: the European experience [J]. Ecological Economics, 2008,68(1-2):221-229.
- [8] 韩卫滨,韩霜景,胡乃利. 基于模糊识别的福建省水资源可持续利用评价 [J]. 中国农村水利水电, 2008,(2):67-76. (HAN Weibin, HAN Shuangjing, HU Naili. Based on the fuzzy recognition of evaluation of water resources sustainable utilization in Fujian province [J]. China's Rural Water Conservancy and Hydropower, 2008,2:67-76. (in Chinese))
- [9] Antonio A.R Joris, Colin Hunter, Susan Walker. The development and application of water management sustainability indicators in Brazil and Scotland [J]. Journal of Environmental Management, 2008,88(4):1190-1201.
- [10] Andrew Ako, Gloria Eneke Takem Eyong, George Elambo Nkeng. Water resources management and integrated water resources management in Cameroon [J]. Water Resource Manage, 2010,(24): 871-888.
- [11] 卢超,王蕾娜,张东山,等. 水资源承载力约束下小城镇经济发展的系统动力学仿真[J].资源科学, 2011,33(8): 1498-1504. (LU Chao, WANG Leina, ZHANG Dongshan, et al. System dynamics simulation of small town's economy under the constraints of water resources' carrying capacity [J]. Resources Science, 2011,33(8):1498-1504. (in Chinese))
- [12] 吕芳,张兰霞. 可变模糊评价法在沿海经济带水资源可持续性利用评价中的应用[J]. 水利经济, 2012,30(4):12-15. (LV Fang, ZHANG Lanxia. Variable fuzzy evaluation method to assess the sustainable utilization of water resources in the coastal economic belt [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012,30 (4):12-15. (in Chinese))
- [13] 邹积君,刘志文,张小芳,等. 区域水资源可持续利用指标体系的设计及评价方法研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003,17(1):37-40. (ZOU Jijun, LIU Zhiwen, ZHANG Xiaofang, et al. Evaluation index system and sustainable utilization of regional water resources [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003,17(1): 37-40. (in Chinese))
- [14] Satty, T.L, L.G. Vargas. Estimating technological coefficients by the analytic hierarchy process[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 1979,13:333-336.
- [15] Lai, Young -Jou, Hwang, Ching -Lai. Fuzzy Multiply Objective Decision Making [M]. Springer-Verlag, 1994.
- [16] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉:华中工学院出版社, 1985:104-105. (DENG Julong. Grey Control System [M]. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1985:104-105. (in Chinese))
- [17] 蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (CAI Wen, YANG Chunyan, LIN Weichu. The Method of Extension Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [18] Pearson. National Life from the Standpoint of Science (2nd edition) [M]. Camvridge University Press, 1901:35-36.
- [19] Ali Magheri, Peder Hjorth. A Framework for process indicators to monitor for sustainable development: practice to an urban water system [J]. Environment, Development and Sustainability, 2007,(9): 143-161.
- [20] Croke B.F.W., Ticehurst J.L., Letcher R.A., et al. Integrated assessment of water resources: Australian experiences [J]. Water Resources Management, 2007,21:351-373.
- [21] 程瑶,孙倩,马建琴,等. 区域水资源可持续利用系统评价的模糊双向传播神经网络模型[J]. 水文, 2008,28(1):28-31. (CHENG Yao, SUN Qian, MA Jianqin, et al. A fuzzy counter-propagation neural network model to assess local sustainable water resources system[J]. Journal of China hydrology, 2008,28(1):28-31. (in Chinese))
- [22] 李丽,任永泰. 区域水资源可持续利用综合评价模型的构建及其应用—以哈尔滨市为例[J]. 数学的实践与认识, 2010,40(19):45-51. (LI Li, REN Yongtai. Comprehensive evaluation model of regional water resources sustainable utilization of the building and its application to Harbin city as an example [J]. The Practice of Mathematics and Understanding, 2010,40(19):45-51. (in Chinese))
- [23] 何君,石城,杨思波,等. 基于因子分析和AHP的水资源可持续性综合评价方法[J]. 南水北调与水利科技, 2011,9(1):75-79. (HE Jun, SHI Cheng, YANG Sibao, et al. The sustainability of water resources based on factor analysis and AHP comprehensive evaluation method [J]. Journal of the South-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2011,9(1):75-79. (in Chinese))
- [24] 徐建新,樊华,胡笑涛. 熵权与改进 TOPSIS 结合模型在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2012,(2):30-37. (XU Jianxin, FAN Hua, HU Xiaotao. Entropy weight combined with improved TOPSIS model in the application of the evaluation of groundwater resources carrying capacity [J]. China's Rural Water Conservancy and Hydropower, 2012,(2):30-37. (in Chinese))
- [25] 程莉,汪德耀. 苏州市水资源承载力研究[J]. 水文, 2010,30(1):47-50. (CHENG Li, WANG Deguan. Modeling of water resources carrying capacity in Suzhou city [J]. Journal of China Hydrology, 2010,30(1):47-50. (in Chinese))
- [26] 刘恒,耿雷华,陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立 [J]. 水科学进展, 2003,14(3):265-270. (LIU Heng, GENG Leihua, CHEN Xiaoyan. Indicator for evaluation sustainable utilization of regional water resources [J]. Advance in Water Science, 2003,14 (3):265-270. (in Chinese))
- [27] Friedman J H, Turkey J W A. Projection pursuit algorithm for

- exploratory data analysis [J]. IEEE Trans on Computer, 1974,23 (9):881-890.
- [28] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. (LI Xiaolei. A New Intelligent Optimization Method of Artificial Fish Swarm Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese))
- [29] 汪丽娜, 陈晓宏, 李粤安. 投影寻踪和人工鱼群算法的洪水分类[J]. 人民长江, 2008,39(24):34-37. (WANG Lina, CHEN Xiaohong, LI Yuean. Flood classification of projection pursuit and artificial fish swarm algorithm [J]. Yangtze River, 2008,39(24):34-37. (in Chinese))
- [30] 丁红, 刘东, 李陶. 基于改进人工鱼群算法的三江平原投影寻踪旱情评价[J]. 农业工程学报, 2010,26(12):84-88. (DING Hong, LIU Dong, LI Tao. Projection pursuit model for evaluating drought based on improved artificial fish swarm algorithm of Sanjiang plain [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26 (12):84-88. (in Chinese))

Evaluation Method for Sustainable Water Resources Utilization in Foshan

KUANG Yuanhua^{1,2}, WANG Lina³, HU Jianwen⁴, CHEN Xiaohong^{1,5}, LIU Bingjun^{1,5}

(1. Center of Water Resource and Environment Research, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Foshan Water Authorities, Foshan 528000, China; 3. School of Geograph, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 4. Hydrology Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, China; 5. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510275, China)

Abstract: According to the water resource conditions and social environment background of Foshan City, this paper selected 10 indexes from 4 aspects, i.e. the present situation of water resources condition, the comprehensive benefits of water resources, water resources utilization efficiency and sustainable utilization of water resources. The research focused on the evaluation of sustainable water resources utilization in Foshan by projection pursuit model and artificial fish swarm algorithm. Research results show that the evaluation result accords with the actual situation of water resources in Foshan City. This paper put forward the corresponding opinion to relieve future water resources pressure.

Key words: water resources; sustainable; index; method

(上接第 18 页)

Research Overview of Early Warning of Groundwater Pollution

GUO Yongli¹, JIANG Guanghui¹, GUO Fang¹, TENG Yanguo²

(1. Karst Dynamics Laboratory /Institute of Karst Geology, CAGS, MLR, Guilin 541004, China;
2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the further study on groundwater pollution, research about early warning of groundwater has begun. This paper described the progressive correlation among groundwater vulnerability, risk assessment of groundwater pollution and early warning of groundwater pollution. The classification methods of early warning of groundwater pollution can be summarized into two categories, i.e. methods of early warning of groundwater pollution based on the setting threshold and the established criteria, on the basis of summarizing the research theory and methods of groundwater vulnerability and risk assessment of groundwater at home and abroad. In the end, this paper pointed out that the significance of early warning of groundwater pollution in the sustainable development of groundwater resource, and the research method and theoretical study of early warning of groundwater pollution should be improved in crossing of multidisciplinary, coupling the advanced technology, and the accuracy of data.

Key words: early warning of groundwater pollution; vulnerability of groundwater; risk of groundwater pollution; classification