

基于分形理论的区域水资源系统脆弱性评价

陈康宁,董增川,崔志清

(*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*)

摘要 根据资料获取的难易程度以及指标的科学性、可比性、全面性和动态性等原则,构建了区域水资源系统脆弱性评价指标体系,并对河北省水资源系统的脆弱性进行了评价。结果表明,在实施南水北调工程、强化本地节水措施力度、努力保证生态环境用水的条件下,2000~2030 年河北省水资源系统的脆弱性程度将逐步改善。

关键词 河北省 水资源系统 分形理论 脆弱性评价

中图分类号 :TV213 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2008)03-0024-03

Evaluation of vulnerability of regional water resources system based on the fractal theory

CHEN Kang-ning, DONG Zeng-chuan, CUI Zhi-qing

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract To address the difficulties in obtaining data and to act on the principle that a data indexing system should be scientific, comparable, comprehensive and dynamic, an index system for the evaluation of vulnerability of regional water resources was developed and applied in Hebei Province. The results show that water resources in Hebei Province will become gradually less vulnerable from 2000 to 2030, when the South to North Water Transfer Project is in operation, water-saving measures are taken and the ecological water demand is satisfied.

Key words Hebei Province ; water resources system ; fractal theory ; vulnerability evaluation

区域水资源系统是由相互联系、相互制约、相互作用的若干水资源工程单元和管理技术单元组成的有机体^[1]。根据自组织理论,区域水资源系统满足自组织系统产生的基本条件^[2]。首先,区域水资源系统是开放的大系统^[3],是与生态环境、社会经济相耦合的水资源生态经济复合系统,是自然资源与人工系统相结合的复合系统,它与所处环境之间存在物质流、能量流、信息流、价值流的相互交换;其次,区域水资源系统又是复杂的非线性系统,其内部子系统或元素数量巨大、种类繁多^[4],各供水单元与用水部门之间存在着相互制约、相互推动的非线性关系;再次,在外部物质、能量、信息输入区域水资源系统的情况下,区域水资源系统内部功能会越来越完

善,并且呈现出各个子系统或元素之间相互配合地共同完成水资源开发利用目标的状态,即系统呈现出宏观有序的远离非平衡态的状态,走上自组织演化的有序道路;最后,区域水资源系统在外界影响下会产生无数个“小涨落”,当涨落影响达到一定程度时,系统就会产生“巨涨落”,从当前的状态跃到更有序的状态^[3],从而不断地向前发展。对于这样一个系统而言,各个子系统或元素之间的竞争和合作构成了系统演化的动力,这种竞争和合作的发展决定了系统的演化方向。按照协同学的观点,系统从无序到有序表示系统已逐渐远离平衡态,而向着更加复杂和功能多样化的方向发展^[5]。因此,把握好区域水资源系统整体演化方向,正确地判断系统运动的

宏观模式,对于水资源的合理开发、利用和保护,具有十分重要的意义。本文首先构建了区域水资源系统脆弱性评价体系,然后运用分形理论找出了反映系统整体演化趋势的序参量,最后以河北省水资源系统为例,对区域水资源系统的脆弱性进行了评价。

1 脆弱性评价指标体系的构建

区域水资源系统的脆弱性主要表现在系统各组成部分的发展模式难以为继以及系统各组成部分之间的联系容易削弱上,从长远来看,系统难以维持正常的功能和稳定的效益。区域水资源系统脆弱性评价是对区域水资源系统的综合评价,其主要内容涉及水资源的供给、需求和管理等^[6]。刘绿柳^[7]认为,在水资源丰富、水循环更新快、产业结构合理、管理机制完善、经济技术水平高、开发利用方式得当的情况下,水资源系统较不脆弱,则有利于可持续发展。要正确合理地评价区域水资源系统的脆弱性,必须建立具体的评价量化指标体系。为此,本文根据资料获取的难易程度以及指标的科学性、可比性、全面性和动态性等原则,构建了区域水资源系统脆弱性评价指标体系。该评价指标体系由目标层、准则层和指标层构成,其中指标层选取了可分别反映水资源条件、水资源开发利用效率、生态环境状况和水资源合理配置状况的 14 个代表性指标,如图 1 所示。

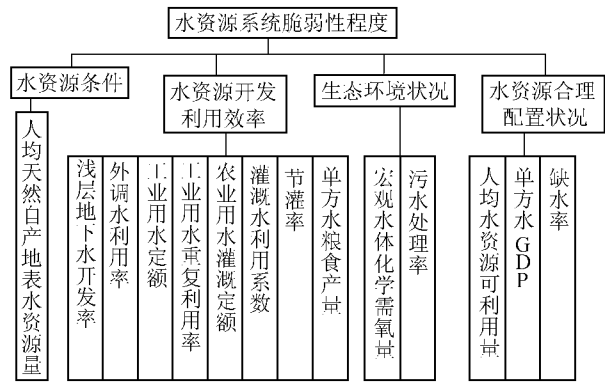


图 1 脆弱性评价指标体系

2 分形理论的应用

法尔科内对分形集合 F 作出了如下描述^[8]：
 ① F 具有精细的结构,即在任意小的尺度之下,它总具有复杂的细节；
 ② F 是如此的不规则,以至它的整体和局部都不能用传统的几何语言来描述；
 ③ F 通常具有某种自相似性,这种自相似性可以是近似的,也可以是统计意义上的；
 ④ F 在某种意义下的分形维数通常都大于它的拓扑维数；
 ⑤ 在多数情形下, F 可以采用非常简单的方法来定义,也可以通过递归过程产生。目前,一般采用这种描述来判断对象是否分形。

描述分形的特征量是分维数,而分维数的定义有多种,其中 Hausdorff 维数适用于任意集,其定义是若 U 是 n 维欧氏空间 R^n 的任意非空子集,则称 $|U| = \sup \{ |x - y| : \forall x, y \in U \}$ 是集合 U 的直径。若 $\{U_i\}$ 是直径至多为 δ 的且覆盖 F 的一个可数(或有限)集族,即 $F \subseteq \bigcup_i U_i$,则称 $\{U_i\}$ 是 F 的一个 δ -覆盖。假设 F 为 R^n 的任意子集,即 $F \subset R^n$, D 是一个非负实数,对任意 $\delta > 0$,定义

$$H_\delta^D(F) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^k |U_i|^D : \{U_i\} \text{ 为 } F \text{ 的 } \delta\text{-覆盖}, k \text{ 是 } \{U_i\} \text{ 的元素的总个数} \right\} \quad (1)$$

考虑所有直径不超过 δ 的 F 的覆盖,并试图使这些直径的 D 次幂的和达到最小。当 δ 减少时,能覆盖 F 的集类的个数也相应的减少;当 $\delta \rightarrow 0$ 时, $H_\delta^D(F)$ 趋于一极限,集合 F 的 Hausdorff D 维测度

$$H^D(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^D(F) \quad (2)$$

假设已建立的区域水资源脆弱性评价指标体系的每一个指标 g_{ij} 都可看作某一个小球的半径,14 个小球可以装在一个下方有半径为 r_n 的圆孔的容器内,若所有半径不大于 r_n 的小球在一定条件下一定能够通过圆孔漏下,那么通过圆孔漏下的小球个数

$$N(r_n) = \sum_{i,j} H(r_n - g_{ij}) \quad (3)$$

其中 $H(x)$ 是 Heaviside 函数,

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (4)$$

在双对数坐标中,拟合的 $\ln N(r_n) - \ln r_n$ 直线的斜率即为分维数。不难发现,对于一组给定的 r_n ,假设有一组 $N(r_n)$ 与其对应呈幂函数关系,则将自变量与因变量分别取对数再取微分,可得

$$\begin{aligned} d(\ln N(r_n)) &= dN(r_n)/N(r_n) \\ d(\ln r_n) &= dr_n/r_n \end{aligned}$$

由此可知,对数的微分具有变量微分与原量比值的含义,若

$$D = dN(r_n)/d(\ln r_n)$$

即幂函数的相对变化与变量的相对变化呈线性关系,从物理意义上讲,系统具有自相似性特征。所谓自相似性,即系统呈现有序结构。而表征有序结构的变量称为序参量^[9]。协同学理论认为,不论什么系统,如果某个参量在系统演化过程中从无到有地发生变化,并且能够指示新结构的形成过程,反映新结构的有序程度,则这个参量就是序参量^[5]。比较脆弱性评价指标体系可以发现:在水资源系统脆弱性较为明显的情况下,有较多的小球半径较小,难以留在容器内;反之,有较多的小球半径较大,难以通

过半径较小的圆孔。由于水资源系统符合自组织系统的基本条件,如果能够找到支配水资源系统演化方向的序参量,就有可能把握住区域水资源系统内各子系统之间整体运动的宏观模式。分析 $\ln N(r_n)$ 与 $\ln r_n$ 的拟合直线可知,若直线的斜率较大,则该区域水资源系统较不脆弱。因此,本文将反映区域水资源系统脆弱性程度的分维数作为度量区域水资源系统自组织演化复杂性的序参量。

3 区域水资源系统脆弱性评价

以河北省为例,根据相关资料^[10],对区域水资源系统脆弱性进行评价。

3.1 评价指标的标准化

对于正向指标,即越大越好的指标,如工业用水重复利用率、单方水粮食产量、污水处理率和人均水资源可利用量等,利用式(5)进行标准化处理。

$$s_{ij} = \frac{g_{ij}}{g_{\max,j}} \times 100 \tag{5}$$

对于逆向指标,即越小越好的指标,如地下水开采率和宏观水体 COD 量等,利用式(6)进行标准化处理。

$$s'_{ij} = \frac{g_{\min,j}}{g_{ij}} \times 100 \tag{6}$$

式中: g_{ij} 为第*i*水平年第*j*个指标的值; $g_{\max,j}$ 、 $g_{\min,j}$ 分别为第*j*个指标在各个水平年间的最大值和最小值。

通过计算,得到了各水平年评价指标的标准化结果,如表 1 所示。

3.2 分维数的计算

根据评价指标标准化结果,得到河北省不同水平年水资源系统脆弱性 $\ln N(r_n)$ 与 $\ln r_n$ 的对应关系,如表 2 所示。

利用最小二乘法进行直线拟合,得到 2000 年、2010 年、2020 年和 2030 年不同水平年的直线斜率,分别为 0.887、2.234、4.437、5.793。

3.3 脆弱性评价结果

通过直线拟合得到的直线斜率即为表征区域水

资源系统脆弱性程度的量化指标,但采用此量化指标直观上较难判断脆弱性程度,需对该结果进行分级处理。由于目前还没有这种分级的统一标准可以采用,本文结合区域实际情况并参考文献[7],将河北省水资源系统脆弱性程度(即脆弱度)划分为 5 个等级,如表 3 所示。

表 2 $\ln N(r_n)$ 与 $\ln r_n$ 的对应关系

r_n	$\ln r_n$	$\ln N(r_n)$			
		2000 年	2010 年	2020 年	2030 年
15	2.708	0.693			
20	2.996	1.099			
25	3.219	1.386			
30	3.401	1.386			
35	3.555	1.386	0.000		
40	3.689	1.386	0.693		
45	3.807	1.386	0.693		
50	3.912	1.609	0.693		
55	4.007	1.609	0.693		
60	4.094	1.609	0.693		
65	4.174	1.609	0.693	0.693	
70	4.248	1.609	1.386	0.693	0.000
75	4.317	2.079	1.609	0.693	0.000
80	4.382	2.197	1.792	1.386	0.000
85	4.443	2.398	1.792	1.386	0.000
90	4.500	2.565	2.197	1.609	0.693
95	4.554	2.565	2.398	2.079	0.693
100	4.605	2.639	2.639	2.639	2.639

表 3 脆弱度等级划分

脆弱度	极重度脆弱	重度脆弱	中度脆弱	轻度脆弱	不脆弱
指标范围	< 1.5	1.5 ~ 4.0	4.0 ~ 5.5	5.5 ~ 7.0	> 7.0

从表 3 可以看出:2000 年河北省水资源系统脆弱度呈极重度脆弱状况;2010~2020 年,情况有所缓和,分别呈重度脆弱和中度脆弱状况;到 2030 年,有望达到轻度脆弱状况。总体来看,2000 年以后,河北省水资源系统的脆弱度将逐渐向良性方向发展,但这有赖于南水北调工程、强化本地节水、努力保证生态环境用水等措施的有效实施。

a. 构筑全新的水资源配置格局,解决区域供水

表 1 评价指标标准化结果

水平年	s_{i1}	s'_{i2}	s_{i3}	s'_{i4}	s_{i5}	s'_{i6}	s_{i7}	s_{i8}	s_{i9}	s'_{i10}	s_{i11}	s_{i12}	s_{i13}	s'_{i14}
2000	100.00	71.00	14.21	19.08	83.15	83.97	87.50	45.45	73.68	75.25	22.60	85.87	11.75	75.00
2010	93.59	96.99	67.37	38.16	91.01	87.59	87.50	70.71	89.47	100.00	67.60	96.80	32.87	79.00
2020	88.46	96.34	75.79	64.44	95.51	91.34	100.00	93.94	100.00	78.76	94.20	97.60	62.47	98.00
2030	89.16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	66.13	100.00	100.00	100.00	100.00

注: s_{i1} 为第*i*水平年人均天然自产地表水资源量的标准化结果; s'_{i2} 为第*i*水平年浅层地下水开发率的标准化结果; s_{i3} 为第*i*水平年外调水利用率的标准化结果; s'_{i4} 为第*i*水平年工业用水定额的标准化结果; s_{i5} 为第*i*水平年工业用水重复利用率的标准化结果; s'_{i6} 为第*i*水平年农业用水灌溉定额的标准化结果; s_{i7} 为第*i*水平年灌溉水利用系数的标准化结果; s_{i8} 为第*i*水平年节灌率的标准化结果; s_{i9} 为第*i*水平年单方水粮食产量的标准化结果; s'_{i10} 为第*i*水平年宏观水体 COD 的标准化结果; s_{i11} 为第*i*水平年污水处理率的标准化结果; s_{i12} 为第*i*水平年人均水资源可利用量的标准化结果; s_{i13} 为第*i*水平年单方水 GDP 的标准化结果; s'_{i14} 为第*i*水平年缺水率的标准化结果。

(下转第 34 页)