

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.04.001

基于 DPSIR 概念模型的水资源系统脆弱性分析

董四方¹,董增川¹,陈康宁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.中国水利水电科学研究院遥感技术应用中心 北京 100044)

摘要 :从水资源复杂系统角度结合 DPSIR 概念模型 构建了水资源系统脆弱性评价指标体系。利用大样本数据、投影寻踪、粒子群算法、插值型曲线 建立了基于粒子群投影寻踪插值的水资源系统脆弱性评价模型。结合河北省南水北调受水区水资源系统的实例 从驱动力-压力-状态-影响-响应等 5 个方面计算分析了该系统的脆弱性。结果表明 以资源型缺水为主导的水资源基础条件薄弱已成为受水区水资源系统脆弱性的制约因素 且在未来很长一段时间内难以改变。

关键词 水资源系统 ;脆弱性 ;DPSIR 模型 ;投影寻踪 ;南水北调工程

中图分类号 :TV213.9 ,O242.1 文献标识码 :A 文章编号 :1004-6933(2010)04-0001-03

Analysis of water resources system vulnerability based on DPSIR conceptual model

DONG Si-fang¹ , DONG Zeng-chuan¹ , CHEN Kang-ning²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;2. Remote Sensing Technology Application Centre , China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100044 , China)

Abstract : In view of the complexity of a water resources system and adopting the DPSIR conceptual model as a reference , an assessment index system for water resources system vulnerability was constructed . Using a large amount of sample data and an interpolation curve , an assessment model of water resources system vulnerability based on projection pursuit interpolation with particle swarm optimization was built . With the water-receiving region of the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP) in Hebei Province as an example , the system vulnerability was analyzed in terms of driving forces , pressures , states , impacts , and responses . The results indicated that water resources shortage has become the bottleneck factor of water resources system vulnerability , and would be difficult to change over a long period .

Key words : water resources system ; vulnerability ; DPSIR model ; projection pursuit ; South-to-North Water Diversion Project (SNWDP)

水是基础性的自然资源和战略性的经济资源 , 人类的生 产、生活以及所栖息的环境都与水资源息息相关。随着社会的发展和技术的进步 ,许多地区水资源开发利用程度不断提高 ,自然-人工二元模式下的水资源演化机理日趋复杂^[1] ,加之长距离、跨流域调水工程的大量修建 ,进一步增加了水资源系统的复杂性。从系统角度、以系统方法研究水资源问题 ,已成为国内外专家和学者的共识^[2]。

1 水资源系统的脆弱性

水资源系统的脆弱性应该是其本质特征的综合

表现 ,是自然属性和人类活动(主要以水事活动为主)共同作用的结果。水资源是一个复杂系统 ,受内、外干扰因素的作用后 ,使得某一部分(系统)崩溃 ,由于子系统脆性的关联性 ,由此带来的结果直接或间接地影响其他部分(系统) ,从而引发了连锁反应 ,给系统带来突发的、沉重的打击 ,甚至导致系统的崩溃 ,从而给经济、社会、生态带来严重的毁坏^[3]。

2 水资源系统脆弱性评价的指标体系构建

2.1 评价指标的选取

为了能够定量分析水资源系统的脆弱性 ,本文

结合 DPSIR(drives-pressures-states-impacts-responses ,) 概念模型^[4] ,对水资源系统脆弱性进行描述。基于 DPSIR 的水资源系统广义脆弱性指标体系由驱动力指标、压力指标、状态指标、影响指标和响应指标等 5 部分构成 ,它将水资源系统脆弱性的各个方面有机地结合在一起。驱动力指标描述推动水资源发展变化的因素 ,主要是水资源自然丰枯变化、气候变化、社会经济发展方面的指标 ;压力指标主要是用来描述社会经济系统各部门和生态系统对水资源的需求 ,以及相应对水资源的副作用 ,如污水排放、点源污染等 ;状态指标用来描述水资源系统满足国民经济与生活需水、生态环境需水的能力以及水环境状况 ;影响指标用来描述自然、人为因素等胁迫下水资源脆弱性对社会经济发展以及生态系统产生的影响 ;响应指标描述针对水资源脆弱性所采取的管理措施与工程措施 ,如节水、水利投资、水污染防治等。

表 1 基于 DPSIR 的水资源系统脆弱性指标体系及分级标准

DPSIR 要素	指标	标识	I	II	III	IV
驱动力(D)	产水系数	D1	≤0.10	0.10 ~ 0.40	0.40 ~ 0.65	≥0.65
	干旱指数	D2	≥4	4 ~ 2	2 ~ 1	≤1
	人口密度(人 · km ⁻²)	D3	≥300	300 ~ 200	200 ~ 100	≤100
	城市化率/ %	D4	≤50	50 ~ 60	60 ~ 70	≥70
	人均 GDP/万元	D5	≤3	3 ~ 5	5 ~ 7	≥7
压力(P)	万元 GDP 用水量/ m ³	P1	≥465	465 ~ 140	140 ~ 35	≤35
	万元 GDP 废水排放量/ m ³	P2	≥60	60 ~ 30	30 ~ 15	≤15
	需水量模数(10 ⁴ m ³ · km ⁻²)	P3	≥18	18 ~ 7	7 ~ 1	≤1
	水旱灾害受灾率/ %	P4	≥30	30 ~ 15	15 ~ 5	≤5
	土壤侵蚀模数(t · km ⁻² · a ⁻¹)	P5	≥15 000	15 000 ~ 5 000	5 000 ~ 2 500	≤2 500
	荒漠化程度/ %	P6	≥20	20 ~ 10	10 ~ 5	≤5
状态(S)	人均水资源量/ m ³	S1	≤500	500 ~ 1 000	1 000 ~ 1 700	≥1 700
	公顷水资源量/ m ³	S2	≤22 500	22 500 ~ 75 000	75 000 ~ 108 000	≥108 000
	地表水资源开发利用率/ %	S3	≥40	40 ~ 20	20 ~ 10	≤10
	地下水开发利用程度/ %	S4	≥100	100 ~ 60	60 ~ 30	≤30
	工业用水重复利用率/ %	S5	≤60	60 ~ 80	80 ~ 90	≥90
	灌溉水利用系数	S6	≤0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	≥0.8
	生态用水的比例/ %	S7	≤2	2 ~ 3	3 ~ 5	≥5
	Ⅲ类以下水质标准河段所占比例/ %	S8	≥50	50 ~ 30	30 ~ 10	≤10
影响(I)	洪涝经济损失占当年 GDP 的比例/ %	I1	≥2	2 ~ 1	1 ~ 0.25	≤0.25
	水环境污染损失占当年 GDP 的比例/ %	I2	≥2	2 ~ 1	1 ~ 0.25	≤0.25
	工业用水缺水率/ %	I3	≥30	30 ~ 10	10 ~ 5	≤5
	生活用水缺水率/ %	I4	≥15	15 ~ 5	5 ~ 0	0
	生态用水缺水率/ %	I5	≥15	15 ~ 5	5 ~ 0	0
	农业用水缺水率/ %	I6	≥30	30 ~ 10	10 ~ 5	≤5
	饮用水安全人口比例/ %	I7	≤60	60 ~ 75	75 ~ 95	≥95
	森林覆盖率/ %	I8	≤30	30 ~ 40	40 ~ 60	≥60
	水土流失率/ %	I9	≥50	50 ~ 30	30 ~ 10	≤10
	节灌率/ %	R1	≤10	10 ~ 30	30 ~ 60	≥60
响应(R)	污水处理率/ %	R2	≤50	50 ~ 70	70 ~ 90	≥90
	污水处理回用率/ %	R3	≤20	20 ~ 30	30 ~ 55	≥55
	水土流失治理率/ %	R4	≤40	40 ~ 60	60 ~ 90	≥90
	水费支出占家庭可支配收入的比例/ %	R5	≤1	1 ~ 2	2 ~ 3	≥3
	企业水费占生产总值的比例/ %	R6	≤1	1 ~ 2	2 ~ 5	≥5
	环境保护投资占 GDP 的比例/ %	R7	≤1	1 ~ 2	2 ~ 3	≥3
	水工程投资占 GDP 的比例/ %	R8	≤1	1 ~ 2	2 ~ 3	≥3

综合考虑指标体系确定的目的性、系统性、科学性、可比性和可操作性原则 ,结合我国的实际情况及数据的可获得性 ,构建基于 DPSIR 的水资源系统广义脆弱性指标体系 ,见表 1。

2.2 评价标准的确定

水资源系统脆弱性评价指标确定后 ,就需要明确各项指标的评价标准 ,才能对水资源系统的脆弱性状况进行评价。目前学术界尚没有统一认可的水资源系统脆弱性标准 ,笔者按照可持续发展和水资源脆弱性的内涵和要求 ,建立起一套衡量水资源脆弱性状况的尺度和标准^[5]。

将水资源脆弱性状态分 4 个等级 ,表示如下 :

$$V = \{ \text{I 级(脆弱性强) , II 级(脆弱性较强) , III 级(脆弱性一般) , IV 级(脆弱性弱)} \}$$

基于 DPSIR 的水资源系统广义脆弱性指标体系及分级标准如表 1 所示。

3 水资源系统脆弱性评价方法

投影寻踪法作为处理高维数据具有可直接由样本数据驱动来探索数据分析方法的优点,即在评价过程中不必预先给定评价指标的权重可以自行搜索产生,但传统的投影寻踪方法,对小样本易产生误差,另一方面对于多元复杂数据,往往难以找到其拓扑结构的最优投影方向。鉴于此,本研究利用大样本数据、投影寻踪、遗传算法、插值型曲线,建立了新的评价模型——粒子群投影寻踪插值模型,直接由样本数据驱动,客观决定各评价指标权重,将多因子的评价归结为单目标决策,以定量数值表示评定结果,从而能较完整地反映水资源系统的脆弱性。

设 p 为水资源脆弱性评价指标数目, n 为样本数目,评价指标集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_p\}$ ($P = 1 \sim 5$), $x_{ij}(i)$ 及 $x_{ij}^*(i = 1 \sim n, j = 1 \sim p)$ 为水资源脆弱性评价标准表产生的第 i 个样本的标准等级及评价指标值,为消除各指标的纲影响,对各评价指标作以下处理:

若指标 $V_j \in V$ 越大,水资源系统脆弱性呈越弱型,则

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

若指标 $V_j \in V$ 越大,水资源系统脆弱性呈越强型,则

$$x_{ij} = (x_{\max j} - x_{ij})(x_{\max j} - x_{\min j}) \tag{2}$$

式中: $x_{\min j}$ 、 $x_{\max j}$ 分别为水资源系统脆弱性评价的第 j 指标中最小值和最大值。

根据投影寻踪法的原理,将标准化后的 p 维数据 $\{x_{ij}\}$ 综合成以 $a = (a(1), a(2), \dots, a(p))$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$:

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x_{ij} \tag{3}$$

式中: a 为单位长度,即满足 $\sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$ 。

在综合投影时,要求投影值 $z(i)$ 应尽可能大地提取 $\{x_{ij}\}$ 中的变异信息,即 $z(i)$ 的标准差 S_z 尽可能大,同时要求 $z(i)$ 的局部密度 D_z 尽可能大。这就要求选择的最佳投影方向 a^* 最大可能暴露高维数据某类特征结构,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。建立指标函数:

表 2 受水区 2000 年及 2030 年指标特征值

年份	D1	D2	D3	D4	D5	P1	P2	P3	P4	P5	P6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
2000 年	0.17	1.71	553	30	7 149	421	36.3	29	34.2	4 792	14.5	184.5	2 061	71.7	165.2	74.9	0.69	0.1	93.4
2030 年	0.17	1.71	620	64	54 277	58	8.5	19	34.2	4 792	14.5	164.6	2 061	65.6	92.1	91.0	0.8	2.7	20.0
年份	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8		
2000 年	0.83	0.45	5.3	0	27.7	30.6	82.6	19.48	33.5	35.5	37.9	10	39.4	1.2	1.17	1	0.97		
2030 年	0.83	0.45	4.8	0	5.7	16.3	94.6	32.00	28.5	99.0	86.0	54	60.0	1.8	4.20	2	1.50		

$$\begin{cases} \max f(a) = S_z D_z \\ \text{s.t.} \sum a^2(j) = 1, a(j) \in [0, 1] \end{cases} \tag{4}$$

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。

$$S_z = \left(\sum_{i=1}^n (z(i) - \bar{z})^2 / (n - 1) \right)^{0.5} \tag{5}$$

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

式中: $\bar{z}$ 为 $z(i)$, $i = 1 \sim n$ 的均值; R 为局部密度的窗口半径,一般取 $R = 0.1 S_z$; 距离 $r_{ij} = |z(i) - z(j)|$; $u(t)$ 为单位阶跃函数,当 $t \geq 0$ 时,其值取 1,当 $t < 0$ 时,其值取 0。

此为一个以 $\{a(j) | j = 1 \sim p\}$ 为优化变量的复杂的非线性优化问题,采用粒子群优化算法进行优化求解^[6]。将求得的最佳投影方向 a^* 代入公式(3),得第 i 个样本投影值的计算值 $z^*(i)$ 。最后根据 $z^*(i)$ 与 $y(i)$ 的散点分布图,利用线性内插方法建立水资源系统脆弱性等级评价的分段插值数学模型。

4 实例应用

河北省属于典型的资源型缺水省份,多年平均水资源量 205 亿 m^3 ,人均 304 m^3 ,仅为全国均值的 1/7,不及国际上公认的人均 1 000 m^3 缺水标准的 1/3。近年来,随着经济的快速发展、人口的增加,水资源供需矛盾日益突出,南水北调工程的实施一定程度上能够缓解这种矛盾。本文以河北省南水北调工程受水区水资源系统为研究对象进行水资源系统脆弱性分析。

根据表 1 所列的基于 DPSIR 的水资源系统脆弱性评价指标体系,从河北省经济统计年鉴、河北省水资源公报、河北省环境状况公报以及《河北省水资源综合规划报告》、《河北省南水北调城市水资源规划报告》、《河北省供水区缺水分析及对策》等相关报告获得驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个部分的各个指标数值,规划水平年指标部分参照《河北省水资源综合规划报告》,现状值(2000 年)及规划水平年(2030 年)指标特征值见表 2。按照各指标特点分别按公式(1)及公式(2)进行标准化。

用所述方法求解脆弱性因子,对受水区进行水资源系统脆弱性评价,其结果见表 3。

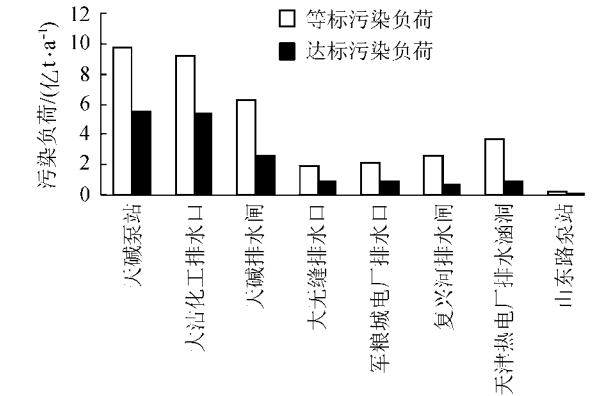


图 2 海河干流入河排污口污染负荷

排污口达标污染负荷比等标污染负荷小,是因为达标污染负荷是将超标最大指标稀释到评价标准浓度时所需要的洁净水的量,而等标污染负荷是将所有超标指标稀释到评价标准浓度时所需要的洁净水的量的总和。由表 2 可以看出,海河干流 8 个排污口达标污染负荷约为 16.8 亿 t/a,即每年需要 16.8 亿 t 洁净水来稀释各排污口排放污水才能达到排放要求,也说明海河所受污染比较严重。

表 2 入河排污口污染负荷统计 万 t/a

排污口名称	等标污染负荷	达标污染负荷
天碱泵站	97112	54896
大沽化工排水口	92400	54259
天碱排水闸	62696	25380
大无缝排水口	19621	8520
军粮城电厂排水口	21643	8555
复兴河排水闸	25826	6511
天津热电厂排水涵洞	36988	8768
山东路泵站	2061	780
合 计	358347	167669

3 结 语

- a. 所调查的海河干流 8 个入河排污口均存在超标排放问题,排污类型为工业废水和混合污水,以有机污染、富营养化污染和化工污染为主要特征。
- b. 8 个排污口中,天碱泵站、大沽化工排水口、天碱排水闸为海河干流上的主要排污口,分别占海河干流等标污染负荷总量的 27%、26%和 17.4%。
- c. 8 个排污口达标污染总负荷为 16.8 亿 t/a,即每年需要 16.8 亿 t 洁净水来稀释各排污口排放污水才能达到排放要求。

参考文献：

[1] 文威, 黄岁梁. 海河污染研究进展[J]. 水资源保护, 2007, 23(5): 55-59.

[2] 张国立. 2007 年天津市入河排污口调查与评价[R]. 天津: 天津市水文水资源勘测管理中心, 2008.

[3] 丁淑芹. 大凌河朝阳市区段入河排污口评价[J]. 辽宁师专学报, 2000, 2(1): 80-82.

[4] 王金保, 黄学平. 采用等标污染负荷法分析大坞河水污染特征[J]. 南昌工程学院学报, 2005, 24(1): 35-38.

(收稿日期: 2009-04-10 编辑: 高渭文)

(上接第 3 页)

从表 3 的计算结果可以看出:2000 年至 2030 年,总体上河北省受水区的水资源系统脆弱性有所改观。这说明南水北调工程、强化本地节水、努力保证生态环境用水等措施的有效实施能缓解水资源系统的脆弱性。

表 3 受水区现状年及规划水平年指标特征值

指标类型	2000 年		2030 年	
	投影值 $z^*(i)$	等级计算值 $y(i)$	投影值 $z^*(i)$	等级计算值 $y(i)$
D	0.7808	1.2208	1.0217	2
P	1.6471	2	2.0055	2.340
S	0.6720	1	1.4006	4
I	2.2837	2.0714	2.5009	3
R	0.6859	1.6267	1.5936	3

5 结 论

本文建立了基于粒子群投影寻踪插值的水资源系统脆弱性评价模型,通过样本数据驱动,客观决定了各评价指标的权重,将多因子的评价归结为单目标决策,以定量数值表示评定结果。该评价模型不仅可以对某一事物进行等级评定,也可以对处于相同等级状态下的不同事物进行更细的区别,从而能较完整地反映水资源系统的脆弱性。利用该模型,结合河北省南水北调受水区水资源系统的现状,从驱动力-压力-状态-影响-响应等 5 个方面分析了该系统的脆弱性。河北省南水北调工程受水区水资源系统脆弱性评价结果表明,该评价模型概念清晰,计算简便,评价结果可靠,可比性强,评定结果可以直观地反映出各区域水资源脆弱性,在脆弱性评价中具有较好的应用价值。

参考文献：

[1] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002(8): 1-6.

[2] 李少华, 董增川, 周毅, 等. 复杂巨系统视角下的水资源安全及其研究方法[J]. 水资源保护, 2007, 23(2): 1-3, 42.

[3] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44.

[4] SMEETS E, WETERING R. Environmental indicators: typology and overview[R]. Copenhagen: European Environmental Agency, 1999.

[5] 宋松柏. 区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.

[6] KENNEDY J, EBERHART R C. Swarm intelligence[M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2001.

(收稿日期: 2010-04-08 编辑: 高渭文)