

水资源紧缺程度评价指标

王建生 徐子恺 姚建文

(水利部南京水文水资源研究所, 南京, 210024)

关键词 水资源供需平衡 水资源评价 评价指标 权数 隶属度

摘要 为分析我国各地区水资源的紧缺程度, 研究人员选择水资源量、社会经济、供水、需水、缺水和水环境 6 个方面共 24 项指标, 建立了水资源紧缺程度综合评价模型, 对 80 个流域二级区的现状 (1993 年)、2000 年、2010 年 3 个水平年进行了评价。对评价结果的分析表明, 海河、汾河、渭河流域以及山东半岛是我国水资源最紧缺地区; 水资源量不足是造成北方地区水资源严重紧缺的主要原因; 南方山丘地区, 特别是西南地区, 供水能力不足、工程建设滞后是造成水资源紧缺的重要原因; 沿海经济发达地区水环境恶化已成为水资源越来越紧缺的重要影响因素。至 2010 年, 我国大部分地区水资源紧缺程度将呈递增趋势。

水资源的供需分析可反映各区的水资源供需水量及缺水情况, 但由于各种分析最终均以水量的多少表示, 还不能充分说明各分区之间的真正差别。同样的缺水问题, 在不同的区域, 其缺水性质、含义和紧缺程度均不一定相同, 故仅以水资源量或缺水率表示, 不完全具有等同可比性。为此, 需对各地区的水资源质和量的状况、社会经济发展及对水资源的需求关系、供水条件及水资源开发利用状况以及缺水程度进行全面分析, 综合评价各分区的水资源紧缺程度及其产生原因, 以便分出轻重缓急, 采取不同的对策与措施。

1 综合评价模型与评价指标体系

1.1 综合评价模型

综合评价模型分 4 个层次: 第一层次为目标层, 即水资源紧缺程度综合评价层; 第二层次为准则层, 即评价紧缺程度所依据的准则, 也即水资源紧缺的主要影响因素, 分为水资源量、社会经济、供水、需水、缺水和水环境 6 个方面; 第三层次为指标层, 即从上述 6 个方面选择评价指标, 本次分析共选择 24 项指标; 第四层次为评价范围, 本次评价的对象是 80 个流域二级区 (未包括内陆河片羌塘和奇普恰

普两个二级区, 这两区基本属于无人区, 无统计资料), 评价时段包括现状 (1993 年)、2000 年和 2010 年 3 个水平年。

1.2 评价指标选择方法

根据掌握的资料, 初步挑选出 42 项指标, 在 42 项指标中, 与水资源紧缺程度最密切的是缺水率指标。以此作为参考指标 $x_0(k)$, 其余指标作为比较指标 $y_i(k)$, (k 为评价区代码, $k=1, 2, \dots, 80$; i 为比较指标项数, $i=1, 2, \dots, 41$), 采用斜率关联度分析方法进行关联度计算, 其计算公式为

$$\hat{\xi}_i(k) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_0(k+1) - x_0(k)}{\sigma_x} - \frac{y_i(k+1) - y_i(k)}{\sigma_{y_i}} \right|}$$

式中, $\hat{\xi}_i(k)$ 为 k 评价区 i 项指标关联系数; σ_x 为 $x_0(k)$ 序列标准差; σ_{y_i} 为 $y_i(k)$ 序列标准差。

$$r_i = 1/(N-1) \sum_{k=1}^{N-1} \hat{\xi}_i(k)$$

式中, r_i 为 i 项指标关联度; N 为参考指标总项数。

根据各项比较指标关联度计算及评价指标选择的原则, 最终选择 24 项指标作为本次综合评价的指标 (见表 1)。

表 1 评价指标及计算公式

类 别	指 标	采用资料及计算公式	备 注
水资源量	1 人均水资源占有量	水资源总量/总人口	
	2 亩均水资源量	水资源总量/耕地面积	考虑过境水
	3 径流系数	径流量/降水量	考虑过境水
	4 干旱指数	水面蒸发量/降水量	
社会经济	5 人口密度	总人口/土地面积	
	6 人均 GDP	GDP/总人口	
	7 工业产值模数	工业总产值/土地面积	
	8 耕地率	耕地面积/土地面积	
	9 灌溉率	灌溉面积/耕地面积	
	10 水田比例	水田灌溉面积/灌溉面积	
	11 人均灌溉面积	灌溉面积/总人口	
	12 工业占 GDP 比重	工业总产值/GDP	
供水	13 人均供水量	可供水量/总人口	
	14 水资源利用率	(地表可供水量 + 地下可供水量)/水资源总量	
	15 地下水供水比例	地下可供水量/可供水总量	考虑过境水及回归水
	16 跨流域调水比例	跨流域调水量/可供水总量	
	17 单方水投资	工程投资/可供水量	
需水	18 需水模数	需水量/土地面积	
	19 城镇需水比例	(城镇生活需水量 + 工业需水量)/总需水量	
	20 单位 GDP 需水量	需水量/GDP	
	21 耗水率	耗水量/总用水量	
缺水	22 缺水率	缺水量/总需水量	
水环境	23 水质等级	评价河段的水质状况	
	24 污径比	污水排放量/地表径流量	考虑过境水

2 评判计算

综合评价采用模糊数学中多因子二级评判法。第一级对所有评价指标进行综合评价,第二级对 6 类指标分别进行评价。

2.1 指标权数分配

评价指标按类别分层次分配权数。第一层次 6 种类别中,水资源量、社会经济、供水、需水 4 类指标权数各为 0.20,缺水和环境两类权数为 0.10。第二层次各类指标中,除供水类指标中地下水供水比例及跨流域调水供水比例两项指标权数各为 0.125 外,其他指标在各类指标中均同权重,见表 2。

2.2 指标隶属度

指标隶属度是表征评价指标隶属于水资源紧缺的程度,取值在 0~1 之间。根据紧缺的程度隶属度分为 5 级。各项指标隶属度的分级标准见表 3。

2.3 评判计算

在各项指标的权数及隶属度确定后,即可进行待评价地区的水资源紧缺程度的评价计

算。评判分两级进行,第一级为综合评判计

表 2 评价指标权数分配

类 别		指 标		权数
名 称	权数 A_i	名 称	权数 B_j	$A_i \cdot B_j$
水资源量	0.20	1 人均水资源占有量	0.25	0.05
		2 亩均水资源量	0.25	0.05
		3 径流系数	0.25	0.05
		4 干旱指数	0.25	0.05
社会经济	0.20	5 人口密度	0.125	0.025
		6 人均 GDP	0.125	0.025
		7 工业产值模数	0.125	0.025
		8 耕地率	0.125	0.025
		9 灌溉率	0.125	0.025
		10 水田比例	0.125	0.025
		11 人均灌溉面积	0.125	0.025
		12 工业占 GDP 比重	0.125	0.025
供水	0.20	13 人均供水量	0.25	0.05
		14 水资源利用率	0.25	0.05
		15 地下水供水比例	0.125	0.025
		16 跨流域调水比例	0.125	0.025
		17 单方水投资	0.25	0.05
需水	0.20	18 需水模数	0.25	0.05
		19 城镇需水比例	0.25	0.05
		20 单位 GDP 需水量	0.25	0.05
		21 耗水率	0.25	0.05
缺水	0.10	22 缺水率	1.00	0.10
水环境	0.10	23 水质等级	0.50	0.05
		24 污径比	0.50	0.05

表 3 评价指标隶属度分级标准

类 别	指 标	隶 属 度				
		0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
水资源量	1 人均水资源占有量/($\text{m}^3/\text{人}$)	<400	400~800	800~1 200	1 200~2 000	>2 000
	2 亩均水资源量/($\text{m}^3/\text{亩}$)	<400	400~800	800~1 200	1 200~2 000	>2 000
	3 径流系数	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	>0.4
	4 干旱指数	>3.0	2.0~3.0	1.5~2.0	1.0~1.5	<1.0
社会经济	5 人口密度/($\text{人}/\text{km}^2$)	>300	150~300	50~150	10~50	<10
	6 人均 GDP/(元/人)	>5 000	3 000~5 000	1 500~3 000	500~1 500	<500
	7 工业产值模数/(万元/ km^2)	>500	200~500	100~200	20~100	<20
	8 耕地率/%	>40	30~40	20~30	10~20	<10
	9 灌溉率/%	>80	60~80	40~60	20~40	<20
	10 水田比例/%	<10	10~20	20~40	40~80	>80
	11 人均灌溉面积/(亩/人)	>1.0	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	<0.4
	12 工业占 GDP 比重	<1.0	1.0~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	>3.0
供水	13 人均供水量/($\text{m}^3/\text{人}$)	<200	200~400	400~600	600~1 000	>1 000
	14 水资源利用率/%	>60	40~60	20~40	10~20	<10
	15 地下水供水比例/%	>60	40~60	20~40	10~20	<10
	16 跨流域调水比例/%	>10	5~10	1~5	0~1	0
	17 单方水投资/(元/ m^3)	>6	5~6	4~5	3~4	<3
需水	18 需水模数/($\text{万 m}^3/\text{km}^2$)	>20	10~20	5~10	2~5	<2
	19 城镇需水比例/%	>50	40~50	30~40	20~30	<20
	20 单位 GDP 需水量/($\text{m}^3/\text{万元}$)	>3 500	3 000~3 500	2 500~3 000	2 000~2 500	<2 000
	21 耗水率/%	>80	60~80	40~60	20~40	<20
缺水	22 缺水率/%	>15	10~15	5~10	1~5	<1
水环境	23 水质等级	5	4	3	2	1
	24 污径比	>0.1	0.05~0.1	0.02~0.05	0.01~0.02	<0.01

算,其计算公式为

$$D_k = A_i \cdot B_j \cdot C_{jk}$$

式中, D_k 为 k 评价区第一级评判结果 ($k=1, 2, \dots, 80$); A_i 为 i 类指标权重矩阵 ($i=1, 2, \dots, 6$); B_j 为 j 项指标权重矩阵 ($j=1, 2, \dots, 24$); C_{jk} 为 k 评价区 j 项指标隶属度矩阵 ($j=1, 2, \dots, 24$; $k=1, 2, \dots, 80$)。

第二级评判分类别进行,计算公式为

$$E_{ik} = B_j \cdot C_{jk}$$

式中, E_{ik} 为 k 评价区第 i 类指标评判结果; B_j 为 j 项指标权重矩阵; C_{jk} 为 k 评价区 j 项指标隶属度矩阵。

通过上述评判计算,分别得出各评价区水资源紧缺的隶属度,以及水资源量、社会经济、供水、需水、缺水和水环境 6 类指标的隶属度。

3 评判结果分析

3.1 水资源紧缺程度分析

水资源紧缺程度根据评价指标综合隶属度

D_k 的大小划分为不紧缺 ($D_k < 0.35$)、轻微紧缺 ($0.35 \leq D_k < 0.50$)、紧缺 ($0.50 \leq D_k < 0.65$) 及严重紧缺 ($D_k \geq 0.65$) 4 级。

水资源严重紧缺地区主要分布在:海河片的南北系和徒骇马颊河,淮河片的南四湖和山东半岛,黄河片的汾河和渭河流域,其中海河南系隶属度最高,各水平年均超过 0.70。

水资源紧缺地区要分布在:辽河中下游、辽东、辽西沿海、淮河中上游、黄河中下游、内陆河准噶尔、河西及内蒙古高原等区。

轻微紧缺的地区有:东北的嫩江、松花江、长江的嘉陵江、汉江、太湖等区,珠江的南盘江、红水河、左郁江、珠江三角洲以及粤西沿海,东南的浙东、闽南,西南的红河和内陆的中亚、塔里木等区。

图 1 为根据上述分析成果绘制的水资源紧缺程度分布示意图。

3.2 紧缺原因分析

在水资源紧缺及严重紧缺的地区,各类指标的隶属度均很大,其中反映水资源指标的隶

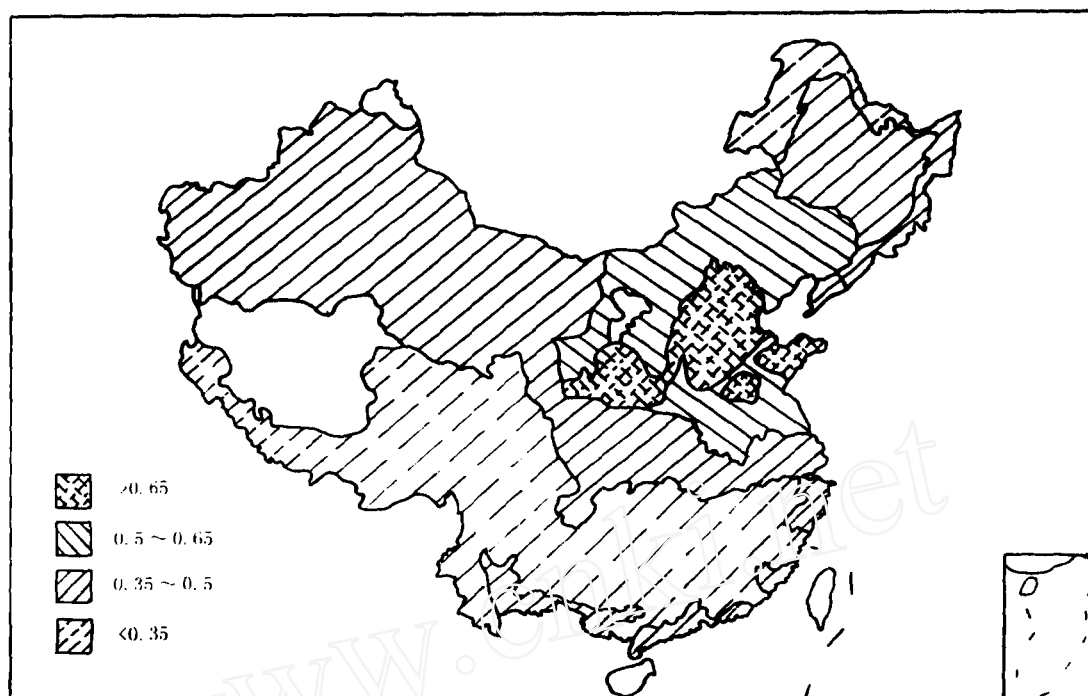


图1 现状水资源紧缺隶属度分级分布(1993年综合指标)

属度尤为突出,均在0.5以上,个别地区高达0.85。水资源不足是造成这些地区水资源紧缺的主要原因。

辽南、海河及山东半岛是我国北方经济发达、人口密集的地区,社会经济类指标的隶属度都在0.60以上,其中山东半岛达0.75,而需水类指标隶属度在0.50左右,比社会经济类低0.1~0.25,反映出这些地区水资源条件与社会经济发展不相匹配,但用水效率较高,取用水定额低,节水水平高。上述地区缺水类及水质指标隶属度也很高,其中海河南系分别达到0.90及0.80,为全国最高值。该地区不仅是全国缺水最严重的地区,也是水环境最恶劣的地区。内陆河片各区需水类指标隶属度相对较高,中亚、塔里木等区隶属度达到0.55~0.60,高于其余各类指标的隶属度。这一方面表征内陆地区对生态环境用水有特殊要求,同时也反映存在管理粗放、灌溉技术落后等浪费水的现象。

南方地区水资源条件相对较好,反映水资源量指标的隶属度在0.35以下。南方水资源

轻微紧缺的地区大致可分为两类。一类分布在西部山丘区,长江上游嘉陵江、乌江,珠江上游南盘江、红水河及西南国际河流的红河等地。这类地区供水类指标较突出,供水能力不足,工程建设滞后,是造成水资源紧缺的重要原因。云贵地区受地形及耕地分散等条件影响,供水工程建设难度大,投资高,使工程建设受到限制;四川等山丘区则与缺乏控制性骨干工程、调节能力不足有关。另一类分布在东部沿海地区,如太湖、浙东、闽南、珠江三角洲、粤东及粤西等区。其共同特点是经济发展快,需水增加量大,污水排放量不断增加,水质环境恶化且越来越严重。社会经济及水质类指标隶属度相对突出,反映了这些地区经济发展及水质环境的实际状况,尤其是太湖流域社会经济及水质隶属度分别达0.63及0.60(2000及2010年水质隶属度增加到0.80)。水环境恶化已成为该地区水资源情势越来越紧缺的重要影响因素。

3.3 趋势分析

现状、2000年及2010年3种水平年指标

隶属度的变化趋势明显。在 80 个评价区中, 各类评价指标综合隶属度呈递增变化趋势的有 57 个区, 呈递减变化的有 8 个区, 保持不变的有 1 个区, 另外先增后减及先减后增的各 7 个区, 递增变化占主流。80 个评价区规划水平年主要指标隶属度平均值见表 4。

表 4 规划水平年主要指标平均隶属度

水平年	综合	水资源量	社经	供水	需水	缺水	水质
现状	0.411	0.363	0.477	0.423	0.466	0.318	0.333
2000	0.426	0.365	0.495	0.427	0.458	0.335	0.433
2010	0.441	0.368	0.526	0.435	0.469	0.335	0.481

3 种水平年综合隶属度分别为 0.411、0.426 及 0.441, 呈递增趋势。各类评价指标除现状至 2000 年需水类隶属度略有减少外, 其余均不同程度地增加。水资源量隶属度变化幅度最小, 供水类隶属度增加幅度也不大, 社会经济及水质隶属度则有较大的增长, 尤以水质的增长最为突出, 这反映出水质环境的变化情势愈来愈严峻, 特别是在南方沿海经济发达地区, 水质环境进一步恶化将成为水资源紧缺程度加剧的主导因素。

4 结 论

水资源的紧缺程度与水资源条件 (包括水

质和水量)、经济发展水平、水资源开发条件与利用程度以及节水水平、管理水平等因素有关。本次从水资源量、社会经济、供水、需水、缺水和水环境 6 个方面选择 24 项指标进行水资源紧缺程度的综合评价, 取得了满意效果。对 80 个流域二级区 3 个水平年水资源紧缺程度评价结果的分析表明, 海河、黄河的汾河渭河流域以及山东半岛是我国水资源最紧缺的地区, 水资源量不足是造成我国北方地区水资源严重紧缺的主要原因; 南方山丘地区, 特别是西南地区, 供水能力不足、工程建设滞后是造成水资源紧缺的重要原因; 沿海经济发达地区, 水环境恶化已成为水资源越来越紧缺的重要影响因素。

5 参考文献

- 1 廖培. 实用模糊数学. 北京: 科学技术文献出版社, 1989
- 2 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1991
- 3 陈守煜. 水文水资源系统模糊识别理论. 大连: 大连理工大学出版社, 1992
- 4 水利电力部水利水电规划设计院. 中国水资源利用. 北京: 水利电力出版社, 1989
- 5 鲁学仁. 华北暨胶东地区水资源研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992

小资料

世界及各大洲工业用水量

亿 m³

	80 年代			2000 年计划		
	取水量	耗水量	废水量	取水量	耗水量	废水量
全世界	7 599	981	6 618	11 530 ~ 13 085	1 900 ~ 2 255	9 625 ~ 9 930
亚 洲	1 180	300	880	3 200 ~ 3 400	650 ~ 700	2 550 ~ 2 700
非 洲	65	20	45	300 ~ 350	50 ~ 100	250
欧 洲	1 930	190	1 740	2 000 ~ 3 000	300 ~ 350	1 700 ~ 1 760
北美洲	2 940	290	2 650	3 600 ~ 3 700	500 ~ 600	3 100
南美洲	300	60	240	1 000 ~ 1 100	200 ~ 250	800 ~ 850
大洋洲	14	1	13	30 ~ 35	5	25 ~ 30

表中资源来源:《世界资源》1990~1991。世界资源研究所主编。本期内其他同表 3。