

福建省泉州市农业水资源可持续利用评价研究

黄初龙 (泉州师范学院资源与环境科学学院, 福建泉州 362000)

摘要 在分析福建省泉州市农业水资源利用现状的基础上, 构建农业水资源可持续利用现状评价指标体系, 评价泉州市农业水资源可持续利用区域分异规律及其主导指标, 并制定相应对策。

关键词 农业水资源可持续利用评价; 指标体系; 区域分异; 福建省泉州市

中图分类号 F323.213 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)01-00268-06

Sustainability Evaluation of Agricultural Water Resources Use in Quanzhou City of Fujian Province

HUANG Chu-long (School of Resources and Environmental Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000)

Abstract Based on the status of water recourse use in Quanzhou City of Fujian Province, indicators system was established for sustainability evaluation of agricultural water resources use. Then the indicators system was applied in the discovery of regional variation and its leading factors of sustainability of agricultural water resources use in Quanzhou City. And some measures were also put forward for sustainable utilization of agricultural water resources in Quanzhou City.

Key words Sustainability evaluation of agricultural water resource use; Indicators system; Regional variation; Quanzhou City of Fujian Province

水资源是社会、经济、环境以至区域可持续发展的重要保证, 在缺水地区和国家甚至是一种重要的战略资源^[1]。农业水资源可持续利用 (Sustainable Utility of Agricultural Water Resources, SUAWR) 对区域农业发展、农业生态系统的正常运转、粮食安全生产至关重要。我国北方地区水资源短缺问题已被高度重视^[2], 但东南部湿润区干旱年份农业缺水问题较少被关注。

泉州位于我国东南部湿润区, 但处于台湾山脉的雨影区, 多年平均人均水资源量仅 1 468 m³^[3], 按国际标准^[4], 属水资源紧缺区, 枯水年更紧缺。而且, 泉州人多地少, 耕地有限, 这决定农产品自给需要作物高产, 作物高产对灌溉依赖性大; 同时, 随着海峡西岸经济区建设的展开, 其工业化、城市化的加速推进必将导致工业、生活用水进一步挤占农业用水。可见, 水土资源的有限性、地域性、水土资源空间配置与需求的不协调性决定了泉州农业水资源 (Agricultural Water Resources, AWR) 供需矛盾突出, 其农业发展和粮食安全需要科学评价 SUAWR 现状, 以合理利用现有水资源。

县级人民政府是国务院决定设定的多数水利行政许可项目和其他水资源开发利用、管理等相关项目审批权限的最基层单位及项目最终落实单位。以县域作为评价单元有利于 SUAWR 对策的落实。且泉州不同县域具有不同的 AWR 利用模式, 如永春的柑橘、安溪的茶树、晋江的灌溉农业。为此, 笔者以泉州各县级行政单元作为评价单元, 并以枯水年 2004 年为评价年进行 SUAWR 评价, 旨在为制定更具可操作性的 SUAWR 对策, 了解如何利用有限水土资源保障粮食安全生产提供科学依据。

1 泉州市 AWR 系统概况

1.1 社会经济与水资源概况 泉州市土地面积 10 865.77 km² (不含金门), 山地、丘陵、平原分别占 50.5%、28.5%、21.0%, 属亚热带海洋性季风气候, 终年温暖湿润, 年平均气温 18~20℃, 无霜期 310 d 以上, 年降雨量 1 000~1 800 mm, 年平均日照时数 1 900~2 000 h, 适应亚热带农业发展。但以

2004 年末常住人口 756 × 10⁴ 人计, 人均耕地面积不到 0.018 hm²/人, 人均实际灌溉面积不到 0.013 hm²/人。而改革开放以来, 工农业生产持续发展, 对水资源需求量逐年增大。2004 年末, 全市完成工业总产值 2 622 × 10⁸ 元, 农林牧渔业总产值 164 × 10⁸ 元。

据水资源公报, 2004 年全市平均降雨量 1 423.5 mm, 折合年降水量 154.67 × 10⁸ m³, 与多年平均值比较, 全市偏少 13.6%, 属枯水年份, 然而, 泉港、惠安、晋江、石狮等沿海平原地区偏多, 而南安、安溪、永春、德化等山区偏少, 市辖区持平。全市平均产水系数为 0.41, 平均产水模数 58.87 × 10⁴ m³/km², 河川径流量 63.97 × 10⁸ m³, 比多年平均值少 36.0%; 地下含水层的动态水量 18.49 × 10⁸ m³; 水资源总量 64.15 × 10⁸ m³, 其中出境水资源占 32.2%^[5]。全市主要河流包括晋江、大樟溪 (境内)、洛阳江 (至洛阳桥闸, 含黄塘溪), 流域面积分别为 5 629、1 558、371 km², 河长分别为 182、101、39 km。

1.2 泉州市 AWR 开发利用现状

1.2.1 水资源紧缺程度加剧。据水资源公报, 即使不计入逐年增大的外来流动人口比例, 泉州人均水资源量也仅 848.5 m³/人, 且用水量已占水资源总量的 43.2%^[5], 按国际标准^[4], 属典型水资源紧缺区。2004 年, 全市地表水源供水量为 25.72 × 10⁸ m³, 占总供水量的 92.2%, 地下水源供水量为 2.17 × 10⁸ m³, 占总供水量的 7.8%。2002~2004 年, 地下水利用量及地下水供给量占总供水量的比例连续上升, 分别为 0.828 × 10⁸、1.612 × 10⁸、2.172 × 10⁸ m³, 2.8%、5.7%、7.8%; 地下水利用率也迅速上升, 分别为 2.85%、6.98%、11.74%。在用水总量与地下水资源量逐年减少的情况下, 地下水取水量却增加, 说明社会经济需水趋紧。

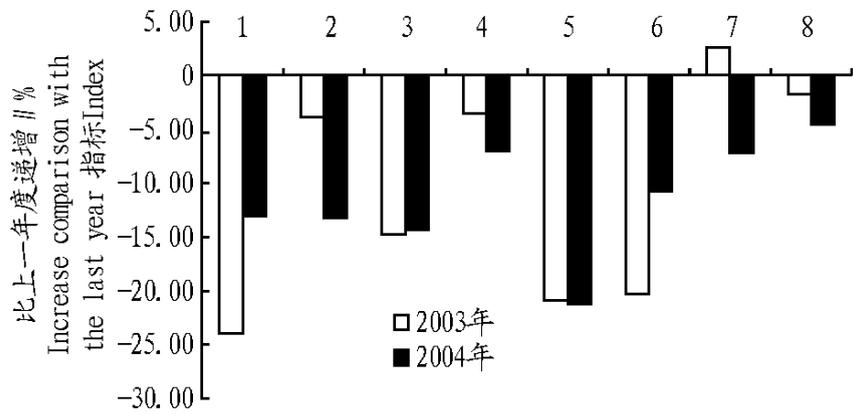
1.2.2 农业用水紧张加剧。泉州市水资源量指标值年变化表明, 自 2002 年以来, 多数用水指标的年递增率均为负值, 说明生活、生产节水能力增强, 用水效率和用水效益提高。万元农业产值用水量和农田公顷均灌溉耗水量下降速率大于其他用水指标, 说明农业用水效益提高速率大于非农业, 万元农业产值用水量已从 2002 年的 904.08 m³ 下降到 2004 年 563.62 m³, 但与发达国家比, 农业用水效益仍有较大的提升空间。2004 年降水比 2003 年多, 人均水资源量年递增率降幅小于 2003 年, 但仍为负值, 说明人口增长较快, 农业可用水

基金项目 福建省青年科技人才创新基金 (编号 2006F3115); 福建省高等学校科技项目 (编号 JA04262)。

作者简介 黄初龙 (1971-), 男, 福建三明人, 博士, 从事水资源评价与环境生态方面的研究。

收稿日期 2008-10-29

资源量减少,而人口增长、生活水平提高导致农产品需求增大,农业需水将增大,水供需矛盾将加剧(图1)。



注:人口数为户籍人口。1 为人均水资源量;2 为人均综合用水量;3 为万元GDP用水量;4 为万元工业产值用水量;5 为万元农业产值用水量;6 为农田公顷均灌溉耗水量;7 为城镇人均生活用水量;8 为农村人均生活用水量。

Note: The population means the population registered. 1. Water resource per capita; 2. Overall water consumption per capita; 3. Water consumption of every 10 thousand yuan GDP; 4. Water consumption of every 10 thousand yuan industrial output value; 5. Water consumption of every 10 thousand yuan agricultural output value; 6. Average irrigation water consumption of farmland per ha.; 7. Water consumption for living per capita in urban area; 8. Water consumption for living per capita in rural area.

图1 福建省泉州市人均水资源量与用水指标值年递增速率

Fig.1 The average water resources per capita and annual increase rate of water consumption index in Quanzhou City

1.2.3 “农转非”进一步发展。2002年泉州农业用水 $12.782 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅占全市总用水量的44.1%,但仍为最大用水户。2004年工业用水比例由2003年的43.1%增大到47.8%,而农业用水比例由2003年的37.0%下降到33.4%。说明水资源的“农转非”有所发展。

尽管中国目前的水资源配置机制仍以政府宏观调控和行政管理机制为主,但随着社会发展及区域水资源供需矛盾的加剧,以水权为法律基础的市场配置机制将会发挥积极作用^[6]。泉州发展战略已明确提出将建立以市场调节为主的经济,大力发展外向型经济,努力培育石油化工业等耗水产业。目前,泉州单方水农业产值仅17.74元/ m^3 ,远低于单方水工业产值195.60元/ m^3 。在工业化政策导向和产业间用水效益差异推动下,在市场配置作用和水资源总量约束下,农业用水将继续被其他用水挤占,特别是工业化和城镇化发展较快的沿海地区。

1.2.4 水资源供需分布格局不协调,沿海地区农业缺水问题突出。因受季风气候和地形条件的影响,泉州地区水资源时空分布极不均衡,全市年降雨量在2341.0~828.4mm,由西北山区向东南沿海逐渐递减。然而,以评价年为例,鲤城、丰泽、洛江、泉港、惠安、晋江、石狮等沿海地区的土地面积仅占全市20.8%,年降雨量比常年多(山区偏少),但也仅占全市20.4%,却集中了全市57%的人口,39%的耕地,29%的实灌面积,71%的工业产值,56%的农业产值。大泉州发展战略将加速推进工业化、城镇化和农业产业化进程,“块状经济”已初具规模的沿海地区水资源需求发展速度将快于内陆。可见,沿海地区是泉州水资源最紧缺的地区,评价年沿海县区均不到450 m^3 /人,而内陆山区县安溪、永春、德化的人均

水资源量均超过1400 m^3 /人。

按泉州评价年耕地公顷均农业用水量(6923 m^3/hm^2)、粮食单产(4748 kg/hm^2)计算,以年人均粮食需求400 kg 计,则每人每年仅粮食消费就需耗水583 m^3 。近年来,泉州沿海地区人口增长迅速,粮食需求增长增大了水资源压力。在目前农业生产方式下,粮食安全对灌溉面积的依赖性仍较强,但灌溉水源枯竭,特别是土地利用格局中耕地比例较大而公顷均降水较少的沿海地区,水资源开发利用程度较高,已引用客水资源,农业缺水问题突出。如石狮市、晋江市、惠安县的耕地比例均超过30%,是福建省耕地比例最大的县市^[7]。尽管评价年沿海平原地区降水大多比多年平均值偏多,耕地公顷均水资源量却均低于6700 m^3 。

1.2.5 农业供水不稳,水源污染加剧。由于季风气候的影响,各地区年降水量年际变化大,农业供水不稳定。由于工业的迅速发展和不合理布局,水污染有加重趋势。2004年全市废污水排放量比2003年增加 $0.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,工业废水增加24%。水质污染威胁农业灌溉水源。

上述问题加剧了泉州沿海地区农业可利用淡水资源的供需矛盾,影响农业发展和粮食稳产。

2 泉州市SUAWR评价指标体系构建

水资源综合评价宜采取指标体系(Indicators System,IS)评价法^[8]。SUAWR评价属于综合评价,构建SUAWR评价指标体系是水资源评价发展、不同尺度水资源评价结果进行比较、SUAWR的各种复杂影响因素的表征、可持续发展程度的量化等的需要。目前,中国以水或水资源为主题构建的指标体系较多^[9],特别是大区域SUAWR评价指标体系的构建及其通用性与区域适用性、全面性与可操作性的探讨^[10],对于构建SUAWR评价指标体系具有十分重要的借鉴和参考价值,但少见县域SUAWR评价指标体系的构建及其通用性的探讨。泉州AWR系统在各种复杂因素综合作用下,存在水资源短缺、“农转非”、供需分布格局不吻合等问题,要揭示区域农业生产需水是否紧缺及其障碍因子,并非简单指标所能表征。从AWR复合生态经济系统角度出发,建立一套科学合理的、可操作性强、能反映或衡量AWR与可持续发展关系的指标体系,才能科学评价SUAWR,揭示其区域分异现状,进而明确其主导指标,制定相应对策。

根据SUAWR内涵,制定SUAWR评价目的及“三效”、“三生”、“三量”、“二维”、“二性”评价原则,确定科学性、可操作性、整体性、协调性等AWR构建原则^[11],并以可持续发展研究的系统论方向为指导^[12],使指标体系基本涵盖AWR系统各环节的SUAWR信息表征;并结合泉州市AWR系统概况,构建能反映可持续用水内涵组成与用水环节的4层结构式的泉州SUAWR现状评价指标体系(表1)。其中,运行层 I_A 、 I_B 、 I_C 分别代表可持续时间维的持续度、数量维的发展度、质量维的协调度;框架层 I_a 、 I_b 、 I_c 分别反映AWR与农业发展、生态环境、社会经济的关系, I_d 、 I_e 分别反映农业需水与生态环境、工业、生活等非农业需水; I_f 、 I_g 共同反映生产、生活、生态环境用水效益。

3 泉州市SUAWR评价与分析

3.1 数据来源与处理 在对评价区气象、统计、水利、国土、

环保等单位调研基础上,获取评价区水资源公报、统计年鉴、环境状况公报与环境质量报告书、国民经济与社会发展统计公报

等资料,及1997~2003年中国水资源公报和中国自然资源数据库中的相关数据。根据指标计算公式,得各指标实际值(表2)。

表1 泉州市SUAWR现状评价指标体系

Table 1 The SUAWR actuality evaluation IS in Quanzhou

L ₁ 目标层 Target layer	L ₂ 运行层 Function layer	L ₃ 框架层 Frame layer	L ₄ 指标层 Index layer		指标计算方法 Index calculation formula
			代号 No.	名称 Name	
SUAWR	I _A 水资源 可持续 供给度	I _a 水资源丰度	I ₁	耕地公顷均降水量	年降水量 / 耕地面积
			I ₂	耕地公顷均水资源量	农业用水量 / 耕地面积
			I ₃	降水相对变率	评价年与多年平均降水量之差 / 多年平均降水量
	I _B 水资源 可持续 满足度	I _b 水资源保育的生态环境基础 I _c 社会经济技术保障条件	I ₄	径流系数	评价年平均河川径流深 / 评价年年降水深
			I ₅	万元GDP用水量	用水量 / GDP
			I ₆	农田公顷均灌溉耗水量	农业用水量 / 灌溉面积
	I _C 供需 协调度	I _d 农业需水	I ₇	人均粮食占有量	粮食总产量 / 总人口
			I ₈	粮食作物播种面积比例	粮食作物播种面积 / 主要农作物播种面积
			I ₉	现有耕地灌溉率	实灌面积 / 耕地面积
		I _e 非农业需水	I ₁₀	人均生活用水量	生活用水量 / 城镇人口
			I ₁₁	单方用水工业产值	工业产值 / 工业用水量
			I ₁₂	环境用水比例	环境用水量 / 总用水量
	I _f 用水效益 I _g 用水公平	I _f 用水效益	I ₁₃	单位降水深粮食产量	粮食产量 / 当年降水深
			I ₁₄	单方灌溉水粮食产量	粮食产量 / 农业用水量
			I ₁₅	单方用水农业产值	农业产值 / 农业用水量
			I ₁₆	人均农业用水量	农业用水量 / 常住人口

表2 泉州市SUAWR评价各指标实际值

Table 2 Actual values of indicators evaluating SUAWR in Quanzhou

辖区 District	I ₁ m ³ /hm ²	I ₂ m ³ /hm ²	I ₃ %	I ₄	I ₅ m ³ /万元	I ₆ m ³ /hm ²	I ₇ kg/人	I ₈ %	I ₉ %	I ₁₀ m ³ /人	I ₁₁ 元/m ³	I ₁₂ %	I ₁₃ kg/nm	I ₁₄ kg/m ³	I ₁₅ 元/m ³	I ₁₆ m ³ /人
鲤城 Licheng	2 059	13 336	0.5	0.032	87	12 467	43	57.0	107	89.7	303	32.58	27 987	0.90	18.5	18
丰泽 Fengze	2 059	8 081	0.5	0.032	132	12 049	43	57.0	67	85.9	217	22.04	27 987	0.90	78.7	12
洛江 Lujiang	2 059	9 529	0.5	0.032	265	12 386	43	57.0	77	56.6	175	2.51	27 987	0.90	14.3	193
泉港 Quangan	2 253	4 321	15.9	0.032	167	10 468	128	73.2	41	54.5	196	1.76	29 772	2.70	72.7	47
惠安 Hian	2 167	4 837	24.1	0.032	160	10 158	145	69.4	48	53.1	189	0.91	91 875	1.45	37.2	100
晋江 Jinjiang	2 007	5 479	10.9	0.030	120	10 077	66	57.1	54	56.6	250	1.01	78 781	0.89	17.2	75
石狮 Shishi	1 961	6 669	21.8	0.029	106	8 649	39	56.5	77	54.9	263	1.46	16 072	0.97	71.7	41
南安 Nanan	2 367	8 940	7.6	0.039	232	9 984	156	68.5	90	54.3	204	0.58	140 257	0.88	9.2	177
安溪 Anxi	2 173	7 135	18.5	0.044	268	10 327	183	79.2	69	50.0	145	1.13	129 852	1.07	12.6	172
永春 Yongchun	1 933	8 216	24.9	0.039	277	8 829	246	74.7	93	51.4	97	0.79	99 384	1.03	13.7	239
德化 Dehua	2 054	6 011	25.3	0.052	357	7 110	304	67.6	85	56.5	83	0.93	67 848	1.14	12.5	266
全市 Whole city	2 135	6 923	14.0	0	173	9 619	129	69.0	72	57.0	196	3.00	683 327	1.00	18.0	122

注:评价年平均河川径流深由地表水资源量折算而成;泉州市各辖区如果没有各自变量值,以泉州市辖区全区指标实际值替代各区指标实际值;农田公顷均灌溉用水量采用实际灌溉面积计算;人均指标均以常住人口计算。

Note: Evaluation of annual average river runoff depth is concluded from surface water resources amount; if those districts had no their own variable value, then the indicators actuality value of Quanzhou city is used to represent the indicators actuality value of each districts; farmland average irrigation water amount per ha. is calculated by the actual irrigation area; population index is calculated by permanent population.

3.2 区域分异评价

3.2.1 指标权数分配。采用层次分析法(AHP)来确定关于目标层各评价指标间的相对重要性次序,从而得到各评价指标的权重(表3)。

3.2.2 指标标准化处理。由于各评价指标原始数据具有不同质特性,为了不同指标具有可比性,为了消除量纲影响,也为了增强分级评价不同级别之间区分度,弱化同级别内部各评价单元间的区分度,该研究采用线性特征函数隶属法对指标实际值进行标准化处理,即以各指标反映目标层SUAWR的程度,在0~1之间取标准化值。标准化值越大,越接近可持续。因为现状排序评价是为了了解本区内部的地域分异,

故以各指标实际值系列的最优值作为全区最优值。采用下式计算(指标I₃为实际值取绝对值后再计算其标准化值):

越大越优型指标: 标准化值 = 某指标实际值 / 某指标系列值的最大值

越小越优型指标: 标准化值 = 1 - 某指标实际值 / 某指标系列值的最大值

指标体系中,I₃、I₅、I₆、I₁₀、I₁₆指标为越小越优型指标,因为I₃值越大,供水越不稳定,越不利于AWR的可持续利用;I₅、I₆值越大越不利于可持续,也表明社会经济技术对农业高效用水的支持越小;I₁₀值越大,表示该评价单元生活用水对整个泉州的AWR可持续贡献越小;I₁₆值越大,对用水公平性

贡献越小。其他指标为越大越优型指标。

表3 指标体系权重分配
Table 3 Wight dstribution in IS

L_2	A_j	L_3	B_j	L_4	C_k	AB_jC_k
I_A	0.4	I_a	0.50	I_1	0.5	0.100
				I_2	0.3	0.060
				I_3	0.2	0.040
		I_b	0.25	I_4	1.0	0.100
				I_c	0.25	0.050
				I_6	0.5	0.050
I_B	0.2	I_d	0.60	I_7	0.2	0.024
				I_8	0.4	0.048
				I_9	0.4	0.048
		I_e	0.40	I_{10}	0.2	0.016
				I_{11}	0.4	0.032
				I_{12}	0.4	0.032
I_C	0.4	I_f	0.70	I_{13}	0.4	0.112
				I_{14}	0.4	0.112
				I_{15}	0.2	0.056
		I_g	0.30	I_{16}	1.0	0.120

注: A_j 、 B_j 、 C_k 分别为 L_2 、 L_3 、 L_4 的权重; AB_jC_k 为各指标相对于 L_1 目标的综合权重。

Nte: A_j 、 B_j 、 C_k repectively represents the weight of L_2 、 L_3 、 L_4 ; AB_jC_k is the comprehensive weight of each indicator as opposed to L_1 target.

3.2.3 算法与结果。

(1) 加权平均算法。N 维加权平均算法的映射 $f: R^n$

R , 相关的连接权重向量 $W = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_n]^T$, 满足 $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ ($W_j \in [0, 1], j = 1, 2, \dots, n$)。

对于一个评价单元的标准化加权合成输出值为:

$$f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n W_j U_j$$

式中, a_1, a_2, \dots, a_n 为 n 个指标; U_j 为评价单元的第 j 个输入指标的标准化值; $f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为评价单元相对应的输出值; W_j 为指标权重。该研究中, $j = 1, 2, \dots, 23$, $W_j = A_j B_j C_k$ (表3)。

(2) 综合评价模型法^[10]。采用上述2种方法, 得评价结果, 见表4。

表5 综合评价模型法和加权平均算法的运行层各领域评价值及其与总评价值的相关性

Table 5 Pertinence between evaluation values of domains in circulating layer of IS and total evaluation values of IS by Wighted Average Evaluation and Two Layers Wighted Summated Evaluation

评价方法 Evaluation method	运行层 Domain	鲤城 Licheng	丰泽 Fengze	洛江 Lujiang	泉港 Qiangang	惠安 Hian	晋江 Jrjiang	石狮 Sishi	南安 Nanan	安溪 Anxi	永春 Yongchun	德化 Dehua	相关系数 Correlation coefficient
加权平均算法 Wighted Average Evaluation	I_A	0.047	0.043	0.040	0.038	0.035	0.039	0.038	0.045	0.040	0.037	0.039	0.450
	I_B	0.025	0.019	0.017	0.017	0.017	0.016	0.018	0.020	0.019	0.021	0.020	0.324
	I_C	0.046	0.058	0.026	0.072	0.059	0.050	0.051	0.049	0.050	0.036	0.028	0.823
综合评价模型法 Two Layers Wighted Summated Evaluation	I_A	0.118	0.103	0.100	0.077	0.067	0.085	0.075	0.101	0.078	0.069	0.068	0.508
	I_B	0.064	0.049	0.045	0.049	0.050	0.045	0.049	0.059	0.058	0.063	0.062	0.032
	I_C	0.082	0.136	0.058	0.174	0.135	0.099	0.122	0.111	0.114	0.091	0.074	0.653

注: 表中数值为各领域所统领的各指标评价值的平均值。

Nte: The data in this table is the mean value of the indicator evaluation value of each domain.

(3) SUAWR 地域分异的主导指标。各指标评价值与总评价值的 Pearson 相关分析表明, 2 种算法正相关系数均大于 0.

3.2.4 结果与分析。

(1) SUAWR 地域分异。泉州的 SUAWR 地域分异大体表现为由中部地区向西北山区和东南沿海平原区递减(表4)。

(2) 指标体系权重分配的合理性。比较 2 种排序结果可知, 前者考虑了指标层的权重, 后者不考虑, 2 种排序基本一致, 说明指标体系的稳定性较好, 指标层各指标权重对评价结果有一定影响, 指标体系各层次的权重分配较合理。

运行层的 I_A 与 I_C 领域的权重大于 I_B 领域(表3), 而对照 2 种算法的排序结果与其各领域评价值, 都表现出: I_A 与 I_C 值较大的评价单元, 其排序位置靠前; 而 I_B 值较大的评价单元, 其排序位置不一定靠前(表4)。对 2 种算法的总评价值与各领域评价值的 Pearson 相关分析表明(表5), 2 种算法中, I_A 和 I_C 与总评价值的相关系数均高于 I_B 。这说明 I_A 与 I_C 是泉州 SUAWR 的主要影响因素, 评价结果与基于 AHP 的权重分配结果相符, 也说明权重对评价结果有较大的影响。同时, 综合评价模型法的 I_A 和 I_C 与 I_B 间的相关系数差距明显大于加权平均算法, 说明指标层的权重对评价结果也有一定的影响。

表4 泉州市 SUAWR 评价与排序结果

Table 4 SUAWR evaluation values and sequence in Quanzhou

辖区 District	加权平均算法 Wighted Average Algorithm		综合评价模型法 Two Layers Wighted Summated Evaluation	
	分值 Values	位序 Sequence	分值 Values	位序 Sequence
鲤城 Licheng	0.62	1	1.42	3
丰泽 Fengze	0.60	3	1.46	1
洛江 Lujiang	0.44	11	1.10	10
泉港 Qiangang	0.61	2	1.45	2
惠安 Hian	0.55	6	1.24	6
晋江 Jrjiang	0.53	8	1.18	8
石狮 Sishi	0.54	7	1.23	7
南安 Nanan	0.59	4	1.40	4
安溪 Anxi	0.56	5	1.27	5
永春 Yongchun	0.49	9	1.16	9
德化 Dehua	0.46	10	1.08	11

45 的指标有 $I_1, I_5, I_{11}, I_{12}, I_{15}, I_{16}$, 其中, 仅 I_1, I_{16} 的综合赋权值较大; 负相关的指标有 $I_4, I_6, I_7, I_9, I_{10}, I_{13}$, I_{10} 的负相关性最强,

但 I_{10} 综合赋权值却最小(表6)。说明评价结果不是完全取决于权重分配,评价结果可信。按相关性由强到弱,泉州SUAWR地域分异的主导指标依次为: $I_{16} > I_5 > I_{11} > I_{12} > I_{10} > I_1 > I_{15}$ 。

泉州中部SUAWR强于北部和南部的分异格局与其 I_1 、 I_{11} 、 I_{16} 的地域分异格局一致,与 I_5 、 I_{12} 、 I_{15} 的大体一致。说明泉

州市SUAWR区域分异主要取决于水资源禀赋的区域分异格局及水土资源配置不协调所导致的AWR供需矛盾,主要体现在人均农业用水量、耕地公顷均降水量的地域分异;也受人口增长和经济发展的区域差异所决定的农业用水效益区域差异的重要影响,主要体现在单方用水工业产值、万元GDP用水量、单方用水农业产值的地域分异。

表6 综合评价模型法和加权平均算法的各指标评价值与总评价值的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between evaluation values of indicators and total evaluation values of IS by the two methods

评价方法 Evaluation method	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}
加权平均算法 Weighted Average Evaluation	0.49	0.13	0.33	-0.36	0.66	-0.41	-0.37	0.02	-0.14	-0.50	0.61	0.53	-0.06	0.32	0.46	0.74
综合评价模型法 Two Layers Weighted Summated Evaluation	0.53	0.21	0.45	-0.36	0.56	-0.50	-0.39	0.00	-0.09	-0.53	0.53	0.55	-0.11	0.33	0.50	0.68

中部地区各评价单元SUAWR较强,但南安、安溪的万元GDP用水量过高,说明整个社会经济系统用水效率偏差;单方用水工业产值和环境用水比例偏低,说明未来几年非农业用水有可能挤占农业用水;人均农业用水量远高于SUAWR较强的其他评价单元,单方用水农业产值为全市最低,说明农业用水效率较差。北部和南部地区的SUAWR较弱,其原因为:永春、德化的耕地公顷均降水量偏低,万元GDP用水量和人均农业用水量全市最高,而单方用水工业产值却最低,单方用水农业产值也偏低;石狮、晋江的耕地公顷均降水量全市最低,环境用水比例偏低。

指标体系运行层各领域均有主导指标,各指标评价值与总评价值的相关分析结果符合前人已有认识与泉州实际情况,说明指标体系结构设置及其所选指标合理。指标合理性分析也能说明所选指标合理,以主导指标“耕地公顷均降水量”为例:首先,从长期可利用角度看,水资源是指区域内可逐年更新的淡水量,大致与年降水量相当^[13],水资源可再生能力是指单位面积单位时间内可更新水资源量^[14]。泉州地处东部季风区,降水是其可更新水资源的主源,年降水量直接反映全年农业需水能否满足,因此,耕地公顷均降水量能表征水资源丰度。其次,泉州市农业生产以雨养灌溉农业为主,可作农田灌溉水的地表水和地下水基本来自降水,而且降水区域分布不均,沿海平原区耕地多降水少,耕地公顷均降水量区域分异明显,有利于反映SUAWR区域差异。

4 泉州市SUAWR对策

目前,泉州农业用水量正被非农业需水挤占,但仍是用水大户,其SUAWR影响整个社会经济系统的水资源可持续利用水平。由泉州SUAWR地域分异的主导指标可知,泉州市SUAWR区域差异的主要问题是水资源禀赋、水土资源配置、农业用水效益的区域差异明显,其SUAWR对策如下。

(1) 协调因水资源禀赋导致的社会经济系统与水生生态系统的供水供需矛盾。尽管评价年沿海平原地区降水量比多年平均值偏多,而山区则偏少,沿海平原地区的现有耕地灌溉率仍然远低于西北内陆山区(表2)。西北部安溪、永春、德化3个山区县,年人均水资源占有量为 $3\ 674\ \text{m}^3$;而东部沿海地区南安、晋江、石狮、鲤城、丰泽、洛江、惠安的人口占全

市人口的78.72%,水资源总量仅占全市的31.29%,年人均水资源占有量仅为全市人均占有量的47.94%,仅为西北部3县年人均占有量的20.00%。因此,泉州水资源丰度、农业需水可持续满足度区域分异显著,仍需发挥水利工程对天然降水时空分配不均的调节作用。然而,水利工程通常具有负面作用及潜在的生态破坏性,新建工程必须充分论证,严格审批,着重提高已有水利工程的利用效率。目前,泉州已成为全国率先实施全流域水资源优化配置工程的地级市^[15],但仍需继续完善山美水库扩蓄工程、金鸡拦河闸、南高干渠改造整治工程等重点水利工程及其配套设施建设,以充分发挥现有工程的效率。

(2) 重视农业节水技术,改善水土资源利用效率。泉州粮食自给率低,2004年泉州市粮食总产不到 $9.73 \times 10^8\ \text{kg}$,人均仅 $128.7\ \text{kg}$ 。如果年粮食需求量以人均 $400\ \text{kg}$ 计算,年缺粮达 $20.5 \times 10^8\ \text{kg}$,即粮食需求67.9%需从境外进口,粮食安全易受粮市波动威胁。作为缺水区,耕地有限的泉州粮食产量增加不能依靠灌溉水量增加,只能依靠现有水土资源的高效利用。据《2005福建省统计年鉴》(2005),评价泉州年粮食单产约 $4\ 748\ \text{kg}/\text{hm}^2$,而福建省粮食单产已达 $4\ 965\ \text{kg}/\text{hm}^2$,水稻单产已达 $5\ 535\ \text{kg}/\text{hm}^2$,中国水稻单产已达 $6\ 120\ \text{kg}/\text{hm}^2$,而发达国家已达 $8\ 160\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。因此,依靠节水技术进步,提高单方水粮食产量尚有较大空间,节水和农业高效用水是满足泉州粮食增长需求的重要途径。目前,应在全流域实施节水灌溉措施,推广田间灌水新技术;完善山美水库灌区和其他中型水库灌区的节水改造,建成高标准的节水型灌区,加强晋江、南安水利化试点县的建设,发展节水灌溉面积,促进节约用水;坚持“量水而行、以水定供、以供定需”的原则,发展节水型产业,限制高耗水产业发展;重视生物节水技术的应用与推广,加强耐旱抗涝作物品种的培育,以有效应对旱涝灾害。

(3) 优化产业结构,依靠水市场机制,提高农业用水效益。水资源宏观经济配置研究表明,水资源的“农转非”难以避免。为使有限的水资源最大限度地满足粮食生产用水需求,并发挥最佳的区域经济社会效益,一方面,必须通过确定行业用水定额及量化各生产部门初始用水权,深化水利产权

制度与水价改革,激励企业降低工业万元产值耗水量,推动区域产业结构与用水结构的调整;另一方面,通过经济补偿的方式促进农业节水技术的推广和使用,采取优惠政策鼓励粮食主产区增强节水灌溉能力,充分利用虚拟水贸易机制,加大出口和生产低耗水高效益水资源产品比例,进口高耗水低效益水资源产品,使水资源由低效益的丰水区流向高效益的贫水区,以市场机制杜绝农业种植结构与水资源条件不相适应的浪费水资源、破坏水生态系统现象的发生,从而缩小农业与非农业用水效益的差距,实现 AWR 系统的生态、经济、社会效益的最优化。

(4) 重视人为因素对 SUAWR 的影响,协调“人水关系”。SUAWR 由中部地区向西北和东南递减的分布格局符合评价区 AWR 系统实际情况,受 AWR 系统各子系统的多种因素共同制约,取决于降水资源与水资源总量的时空分异、水土配置时空分异、水资源利用效益地域差别,前二者是该区 SUAWR 的天然制约因素。然而,人水矛盾根源于人类对天然水资源的过度干扰,应主动约束并规范自己的行为^[16],建立节水型社会经济系统,实现 AWR 系统“人水关系”的协调。在节流方面,通过科学管理、规划、配置水资源,建立以节水灌溉为主的节水农业生产体系,提高农业用水效益;在开源方面,应因地制宜地加强水资源方面的工业反哺农业的对策措施研究,如沿海地区,应通过法律、税收等手段,在万元产值用水定额、水价等方面进一步拉开工农业用水的差距,促使工业用水加强循环利用、污水回用,增大工业冷却用水中的海水比例,通过工业产业结构调整减少区域工业用水量,从而缓冲工业用水效益远高于农业用水效益所导致“水资源农转非”的拉动力。

5 结语

水资源既是天然生态系统的基础资源,也是社会经济系统的经济资源。SUAWR 是农业可持续发展的基础。泉州是我国东部沿海地区典型的水资源紧缺区,在分析相关文献已有高频指标基础上,针对泉州水资源利用概况,构建了泉州 SUAWR 现状评价 AWR。AWR 的应用表明,泉州中部地区 SUAWR 能力强于东南部沿海地区和北部地区。相关分析表

明,这种分异格局的主导指标是反映需水公平的人均农业用水量,反映社会经济技术保育水资源能力的万元 GDP 用水量,反映非农业需水可持续满足度的单方用水工业产值、环境用水比例、人均生活用水量,反映水资源禀赋的耕地公顷均降水量,及反映农业用水效益的单方用水农业产值。说明必须重视水资源保育和环境用水需求,更要强调人为因素对 SUAWR 的影响,协调 AWR 系统“人水关系”,即提高泉州市 SUAWR 能力在于加大水利投入,通过工程和管理措施改变水土资源配置与供需水分布的不协调格局,通过调整产业结构,并在全区建立节水高效的现代农业,缩小农业用水效益区域差异,整体提高全市农业用水效益。

参考文献

- [1] QADIR M,BOERS T M,SCHUBERT S.Agricultural water management in water-starved countries: Challenges and opportunities[J]. *Agricultural Water Management*,2003(62):165-185.
- [2] 潘家铮,张泽祯.中国北方地区水资源的合理配置和南水北调问题 中国可持续发展水资源战略研究报告集第8卷[R].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [3] 福建省水利厅.福建省水资源管理的现状、问题和对策 EB/OL. <http://www.chinawater.net.cn/cvsnews/revsltm/gvpf-16.htm>
- [4] ROBERT E,PAMELA L.Sustaining water: Population and the future of renewable water supplies EB/OL. <http://www.crie.org/pop/pa/h2o-toc.html>.
- [5] 泉州市水利局.2004年泉州水资源公报[R].2004.
- [6] 方红远.区域水资源合理配置中的水量调控理论[M].郑州:黄河水利出版社,2004:205.
- [7] 刘清丽,陈友飞,王国杰.福建省土地利用格局及其影响因子[J]. *福建地理*,2004,19(4):6-10.
- [8] 中华人民共和国水利部水资源水文司.水资源评价导则(SL/T238-1999)[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [9] 黄初龙,章光新,杨建锋.我国水资源可持续利用评价指标体系研究进展[J]. *资源科学*,2006,28(2):33-40.
- [10] 黄初龙,邓伟,杨建锋.农业水资源可持续利用评价指标体系构建及其应用[J]. *农业现代化研究*,2005,26(6):422-425,430.
- [11] 黄初龙,邓伟.农业水资源可持续利用评价指标体系构建与应用[M].北京:化学工业出版社,2008:29-39.
- [12] 牛文元.可持续发展:21世纪中国发展战略的必然选择[J]. *生态经济*,2000(1):1-3.
- [13] 朱颜明,何岩.环境地理学导论(中国科学院研究生教学丛书)[M].北京:科学出版社,2002.
- [14] 沈珍瑶,杨志峰,刘昌明.黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法[J]. *自然资源学报*,2002,17(2):188-197.
- [15] 蔡小伟,赵鹏.落实科学发展观福建篇:水资源大省怎样止渴 EB/OL.(2005-08-11) 人民网: <http://politics.people.com.cn/GB/14562/3607569.html>.
- [16] 陈家琦.自然·水·人[J]. *自然资源学报*,2004,19(6):689-693.

(上接第267页)

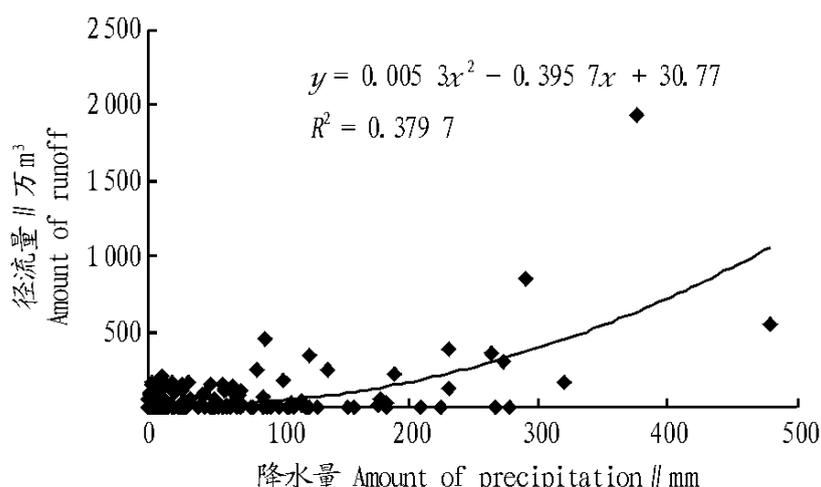


图6 降水量与径流量二元回归分析

Fig.6 The dualistic regression analysis between precipitation and runoff

二者的联系并不是很紧密,也就是说二者的相关系数不具有显著性。当降水量发生变化时,径流量一般也发生相应的变化,但是该变化不仅仅是因为降水量的影响,还受到多种因素的影响,如地形条件、植被条件、水库蓄水量、用水量等。在这些影响因素中,降水量可能并不是对径流量影响最大的因素,哪些因素对径流量的影响最大,还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 王海龙.华北土石山区防护林体系稳定林分结构定向调控基础研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [2] 刘世海,余新晓,胡春宏,等.密云水库北京集水区人工水源保护林降水化学性质研究[J]. *水土保持学报*,2002,16(1):100-103.