

基于虚拟水理论的济南市 水资源可持续利用现状研究

张守成¹, 郭正萌², 王婵²

(1.山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014; 2.山东省物化探勘查院, 山东 济南 250014)

摘要:采用国际上前沿的虚拟水理论,运用联合国粮农组织(FAO)推荐的 CLIMWAT 2.0 和 CROPWAT 8.0 软件,对济南市农业作物虚拟水含量进行计算,得出了 2009—2014 年济南市农业产品虚拟水总量;通过查阅、分析济南市 2009—2014 年水资源公报,计算出济南市 2009—2014 年林牧渔畜产品、工业产品、生态环境用水、城镇公共用水及生活用水的虚拟水总量;通过对济南市各产业虚拟水数据研究分析,得出了各产业虚拟水变化趋势及其原因;根据虚拟水理论,并与济南市水资源总量对比计算,得出济南市水资源匮乏指数,经研究得出济南市水资源可持续开发利用仍将面临严峻挑战的结论,并针对济南市水资源利用现状的严峻情况,提出了通过减少济南市虚拟水总量、增加水资源总量或节省水资源消耗达到降低水资源需求压力的目的,从而为济南市水资源可持续开发、利用提供参考及新思路。

关键词:虚拟水;水资源;可持续利用;济南市

中图分类号:TV213.4

文献标识码:B

引文格式:张守成,郭正萌,王婵.基于虚拟水理论的济南市水资源可持续利用现状研究[J].山东国土资源,2017,33(9):37-44.ZHANG Shoucheng, GUO Zhengmeng, WANG Chan. Study on Present Sustainable Utilization Condition of Water Resource Based on Virtual Water in Jinan City[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(9): 37-44.

0 引言

水资源是人类社会赖以存在和发展的最重要的物质资源,是人类社会文明进步和经济发展的基础。随着我国社会经济迅速发展,水资源短缺问题已日趋突出,许多城市水资源严重短缺,使当地经济发展遭受到严重的影响,水资源的合理规划及可持续利用已成为当今影响我国经济发展的重要因素。而作为山东省省会的济南,因泉水众多,水量充沛,百泉争涌,有“泉城”及“天然岩溶泉水博物馆”的美誉。自 20 世纪 80 年代以来,济南市经济进入了快速发展阶段,济南市的水资源需求急剧增加,导致地下水开始过度、大量的开采,地下水水位持续降低,至 21 世纪初,济南市泉水出现时涌时停,趵突泉曾创下了停喷 890 天的历史记录,2014 年 12 月至 2016 年 4

月,趵突泉水位又多次长期处于停喷红色警戒线以内。水资源的短缺问题已经成为制约济南经济发展的重要因素,如何合理开发、利用济南市水资源,是保证济南市经济社会可持续发展的重要基础。

1 基本理论、研究方法及评价指标

1.1 虚拟水

“虚拟水”最初用于表述世界贸易中隐含在粮食产物中的水。由于粮食作物在生产过程中需要消耗大量的水,且又经常作为大宗商品进行贸易,这些粮食作物跨地区、跨区域进行贸易,其背后隐藏在粮食作物中的水资源的流动,通过农业贸易,实现不同地区区域间水资源的分配,从而影响地区区域内水资源利用,这就是虚拟水理论的应用。将这一部分隐含在产品生产过程中的水称为虚拟水^[1-3]。“虚拟水”

收稿日期:2017-02-22;修订日期:2017-04-11;编辑:陶卫卫

作者简介:张守成(1984—),男,山东莒县人,工程师,主要从事岩土工程工作;E-mail:254230593@qq.com

是指在某种产品和服务完成过程期间,所需要的水资源数量,即凝结在产品和服务中的“虚拟”水量,因此,“虚拟水”用来计量生产商品和服务所需要的水资源数量^[4]。

由于各个地区、区域的气候条件、生产工艺、技术方法等因素不同,使生产产品和服务的虚拟水含量各不相同,表现有较大的差异性,因此在虚拟水计算时,需要考虑产品的生产地及消费地^[5]。

1.2 研究方法

1.2.1 农业产品虚拟水量化

农业产品的虚拟水含量的确定是通过农业作物单位面积的需水量与单位面积产量的比值来进行计算,公式(1)^[6]:

$$VW_{CN} = \frac{CWP_{CN}}{Y_{CN}} \quad (1)$$

式中: VW_{CN} — C 农作物在 N 地区单位质量的虚拟水含量(m^3/t); CWP_{CN} — C 农作物在 N 地区生长过程中的需水量(m^3/hm^2); Y_{CN} — C 农作物在 N 地区的产量(t/hm^2)。

CWR_{CN} 由农作物在整个存续期累计的土壤水分蒸发蒸腾总量 ET_C 确定,具体为公式(2):

$$CWR_{CN} = 10 \times ET_C \quad (2)$$

式中: ET_C —农业作物生长过程中蒸腾、散发水量,计算公式(3)为:

$$ET_C = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中: K_c —农业作物系数,其与农业作物类型及当地土壤蒸腾、散发效应有关,反映了实际农业作物与参考农业作物的差异; ET_0 —农作物生长过程中的蒸腾、散发水量,是指假定作物类型为草,高度为 12 cm,表面阻力系数为 70 s/m,反射率为 0.23,生长正常,高矮整齐,地表全覆盖且供水充足的状况下的需水量^[7-9],公式(4):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_c - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

式中: R_n —农作物表面的净辐射(MJ/m^2); G —土壤热通量(MJ/m^2); T —平均温度($^{\circ}C$); U_2 —地面 2 m 高度处的风速(m/s); e_c —饱和蒸汽气压(kPa); e_d —实测蒸汽气压(kPa); $e_c - e_d$ —饱和蒸汽气压与实测蒸汽气压的差值(kPa); Δ —饱和蒸汽气压与温度相关曲线的斜率($kPa/^{\circ}C$); γ —湿度计常数($kPa/^{\circ}C$); ET_0 具体计算可以通过联合国粮农组织

开发的用来查询全球气象数据的数据库 CLIMWAT 2.0 及联合国粮农组织土地和水资源发展部门开发的决策支持工具 CROPWAT 计算得出。

区域内某农作物产品总虚拟水(TVW)如公式(5):

$$TVW = VW_{CN} \times Y \quad (5)$$

式中: TVW —农业作物 C 在 N 地区的总虚拟水; Y —农业作物 C 在 N 地区作物总产量。

农业作物虚拟水总量 AWU 为该地区各农作物总虚拟水 TVW 之和,即公式(6):

$$AWU = \sum_{i=1}^n TVW_i \quad (6)$$

式中: TVW_i —该地区第 i 种农业作物虚拟水总量。

1.2.2 林牧渔畜虚拟水量化

畜牧产品虚拟水含量主要由 2 部分组成,一部分是畜牧成长过程中需要消耗的水量,主要为饮食用水量,受畜牧品种、类型、成长环境、饲养方式等的影响;另一部分为畜牧产品加工过程中的消耗水量。作为济南市畜牧业饮食、饲养用水,可以参照济南市水资源公报中林木渔畜用水,加工用水统计包含在工业用水,故林牧渔畜虚拟水总量可以采用当地生活用水、工业用水及林牧渔畜用水量统计来实现,其数据参照济南市水资源公报提供的数据。

1.2.3 工业产品的虚拟水量化

工业产品在生产过程中也需要消耗大量的水资源,其中一部分为原材料虚拟水,另一部分则是在产品加工过程中需要消耗的水。由于不同地区、不同企业的生产技术、生产效率等不一样,其生产的同一种产品虚拟水含量也差别较大,而在实际研究中,直接使用产品虚拟水含量的情况也比较少,一般采用工厂生产过程中消耗的总水量,故工业产品的虚拟水量化可采用工业产品总的耗水量,即可通过查阅当地工业用水量统计来实现。

1.2.4 生态环境、城镇公共用水及生活用水虚拟水量化

生态环境虚拟水主要包括城市生态环境虚拟水和改善生态环境植被建设虚拟水,城镇公共用水是由服务业、餐饮业、货运邮电业及建筑业等用水组成,生活用水虚拟水主要为实体水消费,生态环境、城镇公共用水及生活用水虚拟水总含量可参照济南市水资源公报。

1.3 评价指标

虚拟水总量 WU 。含量按照虚拟水理论,一个地区虚拟水总含量公式(7)为:

$$WU = AWU + VWU + IWU + DWU \quad (7)$$

式中: WU —一个地区虚拟水总量(m^3); AWU —农业产品虚拟水总量(m^3); VWU —林牧渔畜虚拟水总量(m^3); IWU —工业产品虚拟水总量(m^3); DWU —生态环境、城镇公共用水及生活用水虚拟水总量(m^3)。

水资源压力指数 WSI 。指一个地区虚拟水总含量 WU 与该地区可利用水资源量 AW 的百分比值,公式(8)如下:

$$WSI = \frac{WU}{AW} \times 100\% \quad (8)$$

式中: AW —地区可利用水资源量,可以查阅当地水资源公报。

水资源压力指数越大,表明该地区水资源越匮乏,假若一个国家或地区的水资源的需求量大于当地水资源的更新量,其水资源压力指数大于 100%^[9,10]。

2 济南市各产业虚拟水的计算与分析

2.1 数据来源及研究内容

(1)数据来源。该研究所用数据来源主要如下:《济南市统计年鉴》(2009—2014 年);《济南市水资源公报》(2009—2014 年);联合国粮农组织(FAO)

推荐的 CLIMWAT 2.0 和 CROPWAT 8.0 软件;阿尔杰恩·胡克斯特拉(Arjen Y. Hoekstra)于 2011 年发布的全球水资源公报;《水足迹评价手册》。

(2)研究内容。主要研究内容为:济南市农业产品虚拟水含量及总量、济南市林牧渔畜虚拟水总量、济南市工业产品虚拟水总量、济南市生态环境虚拟水总量、济南市城镇公共用水虚拟水总量、济南市生活用水虚拟水总量、济南市虚拟水总量、水资源压力指数及根据上述数据进行的济南市水资源利用现状评价。

2.2 2009—2014 年济南市各行业虚拟水计算

2.2.1 计算农业作物虚拟水含量流程

利用 CLIMWAT 和 CROPWAT 软件,计算农业作物虚拟水含量,具体流程如图 1。

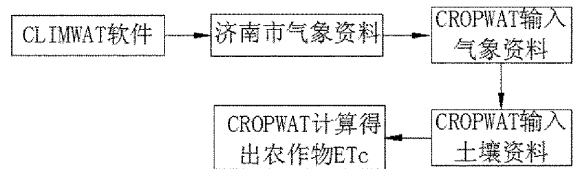


图 1 CLIMWAT 软件和 CROPWAT 软件计算农业作物虚拟水含量的计算流程

2.2.2 2009—2014 年济南市农业作物虚拟水计算

通过 CLIMWAT 软件,获取济南市气象资料,利用 CROPWAT 软件及 2014 年《济南市统计年鉴》,对 2013 年济南市农业作物生长需水量、单位质量虚拟水含量及虚拟水总量进行了计算,所得计算结果见表 1。

表 1 济南市 2013 年农业作物生长需水量单位质量虚拟水含量及虚拟水总量

农作物名称	小麦	稻谷	玉米	谷子	高粱	豆类	薯类	花生
ET_c (mm)	328.7	664.3	367.2	296.9	402.4	315.4	434.5	445
CWR_{CN} (m^3/hm^2)	3287	6643	3672	2969	4024	3154	4345	4450
Y (t)	1238600	28900	1314000	15900	2000	18700	47600	56900
VW_{CN} (m^3/t)	558.36	1034.38	582.66	933.65	1810.80	1163.78	766.76	1188.75
TVW (亿 m^3)	6.916	0.299	7.66	0.148	0.036	0.218	0.365	0.676
农作物名称	棉花	蔬菜	果用瓜	苹果	梨	葡萄	桃	其他水果
ET_c (mm)	588.8	341.5	399.7	682.9	674.4	466.8	615	113.83
CWR_{CN} (m^3/hm^2)	5888	3415	3997	6829	6744	4668	6150	1138.33
Y (t)	19800	6571200	787500	253700	39900	21300	108400	98900
VW_{CN} (m^3/t)	4817.45	51.92	66.49	414.53	321.14	284.90	317.71	100.14
TVW (亿 m^3)	0.954	3.41	0.523	1.05	0.128	0.061	0.344	0.572

注: ET_c 为农业作物生长过程中蒸腾、散发水量, CWR_{CN} 为 C 农作物在 N 地区生长过程中的需水量, Y 为农业作物 C 在 N 地区作物总产量, VW_{CN} 为 C 农作物在 N 地区单位质量的虚拟水含量, TVW 为农业作物 C 在再 N 地区的总虚拟水。

根据上述步骤,对济南市 2009 年至 2014 年农作物虚拟水总量计算如表 2 所示。

表 2 2009—2014 年济南市农业作物虚拟水总量概况(亿 m³)

TVW	2009	2010	2011	2012	2013	2014
小麦	7.02	7.11	7.09	7.01	6.92	6.92
稻谷	0.59	0.58	0.57	0.50	0.30	0.23
玉米	7.54	7.66	7.76	7.57	7.66	7.64
谷子	0.19	0.19	0.19	0.14	0.15	0.15
高粱	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
豆类	0.38	0.36	0.34	0.32	0.22	0.22
薯类	0.70	0.65	0.64	0.54	0.37	0.40
花生	0.72	0.70	0.68	0.66	0.68	0.61
棉花	1.57	1.50	1.48	1.30	0.95	0.79
蔬菜	3.29	3.32	3.34	3.39	3.41	3.41
果用瓜	0.56	0.54	0.54	0.53	0.52	0.52
苹果	1.09	1.05	1.02	1.05	1.05	1.05
梨	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12
葡萄	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
桃	0.28	0.33	0.33	0.33	0.34	0.35
其他水果	0.55	0.39	0.55	0.61	0.57	0.58
AWU	24.71	24.59	24.76	24.16	23.36	23.05

注:表中葡萄作物虚拟水总量为 0.06 亿 m³,该数值为四舍五入的数值,2009—2014 年实际数值各不相同,但四舍五入后均为 0.06 亿 m³。此外,根据济南市 2009—2014 年统计年鉴,葡萄种植面积未发生变化;TVW 为各农作物总虚拟水;AWU 为农业作物虚拟水总量。

通过查阅 2010—2014 年济南市统计年鉴,济南市农业产品种植面积如表 3 所示。

表 3 济南市 2009—2014 年农业产品种植面积概况(hm²)

面积	2009	2010	2011	2012	2013	2014
小麦	213600	216300	215700	213100	210400	210500
稻谷	8800	8700	8500	7500	4500	3400
玉米	205200	208500	211200	206200	208500	208100
谷子	6500	6300	6300	4600	5000	4900
高粱	1100	1000	1000	1000	900	900
豆类	11900	11400	10900	10000	6900	6900
薯类	16100	15000	14700	12500	8400	9100
花生	16200	15700	15300	14900	15200	13600
棉花	26700	25500	25200	22000	16200	13400
蔬菜	96400	97100	97900	99300	99900	99700
果用瓜	14100	13600	13600	13200	13100	12900
苹果	16000	15400	14900	15400	15400	15300
梨	1800	1700	1800	1800	1900	1800
葡萄	1300	1300	1300	1300	1300	1300
桃	4600	5300	5400	5300	5600	5700
其他水果	8300	5900	8400	9300	8700	8800

2.2.3 济南市其他产业虚拟水计算

通过查阅济南市 2009—2014 年水资源公报,计算出济南市林牧渔畜、工业产品、生态环境、城镇

公共用水及生活用水虚拟水总量(表 4)。

表 4 济南市 2009—2014 年其他产业虚拟水总量概况(亿 m³)

虚拟水总量	2009	2010	2011	2012	2013	2014
林木渔畜	1.53	1.78	1.64	1.67	1.87	1.71
工业产品	2.4	2.45	2.67	2.52	2.48	2.45
生态环境	0.65	0.78	1.12	0.88	0.85	0.79
城镇公共用水	0.86	0.86	0.98	1.07	1.09	1.09
生活用水	2.38	2.37	2.6	2.66	2.68	2.63
合计	7.82	8.24	9.01	8.8	8.97	8.67

注:林牧渔畜虚拟水总含量采用当地生活用水、工业用水及林牧渔畜用水量统计来实现,具体数据参照济南市水资源公报;对于工业产品虚拟水总量,采用当地工业用水量统计来实现。

2.3 济南市各产业虚拟水数据研究与分析

(1)不同农业作物单位质量虚拟水 VW_{CN} 含量差别很大。根据表 1,不同农作物产品单位质量虚拟水含量柱状图如图 2 所示。

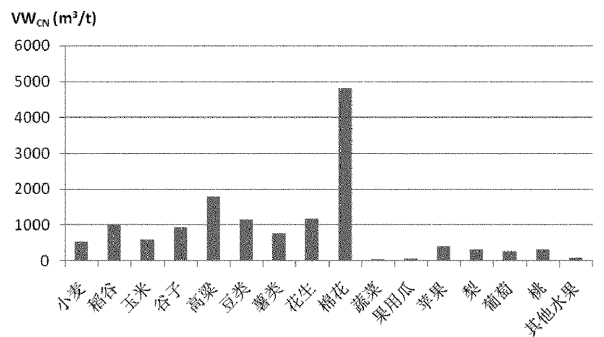


图 2 不同农业产品单位质量虚拟水含量柱状图

通过图 2 可以看出,不同农作物产品单位质量虚拟水含量 VW_{CN} 差别较大,例如粮食作物水稻虚拟水含量远远高于小麦,这是因为水稻生长过程中对水资源需求量大,其叶面蒸腾散发量远大于小麦叶面蒸腾散发量;此外棉花虚拟水含量远远高于水稻,其主要原因为棉花单位面积产量远远低于水稻;而蔬菜虚拟水含量最低,约为小麦的 1/10,主要原因为蔬菜单位面积产量最高,约为小麦产量的 10 倍,因此可以通过调整一个地区农业作物种植达到优化当地水资源利用的目的。

(2)2009—2014 年济南市农业作物虚拟水总量呈降低趋势。根据表 2,济南市 2009—2014 年农作物虚拟总量水含量变化趋势如图 3 所示。

通过表 2、表 3 及图 3 趋势图可以看出,济南市 2009—2014 年农作物虚拟水总量呈降低趋势,主要原因是济南市农业作物种植的调整,表现为减少了单位质量虚拟水含量高的水稻、棉花、谷子、高粱、豆

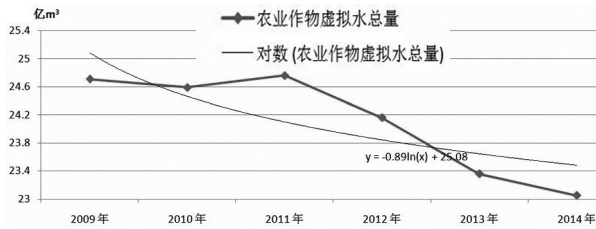


图 3 农业生产水足迹趋势图

类等农业作物的种植面积,增加了单位质量虚拟含量低的蔬菜、桃树及其他水果面积,从而有效降低济南市水资源的消耗,通过趋势图,济南市农业作物对水资源的消耗呈降低趋势,有利于济南市水资源可持续利用。

(3)2009—2014 年济南市其他行业虚拟水总量变化趋势。根据表 4,济南市林牧渔畜虚拟水总量呈波动状态,工业产品及生态环境虚拟水总量总体呈先增高后降低的趋势,城镇公共用水及生活用水呈缓慢增长趋势,具体原因简述如下:

①林牧渔畜虚拟水总量变化,主要因市场供需关系影响每年的林牧渔畜生产总量,故其虚拟水总量出现变化。

②由于济南市工业生产较发达,其生产流程已

基本趋于稳定,在不出现大的工业外部环境改变或大的工业技术提升的情况下,工业产品虚拟水总量已基本趋于成熟稳定。

③生活用水呈缓慢增长趋势。主要因为济南市城市发展引起的,2009 年济南市户口总数为 197.7 万户,总人口数为 603.27 万人,而到 2014 年济南市户口总数增加到 201.93 万户,总人口数增加到 621.61 万人,人口数量的增加,使生活用水呈缓慢增长趋势。可以预见,在济南市人口数量基本稳定之前,生活用水基本呈增长趋势。

④生态环境用水呈增长并趋于稳定状态。作为省会城市,济南市大力提升生态环境,并于 2010 年获得了中国优秀旅游城市、国家园林城市、国家森林公园城市荣誉称号,而这些荣誉的获得,离不开生态环境的建设,这就是济南市生态环境用水前期快速增长,后期趋于稳定的主要原因。

3 基于虚拟水理论的济南市水资源可持续利用评价

3.1 济南市水资源总量利用情况

根据 2009—2014 年济南市水资源公报,济南市水资源利用情况如表 5 所示。

表 5 2009—2014 年济南市水资源利用调查

年份 (年)	平均降雨量 (mm)	水资源总量 (亿 m ³)	地表水资源 总量(亿 m ³)	地下水资源 总量(亿 m ³)	农业灌溉 用水量 (亿 m ³)	林牧渔蓄用 水量(亿 m ³)	工业用水量 (亿 m ³)	城镇公共 用水量 (亿 m ³)	生活用水量 (亿 m ³)	生态用水量 (亿 m ³)
2009	746.8	20.06	9.83	10.23	8.79	1.53	2.40	0.86	2.38	0.65
2010	750.4	20.17	11.32	8.85	9.01	1.78	2.46	0.86	2.37	0.78
2011	677.8	16.09	7.40	8.69	8.55	1.64	2.67	0.98	2.60	1.12
2012	604.4	15.60	7.59	8.01	8.73	1.67	2.52	1.07	2.66	0.88
2013	749.6	20.86	11.57	9.29	8.18	1.87	2.49	1.09	2.68	0.85
2014	444.0	7.91	2.52	5.39	8.23	1.71	2.44	1.09	2.63	0.79

通过表 5 可以得出,济南市 2009 年、2010 年及 2013 年平均降雨量基本一致,在平均降雨量基本相当的情况下,济南市水资源总量基本保持稳定,但地表水资源总量增加较大,由 2009 年的 9.83 亿 m³ 增加到 11.57 亿 m³,这说明济南市通过水利工程,使地表水资源得到了更好的保护、存储及利用;与此相反,济南市地下水资源总量则呈减少趋势,由 2009 年的 10.23 亿 m³ 减少到 9.29 亿 m³,这种趋势对于泉城济南的地下水资源可持续开发利用危害较大,一旦遇到降雨量偏少年份,地下水资源总量将急剧恶化。比如,2014 年济南市平均降雨量仅 444 mm,地下水资源则锐减到仅为 5.39 亿 m³,趵突泉在

2014 年 12 月至 2016 年 4 月期间,多次长期处于停喷红色警戒线以内。对此,济南市政府采取以行政命令方式为主的应急措施,通过回灌补源、关闭市区内的自备水井、加大黄河水引用量,并在 2016 年 4 月首次调用南水北调长江水补源后,趵突泉区域地下水位得到了一定的恢复,但从长远来看,要实现济南市水资源可持续利用及泉水的长年喷涌,仅靠这些是远远不够的^[11]。

3.2 基于虚拟水理论的水资源压力指数计算

根据表 2 及表 4,济南市 2009—2014 年各行业虚拟水总量如表 6 所示。

表 6 济南市 2009—2014 年其他产业虚拟水总量(亿 m³)

各产业虚拟水总量	2009	2010	2011	2012	2013	2014
农业作物	24.71	24.59	24.76	24.16	23.36	23.05
林木渔畜	1.53	1.78	1.64	1.67	1.87	1.71
工业产品	2.40	2.45	2.67	2.52	2.48	2.45
生态环境	0.65	0.78	1.12	0.88	0.85	0.79
城镇公共用水	0.86	0.86	0.98	1.07	1.09	1.09
生活用水	2.38	2.37	2.60	2.66	2.68	2.63
合计	32.53	32.83	33.77	32.96	32.33	31.72

根据表 5,济南市 2009—2014 年水资源总量如表 7 所示。

表 7 济南市 2009—2014 年水资源总量(亿 m³)

名称	2009	2010	2011	2012	2013	2014
水资源总量	20.06	20.17	16.09	15.6	20.86	7.91

通过表 6 及表 7,根据公式(8),计算得出 2009—2014 年济南市水资源压力指数(表 8)。

表 8 2009—2014 年济南市水资源压力指数概况

名称	2009	2010	2011	2012	2013	2014
平均降雨量(mm)	746.8	750.4	677.8	604.4	749.6	444
虚拟水总量(亿 m ³)	32.53	32.83	33.77	32.96	32.33	31.72
水资源总量(亿 m ³)	20.06	20.17	16.09	15.6	20.86	7.91
水资源压力指数(%)	162.2	162.8	209.9	211.3	155	401

3.3 济南市水资源可持续利用评价

根据表 8 数据,济南市 2009—2014 年虚拟水总量、水资源总量趋势图如图 4 所示,水资源压力指数趋势如图 5 所示,水资源压力指数与降雨量关系如图 6 所示。

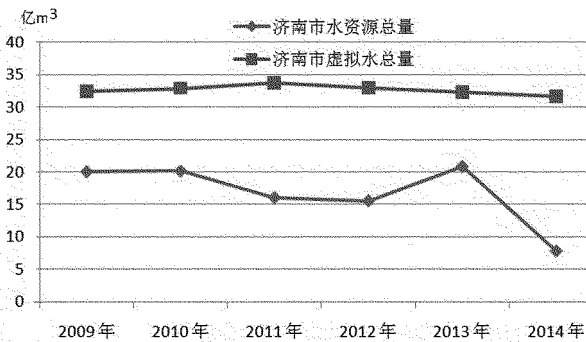


图 4 济南市 2009—2014 年虚拟水总量及水资源总量趋势图

(1)根据表 5 及图 4 可以得出:济南市水资源总量受降雨量影响严重,基本与降雨量呈正比关系,2009 年、2010 年及 2013 年降雨量差别不大,其水资源总量变化不大,但 2011 年、2012 年及 2014 年济

水资源压力指数

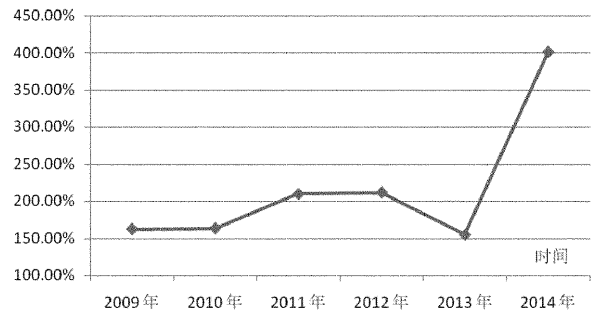


图 5 济南市 2009—2014 年水资源压力指数趋势图

水资源压力指数

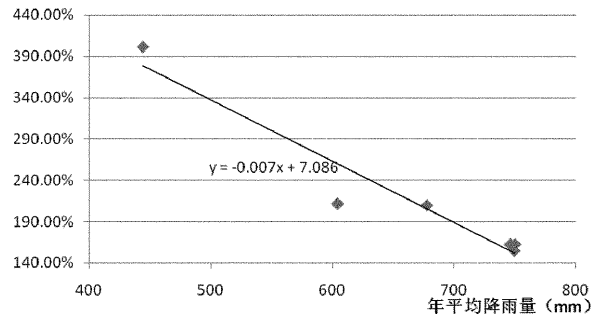


图 6 济南市水资源压力指数与年平均降雨量关系图
济南市降雨量大幅减少,导致济南市水资源总量极大减少。

(2)通过表 6 及图 4 可以看出,济南市虚拟水总量总体呈稳定并有降低趋势,其主要原因是农业作物种植调整使农业产品虚拟水总量降低,进而影响济南市虚拟水总量降低。济南市虚拟水总量总体呈稳定并有降低趋势,有利于济南市水资源可持续开发利用。

(3)根据图 5 水资源压力指数趋势分析图,济南市 2009—2014 年水资源压力指数在降雨量变化不大的 2009 年、2010 年及 2013 年中基本处于稳定状态,维持在 150% 左右,这表明济南市的水资源开发利用已经大幅超出了水资源承载能力,水资源的需求量大幅超出水资源可利用量,且并未随着时间的推移而有所改善,这说明济南市水资源可持续利用现状不容乐观。

(4)根据图 6 可以得知,济南市水资源压力指数与年平均降雨基本呈线性反比关系,年平均降雨量越多,水资源压力指数越小,年平均降雨量越小,水资源压力指数越大。如 2014 年,济南市年平均降雨量仅为 444 mm,水资源压力指数陡升至 401%,水资源需求量远远大于水资源总量,致使地下水水位

持续降低,直至2016年地下水水位得到一定的恢复,可见济南市水资源可持续利用面临严峻的挑战。

4 结论与建议

4.1 结论

基于虚拟水理论,计算研究了济南市2009—2014年各产业虚拟水含量及总量,并依据虚拟水理论,对济南市水资源可持续利用进行了评价,通过研究、计算得出如下结论:

(1)2009—2014年济南市农业产品虚拟水总量占济南市虚拟水总量的76%~72%。随着时间的发展,济南市农业产品虚拟水总量呈降低趋势,这有利于济南市水资源可持续开发利用。

(2)2009—2014年济南市生活用水虚拟水总量约占济南市总虚拟水含量的7.3%~8.3%。受济南市城市发展需要,在人口趋于稳定前,济南市生活用水虚拟水总量将继续呈缓慢增长的趋势,这对济南市水资源可持续利用增加了挑战。

(3)2009—2014年济南市工业产品虚拟水总量约占济南市总虚拟水含量的7.4%~7.7%。受工业技术的发展,济南市工业产品虚拟水总量呈先增高后降低的趋势。可以预见,随着工业技术的发展,工业产品虚拟水含量将呈继续降低的趋势,这对济南市水资源可持续利用提供了良好的基础。

(4)2009—2014年济南市林牧渔畜虚拟水总量呈波动性,约占济南市总虚拟水含量的4.7%~5.4%,其主要原因为林牧渔畜受市场供需关系的影响,产量变化波动明显,致使其虚拟水总量产生波动。

(5)2009—2014年济南市城镇公共用水虚拟水总量约占济南市总虚拟水含量的2.6%~3.4%,并呈缓慢增长趋势;生态环境虚拟水总量约占济南市总虚拟水含量的2%~3.3%,呈先增高后降低的趋势;城镇公共用水虚拟水总量及生态环境虚拟水总量占济南市虚拟水总量比重很小,对济南市水资源可持续利用影响作用有限。

(6)通过计算分析,济南市虚拟水总量总体呈稳定并逐步降低的趋势,这表明随着时间的推移,济南市对水资源需求有降低趋势,减轻了济南市水资源的可持续利用的压力。

(7)通过计算,济南市水资源压力指数为155%

~401%,这表明济南市的水资源需求已经大幅超出了水资源承载能力,说明济南市水资源可持续利用现状不容乐观,可以预见,在未有大量水资源补给的情况下,济南市水资源仍将持续面临短缺的问题,济南市水资源可持续开发利用仍将面临严峻挑战。

4.2 建议

针对济南市水资源利用严峻现状,建议可以采用如下措施:

(1)通过减少济南市虚拟水总量达到降低水资源需求压力的目的,具体措施如下:

①加速济南市农业种植和畜牧业养殖的产业化进程,通过先进的生产技术,现代化种植、养殖工艺,使单位质量虚拟水含量降低,提高水资源利用率。②进一步优化农业结构、林牧渔畜业结构,有意识的规避高耗水农业作物及畜牧产业。③鼓励企业采用先进生产设备,从而达到降低工业产品单位虚拟水含量的目的。

(2)通过增加水资源总量或节省水资源消耗达到降低水资源需求压力的目的,具体措施如下:

①通过修建水库,建设城市集水工程,收集天然降水,减少水资源污染等措施,增加水资源可利用量。②合理的水价机制。利用政府职能,制定阶梯式水价模式,提高市民及企业的节水意识^[12]。③开展跨区域调水,是短期增加水资源总量的最有效方式。

参考文献:

- [1] 胡克斯特拉,刘俊国,曾昭,等.水足迹评价手册[M].北京:科学出版社,2012.
- [2] Allan J A. Virtual water: a strategic resource. Global solutions to region deficits[J]. Ground Water, 1998, 36(4): 545-546.
- [3] Dennis Wichelns. The role of "virtual water" in efforts to achieve food security and other national goals, with an example from Egypt[J]. Agricultural Water Management, 2001, (49): 131-151.
- [4] 吴争程.福建省虚拟水贸易分析[J].贵州师范学院学报,2007, 25(4): 83-87.
- [5] 吴争程.福建省虚拟水贸易分析[J].山东财经大学学报,2014, (5): 43-48.
- [6] 赵阳.基于水足迹理论的昆明市水资源可持续利用研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [7] 刘宁.基于水足迹的京津冀水资源合理配置研究[D].北京:中国地质大学,2016.
- [8] 陈强强.甘肃张掖市实施虚拟水战略研究[D].兰州:甘肃农业

大学, 2005.

- [9] 王红波, 赵明华. 山东省水足迹估算与水资源利用策略——以山东省昌邑市为例[J]. 山东国土资源, 2007, 23(5): 15-20.
- [10] 董宁, 田爱民. 基于虚拟水的济南市水资源可持续利用研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6): 493-496.

- [11] 成世才, 卢兆群, 张强, 等. 济南西部地区地下水水化学特征及演变机理浅析[J]. 山东国土资源, 2017, 33(1): 56-59.
- [12] 于翠翠, 陈瑞恒, 胡思敬, 等. 应用 SPSS 分析降水年际年内变化对泉水动态影响——以济南明水泉域百脉泉群为例[J]. 山东国土资源, 2017, 33(3): 52-58.

Study on Present Sustainable Utilization Condition of Water Resource Based on Virtual Water in Jinan City

ZHANG Shoucheng¹, GUO Zhengmeng², WANG Chan²

(1. Shandong Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Jinan 250014, China; 2. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Shandong Jinan 250013, China)

Abstract: Based on the virtual water theory, by using CLIMWAT 2 and CROPWAT 8 softwares recommended by the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), the virtual water content of agricultural crops in Jinan city have been calculated, virtual water content of agricultural products in 2009—2014 in Jinan city has been obtained. Through inspection and analysis on water resources bulletin from 2009 to 2014 in Jinan city, the total annual forest, the total amount of virtual water, including livestock products, industrial products, ecological environment of water, urban public water and living water in 2009—2014 in Jinan city has been calculated. Through study and analysis on the virtual water data of various industries in Jinan city, the trend and origin of virtual water changes in the industry have been gained. Based on virtual water theory, comparing with the total amount of water resources in Jinan city, water scarcity index has been gained. Finally, through research on the total virtual water, the total water resources, and water scarcity index from 2009 to 2014 in Jinan city, sustainable development and utilization of water resources in Jinan city will be faced with severe challenges. Pointing to severe condition of water resources utilization in Jinan city, the solutions have been put forward. In this paper, from the aspect of virtual water theory, present situation of water resources utilization in Jinan city has been studied and analyzed. It will provide references and new ideas for sustainable development and utilization of water resources in Jinan city.

Key words: Virtual water theory; water resource; sustainable utilization; Jinan city