

DOI: 10.5846/stxb201507301608

黄初龙, 于昌平, 高兵, 黄云凤. 厦门市资源水与虚拟水耦合代谢效率评价. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Huang C L, Yu C P, Gao B, Huang Y F. Assessment of urban water metabolism based on integrated analysis of available and virtual water: a case of Xiamen in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

厦门市资源水与虚拟水耦合代谢效率评价

黄初龙^{1,2,3}, 于昌平¹, 高 兵^{1,3}, 黄云凤^{4,*}

1 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 泉州师范学院资源与环境科学学院, 泉州 362000

3 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021

4 集美大学食品与生物工程学院, 厦门 361021

摘要: 自然水循环与社会水循环的关联研究是制定系统性水代谢对策的前提。从水资源代谢过程与格局角度, 用物质流分析法(MFA)剖析了亚热带季风气候雨影区缺水城市枯水年份资源水与虚拟水耦合代谢的路径、数量, 提取代谢效率评价所需的过程与结构指标, 以社会、经济、生态环境效益最优化为评价原则构建了城市水资源代谢效率评价指标体系, 采用层次分析法赋权, 评价了近 10 年来枯水年份厦门市资源水与虚拟水耦合代谢效率。结果表明, 厦门水资源代谢效率呈加速提高趋势, 主要由用水效率类和水代谢过程与格局类指标驱动。说明提高水资源代谢效率的根本对策在于用水行为和用水过程与格局的改善。采用情景分析法设计主导驱动指标不同组合下水资源代谢效率情景方案, 方案可实现, 表明指标体系可行、稳健, 因此, 可基于这些指标制定水资源管理对策。基于 MFA 结果提取指标丰富了指标体系构建理论。

关键词: 资源水; 虚拟水; 水资源代谢效率; 物质流分析; 指标体系; 情景分析

Assessment of urban water metabolism based on integrated analysis of available and virtual water: a case of Xiamen in China

Huang Chulong^{1,2,3}, Yu Changping¹, Gao Bin^{1,3}, Huang Yunfeng^{4,*}

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Department of Resources and Environmental Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China

3 Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

4 School of Food and Biotechnology Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China

Abstract: The growing scarcity of freshwater represents an increasing risk to human society. Water scarcity is often presented as a systematic water scarcity, which is often caused by complex factors. Most previous researchers have focused on either available or virtual water in order to design strategies for mitigating water scarcity; however, herein, we argue that systematic water scarcity due to urbanization requires an assessment of the integrated metabolic efficiency of available and virtual water. In the case of Xiamen City, which is located in the shadow area of the rain belt in the subtropical monsoon climate, the dry years of 2003, 2009, and 2011 were selected for the assessment in order to implement the results in water management policies and mitigation measures for systematic water shortages. Material flow analysis (MFA) was employed to analyze integrated flows of urban available and virtual water in the dry years from the perspective of water metabolic processes or patterns. It was found that MFA could derive effective indicators for the integrated assessment, based on the comparable, comprehensive, and verifiable MFA charts, according to the effects of indicators in identifying critical

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500391); 中国博士后科学基金面上项目(2012M520402); 国家重大科学研究计划项目(2014CB953801); 福建省中青年教育科研教育项目(JA13272)

收稿日期: 2015-07-30; 修订日期: 2016-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yfhuang@jmu.edu.cn

pathways and links of the integrated flows. Using these MFA indicators, an indicator system could be formulated following the trade-off between socio-economic and environmental benefits. Finally, the indicator system was empowered by the analytic hierarchy process and was used in the integrated assessment. The results showed that improvement in efficiency of the integrated metabolism was accelerated in the past 10 years, and this was dominantly driven by key indicators that evaluated the socio-economic benefits of water use (irrigated area per cubic meter of water, industrial output per cubic meter of water, retail sales of consumer goods per cubic meter of water) and assessed the function of water metabolic processes or patterns (freshwater reuse rate, the proportion of water used in the ecosystem to that used in socio-economic system). These indicators show that the improvement in water metabolic efficiency was dependent on the positive adjustment of water use mode, structure, and process. Scenario Analysis was applied in the design of a better urban water metabolic management system, based on the key driving indicators derived from the integrated assessment results. The indicator system proved robust and operational, and reflects the interaction between natural and social water cycle. In addition, it allows dynamic interaction between water flow and the related socioeconomic or environmental processes to be analyzed, and therefore, could be used to formulate water management policies or developing urban water metabolic models with high efficiency. Establishment of indicator systems based on MFA results in this case study would open a new window for the development of operational efficient indicator systems.

Key Words: available water; virtual water; water metabolic efficiency; material flow analysis; indicator system; scenario analysis

水资源是输入城市的主要资源之一,可分为生态水、灾害水、资源水和虚拟水^[1]。城市水系统可看作自然水循环与人工水循环过程叠加的代谢系统^[2],主要由生产、消费和还原 3 个级别组成^[1,3]。城市水问题生态实质是水资源代谢问题^[4],水资源代谢效率评价是提高水代谢效率的前提。由于提高水代谢效率取决于人类行为,而资源水和虚拟水均受人类强烈调控^[1]、同步输入城市且交互作用,因而,客观评价水资源代谢效率需要同步考虑资源水与虚拟水。

物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)能追踪社会经济系统中物质提取、处理、加工、消费、排放等物质流,可系统地量化社会经济系统与环境系统之间的物质交换^[5-6]。可见,MFA 既可重现天然水流动过程与格局,也可追踪虚拟水流动与分布,便于从水代谢过程与格局角度同步提取资源水流和虚拟水流代谢指标,从而构建可系统地评价水代谢效率的指标体系,既可为水资源管理提供指标依据,也便于从不同学科深入认识社会水循环结构和过程,促进社会水循环与自然水循环的关联研究。

1 研究区概况

中国东南沿海城市是我国城市缺水重点地区^[7]。厦门位于该区,陆地面积 1699 km²,地形以山地、丘陵为主,境内河流水系分散,源短流急。沿海平原是人口密集区,经济发达,需水量大;属亚热带海洋性季风气候,降水季节波动幅度大,以地表水为主的供水易受年际年内变化影响;且因位于台湾山脉雨影区,人均水资源量少,2009 年仅 276.5 m³^[8-9];又由于气候、地形等因素影响,降水的空间分布也不均匀,由人口稀少的西北向人口密集的东南沿海递减^[8]。因此,伴随城市规模持续扩张^[10],厦门是依靠资源型缺水典型城市,作为水资源代谢效率评价对象探讨缺水对策,具有代表性。

1999 年以来典型枯水年份分别为 2003 年、2009 年、2011 年,全市平均降水量分别为 1206.4、1086.7、1290.1 mm,比多年平均值分别少 21.3%、29.0%、15.7%^[8],可作为水资源代谢效率评价年,其评价结果可为缺水对策制定提供依据。

2 研究方法

2.1 虚拟水核算

虚拟水是指已被人类经济社会系统利用、由部分资源水转化而赋存于商品中的水,相当于特定社会经济条件下的用(耗)水量,即生产商品和服务所用水量,其水量大小可用商品重量来衡量,经商品流通而自由流通,直接影响人类系统的生产功能与生活水平^[1]。本研究以质量为单位核算各代谢过程虚拟水量,具体核算过程见图1注释。

2.2 资源水与虚拟水耦合代谢分析方法

分别基于自然水循环、社会水循环,分析资源水、虚拟水代谢流程与格局。进而,把不同统计口径的数据资料统一转化为以质量为单位,基于质量守恒定律,应用 MFA 分析各水资源代谢环节的水资源通量,合成资源水与虚拟水代谢流程图,从而实现自然水循环与社会水循环的关联分析。

2.3 水资源代谢效率变化驱动因素分析

城镇化进程中水资源代谢效率变化的驱动因素复杂多变,主要因素筛选是评价水资源代谢效率的必要步骤。指标体系是反映复杂影响因素的良好工具^[11],可用于评价资源水与虚拟水耦合代谢效率。进而采用相关分析、层次分析等方法分析不同城镇化阶段水资源代谢效率差异、发展趋势及其成因。

2.4 水资源代谢效率评价指标体系构建方法

指标及指标体系的科学性与可操作性是获得客观评价结果的前提,而指标提取与指标体系构建方法常因研究目标、数据来源、研究角度而异,是各种评价研究的探讨焦点^[11-12]。为了确保指标体系的科学性与可行性,根据资源水与虚拟水耦合代谢过程与格局,采用 MFA 提取水资源代谢效率评价指标,根据评价目标筛选指标,兼顾资源水与虚拟水代谢过程与格局特征,按层次结构法组建指标体系。其中,指标筛选兼顾水资源流过程与格局特征、水资源代谢效率评价目标需要、数据来源的可靠性。

2.5 指标数据来源与标准化处理

主要数据来源于各评价年相对应的《厦门市水资源公报》、《厦门市环境统计手册》、《厦门市国民经济和社会发展统计公报》、厦门统计信息网、《福建省统计年鉴》及电子文献。

指标数据标准化处理时,先进行指标分类,再采用极差变换法对指标实际值进行标准化处理,即每个指标实际值 C_i 的去量纲,均按数据系列中的最大参考值与最小值之差为分母进行标准化处理^[11]。

2.6 指标体系赋权与评价方法

层次分析法(AHP)是定性与定量相结合的可将复杂问题分解为若干层次和若干因素的一种系统化、层次化的多目标决策分析方法^[13-14]。水代谢系统是一个由相互关联的众多因素构成的复杂而缺少定量数据的系统,采用层次分析法有利于其复杂代谢问题层次化,在每一层次通过两两比较,确定各指标所反映因子的相对重要性,得出各指标对中间层、中间层对总目标的权重,再综合排序,从而解决问题。根据文献[13, 15-17]中方法进行指标体系赋权。赋权结果一致性检验参照文献[18]的方法和参数。进而,为避免个别指标对指标体系整体功能产生影响,采用文献[11]的加权求和法求水资源代谢效率。

2.7 资源水与虚拟水耦合代谢路径设计

水资源代谢路径剖析是科学评价水资源代谢效率的前提之一。代谢路径剖析有利于明确代谢过程与格局,为水资源流分析提供框架,进而为水资源代谢过程与格局方面的水资源代谢效率评价指标的提取提供依据。近年来,水循环研究焦点已由自然水循环转向社会水循环,然而有些水代谢环节关注较少,如城市水循环中,城市区域内自然净化的资源水在城市生活、生产、环境之间的循环利用,生活垃圾与工农业固体废物所隐含的虚拟水在生活中的回用^[19]。因此,结合数据来源,可设计厦门市资源水与虚拟水耦合代谢路径简图(图1)。

2.8 水资源代谢效率情景方案设计

保证水资源代谢效率情景方案的科学性与可操作性,关键在于方案设计指标的科学与可行性。这类指

标采用两步法提取;根据 MFA 结果,先获得枯水年水资源利用过程与格局方面主要指标,再根据研究区社会经济和环境用水现状选取其他主要指标;再从主要指标与近 10 年厦门岛水资源代谢效率变化的相关分析中,获取水资源代谢效率变化的主导指标。从而,使水资源消费情景方案设计指标体现厦门市水资源代谢效率变化特征,既反映水资源代谢的客观实际,又简化了方案设计的指标数量,便于水资源规划与管理对策的制定与执行,使水资源代谢效率优化方案能兼顾科学性与可行性。

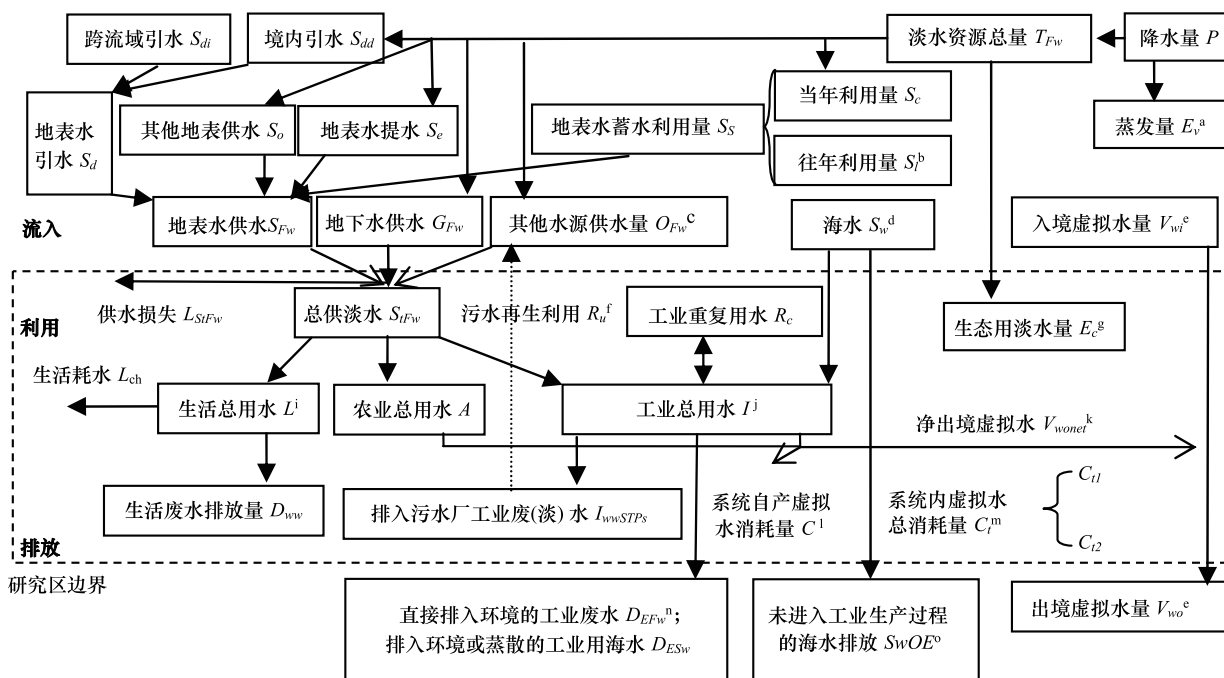


图 1 厦门市资源水与虚拟水耦合代谢路径示意

Fig.1 A conceptual model for analysis of the integrated metabolism of available and virtual water for Xiamen city

箭头表示水流方向。鉴于数据来源,未考虑垃圾回用虚拟水流。图中大写字母及其下标字母为各指标代号,其中, C_{t1} ,社会消费品零售总额所含虚拟水; C_{t2} ,社会非消费品销售总额所含虚拟水。上标字母说明:^a $E_v = P - T_{Fw}$; ^b 即当年蓄水减少量; ^c 包括污水处理回用量、雨水利用量等,其中,2003 年污水回用量仅处理量 1%,即 $65.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ [20]; 2011 年污水回用量按再生水利用率 10.7% [21] 计算,废污水排放数据见文献 [22]; ^d 主要用于火电厂冷却和湖泊冲污等,均未经淡化等处理直接利用,不纳入虚拟水核算,其中,2003 年海水取水量是全市工业用水量与工业淡水取水量的差 [22],但 2009 年海水取水量采用海水利用量 [8] (按 2003 年方法计算结果略大于海水利用量),2011 年则采用工业取水量与工业淡水取水量的差值 [8,22]; ^e 出、入境虚拟水量分别为各年万元 GDP 用水量和外贸出口、进口总额的乘积,万元 GDP 用水量来自各年厦门水资源公报 [8]; 外贸进出口总额和社会消费品零售总额;2003 年来自厦门市 2003 年国民经济和社会发展统计公报 [23],2009 年和 2011 年来自于厦门统计信息网 [24-25]; 美元兑换人民币汇率按中国人民银行公布的最接近相应年份最后一天的人民币汇率中间价计算,即 2004-1-2 为 1 美元对人民币 8.2768,2009-12-31 为 1 美元对人民币 6.8282 元 [26],2011-12-30 为 1 美元对人民币 6.3009 [27]; ^f 包括淡水和海水,是工业用水的组成部分; ^g $E_c = T_{Fw} - S_c - (O_{Fw} - R_u) - G_{Fw} - S_e - S_o - S_{dd}$; ^h 是总生活用水与生活污水排放量的差; ⁱ 假定生活用水贮存量为 0,工农业用水贮存水量以虚拟水形式表示,不含海水; ^j 其中,淡水取水量引自文献 [8]; ^k $V_{wonet} = V_{wo} - V_{wi}$; ^l $C = A + I_{Fw} - I_{wwSTPs} - D_{EFw} - V_{wonet}$; ^m $C_t = S_{Fw} + V_{wi} - V_{wo} - R_u = C_{t1} + C_{t2}$; ⁿ 是工业废水排放量与 I_{wwSTPs} 的差值(淡水); 2011 年,生活用水为城镇生活用水量与农村生活用水量之和 [8,22]; ^o 是当年所取用的总海水中除工业用海水外的利用与消耗

3 基于 MFA 的厦门市枯水年资源水与虚拟水耦合代谢分析

基于水资源代谢路径及数据来源(图 1),应用 MFA,可进行 1999 年以来枯水年份水资源流质量平衡。结果表明(图 2),不仅资源水消耗持续增长,而且出境虚拟水始终高于入境虚拟水量。2003、2009、2011 年的出入境虚拟水量的比值分别为 1.29、1.77、1.55,说明厦门尽管缺水,却依靠外来水源和城市系统内资源水向虚拟水的转化,成为典型的水资源出口型城市。进一步说明了城市资源水与虚拟水耦合评价的必要性。

4 厦门市水资源代谢效率评价

4.1 水资源代谢效率评价指标体系构建

4.1.1 水资源代谢效率评价指标库构建

物质代谢效率评价指标的选择没有统一的标准,通常涉及“投入指标”和“产出指标”,包括资源消耗、环境污染、经济发展和社会福利 4 个方面^[28]。但投入产出指标容易忽略系统内资源利用效率,为全面评价以生态、社会经济效益最优化为目标的都市水资源代谢效率,按代谢过程与格局、社会效益、经济效益、生态环境效益 4 个方面选取指标。

1) 反映水资源代谢过程与格局的指标

根据水资源流 MFA 分析结果(图 2),可提取兼顾水资源流动过程与格局特征的指标。从水资源流过程角度提取反映水资源流过程效率的指标,包括淡水、海水、虚拟水代谢过程指标(附表 1)。从水资源流格局角度提取表征水代谢结构方面的指标,包括供、用、排 3 类结构指标(附表 1)。

2) 影响水资源代谢的社会经济及环境指标

社会经济发展所需资源水与虚拟水的变化量是水资源代谢的驱动力,水代谢效率主要由社会和经济各部门用水效率构成。主要指标包括产业发展指标、人口增长指标、人均收入与消费指标等(附表 1)。

4.1.2 亚热带季风气候雨影区水资源代谢效率评价指标体系组成

城市物质代谢是指城市系统中物质输入、转化、储存以及废弃物排放等代谢过程。城市物质代谢效率是指城市物质代谢过程中单位资源消耗和污染负荷所提供的社会服务量^[29-30]。因而,水资源代谢效率可界定为“研究系统中水资源输入、转化、储存及废污水排放等代谢过程中水资源消耗或废污水排放所提供的社会经济与生态环境服务量”,可由水资源代谢的社会、经济、生态环境 3 方面效益加以表征,其评价指标体系可由反映这些效益的指标构成。据此,以保障居民生活用水需求、提高用水经济产出和改善生态环境质量为目标,结合研究区供用排水特征,并咨询领域专家,厦门市水资源代谢效率评价指标体系应包括反映水资源代谢的过程与格局、社会效益、经济效益、生态环境效益等 4 个指标群(表 1)。此外,水污染也是厦门主要水问题,因此水资源代谢效率评价指标体系必须兼顾水量和水质指标。

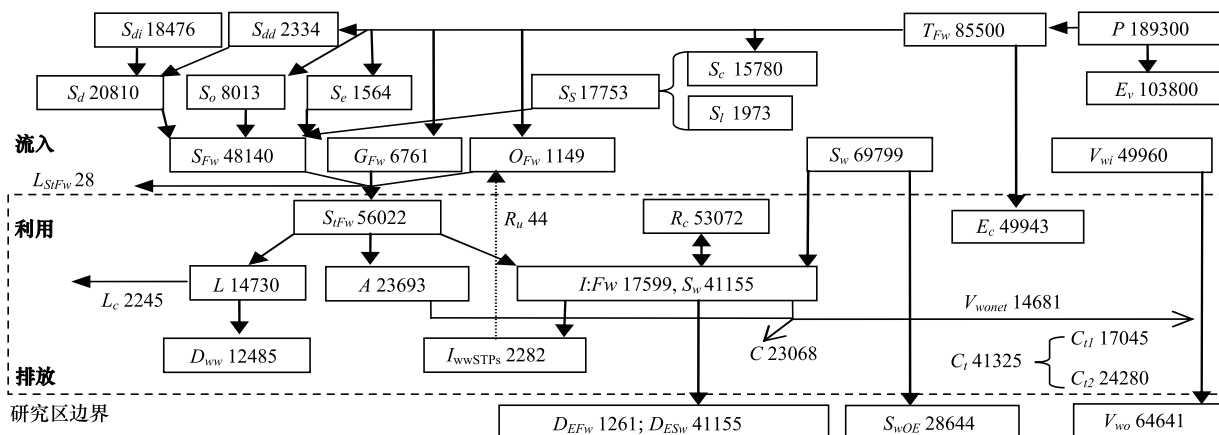
4.2 指标体系赋权结果分析

赋权结果一致性检验 CR 均小于 0.1,符合评价要求。以水资源代谢效率为目标的各领域权重中,社会领域最大,是因为城市生态系统以人为主体的,其水代谢的社会效率最能体现城市用水的可持续性内涵;生态环境领域第二,是由于环境可持续性是人类圈用水可持续的基础。过程与格局指标群中,体现代谢过程效率的淡水回用率、废弃虚拟水回用率比其他指标高,是因为水代谢效率内涵侧重过程而非格局效率。社会效益指标群中,单位用水社会消费品零售额的权重远高于另两个指标,是因为该指标直接反映了水代谢的社会影响。经济效益指标群中,单方水灌溉面积的权重较高,是由于农业用水仍占总用水量一半以上,且用水效益提升空间远大于工业用水效益。生态环境效益指标群中,水环境质量的权重大于其他指标,是因为水环境质量直接反映了人水关系。

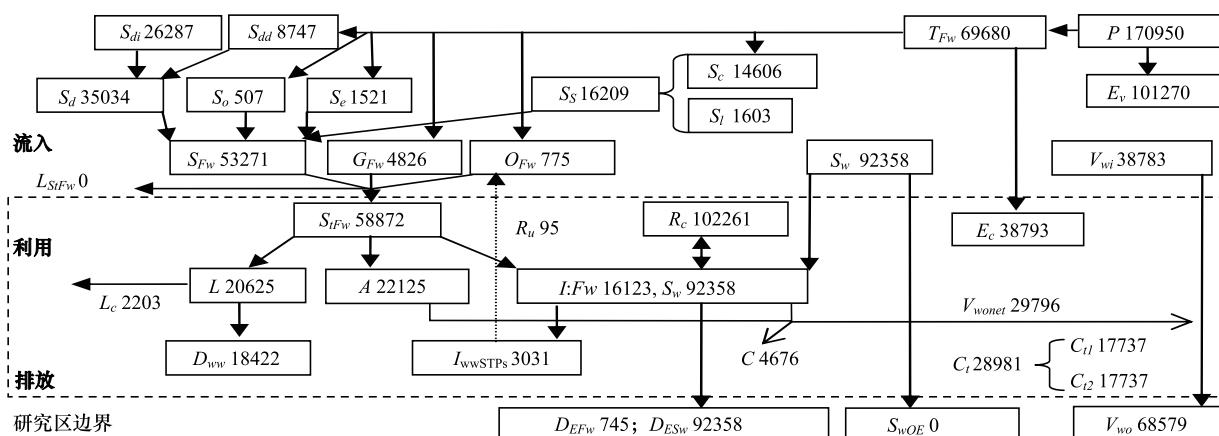
4.3 评价结果与分析

根据赋权和标准化结果(表 2),采用加权求和法求得 2003、2009、2013 年的厦门水资源代谢效率分别为 0.424、0.480、0.610。与 2003 年相比,2009 年、2011 年代谢效率分别提高了 13.1%、43.9%,表明:同为枯水年下,厦门水资源代谢效率加速提高。从各领域对水资源代谢效率的贡献看,社会领域水代谢效率提高幅度最大,2009 年、2011 年分别比 2003 年提高 59.6%、146.5%;过程与格局水代谢效率有较大提高,2009 年、2011 年分别比 2003 年提高 13.8%、22.4%;经济领域水代谢效率也有提高,2009 年、2011 年分别比 2003 年提高 6.9%、15.2%;生态环境领域的水代谢效率则略为下降,2009 年、2011 年分别比 2003 年下降 15.2%、3.2%。表明:1) 厦门水资源代谢效率的迅速提高主要取决于社会经济领域水代谢效率的提高;2) 社会经济方面水资源代谢

2003年



2009年



2011年

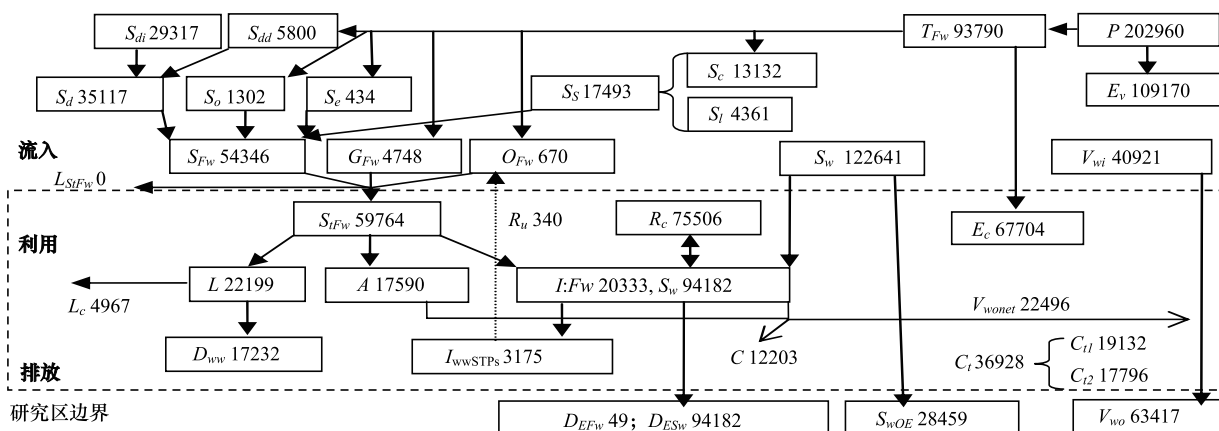
图2 厦门市枯水年社会水循环资源水与虚拟水的耦合流动/($\times 10^7$ kg)

Fig.2 Integrated analysis of available and virtual water flows through social hydrologic cycles in Xiamen in dry years

图中字母代号含义及其数据来源见图1

效率的提高是以牺牲生态环境效益为代价的;3) 社会经济发展与生态环境保护仍不协调;4) 2011 年生态环境方面水资源代谢效率比 2009 年好, 社会经济发展与生态环境保护有趋向协调的可能。

表 1 厦门市资源水与虚拟水耦合代谢效率评价指标体系

Table 1 Indicator system for assessment on integrated metabolism efficiency of available and virtual water flows in Xiamen			
IG	ICU	EQ	RM
PP	淡水回用率 $R_{fw}/\%$	废污水回用量/总供淡水量	为废污水排放率与回用率合成指标,反映人工设施对废污水净化的效率。
	废弃虚拟水回用率 $R_{vw}/\%$	固废回用量/固废产生量	因废污水属资源水,而废气所含虚拟水量远小于固废,所以,废弃虚拟水是指固废所含虚拟水量,反映人工设施对废弃虚拟水净化的效率。
	#系统淡水损失率 $L_{fw}/\%$	系统总体损失淡水/总供淡水量	系统总体损失水量包括供水、用水、排水等各环节的损失量,反映系统水量代谢效率。
	虚拟水出入境比例 $IE_{vw}/\%$	出境虚拟水/入境虚拟水	数值越大表示对境外虚拟水依赖越小、支撑能力越强,进而反映评价区虚拟水代谢效率越高。
	#生产用水比例 $R_p/\%$	生产用水/总用水量	生产用水指工业用水和农业用水。值越小,说明第三产业和生活用水比例越大,越有利于产业结构优化,从而有利于系统代谢效率的提高。
SC	生态用水比例 $R_e/\%$	生态用淡水总量/水资源总量	生态用淡水总量指水资源总量与生产、生活等非生态用水量之差。反映非生态用水代谢效率。
	人口发展水平 $P/\%$	人口增长率+每万人拥有在校大学生增长率	人口增长率、高校在校生数增长率分别反映水代谢效率对人口数量、质量增长水平的贡献。
	单位用水社会消费品零售额 $C_w/(\text{元}/\text{m}^3)$	社会消费品零售额/总用水量	是水代谢效率在用水人口物质生活水平方面的反映。
	单方用水支撑人口数 $P_{lw}/(\text{人}/\text{m}^3)$	当年年末常住人口数/生活用水总量	单方生活用水所能支撑的人口越多,表示生活供用水过程损耗越少,生活用水代谢效率越高。
EN	单方水灌溉面积 $U_{ai}/(\text{m}^2/\text{m}^3)$	1/农田亩均用水量	反映农业用水代谢效率。
	单方用水工业产值 $U_{io}/(\text{元}/\text{m}^3)$	1/万元工业产值用水量	反映工业用水代谢效率。
EC	森林覆盖率 $F_c/\%$	森林覆盖面积/总土地面积	森林覆盖率既受社会经济木材需求的影响,也受供水、净水等水代谢需求的影响,反映人工水循环系统水代谢的基础支撑能力。
	降水产流率 $E_p/\%$	1-(降水量-水资源总量)/降水量	反映自然水循环对人工水循环代谢效率的响应。代谢效率越低,蒸发越多,产流越少。
	#水环境质量 $Q_{we}/\%$	废污水排放量/水资源总量	废污水排放量指淡水供用过程中排入环境的废水和污水,反映系统水质代谢效率

IG, indicator groups, 指标群;ICU, indicators, codes, units, 指标及其代号和单位;EQ, equation, 计算公式;RM, remarks, 备注。PP, processes and patterns, 过程与格局领域;SC, society, 社会领域;EN, economics, 经济领域;EC, eco-environment, 生态环境领域。#指越小越优型指标,即指标值越小对代谢效率的贡献越高;其他均为越大越优型指标,即指标值越大对代谢效率的贡献越高

表 2 指标体系赋权与评价结果

Table 2 Results of priority setting for indicator system and its application in assessing on water metabolism efficiency															
IG		PP						SC			EN		EV		
W		0.153						0.431			0.170		0.246		
I		R_{fw}	R_{vw}	IE_{vw}	R_p	R_e	$P^{\&}$	C_w	P_{lw}	U_{ai}	U_{io}	F_c^*	E_p	$Q_{we}^{\#}$	
指标实际值	2003	0.079	77.948	1.294	73.707	58.413	1.4	0.004	0.015	1.138	0.079	46.02	45.166	18.746	
Actual value	2009	0.161	90.4	1.768	64.968	55.673	1.2	0.01	0.012	1.091	0.179	38.68	40.76	31.857	
	2011	0.569	93.699	1.55	63.455	72.187	2.24	0.014	0.016	1.016	0.313	42.8	46.211	21.81	
指标标准化值	2003	0.001	0.779	0.647	0.263	0.584	0.14	0.206	0.491	0.569	0.159	0.46	0.452	0.813	
Normalized value	2009	0.002	0.904	0.884	0.35	0.557	0.12	0.481	0.407	0.546	0.357	0.387	0.408	0.681	
	2011	0.006	0.937	0.775	0.365	0.722	0.224	0.714	0.688	0.508	0.625	0.428	0.462	0.782	
W	0.365	0.293	0.076	0.078	0.189	0.128	0.646	0.227	0.750	0.250	0.128	0.220	0.651		
领域评价	2003	0.408	0.262	0.466	0.688										
Evaluation value for each group	2009	0.465	0.418	0.498	0.583										
	2011	0.500	0.646	0.537	0.666										

IG, indicator groups, 指标群;W, weight, 权重;I, indicators, 指标。指标群和指标代号含义见表1。#指越小越优型指标;&指常住人口自然增长率,2003和2009年数据来源于厦门统计信息网^[31],其中,2011数据来自电子文献^[32]; * 2003年数据来自文献^[33],2009年数据来自文献^[34],2011年数据为2010年底数据,来自文献^[35]

5 水资源代谢驱动机制及其优化调控

5.1 水资源代谢驱动机制分析

由于自然水循环系统的复杂性、多变性及被人类干扰后变化的不确定性,人类对自然水循环系统的认识具有局限性、滞后性,例如人类对水坝和河流水泥护岸建设改变自然水系统导致的潜在危害的认识远远滞后于建设效益的认识。为此,水资源高效代谢的关键在于水循环过程中人类行为而不是自然过程的调整。评价结果也表明,厦门水资源代谢效率加速提高关键在于社会经济领域的人类用水效率快速提高(表 2)。供水和废水处理是联结自然水循环和社会水循环的枢纽环节,也是虚拟水流和资源水流的耦合环节。因此,影响虚拟水和资源水耦合代谢效率的主要环节有:水生产、水消费、水排放。水生产和水排放又经由水消费而形成循环,直接取决于水消费状况(图 2)。

水生产供给方面,包括虚拟水和生产生活用水的生产。虚拟水产品生产量与产品结构取决于研究区内虚拟水消费与虚拟水进出境状况。如,人均水足迹远大于农村的城市或缺水区适宜发展低耗水高附加值产业,通过虚拟水贸易进口高耗水产品满足社会经济发展需求^[36]。水稀缺条件下,虚拟水生产规划应考虑各产业用水效率与机会成本,减少水产养殖和农作物生产规模,提高低耗水高附加值服务业在国民经济中所占比例^[37]。厦门为虚拟水出口型城市(图 2),其虚拟水出境量多少取决于境外虚拟水供需平衡状况。生产、生活供水量则取决于生产、生活用水效率。

水消费需求方面,虚拟水消费既受境内消费影响,也受境内外虚拟水贸易影响,因此虚拟水消费驱动机制分析既要考虑境内消费,也要考虑境内外虚拟水贸易量和贸易结构的影响^[36,38-39]。如,2007 年中国国内贸易所含虚拟水提取量和消费量分别占全国年淡水总取水量的 38%、总水消费量的 39%;而国际贸易所含虚拟水提取量和消费量仅分别占全国总取水量的 17.4%、总水消费量的 16.1%,其中,纺织品、服装、皮革制品所含的虚拟水贸易量大于农产品^[39]。资源水消费则受经济发展水平、产业耗水结构、水资源禀赋和水资源可利用性与社会经济需水的空间匹配性等因素影响。

水排放方面,包括废污水排放和隐含虚拟水的固体废物排放。废污水排放既是社会水循环可利用水量的消耗,也是自然水循环水体自净负荷的增加。废污水排放量与废污水中污染物含量取决于水消费量与消费结构,也取决于水处理设施投入。其中,工业废水排放取决于经济增长状况和工业结构^[40]。固废排放既取决于工农业生产清洁技术水平与循环利用能力,也取决于居民生活消费习惯、消费水平。

代谢效率评价与各指标标准化值的 Pearson 相关分析结果表明(表 3),影响水资源代谢效率的主导指标包括单方用水灌溉面积、淡水回用率、单方用水工业产值、单方用水社会消费品零售额、生态用水比例,这些指标与水资源代谢效率的 Pearson 相关系数达 0.9 以上;其他重要指标包括为人口发展水平、废弃虚拟水回用率、单方用水支撑人口数、生产用水比例,这些指标与水资源代谢效率的 Pearson 相关系数达 0.8 以上。可见,用水效率类指标与水代谢过程与格局类指标是水资源代谢效率变化的主要驱动指标,可作为水资源代谢优化调控方案的制定依据。

表 3 水资源代谢效率评价与各指标标准化值的 Pearson 相关分析

Table 3 Correlation analysis between values of water metabolism efficiency and standardized values of indicators

指标 Indicator	R_{fw}	R_{vw}	IE_{ew}	R_p	R_e	P	C_w	P_{lw}	U_{ai}	U_{io}	F_c	E_p	Q_{we}
Pearson	0.991	0.852	0.334	0.817	0.900	0.888	0.962	0.831	-0.996	0.990	-0.223	0.398	0.003

指标代号含义见表 1

5.2 水资源代谢优化调控

以枯水年各驱动指标实际值年变化速度为代表(表 2),假定低方案各驱动指标年变化速度为 2003—2009 年的年变化速度;高方案各驱动指标年变化速度为 2009—2011 年的年变化速度;中方案各驱动指标年变化速度为高低方案各指标年变化速度的平均值。则可得 2020 年(短期)、2030(中期)、2050 年(长期)的高、中、低方案厦门各驱动指标预测值(表 4)。

表 4 驱动指标变化趋势情景
Table 4 Scenario values of indicators for water metabolism efficiency

方案 Scenario	Max	实际值 Actual values									标准化值 Normalized value																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		低 Pessimistic			中 Average			高 Optimistic			低 Pessimistic				中 Average				高 Optimistic																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Y																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			</

Y, forecast years, 预测年; 其他代号为各指标代号, 含义见表 1; 最小参照值均为零; Max, 最大参照值, 标准化后均为 1; 负值按 0 计算; 回用率超过 100%, 表示循环回用导致的累计回用率; 生态用水比例超过 100% 的按 100% 计, 表示人类圈不取用生态水, 仅需依靠资源水就可满足需要, 资源水含义见文献^[1]; 单方用水灌溉面积为负数时, 按 0 计算

驱动指标不同组合模式下水资源代谢效率情景方案设计与优化:根据各驱动指标高、中、低方案的短、中、长期预测值(表4),假定其他指标值为基准年2011年实际值,则可求得2020年(短期)、2030年(中期)、2050年(长期)的高、中、低方案厦门水资源代谢效率(表5)。

基于现状评价期水资源代谢效率年均增速的水资源代谢效率情景方案设计与优化:以枯水年水资源代谢效率年变化为例(4.3 评价结果与分析),假定低方案水资源代谢效率年变化速度为2003—2009年的年变化速度,即水资源代谢效率年均增加2.2%;高方案水资源代谢效率年变化速度为2009—2011年的年变化速度,即水资源代谢效率年均增加13.6%;中方案水资源代谢效率年变化速度为高低方案年变化速度的平均值,即水资源代谢效率年均增加 $(2.2\%+13.6\%)/2 = 7.9\%$ 。则可得2020年(短期)、2030年(中期)、2050年(长期)的高、中、低方案厦门水资源代谢效率(表5)。

表5 水资源代谢效率情景

Table 5 Water metabolism efficiency scenarios

方案 Scenario	高 Optimistic	中 Average	低 Pessimistic
BY	0.610		
G	13.6	7.9	2.2
2020	1.357 (0.441)	1.043 (0.444)	0.730 (0.437)
2030	2.186 (0.497)	1.525 (0.503)	0.864 (0.498)
2050	3.846 (0.654)	2.488 (0.621)	1.131 (0.619)

BY, base year, 基准年(2011); G, annual growth rate, 年增速(%); 表中括号内数值为驱动指标不同组合模式下水资源代谢效率情景值; 括号外数值为基于现状评价期水资源代谢效率年均增速的水资源代谢效率情景值

与2003—2011年水资源代谢效率年变化速度直接预测的短、中、长期的高、中、低方案厦门水资源代谢效率相比,驱动指标不同组合模式下水资源代谢效率情景均偏低,特别是比除中方案2020年外的中高方案水资源代谢效率情景值低3倍以上(表5)。可见,驱动指标不同组合模式下水资源代谢效率情景设计更具可操作性。因此,可根据这些主导指标制定相应的水资源管理对策。如淡水回用率:淡水是社会经济用水的主要来源。淡水回用不仅具备显著的社会经济效益^[41];也有利于减少天然水提取,改善生态环境质量。如,回用的淡水可用于冲侧、灌溉、冷却、洗涤、防灾、农产品加工、造纸、城市景观用水、湿地用水、地下水空间维护等生活、生产、生态用水等^[42]。

6 结论

应用MFA从水代谢过程与格局角度同步提取资源水流和虚拟水流代谢指标,一方面可同步考虑研究系统边界水资源输入输出特征和系统内部各环节的水代谢特征,另一方面便于同时反映资源水和虚拟水的代谢特征。因此,把这些指标纳入水资源代谢效率评价指标体系,从而更系统地、全面地评价水代谢效率。评价结果表明,厦门近十年来水资源代谢效率迅速提高,主要依赖于社会经济领域水代谢效率的提高;然而,生态环境领域水代谢效率则略为下降,但下降幅度趋缓。评价结果与各指标值的相关分析表明,用水效率类指标和水代谢过程与格局类指标是厦门市水代谢效率变化的主要驱动指标,说明提高城市水代谢综合效率主要取决于水资源用水消费行为的改善、水代谢过程与格局的合理规划。依据这些主要指标设计城市水代谢效率改善对策,有利于提高对策的可操作性与综合性。

因数据来源限制,本研究代谢系统内的资源水流与虚拟水流耦合环节较简单,有待完善。然而,基于物质流图的资源水与虚拟水耦合代谢分析为自然资源与虚拟资源的耦合分析提供了框架基础,有利于获取反映自然过程和社会经济过程中资源流全局特征的系统性指标,促进社会水循环与自然水循环的关联研究,为制定一体化、综合性资源管理对策提供依据,也为水资源消费者与管理者的沟通提供简洁、实用的指标工具。此外,基于物质流图提取反映资源流过程与结构的指标,有利于完善资源评价指标体系构建理论与方法。

致谢:感谢中国科学院城市环境研究所陈少华研究员、崔胜辉研究员、唐立娜研究员,台湾大学马鸿文教授和审稿专家关于本文修改方向的宝贵建议!

参考文献 (References):

- [1] 黄初龙. 福建省中长期水资源供需平衡问题与对策. 中国水利, 2009, (9): 53-55, 4-4.
- [2] 王晓昌. 基于水代谢理念的城市水系统构建. 给水排水, 2010, 36(7): 6-6.
- [3] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: model development, and a case study for Beijing. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4702-4711.
- [4] 颜京松, 王美珍. 城市水环境问题的生态实质. 现代城市研究, 2005, (4): 6-10.
- [5] Brunner P H, Rechberger H. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2003; 1-318.
- [6] Huang C L, Vause J, Ma H W, Yu C P. Using material/substance flow analysis to support sustainable development assessment: A literature review and outlook. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 68: 104-116.
- [7] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2007 中国可持续发展战略报告-水: 治理与创新. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 厦门水利局. 厦门市水资源公报(1999-2011). 2000-2012.
- [9] 厦门市统计局. 厦门经济特区年鉴(2000-2012). 北京: 中国统计出版社, 2000-2012 [2015-05-03]. <http://www.stats-xm.gov.cn/zfxgk/zfxgkml/tjsjzl/tjnj/>.
- [10] Lin T, Xue X Z, Shi L Y, Gao L J. Urban spatial expansion and its impacts on island ecosystem services and landscape pattern: A case study of the island city of Xiamen, Southeast China. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 81: 90-96.
- [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. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [12] 黄初龙, 章兴新, 杨建锋. 中国水资源可持续利用评价指标体系研究进展. 资源科学, 2006, 28(2): 33-40.
- [13] Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [14] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- [15] Liao C N. Supplier selection project using an integrated Delphi, AHP and Taguchi loss function. *ProbStat Forum*, 2010, 3: 118-134.
- [16] Chakladar N D, Chakraborty S. A combined TOPSIS-AHP-method-based approach for non-traditional machining processes selection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, 222(12): 1613-1623.
- [17] Kun M, Topalo lu S, Malli T. Evaluation of wheel loaders in open pit marble quarrying by using the AHP TOPSIS approaches. *Archives of Mining Sciences*, 2013, 58(1): 255-267.
- [18] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 陈俊羊, 赵俊峰. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [19] Huang C L, Vause J, Ma H W, Yu C P. Urban water metabolism efficiency assessment: Integrated analysis of available and virtual water. *Science of the Total Environment*, 2013, 452-453: 19-27.
- [20] 中国水网. 厦门市污水处理回用率不到 1%上亿吨中水流入海. (2004-05-15) [2016-05-03]. <http://www.h2o-china.com/news/27596.html>.
- [21] 台海网. 厦门市再生水利用率已达 10.7% 每天将回用 600 吨中水洗路. (2012-08-04) [2016-05-03]. <http://www.taihainet.com/news/xmnews/shms/2012-08-04/904918.html>.
- [22] 厦门市环境保护局. 厦门环境统计手册(2003, 2009, 2011). 2004, 2010, 2012.
- [23] 厦门市统计局. 厦门市 2003 年国民经济和社会发展统计公报. (2008-03-24) [2016-05-03]. http://www.xm.gov.cn/zfxgk/xgkznm/gmzgan/tjgh/200803/t20080324_202526.htm.
- [24] 厦门统计信息网. 2009 年 12 月全市主要经济指标快报. (2010-01-16) [2016-05-03]. http://www.stats-xm.gov.cn/tjzl/tjsj/jdsj/sjyb/201009/t20100916_16286.htm.
- [25] 厦门统计信息网. 2011 年 1-12 月全市主要经济指标快报. (2012-03-06) [2016-05-03]. http://www.stats-xm.gov.cn/tjzl/tjsj/jdsj/sjyb/201203/t20120306_20368.htm.
- [26] 中国人民银行货币政策司. 2009 年 12 月 31 日 中国外汇交易中心受权公布人民币汇率中间价公告. (2009-12-31) [2016-05-03]. http://www.pbc.gov.cn/publish/zhengcehuobisi/637/2010/20100423150309957153245/20100423150309957153245_.html.
- [27] 中国人民银行货币政策司. 2011 年 12 月 30 日 中国外汇交易中心受权公布人民币汇率中间价公告. (2011-12-30) [2016-05-03]. <http://www.pbc.gov.cn/zhengcehuobisi/125207/125217/125925/755696/index.html>.
- [28] 刘勇. 基于 DEA-Malmquist 的我国城市物质代谢效率评价. 自然资源学报, 2010, 25(1): 12-17.
- [29] Vogtlander J G, Bijma A, Brezet H C. Communicating the eco-efficiency of products and services by means of the eco-costs/value model. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10(1): 57-67.
- [30] 张妍, 杨志峰. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例. 生态学报, 2007, 27(8): 3124-3131.

- [31] 厦门统计信息网. 2009 年厦门市常住人口发展特点浅析. (2010-05-06) [2016-05-03]. http://www.stats-xm.gov.cn/tjzl/tjfx/201005/t20100506_12001.htm.
- [32] 刘艳. 厦门常住人口达 367 万 岛内密度高于香港新加坡. 厦门日报, (2013-06-07) [2016-05-03]. http://news.xmnn.cn/a/xmxw/201306/t20130607_3359605.htm.
- [33] 厦门市委农办、农业局、林业局区划办. 厦门农业自然资源. 厦门三农网, (2007-03-15) [2015-05-03]. http://www.sn.xm.gov.cn/tccx/201107/t20110714_408932.htm.
- [34] 海西晨报. 厦门被评为“国家森林城市” 全市森林覆盖率达 42.8%. 新浪福建: 厦门网, (2013-09-25) [2016-05-03]. http://news.xmnn.cn/a/xmxw/201309/t20130925_3512018.htm.
- [35] 厦门三农网. 厦门市城乡绿化一体化等十三个绩效评估指标得分值位居全省前两位. (2011-09-01) [2016-05-03]. http://www.sn.xm.gov.cn/cslly/201109/t20110913_425932.htm.
- [36] Feng K S, Siu Y L, Guan D B, Hubacek K. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach. *Applied Geography* 2012, 32(2): 691-701.
- [37] Mubako S, Lahiri S, Lant C. Input-output analysis of virtual water transfers: Case study of California and Illinois. *Ecological Economics*, 2013, 93: 230-238.
- [38] Duarte R, Pinilla V, Serrano A. The effect of globalisation on water consumption: A case study of the Spanish virtual water trade, 1849-1935. *Ecological Economics*, 2014, 100: 96-105.
- [39] Zhang C, Anadon L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. *Ecological Economics*, 2014, 100: 159-172.
- [40] Geng Y, Wang M L, Sarkis J, Xue B, Zhang L, Fujita T, Yu X M, Ren W X, Zhang L M, Dong H J. Spatial-temporal patterns and driving factors for industrial wastewater emission in China. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 76: 116-124.
- [41] 张红岩, 宁方正. 淡水回用一举两得青岛发电厂年节水收益 120 余万元. 青岛日报, (2001-08-29(05)) [2016-05-03]. http://www.qingdaonews.com/gb/content/2001-08/29/content_353783.htm.
- [42] 陈荣. 城市污水再生利用系统的构建理论与方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

附表 1 指标库

Table S1. Indicators bank

IG	I	M	IG	I	RM
Aa	淡水	供淡水损失率	C	社会	反映生活需水对水代谢的驱动力
		用淡水损失率			反映一定程度的用水需求增长率(基于收入影响消费, 消费影响用水)
		废淡水回用率			反映生活用水对水代谢效率的影响
		废污水排放率			反映城镇生活用水对水代谢的影响
		系统淡水损失率			反映农村生活用水对水代谢的影响
					
	虚拟水	虚拟水入境损失率		经济	反映工业用水对水代谢的驱动力
		虚拟水消费损耗率			反映工业用水效率对水代谢效率贡献
		废弃虚拟水回用率			反映农业用水效率对水代谢效率贡献
		系统虚拟水损失率			反映服务业用水效率对水代谢效率贡献
		虚拟水贮存率			反映农田用水对水代谢效率的影响
		虚拟水出入境比例			反映生产用水效率对水代谢效率的贡献
					

续表

IG	I	M	IG	I	RM
	海水	海水回用循环率 海水取水废弃率		环境	森林覆盖率 生态环境需水量 降水变率 地表径流年平均流量 水环境质量 人均水资源量
Bb	供水	新取水比例 淡水取水比例 入境虚拟水比例			反映自然环境对淡水资源的涵养能力,进而反映水代谢供水与净化能力 反映生态环境需水对社会水代谢压力 反映气候环境对代谢过程供水稳定性的影响 反映自然水循环过程淡水更新与废水净化能力 反映水环境污染现状对水代谢供水环节的影响 反映水代谢供需平衡的淡水资源基础
	用水	生活用水比例 生态用水比例 生产用水比例 第一产业用水比例 第二产业用水比例 第三产业用水比例	Bb	排水	生活污水比例 工业废水比例 农田退水比例 入海废污水比例
		缓解淡水资源取水压力 海水用水效率 表示对自然水循环的干扰强度 表示人类圈对陆地水循环的依赖程度 反映对境外社会水循环的依赖程度 反映城市化程度、生活用水与生产生态用水的平衡状况 反映生态环境维护力度 反映经济发展水平与社会发展和水环境保护的协调程度 反映经济结构及经济发展水平 反映工业化程度 反映第三产业用水效率和产业结构调整方向的可持续性			反映生活用水与其他用水的废污水排放结构 反映工业用水与其他用水废污水排放结构 反映农业用水与其他用水的废污水排放结构 反映海洋水环境对废污水的承载权重