

区域水资源代谢效率时空变化及驱动因素

孟丽红¹, 丁之勇², 李成阳^{3,4}, 莫小丽¹, 田进明¹

(1. 赣南师范大学地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000;
2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
4. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730013)

摘要:针对当前水资源短缺的重大问题和现有研究的薄弱环节,从异质性资源禀赋的角度揭示了1990—2015年中国京津冀、中部地区、西部地区9省(市、区)水资源代谢效率时空演变规律和驱动因素。结果表明:时间尺度上1990—1995年水资源代谢效率变化不大,自2000年以后总体呈明显提高的趋势;从空间分布看,在早期阶段,水资源代谢效率较低,空间分布区域差异不明显,2005年以后,京津冀和中部地区明显高于西部地区;综合京津冀、中部地区、西部地区来看,废弃虚拟水回用率、单位用水社会消费品零售额、森林覆盖率以及淡水回用率是影响区域水资源代谢效率的主要驱动因素。

关键词:资源禀赋;水资源代谢效率;时空变化;驱动因素

中图分类号:TV211.1;P964 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)03-0020-07

Spatiotemporal variation and driving factors of regional water resources metabolism efficiency//MENG Lihong¹, DING Zhiyong², LI Chengyang^{3,4}, MO Xiaoli¹, TIAN Jinming¹ (1. College of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730013, China)

Abstract: Considering the problems of current water shortages and the weakness in the existing research, this study scientifically revealed the spatiotemporal varieties of water resources metabolism efficiency and driving factors in nine provinces (cities) in the Beijing-Tianjin-Hebei region, central and western regions of China from 1990 to 2015 in the perspective of heterogeneous resource endowments. The main results show that the water resources metabolism efficiency changed little from 1990 to 1995, and the overall trend has been obviously improved since 2000 from the time scale. From the perspective of spatial distribution, in the early stages, water resources metabolism efficiency was low with unobvious regional differences. Since 2005, more obvious regional differences occurred in the Beijing-Tianjin-Hebei region than in other regions. Waste virtual recycling use ratio, total retail sales of consumer goods of unit water use, forest coverage and fresh water recovery rate are the main driving factors of regional water resources metabolism efficiency.

Key words: resource endowment; water resources metabolism efficiency; spatiotemporal variation; driving factors

水资源是人类生存、生产和发展不可替代的资源要素、生态条件和安全保障^[1]。然而,水资源供需矛盾日益突出,严重影响了我国社会经济的可持续发展。水资源时空分布不均匀,水量、水质以及水管理落后导致的缺水问题异常突出。在全国660多个建制城市中,缺水城市400多个,其中严重缺水城市约为110个,每年因缺水造成的经济损失达2000亿元^[2]。缺水已经成为我国粮食安全、经济发展及社会安定的首要制约要素^[3]。据统计,京津冀人均水资源仅286 m³,远低于国际公认的人均500 m³的“极度缺水标准”。如何解决水资源短缺问题,是研究者和决策者正在深入思考的问题^[4]。

1999年Hermanowicz等^[5]首次提出了水代谢概念,以描述城市或者区域中的水供给、消纳与排放过程。到目前为止,国际上关于水资源代谢的研究已取得很大进展,如Behzadian等^[6]应用WaterMet2模型对城市水资源代谢系统进行了评估,Serrao-Neumann等^[7]从城市水资源代谢的角度,分析了土

地和水资源的合理配置问题。另外,其他学者也分别应用水资源代谢理论,对水代谢系统模拟^[8]、水资源承载力^[9]、能值代谢效率^[10]等方面进行了研究。从国内来看,水资源代谢相关的研究尚处于起步阶段。丹保宪仁^[11]认为,城市水系统的水污染实际上是城市物质代谢失衡的结果。钱家忠等^[12]从系统的观点出发,提出了地球水循环过程中地下水代谢的概念,分析了地下水代谢过程,建立了地下水极限代谢条件方程。一些学者对城市水代谢做了进一步的研究和探索^[13-15]。综合国内外对水资源代谢的研究进展来看,大部分文献主要集中在实体水探讨,仅有少数学者结合实体水和虚拟水从水消费^[16]、水资源配置^[17]、水流^[18]等角度对水资源代谢进行分析,从时空角度并耦合实体水和虚拟水对水资源代谢效率的研究尚未见开展。区域水生态问题实质是水资源代谢问题,水资源代谢效率评价是保证水资源可持续利用的前提。参照黄初龙等^[19]对水资源代谢效率概念的界定,文中的区域水资源代谢效率指的是研究区域水资源输入、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。由于提高水资源代谢效率取决于人类行为,而资源水和虚拟水受人类强烈调控,客观评价水资源代谢效率需要同步考虑资源水与虚拟水。

鉴于此,针对当前区域水资源代谢效率研究的薄弱环节,本文选取我国京津冀和中、西部地区为研究对象,探索异质性资源禀赋下区域资源水-虚拟水耦合代谢效率的分析途径,揭示了1990—2015年研究区水资源代谢特征及空间演变规律,找出影响区域水资源代谢效率的主要驱动因素,并制定提高水资源代谢效率的优化控制模式和策略,旨在为京津冀和中、西部地区至全国的水资源规划与合理开发利用提供决策依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

从资源禀赋的差异,本文选取我国京津冀地区(北京、天津、河北)、中部地区(湖北、江西、湖南)和

西部地区(新疆、甘肃、青海)9个代表省(市、区)为研究对象。推动京津冀协同发展是重大国家战略,而区域生态环境是这一战略面临的首要问题。在强人类活动干扰及脆弱生态环境约束下,水资源已成为制约京津冀地区经济社会发展的关键要素。京津冀地区,以全国1%的水资源量承载了全国8%的人口和11%的经济总量^[6]。1990—2015年京津冀地区人均水资源量仅为148 m³,平均降水量为511 mm。相关研究测算出的京津冀水资源短缺风险指数为7.5,水资源短缺状况处于高风险状态,其中北京市和天津市水资源短缺风险指数均超过10。中部地区相比京津冀地区虽然水资源禀赋条件较好,1990—2015年人均水资源量高达2 905 m³,平均降水量为1 526 mm,但多年来的资源开发,导致了一定程度的资源枯竭,资源承载力不断下降,环境污染和资源破坏问题比较突出^[20-21]。新疆、甘肃、青海属于干旱少雨的西北地区,1990—2015年平均降水量仅为259 mm,但由于地广人稀,人均水资源量达到5 336 m³。目前西北干旱区处于我国的江河源区,若上游生态恶化,对我国其他地区的生态环境和经济发展有着强烈的现实危害和深远影响^[22-23]。本文首次从异质性资源禀赋的角度,探讨中国东中西部地区水资源代谢效率的时空分布问题将是一大创新和突破,将为全国不同区域水资源规划与合理开发利用提供理论参考和策略指导。

1.2 数据来源

研究区1990—2015年的淡水回用率、废弃虚拟水回用率、系统淡水损失率等13个指标数据(表1和表2),主要来源于1990—2015年《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》各省市水资源公报、统计年鉴、各地级市政府网站的相应年份的《国民经济和社会发展统计公报》、中国环境监测官方网站、国家数据网、国家统计局、中国统计信息网等官方网站等。

2 研究方法

2.1 资源水与虚拟水耦合代谢路径

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(图1),主要包括输入、过程、输出

表1 京津冀地区1990—2015年过程格局与经济指标

年份	过程格局					经济	
	淡水回用率 $R_{fw}/\%$	废弃虚拟水回用率 $R_{vw}/\%$	虚拟水出入境比例 $V_{vw}/\%$	生产用水比例 $R_p/\%$	生态用水比例 $R_e/\%$	单位水灌溉面积 $U_{ai}/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	单位用水工业产值 $U_{io}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$
1990年	4.1	28.4	0.80	84.6	0.5	1.51	0.01
1995年	4.9	31.9	0.79	67.3	1.7	2.43	0.01
2000年	9.1	73.6	1.44	65.8	1.8	1.38	0.02
2005年	7.5	78.3	1.84	56.4	4.7	1.86	0.10
2010年	19.3	65.8	1.91	45.2	17.2	2.06	0.27
2015年	24.8	83.3	3.18	26.8	38.8	3.42	0.45

表2 京津冀地区 1990—2015 年社会与环境指标

年份	社会			环境		
	单位用水社会消费品零售额 $C_w/(\text{元} \cdot \text{万 m}^{-3})$	单位用水支撑人口数 $P_w/(\text{人} \cdot \text{m}^{-3})$	单位水灌溉面积 $U_{ai}/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	森林覆盖率 $F_c/\%$	降水产流率 $E_p/\%$	水环境质量 $Q_{we}/\%$
1990 年	7.38	0.01	1.51	14.9	30.5	23.3
1995 年	23.89	0.01	2.43	20.1	31.5	43.3
2000 年	41.46	0.01	1.38	21.3	22.9	55.8
2005 年	84.39	0.01	1.86	21.3	29.5	43.5
2010 年	180.30	0.01	2.06	35.8	26.8	63.3
2015 年	271.30	0.01	3.42	35.8	27.9	57.6

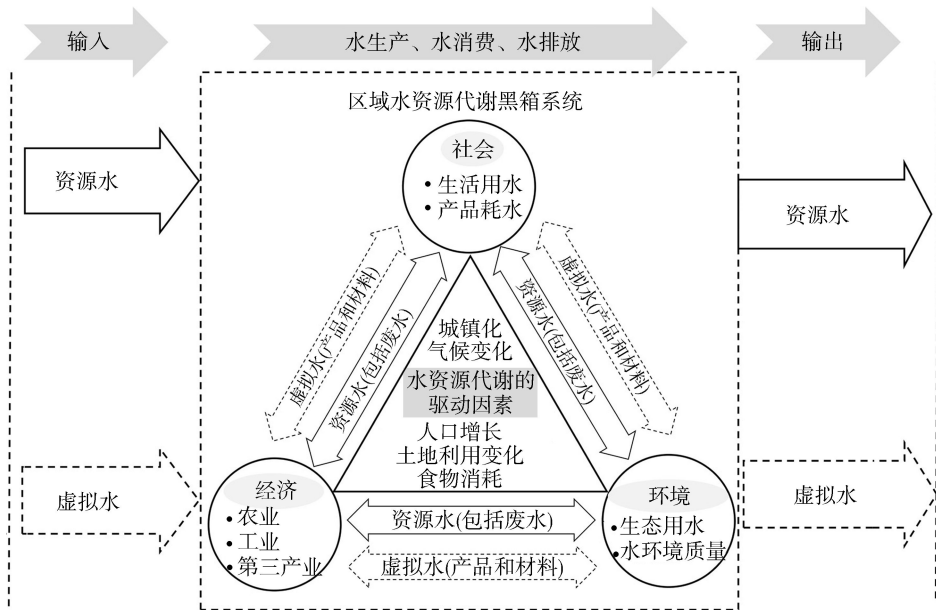


图1 资源水与虚拟水耦合代谢路径示意图

3 大模块,其中过程涉及水生产、水消费和水排放等,具体指标包括社会、经济和环境三大方面,整个耦合代谢过程包含资源水和虚拟水,水资源代谢的驱动因素主要从城镇化、气候变化、人口增长、土地利用等方面剖析。代谢路径剖析有利于明确代谢过程与格局,为水代谢的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。

2.2 水资源代谢效率评价指标体系构建

影响区域水资源代谢效率的因素有很多,如社会经济因素、水资源状况因素以及生态环境因素等,因此水资源代谢效率评价指标的选取非常关键。在指标的选取中要遵循全面性、科学性、可操作性、时效性等原则。为了确保指标体系的科学性与可行性以及研究结果的合理性,本文采用物质流分析法提取水资源代谢效率评价指标,在参考现有研究成果^[1,24]的基础上,建立反映水资源代谢的过程与格局、社会效益、经济效益、环境效益等4个指标群,初步构建评价指标体系(表3)。

2.3 水资源代谢效率评价方法

2.3.1 指标值标准化方法

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。

越大越优型指标的标准化值的计算公式为

$$S_i = (x - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \tag{1}$$

越小越优型指标的标准化值的计算公式为

$$S_i = (X_{max} - x) / (X_{max} - X_{min}) \tag{2}$$

式中: S_i 为指标标准化值; x 为 X 系列中各指标实际值; X_{max} 为指标最大参考值; X_{min} 为指标最小参考值。

2.3.2 指标体系赋权

层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)是美国运筹学家 Saaty 提出的一种定性与定量相结合的决策方法,具有客观性、准确性和有效性的特点。层次分析法的基本思想是,根据数据资料和评价依据把复杂的问题分解为各个组成元素,将这些元素按支配关系分组构成有序的梯阶层次结构,根据一定的比率标定,通过两两比较将判断定量化,形成比较判断矩阵。最终把系统分析归结为最低层(如决策方案)相对于最高层(总目标)的相对重要性权值的确定或相对最优次序的排序问题,从而为决策方案的选择提供依据。一般有5个步骤,分别为指标体系层次建构、构造判断矩阵、确定权重因子、求解特征值和特征向量、一致性检验。

表 3 资源水与虚拟水耦合代谢效率评价指标体系

指标群	指 标	计算方法	单位	简 述
过程格局	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的合成指标,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}	废弃虚拟水回用量/废弃虚拟水总量=固废回用量/固废产生量	%	因废污水属资源水,而废气排放所代表的虚拟水量远小于固体废物,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
	虚拟水出入境比例 V_{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、支撑能力超强,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。为越小越优型指标,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
	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,反映非生态水代谢效率
社会	人口发展水平 P	人口增长率+每万人口拥有大学在校学生数增长率	%	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	社会消费品零售额/总用水量	元/万 m^3	是水代谢效率在用水人口物质生活水平方面的反映
	单位用水支撑人口数 P_{lw}	当年年末常住人口数/生活用水总量	人/ m^3	单位生活用水所能支撑的人口越多,表示生活供水过程损耗越少,生活用水代谢效率越高
经济	单位水灌溉面积 U_{ai}	1/农田单位面积平均用水量	m^2/m^3	反映农业用水代谢效率
	单位用水工业产值 U_{io}	1/万元工业产值用水量	元/ m^3	反映工业用水代谢效率
环境	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

2.3.3 评价模型

为避免个别指标对指标体系整体功能产生影响,采用加权求和法评价水资源代谢效率,评价模型如下:

$$A_j = \sum_{k=1}^4 w_k B_{kj} \tag{3}$$

$$B_{kj} = \sum_{i=1}^n w_{ki} s_{ij} \tag{4}$$

式中: A_j 为第 j 年的水资源代谢效率; w_k 为第 k 个领域的权重; B_{kj} 为第 j 年的第 k 个领域指数; w_{ki} 为第 k 个领域第 i 个指标的权重; s_{ijk} 为第 j 年的第 k 个领域第 i 个指标标准化值; n 为第 k 个领域的指标个数。根据以上公式和模型可求得 1990—2015 年研究区城市水资源代谢效率。

3 区域水资源代谢效率的时空演变规律分析

3.1 区域水资源代谢效率的时间动态变化特征

在建立资源水与虚拟水耦合代谢效率评价指标体系及收集 1990—2015 年京津冀地区、中部地区和西部地区 9 个典型区域各项指标数据的基础上,应用式(3)(4)计算得出 1990—2015 年研究区水资源代谢效率(图 2)。从图 2 可以看出,时间尺度上京津冀地区、中部地区和西部地区 1990—1995 年期间水资源代谢效率没有明显的变化,自 2000 年以后水

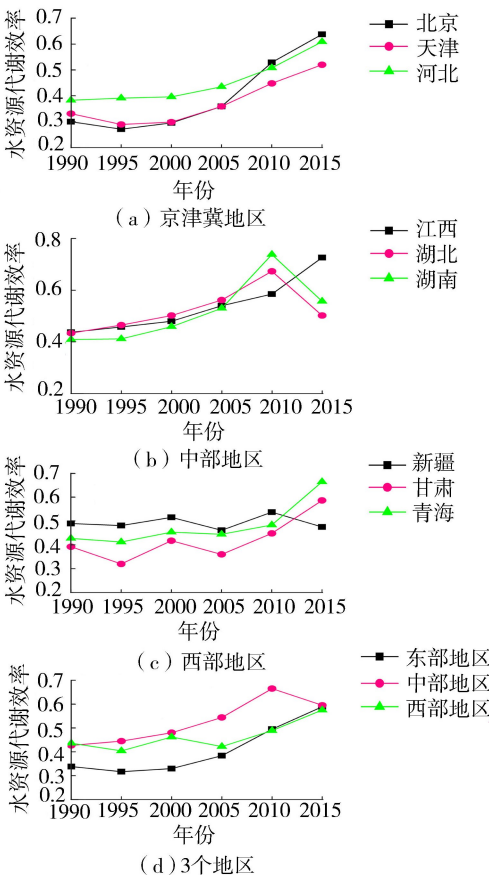


图 2 1990—2015 年京津冀和中、西部地区水资源代谢效率时间动态变化

资源代谢效率均总体呈现出明显提高的趋势,尤其京津冀地区增长的速度最快,从1990年的0.338增加到2015年的0.589,增长了74.26%,西部地区相对增长速度较慢。

从具体各区域来看,京津冀地区北京、天津、河北水资源代谢效率增长速度快,中部地区除了湖北、湖南省2015年出现急剧下降的趋势外,其他年份水资源代谢效率表现递增的特点,西部地区整体增长速度较慢,尤其新疆维吾尔自治区,从1990—2015年水资源代谢效率基本保持不变。整体来看,1990—2015年期间,京津冀和中、西部地区水资源代谢效率均表现出不同程度增加的特征。

3.2 区域水资源代谢效率的空间演变规律分析

从空间分布来看(图3),京津冀地区、中部地区和西部地区1990—1995年这5年间水资源代谢效

率大小基本一致,空间分布也没有明显的变化,各区域均处于0.2~0.3和0.3~0.4这两级比较低水平。自1995年以后各区域水资源代谢效率空间分布上开始呈现明显的区域差异并有逐渐增加的趋势,如2000年西部地区和中部地区的水资源代谢效率高于京津冀地区的水资源代谢效率,2005年中部地区的水资源代谢效率略高于京津冀地区和西部地区的水资源代谢效率。2005—2015年,京津冀地区水资源代谢效率迅速提高,明显优于西部地区和中部地区。

4 区域水资源代谢效率的驱动因素

基于不同因素和水资源代谢效率之间可能存在关联性,本文参考两者之间的相关系数对主要驱动因素进行分析(图4)。从图4可以看出,影响京津

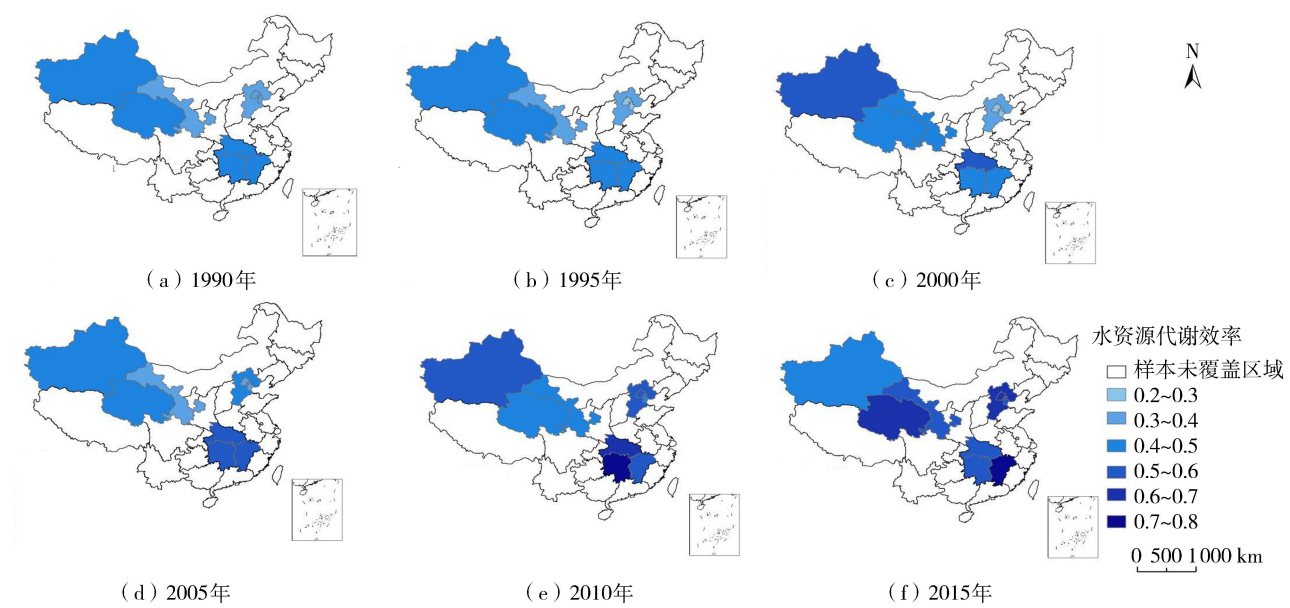


图3 1990—2015年京津冀和中、西部地区水资源代谢效率的空间变化

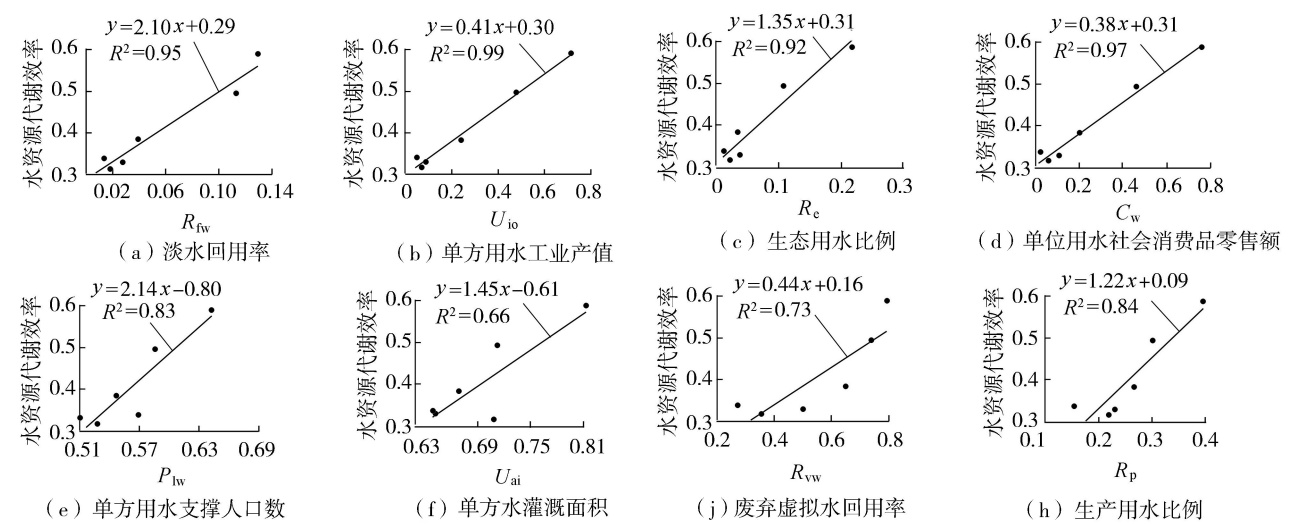


图4 京津冀地区评价指标与水资源代谢效率的相关性

冀地区水资源代谢效率的主导因素包括淡水回用率、单方用水工业产值、生态用水比例、单位用水社会消费品零售额,这些指标与水资源代谢效率的相关系数达 0.9 以上。其他指标如单方用水支撑人口数、生产用水比例,与水资源代谢效率的相关系数达 0.8 以上,可作为水资源代谢优化调控方案的制定依据。

用同样的分析方法可以得出影响中部地区水资源代谢效率的主导因素主要是淡水回用率、森林覆盖率、单位用水社会消费品零售额。西部地区相关系数达到 0.8 和 0.9 以上的指标主要是单位用水社会消费品零售额和废弃虚拟水回用率,上述驱动因素可为制定相应区域水资源代谢优化调控方案提供参考依据。

5 结论与建议

5.1 结论

a. 时间尺度上,京津冀、中部地区、西部地区 1990—1995 年期间水资源代谢效率没有明显的变化,自 2000 年以后总体呈明显提高的趋势,尤其京津冀地区增长速度最快,从 1990 年到 2015 年增长了 74.26%,西部地区增长速度较慢。

b. 从空间分布看,在早期阶段,京津冀、中部地区、西部地区水资源代谢效率较低,空间分布区域差异不明显。自 1995 年以后空间分布上开始呈现明显的区域差异,如 2000 年西部地区和中部地区的水资源代谢效率高于京津冀地区的水资源代谢效率。后期阶段即 2005 年以后,京津冀地区和中部地区明显高于西部地区。

c. 综合京津冀、中部地区、西部地区来看,废弃虚拟水回用率、单位用水社会消费品零售额、森林覆盖率以及淡水回用率是影响水资源代谢效率的主要驱动因素。

d. 该研究结果可为京津冀、中部地区、西部地区至全国的水资源规划与合理开发利用提供决策依据,也为区域之间的空间交互作用提供了新方法和新思路。由于本文首次尝试从资源水-虚拟水耦合的角度探讨水资源代谢效率空间分布规律,研究区范围不够广,将在后续研究选取东中西部典型城市群进一步做水资源代谢效率的空间溢出效应研究。

5.2 建议

a. 根据水资源条件合理控制北京、天津两大核心城市规模,有序引导人口向河北省聚集,实现人水和谐发展。从虚拟水方面来看,京津冀地区虚拟水流动中,河北农业作为重点耗水部门,向京津冀地区

各部门输送了大量虚拟水,为各部门经济生产活动提供了强大的水资源支撑作用。因此为保障京津冀地区整体的水安全及其可持续发展,河北地区农业部门亟需关注其节水问题。

b. 近年来中部地区农业用水效率依然较低,应推广和发展节水农业、制定科学灌溉制度、促进农业生产结构调整、加强农业水资源管理的重要措施。工业方面,应探索一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源得到充分发挥的新型工业化道路。

c. 西部地区应从资源禀赋和经济效应两方面,建立虚拟水输入地对输出地的多元补偿办法。如粮食调入省份将粮食调入量换算为虚拟水量,同时考虑输入地区水资源短缺程度与作物产品价格导致的贸易经济逆差,制定相应增值贸易税或交易税以作为补偿。

参考文献:

[1] 张宁宁,栗晓玲,周云哲,等. 黄河流域水资源承载力评价[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1759-1770. (ZHANG Ningning, SU Xiaoling, ZHOU Yunzhe, et al. Water resources carrying capacity evaluation of the Yellow River Basin based on EFAST weight algorithm [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1759-1770. (in Chinese))

[2] 钱龙霞,张韧,王红瑞,等. 基于 MEP 和 DEA 的水资源短缺风险损失模型及其应用[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1199-1206. (QIAN Longxia, ZHANG Ren, WANG Hongrui, et al. A model for water shortage risk loss based on MEP and DEA and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 46(10): 1199-1206. (in Chinese))

[3] 章燕喃,田富强,胡宏昌,等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 844-849. (ZHANG Yannan, TIAN Fuqiang, HU Hongchang, et al. Joint operation model of multiple water sources in Beijing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 844-849. (in Chinese))

[4] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))

[5] HERMANOWICZ S W, TAKASHI A. Abel Wolman's the metabolism of cities, revisited: a case for water recycling and reuse[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(5): 29-36.

- [6] BEHZADIAN K, KAPELANA Z, VENKATESHC G. Urban water system metabolism assessment using WaterMet2 model[J]. *Procedia Engineering* , 2014,70: 113-122.
- [7] SERRAO-NEUMANN S, RENOUF M, KENWAY S J, et al. Connecting land-use and water planning: prospects for an urban water metabolism approach [J]. *Cities*, 2017,60: 13-27.
- [8] 吴波,赵越,陈岩,等.昆明市水代谢系统中的水质代谢状况评估[J]. *水资源保护*,2020,36(3):40-45. (WU Bo,ZHAO Yue,CHEN Yan, et al. Assessment of water quality metabolism in water metabolism system of Kunming City[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36 (3) : 40-45. (in Chinese))
- [9] 左其亨,张志卓,吴滨滨.基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting,ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*, 2020,36(2):1-7. (in Chinese))
- [10] XU Q, CHEN Q, CHENA B , et al. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks[J]. *Ecological Informatics* ,2015, 26 :111-116.
- [11] 丹保宪仁.水文大循环和城市水环境代谢[J]. *给水排水*,2002,28(6):1-5. (TAMBO Norihito. Hydrological cycle and urban metabolic system of water [J]. *Water & Wasterwater Engineering*, 2002, 28 (6) : 1-5. (in Chinese))
- [12] 钱家忠,朱学愚,孙峰根.地下水代谢与水资源保护[J]. *工程勘察*,2000(4):26-28. (QIAN Jiazhong, ZHU Xueyu, SUN Fenggen. Metabolism of groundwater and protection of water resources [J]. *Engineering Investigation*,2000(4):26-28. (in Chinese))
- [13] 严涛.新型城市水环境代谢系统研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [14] 邵田.中国东部城市水环境代谢研究—以上海市为例[D].上海:复旦大学,2008.
- [15] 桂春雷.基于水代谢的城市水资源承载力研究—以石家庄市为例[D].北京:中国地质科学院,2014.
- [16] ZHANG X, LIU J, ZHAO X, et al. Linking physical water consumption with virtual water consumption: methodology, application and implications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228:1206-1210.
- [17] YE Q L, LI Y, ZHUO L. Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: a case study for Beijing, China [J]. *Water Research*, 2018, 129: 56-62.
- [18] PORKKA M K, MATTI S S, FLORKE, M. The role of virtual water flows in physical water scarcity: the case of Central Asia[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2012, 28(3), 453-474.
- [19] 黄初龙,于昌平,高兵,等.厦门市资源水与虚拟水耦合代谢效率评价[J]. *生态学报*,2016,36(22):7267-7278 (HUANG Chulong, YU Changping, GAO Bing, et al. Assessment of urban water metabolism based on integrated analysis of available and virtual water: a case of Xiamen in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2016,36(22):7267-7278 . (in Chinese))
- [20] 尹艳,邹君.湖南经济发展与水资源利用关系研究[J]. *衡阳师范学院学报*,2014,35(3):155-161. (YIN Yan, ZOU Jun. On relationship between economic development and utilization of water resources in Hunan Province [J]. *Journal of Hengyang Normal University*, 2014, 35 (3) : 155-161. (in Chinese))
- [21] 张振龙,孙慧.新疆区域水资源对产业生态系统与经济增长的动态关联—基于 VAR 模型[J]. *生态学报*, 2017,37(16):5273-5284. (ZHANG Zhenlong,SUN Hui. Research on the dynamic relationship between water-intensive industrial ecosystem and economic growth in Xinjiang based on VAR model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(16):5273-5284. (in Chinese))
- [22] 王希义,彭淑贞,徐海量,等.大型输水工程的生态效益与社会经济效益评价:以塔里木河下游为例[J]. *地理科学*, 2020, 40 (2) : 308-314. (WANG Xiyi, PENG Shuzhen, XU Hailiang, et al. Evaluation of ecological and social-economic benefits of large water conveyance projects: a case study on the lower reaches of the Tarim River [J]. *Geographic Science*, 2020, 40 (2) : 308-314. (in Chinese))
- [23] 张飞,陈道胜.世界水日、中国水周主题下的水资源发展回顾与展望[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 77-86. (ZHANG Fei, CHEN Daosheng. Review and outlook on water resources development based on China Water Week and World Water Day [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40 (4) : 77-86. (in Chinese))
- [24] 王建华,翟正丽,桑学锋,等.水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. *水利学报*,2017,48(9):1023-1029. (WANG Jianhua,ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2017,48(9):1023-1029. (in Chinese))

(收稿日期:2020-05-15 编辑:郑孝宇)