

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0005

YANG Yang, XIAO Cunde, WANG Xiaoming, et al. Review on water resources based on input-output theory and prospect of water resources management[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):214-224. [杨洋, 效存德, 王晓明, 等. 基于投入产出理论的水资源研究进展及水资源管理展望[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):214-224.]

基于投入产出理论的水资源研究进展 及水资源管理展望

杨洋^{1,2}, 效存德³, 王晓明¹, 刘世伟^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 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)

摘要:近年来,气候变化背景下的水资源问题得到日益增加的关注,其研究从水资源短缺、供需平衡等内容转向适应可持续发展的综合研究。基于投入产出理论的水资源研究,从系统循环的角度分析资源的流动性和持续性,能够揭示水资源-经济社会复合系统中各要素的内在数量关系,提出面向可持续发展的水资源价值观和方法论。首先,从模型拓展和实际应用两条主线梳理了国内外基于投入产出理论的水资源相关研究。在模型方面,概括了投入占用产出模型、水资源投入产出模型和区域间投入产出模型的发展和适用性,对比分析了不同区域间投入产出模型的优缺点。在应用方面,分别从不同时空尺度、驱动力因素等方面对虚拟水、水足迹和水资源优化配置三个热点内容进行了整理,并指出:基于投入产出理论的水资源研究基本建立在价值型模型的基础上;区域间投入产出模型已成为分析区域间经济结构、资源流动等环境问题的重要工具。其次,讨论了投入产出模型在冰冻圈水资源管理中的应用,提出基于服务角度的水资源管理模式。最后,展望了投入产出理论在水资源研究中的应用,以期能够为决策者提供额外的信息以便更好的管理水资源。

关键词:投入产出模型;虚拟水;水足迹;水资源优化配置;冰冻圈水资源

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-0240(2021)01-0214-11

0 引言

气候变化背景下,区域水资源受到很大的威胁。一方面,气候变化改变全球水循环,引起水资源在时空上的重新分配,并对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接或间接的影响;同时极端气候事件的频繁发生进一步导致水资源的不均衡。另一方面,人口持续增长、耕地扩张以及其它社会经济发展对水资源的需求不断增加^[1],产业用水与生态、城市用水之间的冲突日益增强,加剧了当地水资源压力。2009年到2018年,中国人均水资源占有量约在1 812~1 972 m³之间变化^[2],平均值为2 054.5 m³,约为世界平均水平的四分之一,水资源短缺依然是

制约国民经济发展的重大“瓶颈”。因此,合理规划与水资源承载力相符的产业活动,科学进行水资源优化配置具有重要意义。

水资源短缺问题主要有两种解决方法,一种是从实体水资源的角度出发,通过水利工程跨流域调水实现水资源的重新分配;另一种是通过商品贸易等经济手段实现水资源的区域间配置,以缓解当地水资源压力^[3]。前者例如南水北调工程等,虽然可以直接实现水资源在空间上的分配,但成本高昂,同时对生态系统产生负面影响;后者则可通过商品流通实现水资源的转移。

近年来水资源相关研究逐渐趋向于多领域跨学科交叉,以期从可持续发展的角度更高效的管理

收稿日期: 2020-10-30; 修订日期: 2021-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671058;41690145)资助

作者简介: 杨洋,博士研究生,主要从事冰冻圈服务和可持续发展研究. E-mail: yangyang@lzb.ac.cn

通信作者: 效存德,研究员,主要从事冰冻圈与全球变化、冰冻圈功能及其服务研究. E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

水资源。基于投入产出模型的水资源研究,从资源循环角度揭示了经济、水资源、环境三者之间的内在数量关系,提出面向可持续发展的水资源价值观和方法论,从“需求”角度管理水资源,可为政府实施可持续发展战略提供决策依据。因此,本文拟从模型拓展和实际应用两个方面对国内外基于投入产出模型的水资源相关研究进行综述,最后进一步探讨冰冻圈水资源管理的发展方向。

1 投入产出模型的拓展

20世纪30年代后期美国经济学家华西里·列昂惕夫(Wassily Leontief, 1906—1999)基于魁奈的经济表和瓦尔拉斯的一般均衡理论发表了论文《美国经济系统中投入与产出的定量关系》^[4],标志着投入产出理论的诞生,并在后期进一步完善了其理论框架^[5-6]。为表彰其贡献,1973年列昂惕夫被授予诺贝尔经济学奖。投入产出理论主要通过编制投入产出表及建立相应的数学模型,分析经济系统中产业间的相互依存关系,自提出至今不断得到发展和完善,对框架的扩展多是为了包含更多的经济活动信息,或是基于环境因子对模型进行拓展,例如分析与产业活动相关的水资源利用问题。

1.1 投入占用产出模型

基于投入产出理论进行水资源研究始于投入占用产出模型的提出。一般而言,生产活动的前提除了消耗外,还必须占用生产资料、劳动力、资金和相应的自然资源。传统的投入产出表在垂直方向只包含投入部分,而投入占用产出表则增加了“占用”部分^[7],它能够清晰的列出某个时间各经济部门在生产过程中对自然资源的占用数量,“占用”是进行生产过程的前提和基础,能够将系统的流量投入与存量占用联系起来,更全面、合理的度量人类生

产活动对资源的影响。因此,学者们设计和编制了中国1999、2002年全国及长江、黄河等九大流域的水利投入占用产出表,并在此基础上改进了流域用水系数等指标的计算方法^[8-9];同时结合线性规划模型计算和预测了全国主要流域的水资源影子价格(生产、工业用水)^[10-11]。结果表明,1999年中国农业虚拟水消耗较大,水资源较为充足的东南诸河、珠江、长江和西南诸河流域的产品虚拟水普遍大于内陆河流域^[3],为水资源定价和水利投资效应等分析提供了数据支持。但由于编制流域投入占用产出表对基础数据的需求较大,限制了模型的后期发展。

1.2 水资源投入产出模型

随着工业化和城市化的不断发展,资源快速消耗的同时排放大量温室气体与其他污染物,给人类生存环境带来负面影响。为了能够更好的分析区域、国家和全球经济活动对资源流动和环境的影响,学者们引入了环境投入产出分析。早期的拓展基于混合型投入产出表,例如把产业部门分为纯经济部门和资源关联部门,并加入以实物单位计量的资源投入^[12]。

后期学者们建立了分离出资源部分的独立模型,开启了水资源投入产出模型的运用,通过构建水资源卫星账户建立水资源与社会经济系统的联系,描述产业部门在生产过程中对实体水资源的直接消耗和由于生产最终产品引起的间接水资源消耗。例如综合评价水资源投入产出模型的发展^[13];剖析行业用水特性^[14-15];指出仅使用直接、完全用水系数和用水关联度等指标分析部门用水特性并不够精确^[16]。目前最常见的水资源投入产出表是在价值型投入产出表的下方加入“用水量”项目(如表1),即通过构建水资源卫星账户建立水资源与经济系统的联系。

表1 水资源投入产出表的基本结构^[17]

Table 1 Basic framework of the water input-output table^[17]

项目	中间使用(需求)					最终使用(需求)	总产出
	1	...	j	...	n		
中间投入	部门1	Z_{11}	...	Z_{1j}	...	Z_{1n}	y_1

	部门 <i>i</i>	Z_{i1}	...	Z_{ij}	...	Z_{in}	y_i

	部门 <i>n</i>	Z_{n1}	...	Z_{nj}	...	Z_{nn}	y_n
增加值	V_1	...	V_j	...	V_n		
总投入	x_1	...	x_j	...	x_n		
用水量/ m^3	W_1	...	W_j	...	W_n		

假设经济系统可以分为 n 个部门(如表 1), Z 是由 Z_{ij} 构成的中间使用流量矩阵, 代表行业 j 对行业 i 产品的直接消耗量; Y 是由 Y_i 构成的最终使用矩阵, 表示行业 i 产品作为最终使用的数量; x_i 表示行业 i 的总产出, x_j 表示行业 j 的总投入; V_j 表示行业 j 的增加值数额, 则根据该水资源投入产出表可以建立用水系数分析模型。用水系数是部门用水强度的测度指标, 常用以反映各部门生产活动对水资源的依赖程度及利用效率。直接用水系数能够表示行业 j 生产单位价值量产品所需要的水资源量, 反映各部门在生产本部门产品或服务过程中的直接用水强度。其计算公式为:

$$w_j^d = \frac{w_j}{x_j} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: w_j^d 为第 j 部门的直接用水系数; w_j 为行业 j 的直接用水量(使用自然状态的水资源总量)。在直接用水系数的计算中, 仅考虑了实体水的投入数量。实际上, 任何部门在生产产品的过程中还需要一些其他部门的产品作为其中间投入, 而这些产品的生产也需要水资源, 即隐含在消费过程中的水资源消耗, 因此完全用水包括直接用水和间接用水两部分。完全用水系数表示行业 j 生产单位最终使用产出量所需要消耗的整个经济系统的水资源总量。其计算公式用矩阵形式表示为:

$$B^d = Q(I - A^{-1}) \quad (2)$$

式中: B^d 为完全用水系数矩阵; Q 为直接用水系数构成用水系数行向量; A 为直接消耗系数矩阵; I 为单位矩阵; $(I - A)^{-1}$ 称为“列昂惕夫逆矩阵”。

研究表明水资源的经济价值在于水资源具有使用价值, 即能满足人类生存的基本需求, 并与其他生存物质具有同样的重要性; 由于资源的稀缺性, 投入产出表中的部门产出并没有完全反映水资源的使用价值。例如国家会对农业灌溉用水进行补贴, 如果仅使用农业用水价格指代水资源价格, 会低估农业用水产生的影响。同时加入用水行向量构建的价值型水资源投入产出表是不全面的, 将对应总量指标不同的两个相对指标进行简单的比较并不能完全说明产业用水的关联特征^[18]。因此, 为了使模型更加合理, 许多学者尝试在投入产出模型之外构造单独的水资源分析模块, 描述更加完整的水资源-经济系统。

1.3 区域间投入产出模型

在经济全球化和国内市场一体化的趋势下, 国家及国家内部不同地区之间的经济联系日益密切,

各种商品和服务中“隐含”的资源在区域间流动。同时, 不同地区的资源禀赋和技术水平也存在差异, 使得各地区经济发展不平衡。为了研究区域间环境及资源问题, 区域间投入产出模型(Inter-regional input-output model, IRIO)应运而生。IRIO 是基于不同地区的商品和劳务流动, 将各地区投入产出模型连接而成的跨区域模型。相比单区域投入产出模型(Single-regional input-output model, SRIO), IRIO 可以更好的反映区域间产业部门的经济联系, 从系统循环的角度分析区域间水资源的流动性与可持续性, 适用于水资源的区域间配置。

1.3.1 行系数模型

Isard^[19-20]首次提出的区域间投入产出模型常被称为 Isard 模型或行系数模型。该模型对区域间和区域内部产业交易采取分项处理, 如果同一部门的产品, 生产区域不同则视为不同的产品, 即区域外部和内部采用不同的投入系数。IRIO 的构建不仅需要研制各区域内的流量矩阵, 还需要调查各区域间产品的流动, 对数据的需求量较大, 因此研制比较困难。用 r, s 表示两个不同的区域, 将一个区域生产的某种产品以固定的比例分配给各区域(包括本区域), 这个比例关系称为区域分配系数:

$$h_i^{rs} = \frac{t_i^{rs}}{X_i^r} (r, s = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: h_i^{rs} 为 r 区域到 s 区域的分配系数, t_i^{rs} 为 r 区域到 s 区域 i 部门产品的贸易量; X_i^r 为 r 区域 i 部门的总投入, 由 $X_i^r = \sum_{s=1}^m t_i^{rs}$ 可知 $\sum_{s=1}^m h_i^{rs} = 1$ 。

若已知一个区域的产量, 根据分配系数即可计算某区域与所有区域之间的贸易量。

$$t_i^{rs} = h_i^{rs} \cdot X_i^r (r, s = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

则 s 区域 i 部门产品的实际供给量为:

$$\sum_{r=1}^m t_i^{rs} = \sum_{r=1}^m h_i^{rs} \cdot X_i^r (r, s = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

s 区域 i 部门产品的需求量为:

$$t_i^s = \sum_{j=1}^n a_{ij}^s X_j^s + Y_i^s (r, s = 1, 2, \dots, m; i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: a_{ij}^s 为直接消耗系数, 即 s 区域 j 部门生产单位产品需要 i 部门产品的总投入。

根据 s 区域供需平衡关系, 则:

$$\sum_{r=1}^m h_i^{rs} X_i^r = \sum_{j=1}^n a_{ij}^s X_j^s + Y_i^s (r, s = 1, 2, \dots, m; i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

用矩阵形式表示模型平衡关系为:

$$\sum_{r=1}^m H^{rs} X^r = A^s X^s + Y^s \quad (8)$$

1.3.2 列系数模型

后期学者们在行系数模型的基础上提出了一些对数据要求相对较少的简化模型。例如 Chenery^[21] 和 Moses^[22] 提出的多区域投入产出模型 (Multi-regional input-Output model, MRIO), 常被称为 Chenery-Moses 模型或列系数模型。该模型建立每一个部门的产品流动矩阵, 由此推算区域间贸易系数。与直接研制区域间投入产出矩阵的 IRIO 相比, MRIO 对数据的需求较少, 更方便于跨区域水资源的相关研究。用 r, s 表示两个不同的区域, 则区域供应系数可以表示为:

$$c_i^{rs} = \frac{t_i^{rs}}{t_i^s} = \frac{t_i^{rs}}{\sum_{r=1}^m t_i^{rs}} \quad (r, s = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: 其中 t_i^{rs} 为 r 区域到 s 区域 i 部门产品的贸易量; t_i^s 为 s 区域 i 部门产品的实际数量。确定供应系数后, 若已知一个区域的需求量, 根据供需平衡关系即可计算出各区域对该区域的供应量。

1.3.3 引力模型

编制 MRIO 的难点是估算区域间商品的流量, 由于统计数据的不全面, 很难直接获取所需的区域间

流量数据。因此, 多数编制都是以现有数据为基础, 根据数学模型估算其区域间商品的流量数据, 例如区位熵、引力模型和回归方程等。Leontief 和 Strout^[23] 提出的引力模型 (Balanced regional model) 是目前为止运用最广泛的方法, 其基本形式可以表示为:

$$t_i^{rs} = \frac{X_i^r \cdot d_i^s}{\sum_r X_i^r} \cdot Q_i^r \quad (10)$$

式中: t_i^{rs} 为 r 区域到 s 区域 i 部门产品的流出量; X_i^r 为 r 区域 i 部门的总产出; d_i^s 为 s 区域对 i 部门产品的总需求 (中间需求与最终需求的合计); $\sum_r X_i^r$ 为全部 i 产业的总产出。 Q_i^r 为 r 区域到 s 区域 i 部门的贸易参数或摩擦力系数 (trade parameter), 摩擦系数 Q 是引力模型的关键, 可以使用最小二乘法确定。

作为较常用的区域间模型, 三种模型的优缺点如表 2 所示。Isard 模型与 Chenery-Moses 模型相比, 前者确定了一个区域某种产品向各个区域 (包括本区域) 的分配, 即行系数固定。后者确定了各个区域对某一区域某种产品需求量的供应比例, 即列系数固定。目前区域间投入产出模型已成为分析区域间经济结构、水资源流动等环境问题的基础, 中国学者们也尝试编制了不同规模的区域间投入产出表。

表 2 区域间投入产出模型比较

Table 2 The three inter-regional input-output models (IRIO)

模型名称	假设条件	优点	缺点
行系数模型 (Isard Model)	固定一个区域某种产品向各个区域 (包括本区域) 供应产品的百分比	模型比较简单	产业按区域进行划分, 不仅需要研制各区域内流量矩阵, 还需研制各区域各部门区域间流量矩阵; 分配系数不确定性大; 数据需求大
列系数模型 (Chenery-Moses Model)	任一部门对区域 (含本区域) 内各部门的供应比例相同	只需得到每一部门产品在各个区域间流量数据, 不需要逐个研制分区域、分部门区域间流量矩阵	供应系数矩阵较难确定
区域间引力模型 (Leontief Model)	区域性和全国性部门分别达到内部供求平衡	简化模型的测算过程; 区分商品为国家商品、区域商品和本地商品	计划成分较大

2 投入产出理论在水资源应用方面的拓展

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源, 中国已将水资源列为和粮食、石油资源并列的三大战略资源之一^[24]。随着人口增长和生产力的发展, 水资源问题日益严峻, 作为计量经济学的重要理论与方法, 投入产出分析为解决水资源短缺问题提供了新的方法。基于投入产出理论的水资源研究逐渐扩展, 虚拟水、水足迹以及与其他方法

结合的水资源配置分析成为其研究的热点。

2.1 虚拟水

20 世纪 90 年代英国学者 Tony Allan^[25] 提出“虚拟水”概念, 将其定义为农产品生产过程中一种看不见但又实际存在的水资源; 后期 Hoekstra 和 Chapagain^[26-27] 对虚拟水概念进行了拓展, 定义为生产商品和服务过程中所需要的水资源量。

产品虚拟水测算是虚拟水研究的基础, 传统的计算方法有 Zimmer 等^[28] 提出的单位用水量法以及

Chapagian 等^[29]提出的产品生产树法,但其量化主要针对农产品及动物产品,适用于核算部门个别商品的虚拟水量,较难对工业和服务产品的虚拟水量进行计算。例如,Lenzen^[30]认为,由于“系统和不可量化的截断误差”,使用其他替代的虚拟水定量方法可能导致虚拟水量的低估。相比之下,基于投入产出模型的虚拟水计算,从产业部门交易数据出发考虑部门之间的相互依赖程度,避免了重复计算,可以从宏观角度更好的分析水资源的流动。但由于缺乏描述系统结构的原始数据,投入产出的应用也可能受到很大程度的限制。

在国内,程国栋^[31]首次提出虚拟水概念,并建议在我国西北干旱地区实施虚拟水战略,即贫水国家(地区)通过贸易的方式从富水国家(地区)购买水密集型农产品,以缓解缺水国家(地区)的水资源短缺和粮食安全。虚拟水研究揭示了全球贸易对水资源重新分配的重要作用,为解决经济发展和人口增长等问题造成的水资源压力提供了新的思路和方法,但由于区域经济差异性的差异性,后期有学者认为虚

拟水战略的实施必须具备一定的条件^[32-33]。例如孙才志等^[34]指出虚拟水战略的出发点只关注了水资源的要素禀赋,完全依靠水资源因素实施虚拟水战略具有一定的局限性,同时提出“广义虚拟水战略”;另外有学者认为从系统的角度出发,虚拟水出口在某种程度上挤占了当地水资源在生态系统服务方面的提供能力,虚拟水贸易应当制定相应的规则,不能完全依赖现有的国际市场贸易秩序^[35]。

基于投入产出模型的虚拟水研究涉及全球及国家尺度虚拟水贸易^[36-38]、考虑虚拟水短缺后的虚拟水贸易网络^[39]、欧盟国家虚拟水转移^[40]等内容,通过测算产品或行业间的虚拟水流量,从进出口贸易的角度进行水资源的合理配置。中国虚拟水的相关研究(表3),从模型上主要存在两个方面的限制:基于SRIO的研究未能涵盖中国国内区域间贸易的整个供应链,因此不能充分揭示经济发展、水资源可得性的空间差异;而基于MIRO的研究存在空间分辨率不高,或者水资源利用现状数据不完善等问题。

表3 基于投入产出模型的中国虚拟水研究案例(2009—2019年)
Table 3 Case studies of virtual water based on the water input-output models from 2009 to 2019

研究地区	研究方法	研究内容	文献来源
城市尺度			
北京市	SRIO	部门间虚拟水贸易和水足迹	Wang 等 ^[41] , 2013
山东省	IRIO	部门与水资源利用关系及虚拟水评估	Wang 等 ^[42] , 2014
流域尺度			
海河流域	IRIO	基于消费的虚拟水贸易	Zhao 等 ^[43] , 2010
黄河流域	MRIO	流域与其他地区之间虚拟水流动及农村和城市的家庭用水足迹	Feng 等 ^[44] , 2012
全国尺度			
中国	IRIO	虚拟水流量与水资源压力	Zhang 等 ^[45] , 2011
中国	MRIO	省级虚拟水贸易、基于消费的水足迹规模和结构	Zhang and Anadon ^[46] , 2014
中国	IRIO	水足迹的省际差异和省际虚拟水贸易	Dong 等 ^[47] , 2014
中国	IRIO	省际间虚拟水流动与水资源压力评价	Zhao 等 ^[48] , 2015
中国	MRIO	省际间虚拟水贸易的驱动因素	Jiang 等 ^[49] , 2015
中国	IRIO	虚拟水流量的空间变化和部门特征	Zhang 等 ^[50] , 2016
中国	IRIO	虚拟水进出口及贸易结构	Chen 等 ^[51] , 2018
中国	IRIO	各省能源产业虚拟水和省际间流动	Lin 等 ^[52] , 2019

2.2 水足迹

水足迹指一个国家、地区或个人在一定时间段内消费的所有产品和服务所包含的水资源量^[53],不仅包括生产过程中直接消耗的水资源,还包括生产产品时消耗原材料产生的间接水资源。水足迹概念关联了实体水和虚拟水两个部分,是评价地区居

民消费对当地水资源影响的潜在可持续性指标之一^[54],水足迹侧重于研究区域内生产和消费活动对水资源的消耗,虚拟水则侧重于研究跨区域消费和贸易过程的水资源消耗,需要注意的是两者描述的都是产品和服务生产过程中的耗水量。基于投入产出理论的水足迹研究主要基于不同的尺度:例如

从产业尺度量化英国水足迹情况,研究表明农业、食品制造业、电力和天然气生产行业的水足迹消耗较多^[55];分析黑河流域产业间水足迹及虚拟水转移等^[56]。从行政区尺度基于生产和消费对辽宁省^[57-58]、新疆维吾尔自治区^[59]等地区的水足迹进行评价。从流域尺度结合水压力指数评估海河流域虚拟水和消费水足迹的影响^[60]。从国家尺度分析我国1997—2007年水足迹状况,结果表明中国年平均水足迹总量为2.83万亿 m^3 ,总体呈现下降趋势^[61];或从技术进步、经济发展及政策完善三个角度剖析中国水足迹变迁的影响因素^[62]。从多区域尺度以蓝色水资源为研究重点评估北京市水足迹情况^[63-64];重新定义一个地区的水足迹为国家或地区内用水量和虚拟水量净值的代数和^[65],并以此为指标计算水资源省际间流动造成的水压力指数。总体来看区域间产品贸易与调动产生了虚拟水的流动,农产品等富含虚拟水的产品或服务从水资源富裕国家或地区向缺水国家或地区流动,在一定程度上帮助缺水国家缓解水资源压力,维护大尺度多区域水量平衡关系。

2.3 水资源优化配置

产业系统是一个相互关联的有机整体,任何一种规模的变动都会对水资源的需求与消耗产生不同层次的影响,随着社会经济的发展产业结构与水资源禀赋条件不匹配的现象越来越严重,因此需要从水资源配置的角度出发,结合其他方法,科学测量水资源的使用情况。结构分解分析(Structure decomposition analysis, SDA)是研究水资源变化驱动因素的有利手段,从水资源管理的角度,分析什么因素影响虚拟水变化,不同因素的影响程度能够为产业用水结构调整提供依据,实现水资源优化配置。例如研究日本虚拟水贸易,将变化驱动因素分为技术效应、产业结构效应和产量效应,结果表明日本虚拟水使用主要由于技术进步和产业结构调整导致^[66]。结构分解分析一般没有固定的分解模式,可以根据研究目的确定其因素分解项,例如将驱动因素分解为用水强度和消费量的变化^[43];或计算各驱动因素在起始年和终止年分解项的平均值,作为各因素对水足迹变化的独立贡献^[67]。但基于投入产出理论的水资源优化配置只考虑了生产环节、生活用水和生态用水等的直接消耗,没有考虑消费环节和进出口环节等的间接消耗,同时在生态用水方面没有进行定量分析,造成在水资源优化配

置时结果有所偏差。

3 基于服务角度的冰冻圈水资源管理展望

气候变化背景下,冰冻圈水资源作为水资源的重要组成部分对中、高纬度受冰冻圈融水补给的流域具有重要意义^[68-71]。以往对冰冻圈水资源的研究多集中于资源的自然属性及对社会经济的负面效应^[72-74],对冰冻圈水资源的正面效应研究很少^[75-77]。社会水文学是一门基于传统水文学及其交叉学科、研究人-水耦合系统的科学^[78],在水资源综合管理方面发挥着重要的作用。投入产出模型作为社会水文学研究的新工具,考虑了人类活动影响下水资源的循环过程,可为冰冻圈水资源管理提供新的视角。

如果从服务角度描述冰冻圈水资源的流动过程(图1):一方面,冰冻圈与气候系统其他圈层相互作用使得冰冻圈要素产生不同功能,其功能是冰冻圈服务形成的基础。作为供给端冰冻圈为经济社会产生了各种惠益,例如供给服务、调节服务、文化服务和支持服务。另一方面,冰冻圈要素产生的资源,例如冰川和积雪水资源,作为投入变为资本;在人类活动作用下,资本以存量和流量的形式进入社会经济系统,并在此过程中产生服务价值流,即凝结了人类劳动后具有使用价值的服务。水资源服务以冰冻圈水资源为载体,隐含在产品和服务中参与经济系统各部门的生产,在产业间流动并产生经济效应。与此同时,产品和服务中包含的冰冻圈水资源以贸易的形式在区域间发生转移,并对其他区域产生重要影响。

例如基于区域间投入产出模型计算得到2012年中国31个省份通过最终需求转移的虚拟水量达到338亿 m^3 (图2),在很大程度上转移了新疆冰冻圈水资源,缓解了其他地区水资源压力,需要说明的是这里的虚拟水并没有考虑贸易出口部分产生的转移。因此,基于资源-资本角度充分发挥区域优势,考虑冰冻圈水资源的转移效应,从资源价值及经济效益两个方面综合制定水资源管理政策,可为区域可持续发展提供科学依据和决策支持。随着科技革新和全球一体化进程的加快,水资源问题的影响更加广泛,其研究也由单纯水文学向多领域跨学科研究转变,同时水资源价值问题不再是单纯的价值核算,更是生态、环境、社会多维学科问题,而区域间投入产出模型可以对隐含水资源流向特别是国

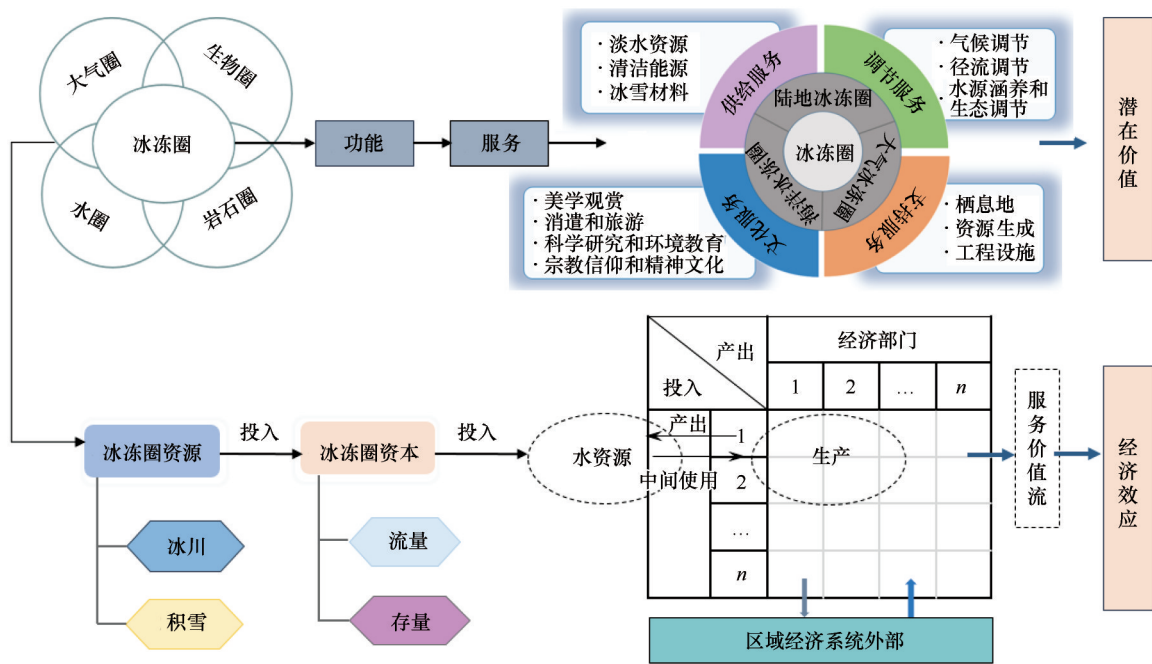


图 1 基于服务价值角度的冰冻圈水资源流动过程

Fig. 1 The flow process of cryospheric freshwater resource based on the perspective of service value

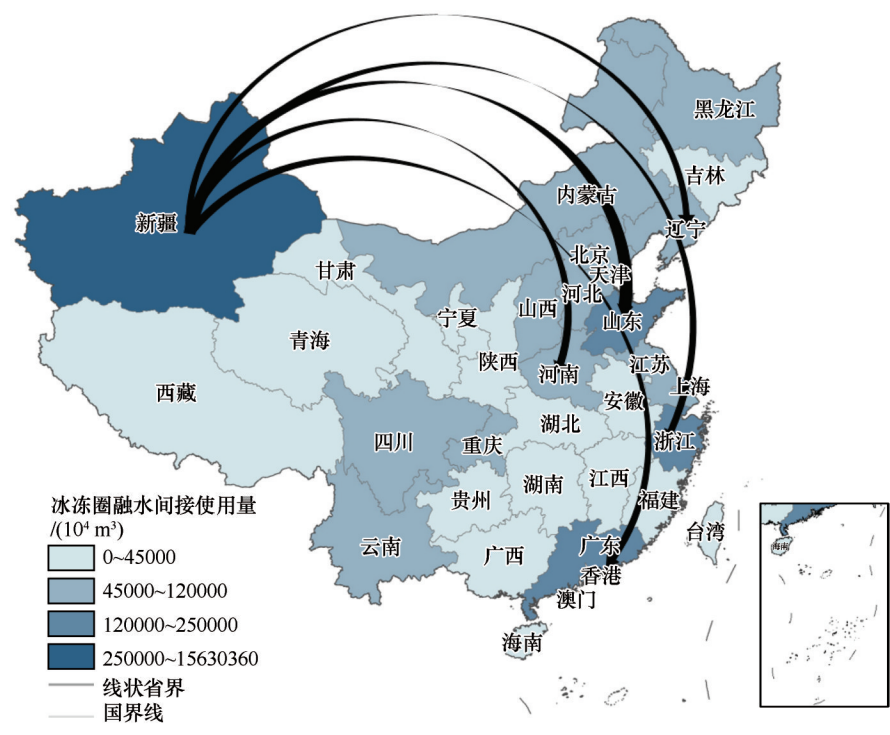


图 2 新疆冰冻圈水资源的省际间转移(2012)

Fig. 2 The inter-provincial transfer of cryospheric freshwater resource of Xinjiang (2012)

家尺度水资源关联进行测算,能够更好解决地区差异,成为水资源管理的新兴工具。

4 结论

本文分别从投入产出模型拓展和水资源实际

应用两个方面梳理了基于投入产出理论的水资源内容,虽然相关研究从模型改进到应用领域都有所发展,但如何在不同水资源禀赋和条件下合理运用投入产出模型,如何科学评估地区水资源的环境效应及人类活动对水资源需求的制约,这些问题都有

待解决。

在建立水资源投入产出模型时一般采用价值-实物混合型投入产出模型,即水资源部分为实物型(实物单位计量),经济部分为价值型(货币单位计量),但不能有效的体现资源的差异性。而实物型投入产出表描述了物质产品的实物运动,运用不同的自然资源计量单位,例如纺织品行业需要多少吨棉花作为原材料,更能清晰的表现不同地区自然资源禀赋差异。因此,实物投入产出模型更适合间接资源需求的核算,后期研究应该更多的关注运用实物型表进行水资源管理研究。

当水资源需求严重超过其可持续利用的均衡状态时,以调整区域内部结构或提高社会经济适应能力为目标的水资源社会化管理可以从地区优势方面发挥其作用。社会化管理阶段的出现意味着水资源管理范围的扩大,管理对象应该由资源本身扩展到其他方面,水资源管理的着眼点也应该从资源本身转向提高系统的适应能力。例如由于缺水压力水资源短缺地区会尽可能的提高用水效率,造成水资源丰富地区生产产品的用水效率可能比缺水地区生产同类产品的效率低,这意味着只从水资源角度制定水资源管理政策会出现偏差。

流域是水资源的重要存在形式,同时影响下游社会经济的产业布局。从流域尺度进行虚拟水核算,能够定量描述流域内生产和消费活动对水资源的消耗,为判断水资源的利用量是否处于流域供给能力范围之内提供数据支撑。但目前中国编制的投入产出表大多都是基于国家或省级尺度,流域尺度相关数据较少,这在一定程度上限制了投入产出模型的运用。

参考文献(References):

- [1] Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(3): 179-185. [姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 179-185.]
- [2] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019. [国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.]
- [3] Yang Zhifeng, Zhi Yuan, Yin Xin'an. Research advances in virtual water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 181-190. [杨志峰, 支援, 尹心安. 虚拟水研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 181-190.]
- [4] Leontief W. Quantitative input-output relations in the economic system of the United States[J]. The Review of Economic and Statistics, 1936, 18(3): 105-125.
- [5] Leontief W. The structure of American economy 1919-1929 [M]. Harvard UP, Cambridge, Mass, 1941.
- [6] Leontief W. The structure of American economy, 1919-1939: an empirical application of equilibrium analysis [M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1951.
- [7] Chen X K. Input-occupancy-output analysis and its application in China [M]//Dynamics and conflict in regional structural change. Palgrave Macmillan UK, 1990.
- [8] Xu Jian, Chen Xikang, Yang Cuihong. Calculating method for total water input coefficient and water input coefficient for added value[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(2): 17-20. [许建, 陈锡康, 杨翠红. 完全用水系数及增加值用水系数的计算[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(2): 17-20.]
- [9] Liu X L, Chen X K, Wang S Y. Evaluating and predicting shadow prices of water resources in China and its Nine Major River Basins [J]. Water Resources Management, 2009, 23(8): 1467-1478.
- [10] Liu X L, Chen X K. Methods for approximating the shadow price of water in China [J]. Economic Systems Research, 2008, 20(2): 173-185.
- [11] He J, Chen X K, Shi Y, et al. Dynamic Computable General Equilibrium Model and sensitivity analysis for shadow price of water resource in China [J]. Water Resources Management, 2007, 21(9): 1517-1533.
- [12] Bogra S, Bakshi B R, Mathur R. A water-withdrawal input-output model of the Indian economy [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50: 1313-1321.
- [13] Yan Tingting, Jia Shaofeng. Overview of water resources input-output models [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2009, 27(1): 8-13. [严婷婷, 贾绍凤. 水资源投入产出模型综述[J]. 水利经济, 2009, 27(1): 8-13.]
- [14] Zhang Hongwei, He Xiabing, Wang Yuan. Analysis of water consumption of China's industries based on the input-output method [J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1218-1224. [张宏伟, 和夏冰, 王媛. 基于投入产出法的中国行业水资源消耗分析[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1218-1224.]
- [15] Liu S Y, Wu X D, Han M Y, et al. A three-scale input-output analysis of water use in a regional economy: Hebei Province in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156(10): 962-974.
- [16] Hassan R M. Economy-wide benefits from water-intensive industries in South Africa: Quasi-input-output analysis of the contribution of irrigation agriculture and cultivated plantations in the Crocodile River catchment [J]. Development Southern Africa, 2003, 20(2): 171-195.
- [17] Wang Dangxian. Study on water resources demand analysis theory and practice [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003. [汪党献. 水资源需求分析理论与方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2003.]
- [18] Weng Wenbin, Wang Zhongjing, Zhaojianshi. Modern water resources planning-theoretical methods and techniques [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. [翁文斌, 王忠静, 赵建世. 现代水资源规划-理论方法和技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.]
- [19] Isard W. Interregional and regional input-output analysis: a model of a space-economy [J]. Review of Economics and statistics, 1951, 33(4): 318-328.
- [20] Isard W. Methods of regional analysis: an introduction to regional science [M]. Cambridge: The MIT Press, 1960.

- [21] Chenery H. Regional analysis[C]//Chenery H, Clark P, Pinna V. The structure and growth of the Italian economy. The Economic Journal, 1953, 65: 149-151.
- [22] Moses L N. The stability of interregional trading patterns and input-output analysis[J]. American Economic Review, 1955, 45(5): 803-832.
- [23] Leontief W, Strout A. Multiregional input-output analysis[M]//Barna T. Structural in interdependence and economic development. London: St. Martin's Press, 1963.
- [24] Xia Jun, Zuo Qiting. China's decade summary and prospect of water resources academic exchange[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(9): 1488-1497. [夏军, 左其亭. 我国水资源学术交流十年总结与展望[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1488-1497.]
- [25] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro- political futures would be impossible[J]. Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, 1993, 13(4): 26.
- [26] Hoekstra A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Value of water research report series No. 12[R]. Netherlands: UNESCO-IHE, Institute for Water Education, Delft, 2003.
- [27] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products[J]. Water International, 2008, 33(1): 19-32.
- [28] Zimmer D, Renault D. Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results[R]. Delft, the Netherlands: IHE, 2002.
- [29] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products[C]//Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft, the Netherlands: IHE, 2003, 12(12): 49-76.
- [30] Lenzen M, Foran B. An input-output analysis of Australian water usage[J]. Water Policy, 2001, 3(4): 321-340.
- [31] Cheng Guodong. Virtual water-a strategic instrument to achieve water security[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2003, 18(4): 260-265. [程国栋. 虚拟水-水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003, 18(4): 260-265.]
- [32] Ansink E. Refuting two claims about virtual water trade[J]. Ecological Economics, 2010, 69(10): 2027-2032.
- [33] Wichelns D. Virtual water: a helpful perspective, but not a sufficient policy criterion[J]. Water Resources Management, 2010, 24(10): 2203-2219.
- [34] Sun Caizhi, Liu Yuyu, Chen Lixin, et al. Analysis on virtual water flows pattern embedded in China's crops trade and its causes-added discussion on the applicability of "virtual water strategy" in China[J]. China Soft Science, 2010(7): 36-44. [孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 等. 中国粮食贸易中的虚拟水流动格局与成因分析-兼论“虚拟水战略”在我国的适用性[J]. 中国软科学, 2010(7): 36-44.]
- [35] Li J G, Harold M, Vanessa H, et al. Systems integration for global sustainability[J]. Science, 2015, 347(6225): 1258832.
- [36] Chen Z M, Chen G Q. Virtual water accounting for the globalized world economy: national water footprint and international virtual water trade[J]. Ecological Indicators, 2013, 28(5): 142-149.
- [37] Zhao Xu, Yang Zhifeng, Chen Bin. Study on Chinese virtual water trade and consumption in an input-output framework[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 286-294. [赵旭, 杨志峰, 陈彬. 基于投入产出分析技术的中国虚拟水贸易及消费研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 286-294.]
- [38] Tan Shenglin, Qiu Guoyu, Xiong Yujiu. New application of the input-output framework in the study of virtual water consumption and trade[J]. Journal of Natural resources, 2014, 29(2): 355-364. [谭圣林, 邱国玉, 熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易中的新应用[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 355-364.]
- [39] Lenzen M, Moran D, Bhaduri A, et al. International trade of scarce water[J]. Ecological Economics, 2013, 94: 78-85.
- [40] Serrano A, Guan D, Duarte R, et al. Virtual water flows in the EU27: a consumption-based approach[J]. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(3): 547-558.
- [41] Wang Z Y, Huang K, Yang S S, et al. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 42(3): 172-179.
- [42] Wang W. Relationships between regional economic sectors and water use in a water-scarce area in China: a quantitative analysis[J]. Journal of Hydrology, 2014, 515: 180-190.
- [43] Zhao X, Yang H, Yang Z, et al. Applying the input-output method to account for water footprint and virtual water trade in the Haihe River basin in China[J]. Environment Science & Technology, 2010, 44(23): 9150-9156.
- [44] Feng K S, Siu Y L, Guan D B, et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: a consumption based approach[J]. Applied Geography, 2012, 32(2): 691-701.
- [45] Zhang Z Y, Shi M J, Yang H, et al. An input-output analysis of trends in virtual water trade and the impact on water resources and uses in china[J]. Economic Systems Research, 2011, 23(4): 431-446.
- [46] Zhang C, Anadon L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China[J]. Ecological Economics, 2014, 100(2): 159-172.
- [47] Dong H, Geng Y, Fujita T, et al. Uncovering regional disparity of China's water footprint and inter-provincial virtual water flows[J]. Science of the Total Environment[J]. 2014, 500-501:120-130.
- [48] Zhao X, Liu J G, Liu Q Y, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in china[J]. PNAS, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [49] Jiang Y K, Cai W J, Du P F, et al. Virtual water in interprovincial trade with implications for China's water policy[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 655-665.
- [50] Zhang Z Y, Yang H, Shi M J. Spatial and sectoral characteristics of China's international and interregional virtual water flows-based on multi-regional input-output model[J]. Economic Systems Research, 2016, 28: 362-382.
- [51] Chen W, Wu S, Lei Y, et al. Virtual water export and import in china's foreign trade: a quantification using input-output tables of China from 2000 to 2012[J]. Resources Conservation & Recycling, 2018, 132(5): 278-290.
- [52] Lin L, Chen Y D, Hua D, et al. Provincial virtual energy-water use and its flows within China: a multiregional input-output approach[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 151: 1-12.
- [53] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[R]. Value of Water Research Report Series No. 11, Netherlands: IHE Delft, 2002.

- [54] Hoekstra A Y, Mekonnen M. The water footprint of humanity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(9): 3232-3237.
- [55] Yu Y, Hubacek K, Feng K, et al. Assessing regional and global water footprints for the UK [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1140-1147.
- [56] Zhang Xinxin, Liu Junguo, Zhao Xu, et al. Virtual water transfer and linkages among industries in the Heihe River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 27-34. [张信信, 刘俊国, 赵旭等. 黑河流域产业间虚拟水转移及其关联分析[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 27-34.]
- [57] Dong H, Geng Y, Sarkis J, et al. Regional water footprint evaluation in China: a case of Liaoning [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 215-224.
- [58] Okadera T, Geng Y, Fujita T, et al. Evaluating the water footprint of the energy supply of Liaoning Province, China: a regional input-output analysis approach [J]. *Energy Policy*, 2015, 78: 148-157.
- [59] Yang Yaxue, Zhao Xu, Yang Jing. Accounting and impact of virtual water and water footprint in Xinjiang [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(5): 228-232. [杨雅雪, 赵旭, 杨井. 新疆虚拟水和水足迹的核算及其影响分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(5): 228-232.]
- [60] White D J, Feng K S, Sun L X, et al. A hydro-economic MRIO analysis of the Haihe River Basin's water footprint and water stress [J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 157-167.
- [61] Wang Yanyang, Wang Huixiao, Zhang Xin. China water footprint trend analysis based on input-output tables [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(11): 3488-3498. [王艳阳, 王会肖, 张昕. 基于投入产出表的中国水足迹趋势分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(11): 3488-3498.]
- [62] Wang Xiaomeng, Huang Kai, Yang Sunshun, et al. Temporal variability and influencing factors of sectoral water footprint in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2114-2126. [王晓萌, 黄凯, 杨顺顺. 中国产业部门水足迹演变及其影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2114-2126.]
- [63] Zhang Z Y, Yang H, Shi M J. Analyses of water footprint of Beijing in an interregional input-output framework [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(12): 2494-2502.
- [64] Wu Zhaodan, Wu Zhaolei, Zhang Changzheng. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: in the analytical level of economic regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 207-219. [吴兆丹, 吴兆磊, 张长征. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较-基于经济区域分析层次[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 208-217.]
- [65] Zhao X, Chen B, Yang Z F. National water footprint in an input-output framework: a case study of China 2002 [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220: 245-253.
- [66] Kondo K. Economic analysis of water resources in Japan: using factor decomposition analysis based on input-output tables [J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2005, 7(2): 109-129.
- [67] Zhang Z Y, Shi M J, Yang H. Understanding Beijing's water challenge: a decomposition analysis of changes in Beijing's water footprint between 1997 and 2007 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(22): 12373-12380.
- [68] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(2): 135-140.
- [69] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress [J]. *Nature*, 2019, 569(7758): 649-654.
- [70] Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers [J]. *Nature*, 2017, 549(7671): 257-260.
- [71] Ding Yongjian, Zhao Qudong, Wu Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 23-32. [丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 23-32.]
- [72] Qin D H, Ding Y J, Xiao C D, et al. Cryospheric Science: research framework and disciplinary system [J]. *National Science Review*, 2018, 5: 255-268.
- [73] Ding Yongjian, Xiao Cunde. Challenges in the study of cryospheric changes and their impacts [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(10): 1067-1076. [丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(10): 1067-1076.]
- [74] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Establishment and significance of the Scientific System of Cryospheric Science [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(4): 394-406. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学体系的建立及其意义[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(4): 394-406.]
- [75] Yang Y, Wu X J, Liu S W, et al. Valuating service loss of snow cover in Irtysh River Basin [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(2): 109-114.
- [76] Wang X M, Liu S W, Zhang J L. A new look at roles of the cryosphere in sustainable development [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(2): 124-131.
- [77] Xiao Cunde, Su Bo, Wang Xiaoming, et al. Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(19): 1975-1984. [效存德, 苏勃, 王晓明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险[J]. *科学通报*, 2019, 64(19): 1975-1984.]
- [78] Murugesu S, Hubert H G S, Günter B. Socio-hydrology: a new science of people and water [J]. *Hydrological Processes*, 2012.

Review on water resources based on input-output theory and prospect of water resources management

YANG Yang^{1,2}, XIAO Cunde³, WANG Xiaoming¹, LIU Shiwei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In recent years, more and more attention has been paid given to water resources problem under the climate change, relating research has also shifted from water shortage, supply and demand balance to comprehensive research to adjust to sustainable development. Based on the input-output theory, the study of water resources analyze the mobility and sustainability of water resources from the perspective of system cycle, revealing the internal quantitative relationship between various elements in the water resources economic and social complex system, and put forward the value and methodology of water resources for sustainable development. This paper firstly reviewed research on water resources based on the input-output theory from domestic and foreign research from the two main lines of model expansion and practical application. In terms of model, the development and applicability of input-occupancy output model, water resource input-output model and inter-regional input-output model are summarized, meanwhile compared and analyzed the advantages and disadvantages of input-output models between different regions. In terms of application, aiming at the three hot topics of virtual water, water footprint and water resources optimal allocation reviewed through temporal and spatial scales and driving force respectively. It is pointed out that: the research of water resources based on input-output theory is basically based on the value model. Inter-regional input-output model has become an important tool for analyzing environmental problems such as interregional economic structure and resource flow. Secondly, the application of input-output model on cryospheric freshwater resources management was discussed. Finally, the paper prospects the application of input-output theory in water resources research, expected to provide additional information for policy makers to better manage water resources the application of input-output theory in water resources research is looked forward to provide additional information to decision makers in order to better manage.

Key words: input-output model; virtual water; water footprint; water resources optimal allocation; cryospheric freshwater resources

(责任编辑: 丁永建; 编辑: 周成林)