第75卷 第7期
2020年7月

地 理 学 报
ACTA GEOGRAPHICA SINICA

Vol.75, No.7
July, 2020

西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式解析

邓铭江[1],龙爱华[2],李 江[1],邓晓雅[2],张 沛[2]

(1. 新疆水利水电规划设计管理局,乌鲁木齐 830000; 2. 中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要: 持续的强人类活动大大改变了流域水循环演变的结构、路径和驱动力,后者又反过来影响着人类生存发展的水安全。日益深入的市场经济使人类活动对水循环的影响从一个流域扩展到流域之外更宽广的区域范围,以产品贸易为纽带的水“流动”已成为驱动区域水循环演变与影响区域水安全的重要内在因素。以流域为单元的传统水循环研究,难以揭示不同区域之间的水循环联系、双向回馈机制与协同进化机理。本文从西北内陆河流域长期大量输出高耗水农产品这一现象分析入手,采用理论解析与案例相结合方法,阐述分析内陆河流域自然水循环、“自然—社会”二元水循环、区域间贸易水循环的基本过程、显著特征及其驱动机制,继而首次明确提出内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式,并就其通量计量模型、影响因素与生态环境效应、科学前沿进行了探索分析,以便未来西北内陆河水循环、水文水资源等研究能更多重视对驱动内陆河流域水循环的外部力量及其双向互馈、协同进化的分析,更新内陆河流域水安全、生态安全的思考范式。

关键词: 西北内陆河流域;贸易水循环;“自然—社会—贸易”三元水循环模式;框架解析;通量平衡模型

DOI: 10.11821/dlxb202007001

1 引言

水循环演变及人类活动影响水资源与生态系统的结构和演变，后者又反过来影响着人类生存发展的水安全[1]。伴随着人类社会发展阶段的演替，流域水循环也经历了纯自然驱动、人类局部轻微干扰下的自然驱动、自然与高强度人类活动双驱动的多元过程。王浩等[2]认为人类活动影响下的流域水循环具有“自然—人工”特性，因此总结提出了“自然—人工”二元水循环理论框架；Allan[3]基于对中东地区水问题的长期研究，于1993年提出了虚拟水与虚拟水战略等水安全管理新理念；此后学界逐渐认识到伴随产品贸易的虚拟水流通，对维护地区乃至全球水资源安全具有重要作用[4]。龙爱华[5]认为干旱内陆区大量的农产品输出极大地改变了西北内陆河区水循环的路径，使西北干旱区水循环存在“天然—人工—虚拟水”的三元特征；邓铭江等[6]在南疆地区水—生态问题解决方案研究中，提出应构建以“自然—人工侧支—虚拟水流动”为主线的水循环生态经济体系；吴

收稿日期: 2019-04-08; **修订日期:** 2020-05-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404301); 国家自然科学基金项目(51479209) [**Foundation:** National Key R&D Program, No.2017YFC0404301; National Natural Science Foundation of China, No.51479209]

作者简介: 邓铭江(1960-), 男, 湖南耒阳人, 博士, 教授级高级工程师, 中国工程院院士, 主要从事干旱区水资源研究与水利工程建设管理工作。E-mail: xjdmj@163.com

通讯作者: 龙爱华(1976-), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事干旱区社会水文学、水资源规划配置与生态经济学研究工作。E-mail: ahlong@iwhr.com

1333-1345 页

普特等[7]从实体水—虚拟水耦合的角度提出，人类社会水文水资源系统的演进可划分为早期的“一维一元”自然循环阶段、近现代的实体水“二元”水循环阶段和当前的“实体水—虚拟水”之二维及“物理流—效用流—价值流”之三元的“二维三元”耦合流动阶段。可见，随着人类活动尤其是市场经济的不断深化，流域水循环演变的非自然驱动力不仅有流域内的，还有来自流域外需求的驱动，即社会产品作为水资源的载体，通过贸易流通带动着水资源在区域间的自由“流动”，已对区域水循环和水安全产生着重要影响。因此，学界对流域水循环研究的模式认知，大致先后经历了四水转化[8-9]、“自然—人工”侧支二元水循环[2, 10]、“自然—社会”二元水循环[11-13]、“自然—社会—虚拟水”三水循环[6]、“二维三元”耦合流动[7]的多元发展历程。但总体而言，迄今的水循环模式研究大多数仍限于单一流域尺度，在刻画单一流域内的水循环过程、驱动力及其效应时具有优势，但对多流域间的水循环过程及其相互作用研究较为缺乏，在揭示人—水系统互馈、多流域间的人—水相互作用关系、基于多流域的区域水安全机理等方面鲜有研究报道，不同流域或区域间的人水耦合机制、区域互馈机制尚未得到重视。

1949年新中国成立后，尤其是西部大开发以来，西北内陆河流域农田灌溉面积不断扩大，经济社会系统耗水快速增加，河流下游水量持续减少，天然植被的退化与衰败趋势长期难以得到有效遏制。国土面积占中国陆地面积1/6、水资源量不足全国水资源总量3%的新疆，却产出中国70%以上的自产商用棉、90%的工业用西红柿、60%的甜菜[6]，蕴含在全区农产品中的虚拟水总量高达650亿m^3以上，但实际供本区消费的农产品虚拟水仅约310亿m^3，其余则通过棉花、西红柿、瓜果等农产品贸易被大量输出疆外，事实上形成了一条隐形的“西水东运”大动脉。类似新疆水资源开发利用的现状，在中国西北内陆河流域大量存在，但当前的水循环研究方法论及思考方式，鲜有从水循环角度揭示这种通过贸易实现的流域（区域）间水循环相互作用及相互影响的报道。基于此，本文通过对一元自然水循环、基于社会再生产下的“自然—社会”二元水循环、多区域间贸易水循环的逐层阐述分析，总结提出内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环现象及其模式，并从通量核算、影响因素与资源效应、研究前沿等方面探索构建西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环研究框架，以期丰富和发展新时期西北内陆河流域水循环与水资源学研究，拓展内陆河流域水安全保障、生态安全建设的思考范式。

2 西北内陆河流域‘自然—社会—贸易’三元水循环解析

2.1 西北内陆河流域自然水循环

自然状态下的水分在地球自转与公转、太阳辐射能、重力势能等自然力作用下，通过水汽输送、降水、蒸发、植物蒸腾、地表径流、下渗、地下径流等环节，在大气圈、水圈、岩石圈、生物圈中进行周而复始的运移转化，其内在驱动力表现为“一元”的自然力[13]。相比外流河，内陆河流域自然水循环有其独特性：①“山区—平原绿洲—荒漠绿洲”是内陆河流域自然水循环的空间范畴，其降水、蒸发、径流等水文要素呈现出明显的垂直地带性分布规律，山区是径流形成区，冰川融雪径流是其径流重要补给源，平原区基本不产流，属径流耗散区，荒漠与沙漠地带是径流消失区，各区分界明显，水循环关系特殊；② 西北内陆河流域地处亚欧大陆腹地，远离海洋加上地形阻隔，得不到充足的水汽补给，年均天然降水稀少（1956—2016年年平均降水量为132 mm，降水总量约2862亿m^3），气候干旱、蒸发强烈，产水模数约为中国平均的11%；③ 地表水与地下水同出一源（降水）但相互转换十分频繁，各水系都有其独立的归宿地，即消失在沙漠

里或汇集于洼地形成内陆尾闾湖，在注入尾闾湖泊前被多次重复利用，因此水资源实际利用量极有可能超过其资源总量（即开发利用率可超过100%）；④ 生态环境本底十分脆弱，由于降水稀少，大部分地表生态赖以生存的水分主要依靠流域内径流性水资源，生态用水与社会经济用水之间呈现明显的“此长彼消”竞争关系。自然水循环是内陆河流域地理过程中最为活跃的关键环节，但自从有显著的人类活动以来，已几乎不存在纯粹的自然水循环过程。迄今，内陆河流域自然水循环已经得到了较多研究探索，但仍有很多机理有待进一步研究和揭示，特别是水循环要素变化及其效应方面[14]。

2.2 西北内陆河流域“自然—社会”二元水循环

2.2.1 区域社会再生产的社会水循环　自然水循环形成的本地水资源作为社会再生产的基本投入要素，随社会再生产各环节持续运转流动，形成水在人类社会经济系统中的运动过程，即社会水循环。物理状态的水投入到社会各经济部门的产品和服务生产后，逐步转化并形成蕴含虚拟水的产品或服务产出，而这些产出中的一部分作为中间投入继续用于其它部门产品虚拟水转化，另一部分则随各经济社会部门的最终使用用于满足区域社会生活的消费需求，还有一部分在当地形成固定资产和积累存储。经历一系列复杂转化后的剩余部分，以污水形式被排放回当地自然环境中，从而在单区域范围内形成从自然系统取水开始、最终排放污水回到自然环境的社会水循环闭合过程（图1）。随着社会经济活动规模的不断扩大，水在社会经济系统的运动日益成为影响社会系统与自然水系统相互作用过程的主要形式[15]。因此，区域社会水循环过程并不只有在管道、渠道、田间等系统中的真实流动，更多的是以产品形式在不同产业、不同消费领域之间进行“看不见”的转化和运动。社会水循环研究不仅要关注其“取水—给水—用水—排水—污水处理—再生回用”六大路径以及由点到线和面的“耗散结构”等基本特征，还需聚焦社会经济系统各类产品和服务是社会水循环的终极载体这一核心问题。而要深刻理解社会水循环的过程、规律和机理，亟需抓住产品和服务这一终极承载，深入认知经济社会系统运转的全过程。

2.2.2 西北内陆河流域“自然—社会”二元水循环状况　高强度人类活动从多个方面影响和改变着自然力驱动下的内陆河流域水循环，主要表现为水循环驱动力在以地形和势能为

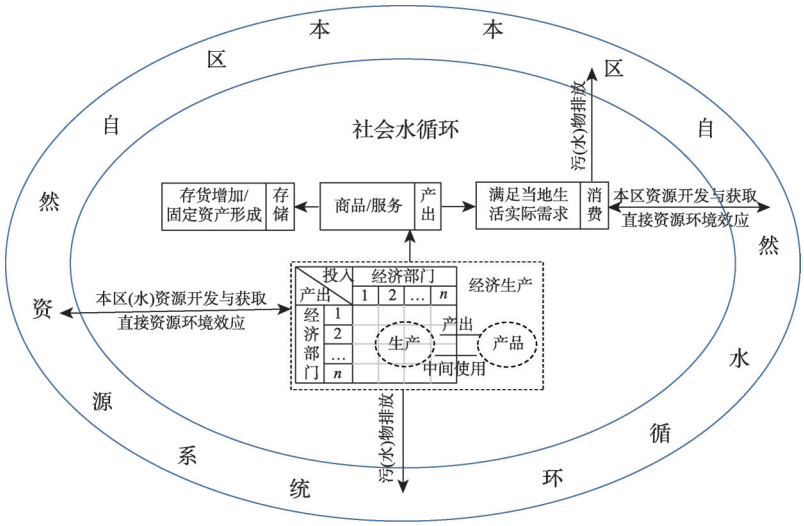
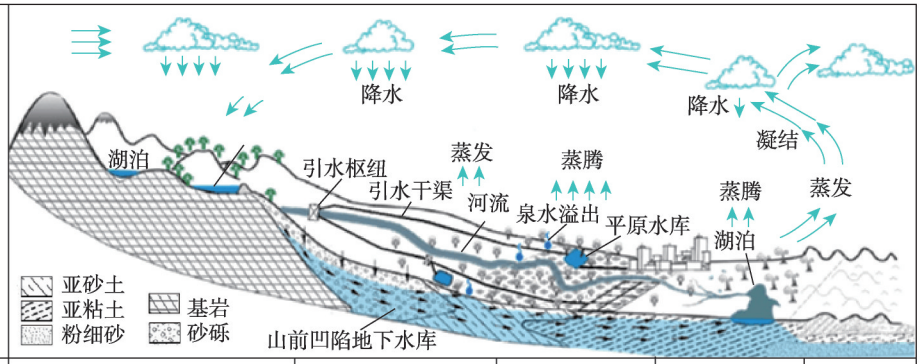


图1　单区域社会再生产中的社会水循环及其与自然水循环的相互作用框架

Fig. 1　Social water cycle and its interaction with natural water cycle in regional social reproduction process

主基础上，增加了人工机械能，城乡供水、农业灌溉、远距离引调水等水利工程日趋庞大。循环结构在“大气—坡面—地下—河道”环节构成的“河湖结构”上，增加了以“取水—输水—用水—排水—回归”环节构成的“库渠结构”，形成“自然—社会”二元水循环模式（图2）。社会水循环的驱动力，源自区域经济社会发展的供水需求与当地供给之间的不平衡出现后，通过外在人工力改变自然水循环过程，建立更符合人类需求的新循环、新平衡。据相关资料①统计分析显示，2016年西北内陆河流域通过各类水利基础设施向社会经济系统供水587.3亿m^3，水资源开发利用率平均达85.5%，其中地表水、地下水、非常规水供水量分别为446.0亿m^3（其中跨流域调水13.0亿m^3）、139.1亿m^3、2.1亿m^3；供水量中，农业、工业分别使用538.3亿m^3、17.1亿m^3；人均用水量2362 m^3，单位耕地灌溉水量577 m^3/亩。从空间分布看，西北内陆区水资源集中区——塔里木河流域和天山北麓诸河多年平均（1956—2016年系列）自产水资源量约为480.8亿m^3，但其2016年用水量高达488.2亿m^3，整体早已进入严重过度开发状态②。内陆河流域水资源开发利用规模以及社会水循环通量的不断扩张，在农产品大量产出的同时也使流域水循环发生了巨变，甚至导致了一系列生态环境甚至社会问题。



生态分区	山地	戈壁(山前冲洪积扇)		人工绿洲	自然绿洲	沙漠
水文地质单元及地下水开采模式	山区	洪积扇上部	扇缘溢出带	绿洲平原	荒漠平原(过渡带)	
		限制开发	调蓄开采	调控开采	禁止开采	
水文单元分区	山区水文	绿洲水文			荒漠生态水文	

图2 干旱区内陆河流域“自然—社会”二元水循环示意图

Fig. 2 Sketch map of "natural-social" dualistic water cycle in arid inland river basin

2.3 西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环

2.3.1 区域间贸易水循环 贸易是促进经济增长的内生动力之一[16]，贸易带动着各种资源在不同区域间交换流通，不断强化多区域间的经济社会联系。实体水作为社会再生产投入的主要要素，伴随着产品在不同区域间的贸易，以虚拟水形式在多区域间“流动”。从水循环的角度，产品贸易就在流域/区域之间形成另一种“看不见”的水循环——贸易水循环。贸易水循环指区域/流域间通过产品（包括跨区域/流域调配水资源）和服务贸易流通形式而形成的水循环，实质是产品贸易下虚拟水流动引发的水循环过程。通过产品贸

① 水利部水资源司, 中国水利水电科学研究院编. 水资源公报技术资料2016. 中国水利水电科学研究院, 2017.10.

② 龙爱华. 国家重点研发计划项目“西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用”之课题一“西北内陆区水资源安全与风险评估”中期报告. 中国水利水电科学研究院, 2019.11.

易，各流域/区域之间得以建立起强大“水”联系，在保障部分重点区域水安全需求的同时，相互作用、相互影响[17]。随着市场经济跨区域贸易的不断发展强化，越来越多区域消费的大部分产品并非本区直接生产而是来自区域外，因而使得“贸易水循环”在区域社会再生产中的作用越来越大，区域水循环过程实际已演变成为由“自然水循环”“社会水循环”“贸易水循环”共同构成的“三元”模式（图3）。三元水循环产生的根源，在于人口增长与经济发展使得对各种产品消费需求与本地供给聚焦不平衡，其驱动力是更大区域范围内人口与经济发展的产品需求增长与供给不足的综合势差。

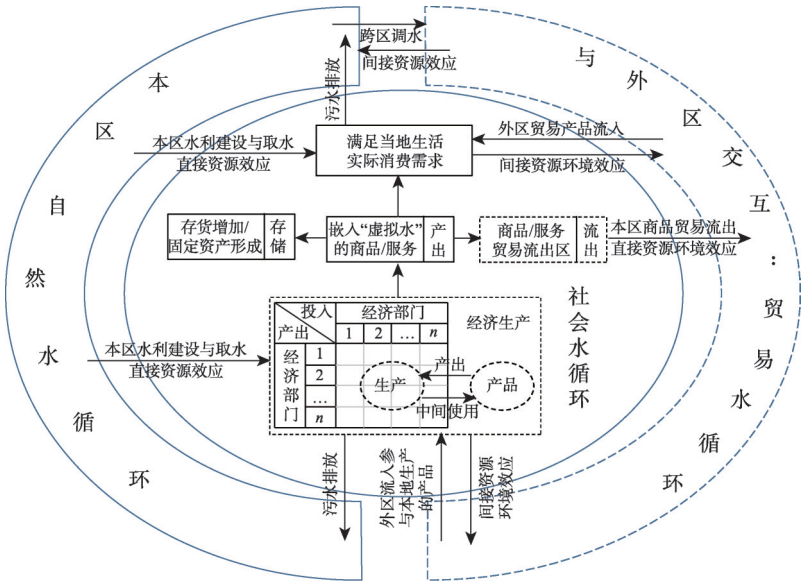


图3　区域“自然—社会—贸易”三元水循环框架图

Fig. 3　Framework diagram for regional ternary water cycle

2.3.2 西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环　“有水是绿洲，无水则荒漠”“灌溉农业，绿洲经济”，是西北内陆河流域景观生态、经济社会发展与水资源开发利用三者相互关系的典型写照，也使得西北内陆河流域水资源开发利用与灌溉面积之间呈现出同向演进关系。鉴于西北内陆河流域自然水循环的独特性、生态环境的本底脆弱性及农业生产对水资源的绝对依赖性，中国政府对西北内陆河流域水土资源开发的历来定位，是生态保护前提下的粮食基本自给，以水定发展格局、以水定灌溉面积[10]。但为发展自身经济和摆脱贫困，在工业化基础薄弱、远离国内主体市场的困境下，依靠其土地资源丰富的优势而不断扩大耕地/灌溉规模，成为西北内陆河流域最直接有效的途径，导致其灌溉面积长期处于持续增长状态，水资源开发利用量也相应不断增长。朱会义等[18]、张翔等[19]的研究表明，西北内陆河流域人口增长导致食物需求上升并非耕地扩张的主要原因，农业经营主体为追求有比较效益的农产品（如棉花、瓜果等高耗水经济作物）规模效益，才是区域耕地扩张的主要原因。不断扩大具有较高经济效益的高耗水作物的种植规模与产出，显然并非仅为满足流域自身范围内的消费需求，更多的是期望通过扩大农产品产出与贸易量获取更大的规模效益。

监测结果表明，即便在实施大规模退耕还林（草）的2001—2010年间，西北内陆河区耕地面积仍在逆势大幅增加[18]。2009年新疆、河西走廊两区的实际灌溉面积就已分别达到670万 hm^2、67万 hm^2，均超过理论上限规模的67.5%[20-21]。灌溉面积的持续快速增

加，使得西北内陆河流域社会经济统计用水量从2001年的384.6亿m^3增长到2016年的587.3亿m^3，西北内陆河流域长期大量生产并输出高耗水农产品。马忠等[22]采用区域间投入产出方法对塔里木河流域的分析结果表明，2012年蕴含在塔里木河流域经济系统中的本地虚拟水量为349.9亿m^3，从流域外通过产品调入的虚拟水量为75.4亿m^3；另一方面，约149.3亿m^3在塔里木河流域内被消费，出口50.7亿m^3，被输送到国内其他区域227.7亿m^3。中国第二大内陆河黑河流域所在的河西走廊，历史上便是中国重要的商品粮基地之一，进入21世纪以来已逐渐转变为中国最大的玉米、蔬菜等种子生产基地，长期大量向国内外输送高耗水农产品。可见，在国家劳动生产地域分工布局及区域资源优势的综合影响下，流域外需求与流域内追求经济收益等共同引致的贸易水循环，已成为驱动西北内陆河流域水资源开发利用及水循环演变的主要驱动力。日益扩大的农产品贸易携带着大量虚拟水输出到内陆河流域外，使得西北内陆河流域在“自然—社会”二元水循环模式外，增加了又一显著的水循环过程——贸易水循环，由此共同构成了现代环境下西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式（图4）。

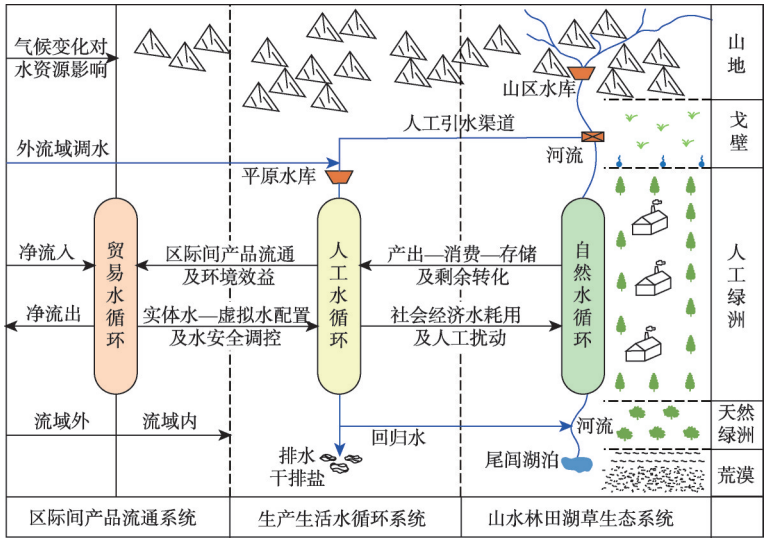


图4 内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式框架

Fig. 4 Sketch map of "natural-social-trading" ternary water cycle in inland river basin

3 内陆河流域‘自然—社会—贸易’三元水循环研究框架初探

目前，自然水循环、“自然—社会”二元水循环已有较多研究，限于篇幅，本文重点从大区域“自然—社会—贸易”三元水循环的水平衡、贸易水循环影响因素与生态环境效应等方面初步探索三元水循环研究框架。

3.1 西北内陆河三元水循环通量核算模型

水平衡是理解并耦合社会经济系统与生态系统的关键纽带[23]。三元水循环模式根植于流域水循环，遵循常规的水量平衡原理但又有区别，三元水循环模式下的水量平衡进一步延伸到更大区域的社会再生产体系中，是从单一流域拓展到多个流域（区域）的相对平衡，因此需在不同尺度上有效耦合水文系统与社会经济系统。此外，由于其核心是耗水平衡，因而平衡方程中增加了“看不见”的流入流出项。

3.1.1 贸易水循环通量计量模型　区域间贸易水循环量由区域间产品（服务）的贸易流通量、单位产品（服务）的虚拟水含量共同确定。目前可借鉴用于计量的方法包括投入产出法、就近原则法及最低成本运输法[22-25]，其中水资源投入产出表及其分析模型既能分析任一流域内不同产业部门的水资源利用及其转换关系，也可用于核算各产业部门进出流域的循环通量，结合区域间投入产出表还可计量进出流域/区域的“来龙去脉”及其数量，因而成为研究贸易水循环的重要模型工具。

（1）单一流域的贸易水循环量分析概念模型

对单一流域而言，贸易出区产品和服务的水循环量可表示为：$w_i^e = h_i^d y_i^e$，贸易入区产品和服务的水循环量可表示为：$w_i^m = h_i^* y_i^m$，流域产品和服务贸易的净循环量可表示为：$w_i^{net} = w_i^e - w_i^m$；其中，$y_i^e$，$y_i^m$ 分别为 i 部门调出、调入产品；h_i^d 为本区域 i 部门的完全需水系数；h_i^* 为输出产品和服务（到本区域）的其他区域 i 部门的完全需水系数。

（2）多区域贸易水循环量分析概念模型

区域间投入产出模型是在单区域投入产出表的基础上建立起来的多区域投入产出联结模型，其不仅可以深刻揭示区域内各产业之间的经济关联，还可以全面反映不同区域不同产业之间的产品流动关系。用矩阵的形式表示多区域间投入产出模型，即：

$$X^R = A^{RS} X^{RS} + F^{RS} \tag{1}$$

式中：X^R 为地区 R 总产出，A^{RS}、X^{RS} 和 F^{RS} 分别表示地区 R 对地区 S 的直接投入系数矩阵、中间投入总量和最终需求矩阵。将矩阵转化为需求主导的形式，即：

$$X^R = B^{RS} F^{RS}, \quad B^{RS} = (I - A^{RS})^{-1} = \left[b_{ij}^{RS}\right] \tag{2}$$

式中：B^{RS} 为列昂惕夫逆矩阵，即 $(I - A^{RS})^{-1}$，其矩阵元素 b_{ij}^{RS} 表示为满足一单位 S 地区对 j 部门的最终需求时，需要 R 地区 i 部门的投入量。通过列昂惕夫逆系数矩阵，可建立最终需求与产出的关系，类似于单区域水资源投入产出表，构建出直接耗水系数矩阵和完全耗水系数，进一步获得某一区域与区域外的贸易水循环量。多区域投入产出表编制是核算区域间贸易水循环通量的关键过程之一，国内外经济学及资源环境领域已就多区域投入产出表编制，开展了大量探索与应用工作[25]。

3.1.2 考虑贸易水循环的流域水量平衡模型　贸易水循环的通量核算基于耗水理念，因此基于质量守恒原理的流域水量平衡以耗水为基准。

（1）流域耗水平衡模型

$$E_{society} = E_{arti\text{-}ecology} + E_{local\text{-}society\text{-}consumption} + w^e - w^m + \Delta w_{store} \tag{3}$$

$$E_{local\text{-}society\text{-}consumption} = E_{agriculture} + E_{industry} + E_{living} \tag{4}$$

式中：$E_{society}$ 为流域社会经济系统耗水量；$E_{arti\text{-}ecology}$ 为社会经济系统人工景观生态耗水量；$E_{local\text{-}society\text{-}consumption}$ 为流域社会经济系统消费的本地耗水量；w^e 为通过产品和服务贸易转移到外流域的耗水量；w^m 为从外流域通过产品和服务贸易转移进入本流域的耗水量；Δw_{store} 为在本流域形成并储存为固定资产所含耗水的变化量；$E_{agriculture}$、$E_{industry}$、E_{living} 分别为本地农业、工业、生活消耗的本流域水量。

（2）流域水量平衡模型

$$P + R_{in} = E_{ecology} + E_{society} + R_{out} + \Delta S + \Delta G \tag{5}$$

式中：P 为流域净降水量；R_{in} 为冰雪消融径流量、外区入境水量（含跨区调入水量）；$E_{ecology}$ 为一定气候和下垫面条件下的自然蒸散量（含自然生态植被）；R_{out} 为流出本流域水量（含跨区调出水量）；ΔS 为本流域地表水资源储量变化量，ΔG 为地下水资源及土壤水变化量。

3.1.3 水文系统与社会经济系统耦合及流域间平衡概念模型

（1）水文系统与社会经济系统耦合：动态平衡概念模型

在一定的气候、水文、下垫面以及人类社会经济技术条件下，水文系统与社会经济系统耦合体现为各自耗水及相互比例关系的动态平衡。定义 ϵ 为流域水分配系数，值为流域自然蒸散量与社会经济系统耗水量之比：

$$\epsilon = E_{ecology}/E_{society} \tag{6}$$

在不同流域内，ϵ 取值有差异。例如，按照中国工程院“西北水资源”课题组建议的“在西北内陆干旱区生态环境和社会经济系统的耗水以各占50%为宜”[26]，则西北内陆干旱区 ϵ 整体上应在1左右浮动。

（2）流域间水量平衡概念模型

流域间水量平衡将单一流域的水平衡扩展到多个流域的大区域水量平衡层面。流域间水量平衡模式中，各单一流域的水量平衡关系仍然成立，但该模式更多考虑多个流域之间通过商品流动途径驱动的贸易水循环及其影响，并由此跳出单一流域范畴、以更大视角看待区域水安全和生态安全问题。对 n 个区域（记为 i）而言，存在以下平衡关系:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n} P_i + \sum_{i=1}^{n} R_{in,i} = \sum_{i=1}^{n} E_{ecology,i} + \sum_{i=1}^{n} E_{arit\text{-}ecology,i} + \sum_{i=1}^{n} E_{local\text{-}society\text{-}consumption,i} + \\ \sum_{i=1}^{n} w_i^e - \sum_{i=1}^{n} w_i^m + \sum_{i=1}^{n} \Delta w_{store,i} + \sum_{i=1}^{n} R_{out,i} + \sum_{i=1}^{n} \Delta S_i + \sum_{i=1}^{n} \Delta G_i\end{aligned} \tag{7}$$

基于上式可进一步对贸易水循环及其影响进行深入分析探讨。

3.2 贸易水循环影响因素与生态环境效应

3.2.1 贸易水循环影响因素 跨流域调水一般成本高昂且调水量相对有限，富涵大量虚拟水的产品贸易就成为缓解乃至解决区域水需求与供给不平衡问题的主要手段之一。研究表明，全球生产交易商品所消耗的水总重超过了世界上任何其他交易商品的重量[27-28]。贸易水循环通量和路径取决于商品流通状况，商品流通变化对贸易水循环演变（维持）具有决定性作用，但贸易本身受多种因素影响。流域/区域间产品贸易格局是生产效率、科技水平、生产要素（劳动力、资本、土地、技术等）及其匹配状况等多因素影响的综合产物。Allan在提出虚拟水战略之初认为水资源空间不均是虚拟水流动的主要原因[3]，但越来越多的研究表明水资源不仅不是影响贸易水循环的唯一因素，甚至不是最主要的因素[29]。Chen等[30]的研究表明，中国虚拟水转移并不是从水资源丰富区到缺水区，而是呈现从西部到东部、从内陆到沿海地区、从不发达地区到发达地区的转移轨迹。更多的检验性研究表明，贸易水循环主要受人口、农业资源、经济水平、技术状况、交通设施和区域耗水密集型产品产量等因素的影响，其中：人口和农业资源是最重要的影响因素，而交通物流、技术进步、区域耗水密集型产品增量和政策因素则对贸易水循环的方向与强度均有重要影响；农业资源因素中，耕地面积、化肥施用量与农业用水量是主要构成因素；产业结构调整、粮食耕作面积波动和政策变化（如退耕还林、良种补贴等），也是虚拟水贸易格局演化的主要影响因素。

西北内陆河流域水—土—经济—社会复杂巨系统具有国土面积大、水资源量小、人口稀少、经济规模小、灌溉规模大、用水量大、开发利用程度高等突出特点。相关研究表明③，2016年中国西北内陆河流域人口、GDP在全国格局中分别约占1.8%、1.5%，统计灌溉面积占全国总灌溉面积的8.5%以上，经济社会用水量约占全国总用水量（6040.2

③ 龙爱华. 国家重点研发计划项目“西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用”之课题一“西北内陆区水资源安全与风险评估”中期报告. 中国水利水电科学研究院, 2019.11.

亿m^3）的9.7%，水资源开发利用率平均达79.4%。水资源紧缺不仅未成为内陆河流域大量引入区外高耗水农产品的推动力，相反在经济总体较落后的情势下，内陆河流域依托其丰富的农业资源、不断深化的节水灌溉和倾斜性的政策支持。长期大规模的水土资源开发使耕地面积、化肥施用量与农业用水量持续攀升，内陆河流域不断向全国乃至世界各地大量输送耗水密集但比较效益高的特色农产品。

3.2.2 贸易水循环的生态环境效应　2012年中国区域间贸易商品的用水量占全国用水总量的30.4%[31]，但到2017年中国已建成运行的跨流域工程调水量仅196亿m^3，跨区域的实体水调动量远低于通过农产品贸易调动的虚拟水量。与社会各界十分关注跨流域调水工程的生态环境影响形成鲜明对比的是，产品贸易水循环的影响、对区域水资源安全的作用并未引起应有的重视。事实上，长期的产品贸易具有不同程度的跨区生态环境、碳排放及水资源等各类效应[32-33]。西北内陆河流域水资源承载能力有限，土地肥力较为贫瘠，过度的水土资源开发尤其是耗水密集型农产品生产，不仅容易引发水土流失、土壤盐渍化、土地生产力退化等系列环境问题，而且大规模的农业活动大量挤占生态用水，导致下游河道断流、地下水位大幅下降，依赖地下水生存的各种天然植被日趋衰退，沼泽湿地萎缩，荒漠化不断扩大。作为中国最大的优质商品棉以及世界原棉重要生产基地，2015年新疆原棉生产水足迹高达210亿m^3[34]，但80%的原棉被销售出新疆，形成了巨大的原棉贸易水循环。虽然棉花种植对新疆农民增收具有显著作用，但规模庞大的棉花种植却大量消耗了有限的可用水资源，不仅引发了天然绿洲萎缩、下游河道断流、尾闾湖泊干涸、荒漠化加剧、地下水超采等问题，同时还使得土壤盐渍化、土壤污染（塑料膜、化肥污染）等环境问题十分严重；进入21世纪以来新疆的年均径流量相比其1956—2000年多年平均径流量有将近100亿m^3的增量，但以棉花、西红柿为代表的高耗水农作物种植实际耗用的水资源日趋增加，通过贸易流出新疆的大宗农产品量不断攀升，使得新疆生态环境不断恶化的趋势并未得到有效遏制。因此，西北内陆河流域水土资源开发利用，既要考虑西北内陆河流域生态安全和水安全，同时也要从维护国家大宗农产品安全的角度考虑贸易水循环的稳定性，客观思考其传统定位、现实情况和长远需求的协同、协调问题。

3.3 内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式研究前景与前沿

地球进入“人类世”新纪元后，人类在地质和生态方面发挥日益重要的核心作用[35]。虽然人类活动已由影响水循环的外部因素逐步演化为驱动水循环演变的内部力量，但仍有不少水文研究将经济社会因素排除在水文过程外，因此亟需发展一门综合自然、社会及人文等多学科的新学科，来更好地诠释人—水耦合过程的动态作用机理，以应对水资源开发利用中人类面临的新问题与新挑战[36-37]。Sivapalan等[38]2012年首次明确提出社会水文学概念，认为社会水文学是水文学与自然、社会、人文学科的交叉学科，其主要通过观察理解、实验假设、系统观测和模拟等途径，来定量预测未来人—水耦合系统可能的发展轨迹，切实解决人类活动区域的社会水文问题。社会水文学明确将人类活动作为驱动水循环的内在力量，由此来深入理解和解释人类活动影响下的水循环过程，尤其强调区域内及区域间“人—水”耦合的双向互馈、协同进化，以此因地制宜地找寻水安全与生态安全的水循环调控切入点和治理模式，跳出了“就水论水”的传统框架。虽然贸易水循环已成为全球陆地水循环过程的普遍现象，但内陆河流域的独特性使其“自然—社会—贸易”三元水循环模式下的水资源、生态环境甚至社会效应，比非内陆河流域更加严峻而紧迫。

长期以来，学界对西北内陆河流域水文水循环的研究主要集中于山区水文、荒漠生

态水文和绿洲农业水文，对通过绿洲农业水文进一步流入社会经济系统中“看不见”的水循环现象与过程则关注较少，而影响“看不见”的水循环过程的各类因素已内生为流域水循环的主要驱动力。绿洲水文与内陆河流域内人类活动的关系最为密切，是内陆河流域“三元”水循环的核心。内陆河流域的绿洲水文过程是典型的社会水文学过程，内陆河流域是定量研究“三元”水循环的天然试验场和突破口。内陆河流域三元水循环的研究将综合自然、社会及人文等多领域信息，不仅能定量刻画水在以人为主体、以流域为范畴的“人—水”耦合动态，还能在多流域尺度上揭示内陆河地区水文水资源在自然与社会复杂巨系统中的运动轨迹及耗散机理。同时，与生态水文学结合，可进一步发现干旱内陆河区“人—水—生态”的协同演化机理。在新形势和新时期下，西北内陆区的水安全保障和生态文明建设，不仅要注重从本地水资源开发利用的环节节水，提高用水效率，更亟待从更大范围尺度、更多社会与人文学科角度，重视水资源的社会经济转换及更大区域流通耗散，研究认知内陆河流域三元水循环模式，深刻理解内陆河流域的自然循环、人工循环、产业/区域间循环的全过程及循环路径，找寻符合自然、经济、区域发展的水问题解决方案。如探索“西北‘水三线’空间格局”下的内陆河流域水资源配置与“空间均衡”实施路径[39]，探究西北内陆河流域人口、经济总量与其灌溉规模、用水总量等之间极不相适应的相互作用与演变机制，解析“人类世”下的水循环格局的演变规律以及未来调控模式，西北内陆区大量生产输出大宗战略物资、生态环境与水资源态势之间形势不断严峻下的区域间生态补偿问题等，成为内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环研究的主要科学前沿与国家重大需求。

4 结语

本文基于以新疆为代表的西北内陆河流域长期大量输出耗水型农产品的事实，首次明确提出了内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式，并对“自然—社会—贸易”三元水循环下的通量核算、影响因素与资源效应等进行了探讨。客观认知到西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式的存在，为从本地、内陆区内及更大范围内的不同层面找寻影响西北内陆河流域水安全和生态安全的因素，提供了新的系统思考范式及可能的解决途径。在三元水循环模式中，各流域以贸易水循环为主要媒介建立起多流域间的水联系，以产品为抓手可深入认知水在整个社会经济系统（而不局限于某单一的流域单元）中的时空转换过程，可在更大尺度上理解流域间人类活动及其对更大范围生态系统的相互影响、作用机制及调控策略。主要结论如下：

（1）持续的强人类活动大大改变了自然水循环的结构、路径和驱动力，形成了“自然力—人工力”共同驱动的“自然—社会”二元水循环格局。在追求比较优势或规模效益的商品贸易驱动下，随着市场经济化进程的广泛深入，中国内陆河流域农产品的最终消费目的地“行走”得更远，区外需求已成为影响内陆河流域水资源利用、水循环演变的内生驱动力。水循环事实上形成了由“自然力—人工力—经济力”三大力共同驱动，“自然水循环—社会水循环—贸易水循环”共存的内陆河流域的三元水循环模式。

（2）三元水循环模式是二元水循环模式在经济社会不断发展、区域间经贸联系日益紧密但经济差异日渐明显等变化环境下，逐步衍生壮大并成为西北内陆区的水循环新模式，进入21世纪以来该模式日渐凸显。日益强大的流域间贸易水循环是人口增长、农业资源、经济发展水平等多种因素在经济社会发展长期演化中形成的，水资源禀赋本身并不是贸易水循环形成的主要影响因素。社会各界尤其是学术界、决策者在关注或决策内

陆河水安全与生态安全的过程中，需客观认知内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环现象及相关问题，需更多地考虑驱动西北内陆河流域水循环的外部力量及其对内陆河水、生态乃至经济社会安全的巨大影响。

（3）跳出“就水论水”的传统思考范式，从系统的角度探索多区域/流域间“人—水”耦合的双向互馈、协同进化机理，是未来水循环与水资源、水安全保障与生态文明建设研究的重要方向，也是社会水文学研究的核心内容。三元水循环模式与社会水文学的核心研究内容高度契合，在相对封闭的中国干旱区内陆河流域开展社会水文学与三元水循环研究，具有较好的综合优势与应用前景。

参考文献(References)

[1] Lu Guihua, He Hai. View of global hydrological cycle. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 419-424. [陆桂华, 何海. 全球水循环研究进展. 水科学进展, 2006, 17(3): 419-424.]

[2] Wang Hao, Wang Chengming, Wang Jianhua, et al. Dualistic annual runoff evolution model and its application in the Wuding River Basin. Science in China: Technical Science, 2004, 34(Suppl.): 42-48. [王浩, 王成明, 王建华, 等. 二元年径流演化模式及其在无定河流域的应用. 中国科学: 技术科学, 2004, 34(增刊): 42-48.]

[3] Allan J A. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. Groundwater, 1998, 36(4): 545-546.

[4] Cheng Guodong. Virtual water: Astrategic instrument to achieve water security. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2003(4): 260-265. [程国栋. 虚拟水: 中国水资源安全战略的新思路. 中国科学院院刊, 2003(4): 260-265.]

[5] Long Aihua. Research on water resources accounting and socialization management: Taking Zhangye Prefecture in Heihe Watershed as a case [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004. [龙爱华. 水资源账户与社会化管理研究: 以黑河流域张掖市为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.]

[6] Deng Mingjiang, Shi Quan. Management and regulation pattern of water resource in inland arid regions. Advance in Earth Sciences, 2014, 29(9): 1046-1054. [邓铭江, 石泉. 内陆干旱区水资源管理调控模式.地球科学进展, 2014, 29 (9): 1046-1054.]

[7] Wu Pute, Gao Xuerui, Zhao Xining, et al. Framework of "two-dimension three-element" coupling flow of real water and virtual water. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 1-10. [吴普特, 高学睿, 赵西宁, 等. 实体水—虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架. 农业工程学报, 2016, 32(12): 1-10.]

[8] Liu Changming. Several issues on water quantity conversion//Liu Changming, Ren Hongzun. Water Volume Conversion: Experiment and Calculation Analysis. Beijing: Science Press, 1988: 3-21. [刘昌明. 水量转换的若干问题//刘昌明, 任鸿遵. 水量转换: 实验与计算分析. 北京: 科学出版社, 1988: 3-21.]

[9] Lu Desheng. Research on the conversion relationship among rainfall, surface flow, soil water and groundwater. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(12): 49-54. [卢德生. 四水转化关系研究. 水利学报, 1993(12): 49-54.]

[10] Wang Hao, Chen Mingjian, Qin Dayong, et al. Study on Rational Allocation and Carrying Capacity of Water Resources in Northwest China. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2003. [王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.]

[11] Long Aihua. Preliminary study on the theory and application of social water cycle [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008. [龙爱华. 社会水循环理论方法与应用初步研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2008.]

[12] Wang Hao, Long Aihua, Yu Fuliang, et al. Study on theoretical method of social water cycle I: Definition and dynamical mechanism. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 379-387. [王浩, 龙爱华, 于福亮, 等. 社会水循环理论基础探析I: 定义内涵与动力机制. 水利学报, 2011, 42(4): 379-387.]

[13] Wang Hao, Jia Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. [王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然—社会”二元水循环理论与研究方法. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226.]

[14] Liu Changming, Wang Zhonggen, Yang Shengtian, et al. Hydro-Informatic Modeling System: Aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 579-587. [刘昌明, 王中根, 杨胜天, 等. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展. 地理学报, 2014, 69(5): 579-587.]

[15] Long Aihua, Wang Hao, Yu Fuliang, et al. Study on theoretical method of social water cycle II: Scientific topics and discipline frontier. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 505-513. [龙爱华, 王浩, 于福亮, 等. 社会水循环理

论基础探析II: 科学问题与学科前沿. 水利学报, 2011, 42(5): 505-513.]

[16] Yin Desheng. Trade and endogenous economic growth: A theoretical summary. Nankai Economic Studies, 2004(6): 52-58, 71. [殷德生. 贸易与内生经济增长: 一个理论综述. 南开经济研究, 2004(6): 52-58, 71.]

[17] Shao L, Guan D B, Wu Z, et al. Multi-scale input-output analysis of consumption-based water resources: Method and application. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 338-346.

[18] Zhu Huiyi, Li Yi. An empirical analysis of the causes of farmland expansion in Northwest China. Progress in Geography, 2011, 30(5): 615-620. [朱会义, 李义. 西北干旱区耕地扩张原因的实证分析. 地理科学进展, 2011, 30(5): 615-620.]

[19] Zhang Xiang, Zhang Qingfeng, Tian Long, et al. Analysis of the arable pressure on large-scale irrigation areas in the arid regions of Northwest China under different food consumption patterns. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 244-251. [张翔, 张青峰, 田龙, 等. 不同粮食消费模式下西北旱区大型灌区耕地压力分析. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 244-251.]

[20] Chen Minjian, Liang Ruiju, Liu Yulong. Water and grain of China in 21 century. Journal of Hydraulic Engineering, 1999 (1): 1-7. [陈敏建, 梁瑞驹, 刘玉龙. 我国二十一世纪的水和粮食问题. 水利学报, 1999(1): 1-7.]

[21] Zhang Baiping, Zhang Xueqin, Zheng Du. Countermeasures and suggestions for wasteland reclamation prohibition in the arid land in Northwest China. Arid Zone Research, 2013, 30(1): 1-4. [张百平, 张雪芹, 郑度. 关于严格限制西北干旱区荒地开垦的若干对策与建议. 干旱区研究, 2013, 30(1): 1-4.]

[22] Ma Zhong, Su Shoujuan, Long Aihua, et al. Water cycle analysis of social and economic system in Tarim River Basin. Advances in Earth Science, 2018, 33(8): 833-841. [马忠, 苏守娟, 龙爱华, 等. 塔里木河流域社会经济系统水循环分析. 地球科学进展, 2018, 33(8): 833-841.]

[23] Wei Yongping, Zhang Zhiqiang, et al. Socio-hydrology: Theory, Method and Application. Beijing: Science Press, 2017. [尉永平, 张志强, 等. 社会水文学理论、方法与应用. 北京: 科学出版社, 2017.]

[24] Dalin C, Hanasaki N, Qiu H G, et al. Water resources transfers through Chinese interprovincial and foreign food trade. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(27): 9774-9779.

[25] Shi Minjun, Zhang Zhuoying China's Inter-regional Input-output Model and Inter-regional Economic Linkage. Beijing: Science Press, 2012. [石敏俊, 张卓颖. 中国省区间投入产出模型与区际经济联系. 北京: 科学出版社, 2012.]

[26] Water Resources in Northwest China task group of Chinese Academy of Engineering. Strategic study on allocation of water resources, conservation and upgrading of eco-environment and sustainable development in North-west China. Engineering Science, 2003, 5(4): 1-26. [中国工程院“西北水资源”项目组. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究. 中国工程科学, 2003, 5(4): 1-26.]

[27] AbdelkaderA, Elshorbagy A, Tuninetti M, et al. National water, food, and trade modeling framework: The case of Egypt. Science of the Total Environment, 2018, 639: 485-496.

[28] Oki T, Yano S, Hanasaki N. Economic aspects of virtual water trade. Environmental Research Letters, 2017, 12(4): 044002. Doi: 10.1088/1748-9326/aa625f

[29] Han Xue, Che Liangliang, Qin Xiaonan. The risk prediction of virtual water trade of major agricultural product in China. Economic Geography, 2018, 38(3): 175-180. [韩雪, 车亮亮, 秦晓楠. 我国主要农产品虚拟水贸易风险等级评估. 经济地理, 2018, 38(3): 175-180.]

[30] Chen W M, Wu S M, Lei Y, et al. China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water. Ecological Indicators, 2017, 74: 321-333.

[31] Liu X, Du H B, Zhang Z K, et al. Can virtual water trade save water resources? Water Research, 2019, 163: 114848. Doi: 10.1016/j.watres.2019.07.015.

[32] Li Fengli, Qu Shisong, Wang Weiping, et al. Changes of virtual water trade of Shandong Province in 1997-2012 and the ecological environment response of typical areas. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2): 123-128. [李凤丽, 曲士松, 王维平, 等. 1997—2012年山东省虚拟水贸易变化及典型区生态环境响应. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 123-128.]

[33] Thompson A, Jeffords C. Virtual water and an EKC for water pollution. Water Resources Management, 2017, 31(3): 1061-1066.

[34] Zhang P, Deng X Y, Long A H, et al. Impact of social factors in agricultural production on the crop water footprint in Xinjiang, China. Water, 2018, 10: 1145. Doi: 10.3390/w10091145.

[35] Lewis S, Maslin M. Defining the Anthropocene. Nature, 2015, 519(7542): 171-180.

[36] Di Baldassarre G, Viglione A, Carr G, et al. Debates: Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes. Water Resources Research, 2015, 51(6): 4770-4781.

[37] Loucks D P. Debates- Perspectives on socio- hydrology: Simulating hydrologic- human interactions. Water Resource Research, 2015, 51(6): 4789-4794.

[38] Sivapalan M, Savenjie H H G, Bloschl G. Socio-hydrology: A new science of people and water. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1270-1276.

[39] Deng Mingjiang. "Three Water Lines" strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1189-1203. [邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略. 地理学报, 2018, 73(7): 1189-1203.]

Theoretical analysis of "natural-social-trading" ternary water cycle mode in the inland river basin of Northwest China

DENG Mingjiang[1], LONG Aihua[2], LI Jiang[1], DENG Xiaoya[2], ZHANG Pei[2]

(1. Xinjiang Water Resources and Hydropower Planning and Design Administration, Urumqi 830000, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The continuous and intense human activities have greatly changed the structure, path and driving force of the natural water cycle evolution, which conversely influences the water security of human being. With the process of globalization and market economy, human activities not only affect the artificial development of water and soil resources, but also extend to the economic field. The "flow" of water trade contained in product has become an important internal factor that drives the evolution of the regional water cycle and affects regional water security. Traditional water cycle research, which focused on the watershed scale, is difficult to reveal the linkage, two- way feedback mechanism and co- evolution dynamic mechanism in water cycle among different regions. Starting from the phenomenon of continuous and water-intensive agricultural products export in Northwest China, this research elaborates the phenomenon, the process, the structure and their driving forces of the unitary natural water circular, nature-human society binary circular, and trading water circular within multi-regional social economic complex systems by theoretical analysis. We explicated the theoretical framework for constructing the "natural-social-trading" ternary water cycle in the inland river basin, including mode of process, driving force of water cycle, conceptual model, influencing factors and ecological environment effects. Furthermore, we discussed the frontier of water cycle research in inland river basin based on ternary water cycle model-social hydrology. We advocated that the future study on water cycle and water resources should focus more on the external forces driving the water cycle of the inland river basin and its two- way mutual feedback and co- evolution, providing theoretical references for the decision-making of water security, ecological environment security and ecological civilization construction in inland river basins.

Keywords: inland river basin of Northwest China; trading water circular; "natural- social-trading" ternary water cycle; theoretical framework analysis; flux equilibrium model of water cycle