

实体水-虚拟水统筹管理保障国家粮食安全

吴普特

(西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 面对我国农业水资源持续紧缺和粮食安全主要矛盾向供需结构性矛盾转变的双重挑战, 亟须加强实体水-虚拟水统筹管理。本文在分析我国粮食生产及水资源利用现状及存在问题的基础上, 明确了以进一步发展实体水-虚拟水耦合流动理论与方法为核心任务的过程水文学是实体水-虚拟水统筹管理的学科基础。梳理了作者及其团队 2015—2019 年粮食生产与消费系统的过程水文学研究进展。为构建切实可行的实体水-虚拟水统筹管理理论与方法体系, 初步提出 3 个主要发力点: ①突破实体水-虚拟水统筹管理技术和方法壁垒, 凝练和解决粮食系统的过程水文学关键科学问题; ②着眼于全产业链广义水资源高效利用, 深化体制机制改革, 实现虚拟水管理落地; ③加强专业人才培养与支撑。

关键词: 实体水-虚拟水耦合流动; 粮食安全; 过程水文学; 全产业链; 统筹管理

中图分类号: S274.1; S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020999

吴普特. 实体水-虚拟水统筹管理保障国家粮食安全[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 1-6.

WU Pute. Integrative Management of Physical Water and Virtual Water to Ensure National Food Security[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 1-6.

0 引言

农业水资源高效利用与可持续管理, 是保障国家粮食安全的重要前提。在现代自然-经济-社会复杂系统中, 粮食消费需求多元化, 区域间粮食流通加剧, 内嵌于其中的虚拟水流动日趋频繁, 农业水资源消耗形成实体水-虚拟水嵌入转化、互为反馈、相互影响的耦合流动过程^[1]。全产业链视角下, 产前种植结构与水资源配置、产中节水, 产后贸易消费所形成的虚拟水流动, 都决定着区域农业水资源利用效率。面对我国农业水资源持续紧缺和粮食安全主要矛盾向供需结构性矛盾转变^[2]的双重挑战, 亟须实行实体水-虚拟水统筹管理。

1 我国粮食生产及其水资源利用的现状、问题和挑战

我国的粮食产量占世界的 1/4, 养活了世界近 1/5 的人口。进入 21 世纪, 我国的粮食生产发展取得了瞩目成就^[3]: 自 2003 年实现粮食产量“十二连增”, 年产量稳定在 6.5 亿 t 以上; 稻谷和小麦的单位面积产量已分别高于世界平均水平 50.1%和 55.2%, 实现了完全自给。然而, 我国粮食的增产伴随着灌溉面积

的持续增加, 2019 年全国有效灌溉面积为 6 760.1 万 hm^2 , 是 2003 年的 1.25 倍^[4]。灌溉水资源依赖性居高不下^[2], 2019 年灌溉用水占国民经济用水总量的 61.4%^[5]。灌溉水利用系数低、水分生产效率区域间差异大且低于发达国家水平等传统农业水资源问题仍没有完全解决。与此同时, 粮食主产区重心不断北移, 水土资源空间错位加剧, 占全国 51%耕地面积的北方仅依靠全国 19%的水资源。消费驱动下的“北粮南运”伴生规模不断扩大的虚拟水“北水南调”工程, 该工程在 2014 年虚拟水调运量已达 867 亿 m^3 ^[6], 远大于南水北调实体工程目前的调水规模。北方粮食主产区水资源压力进一步加剧, 严重制约当地的经济、资源和环境的安全保障和可持续发展。随着人口增长、膳食结构变化和城镇化水平提高, 饲料粮和工业粮的需求不断加大, 粮食生产结构性问题日益突出。显然, 在水资源刚性约束下, 如何统筹实体水高效利用与虚拟水合理流动, 化解粮食供需结构这一主要矛盾, 是需要解决的农业水资源新问题。

我国正在实行的农业水资源管理, 核心与实质是农业生产过程中实体水的节水增效管理。2019 年 4 月 15 日, 发展改革委与水利部联合印发《国家节水行动方案》, 对 2020、2022 年和 2035 年农田灌溉水有效利用系数、用水总量控制的管理目标做出了明确规划; 对于农业节水增效, 提出了大力推进节水灌溉、

收稿日期: 2020-06-01

作者简介: 吴普特 (1963-), 男, 陕西武功人。教授, 西北农林科技大学校长, 党委副书记。E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

优化调整作物种植结构、推广畜牧渔业节水方式和加快推进农村生活节水 4 个重点任务。事实上,节水灌溉技术的推广不仅可直接减少灌溉用水量,对于粮食输出地区,水分生产效率一定程度的提高也会增强粮食虚拟水出口的间接节水能力,从而在国家层面实现节水;粮食种植结构的适水调整不仅受当地水资源禀赋条件和农业生产条件的制约,更取决于产后市场消费与贸易需求;作为我国农业生产主体,小农户用水的保量保质与粮食生产用水安全直接相关,也应是农业实体水-虚拟水耦合流动不可被忽略的部分。显然,虚拟水流动对水资源系统与粮食安全的影响尚未引起重视,现行的农业水资源管理制度不能完全解决现代区域水安全与粮食安全面临的新问题,虚拟水管理仍然是我国农业水管理的盲区。同时,现有的以实体水为主要研究对象的陆地水文学学科体系亦不能完全满足当前的实体水-虚拟水资源协同开发利用和可持续管理的新需求^[7]。建立基于实体水和虚拟水统一认知的科学理论与方法体系,是实现实体水-虚拟水统筹管理的首要任务。

2 实体水-虚拟水耦合流动理论框架与过程水文学

自 1993 年英国学者 Allan^[8]提出“虚拟水”概念提出以来,粮食产后消费与贸易对农业水资源产生的不可忽视的远程影响逐渐明晰。2010 年,嵌入国际食物贸易中的虚拟水流动已达到全球食物生产耗水的 24%^[9]。随着虚拟水成为国际水文学新兴和热点研究领域,美国学者 Dodorico 等^[10]提出完整的现代水文循环全过程应包括传统实体水文循环和“虚拟水文循环”。吴普特等自 2016 年先后提出实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架^[11]和量化方法^[1],揭示了水资源以实体水和虚拟水“二维”在自然-经济-社会“三元”驱动下耦合流动过程的 3 个层次:第一层次,水作为自然物质,服从牛顿流体运动规律,在自然-人工作用下形成以“降水-广义水资源(蓝-绿水)-取水-耗用水-退排水”为基本路径的实体水循环,形成“物理流”;第二层次,水作为生产资料,服从经济生产过程中资源配置规律,形成以“实体水摄取-实体水消耗(生产水足迹)-虚拟水嵌入”的基本路径,即实体水向虚拟水转化并嵌入产品的过程,又称“效用流”;第三层次,嵌入产品的虚拟水作为社会消费主要资源,在消费拉动力作用下,随区域间商品流通形成“虚拟水流动(商品流通)-虚拟水回用(商品回收再生产)”的虚拟水流动路径,同时产生相应的效益,是水资源最终经济社会价值的主要体现,可称为“贸易流”。

2019 年,吴普特等^[7]进一步思考并提出了“过程水文学”这一新的水文学分支学科。过程水文学,是描述陆地上的水以实体水、虚拟水的形式在自然-经济-社会复杂系统中循环转化、耦合流动过程与规律及其伴生效应的一门交叉学科。过程水文学以实体水-虚拟水耦合流动路径和过程为基础,坚持实体水和虚拟水并重,坚持以过程的观点研究水科学问题,坚持过程特征与伴生效应统筹考虑。过程水文学将水循环从实体水维度拓展至实体水-虚拟水维度,力求通过解析实体水-虚拟水在自然-经济-社会复杂系统中循环转化、耦合流动与伴生效应,形成实体水-虚拟水统筹管理的科学理论与方法体系。

过程水文学的核心任务是进一步发展实体水-虚拟水耦合流动理论与方法,实现实体水高效配置与虚拟水流动调控在水资源管理中的有机统一,由此衍生出 4 个主要研究方向^[7](图 1):

1) 实体水-虚拟水循环转化机理。开展多时空尺度实体水-虚拟水耦合流动过程量化和模拟研究,揭示实体水-虚拟水循环转化过程与机制是实体水-虚拟水统筹管理的关键前置性工作。

2) 实体水-虚拟水耦合流动过程。厘清区域用水单元全产业链实体水-虚拟水流动过程与机理,建立通用解析方法,是实体水-虚拟水统筹管理的重要基础。

3) 实体水-虚拟水流动伴生效应。评价实体水-虚拟水耦合流动伴生的资源、环境生态、经济社会效应,构建相应评价指标体系与标准,是建立区域实体水-虚拟水统筹配置与优化的基本前提。

4) 实体水-虚拟水协同管理模式。创新传统水资源管理方法,提出区域实体水-虚拟水统筹优化协同管理新方法,形成多时空尺度综合水安全保障模式。

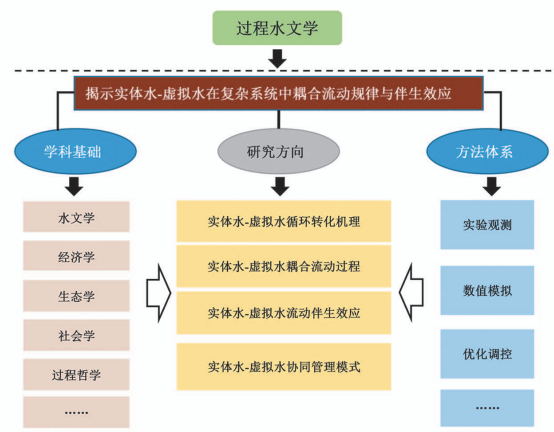


图 1 过程水文学的学科基础、研究重点与方法体系^[7]

Fig.1 The discipline basis, research directions and method system of process hydrology^[7]

3 粮食生产与消费系统的过程水文学研究进展

作者与其团队围绕过程水文学上述 4 个主要研究方向, 针对我国典型灌区、流域与国家粮食生产与消费系统实体水-虚拟水耦合流动相关科学问题, 坚持开展研究 10 余年, 力求不断完善粮食生产与消费系统过程水文学理论和方法体系。2015—2019 年主要研究进展可总结为以下 3 个方面。

3.1 粮食生产与消费实体水-虚拟水耦合流动过程量化方法研究

粮食生产与消费实体水-虚拟水耦合流动过程的量化, 即定量表征实体水-虚拟水耦合流动路径的 3 个阶段: 物理流、效用流和贸易流。吴普特等^[1]集成构建了的区域粮食生产与消费广义实体水-虚拟水耦合流动过程量化方法框架: 作物产前与产中的实体水物理流由区域农业水量平衡方程表达, 水量要素包括田间降水量、灌溉供水量、作物生产蓝水与绿水足迹、作物有效水消耗后的剩余流(地表径流、土壤下渗与排水)等; 对于作物生产过程中的实体水-虚拟水转化效用流, 由作物单位产量(kg/hm^2)或单位产值($\text{元}/\text{kg}$)生产消耗型水足迹表征, 包括蓝水足迹(灌溉水消耗)和绿水足迹(降水资源消耗); 产后农作物产品消费拉力驱动的区域间农产品虚拟水流动量, 可通过量化区域间农产品流通量及流通产品虚拟水量(即输出地该产品单产水足迹)求得。物理流与效用流中各水文要素的量化工作通常借助水文模型、作物水分生产力模型, 结合当地定点实测结果或统计数据校核实现; 在国家以下尺度, 数据短缺现象普遍的条件下, 贸易流的量化难点集中在区域间粮食流通格局的合理模拟。目前常见和普遍认可的方法包括多区域投入产出法、就近原则法及线性优化方法。

针对传统水足迹评价方法未区分不同空间尺度粮食生产水足迹形成特点的不足, 分别对田块、灌区和区域粮食生产水足迹计算方法进行了一定改进。发现在以田块为空间单元的大区域作物生产水足迹时空分布模拟研究中, 单一考虑自然因子、脱离实际生产情况的不足。在基于土壤水分动态平衡的作物生产水足迹计算框架内, 搭载国际粮农组织作物水分生产力模型 AquaCrop, 以地表土壤湿润率为特征参数, 构建了灌溉方式模块, 实现了不同灌溉方式对作物田间耗水时空分布的影响机制的表达^[12-13]。为解决传统灌区尺度作物生产水足迹评价中无法反映灌区“引水-输水-灌水-排水”农业用水的水文过程这一不足, 基于半分布式水文模型, 构建了基于灌区水文过程的作物生产水足迹量化方法, 并在河套灌区得到有效验证^[14]。发现区域灌溉作物生产水足迹定量评价忽略了灌溉

输配水效率对水足迹的影响, 提出将灌溉水在输配水过程的损失量纳入作物生产水足迹的构成要素^[15-16], 完善了区域粮食生产水足迹的量化范畴。

3.2 多时空尺度实体水-虚拟水耦合流动过程解析

以河套灌区^[17-18]、黄河流域^[19]与全国 31 个省级行政区^[20]作为典型研究区域, 定量解析灌区、流域与全国粮食生产与消费实体水-虚拟水耦合流动自 20 世纪 60 年代以来的长时间序列时空演变特征与规律。在不同空间尺度上, 结果均显示伴随单位面积产量不断攀升, 我国粮食作物单产水足迹(单位: m^3/kg)均呈显著下降趋势, 但空间差异性高, 区域间粮食虚拟水流动现象日趋频繁。

在河套灌区, 蓝水足迹占粮食生产水足迹的 85% 以上, 高值区集中在灌区西部。人类活动对河套灌区粮食生产水足迹减小的贡献率高达 84%。20 世纪 90 年代之后, 灌溉技术应用是粮食生产水足迹下降的主要驱动因素^[17]。2010 年灌区小麦与玉米虚拟水输出量为 13.29 亿 m^3/a , 其中玉米虚拟水输出量呈上升趋势^[18]。选择年平均气温、年平均降水量、作物单产、作物播种面积、灌溉水利用系数、灌溉水价、人口数量、城镇化比例、国民生产总值和作物零售价格指数, 共计 3 类 10 个指标, 计算其贡献率。发现作物单产水平对灌区虚拟水输出量变化的贡献率高达 84.22%。

在黄河流域^[19], 年平均作物生产水足迹中 25% 为蓝水足迹。黄河流域灌溉面积扩大了 1.5 倍, 导致流域蓝水足迹增幅高于绿水足迹。黄河流域 83% 的主要作物生产蓝水足迹用于小麦和玉米生产。上游地区灌区的建设和扩张(如青铜峡和河套灌区), 使作物生产水足迹自 1961 年增加了 1 倍。若不考虑稻谷, 黄河流域为虚拟水净输出地区。小麦虚拟水出口量占流域小麦生产水足迹的 45%。

在全国各省级行政区^[21], 粮食单产水足迹空间差异显著。2016 年, 最大值($2.176 \text{ m}^3/\text{kg}$, 西藏)为最小值($0.669 \text{ m}^3/\text{kg}$, 山东)的 3.25 倍。1990 年开始, 中国北方人均粮食产量超过南方, 传统的南粮北运的格局逆转为北粮南运。伴随着北粮南运, 内嵌于粮食中的虚拟水流动, 形成了粮食虚拟水“北水南调”工程, 即缺水的北方通过粮食的调运向丰水的南方输出虚拟水。“北水南调”工程规模不断扩大, 2016 年已达 892.1 亿 m^3/a , 较 1991—2000 年平均水平增长了 3.7 倍。北方形成了以黑龙江、吉林、内蒙古和河南、安徽为代表的东北和黄淮海 2 个虚拟水输出中心。

3.3 实体水-虚拟水耦合流动伴生效应评价

水资源稀缺指数和虚拟水流动间接节水量是实体水-虚拟水耦合流动对水资源影响的常用效应指标。比较黄河流域年内蓝水足迹与天然径流量与环境需

水量之差,即蓝水资源短缺指数,发现年内蓝水足迹峰值比丰水期提前2个月,流域每年平均5个月面临重度的蓝水稀缺(蓝水足迹达到天然径流量30%以上,严重威胁生态环境的长期可持续健康)^[19]。虽然大型水库的调节可以有效缓解缺水期供水压力,但水库蓄水过程中似乎并未重视为生态环境存留足够的水资源禀赋^[22]。

若区域间虚拟水流动由水分生产率较高地区流入较低地区,可产生间接节水。聚焦丝绸之路沿线西部6省,自2008年起,因小麦、玉米从水分生产力较低省份向水分生产力较高省份流动,6省间作物虚拟水流动产生净间接水损失。与此同时,粮食作物较低的市场价格进一步导致主产省份粮食虚拟水输出“费水”又“亏损”^[1]。粮食虚拟水“北水南调”工程不断扩张的同时,输出区在1997—2014年水资源压力增加约35%、农田碳排放增加约30%,输入、输出区之间GDP差值扩大近34倍^[23]。源于水资源严重短缺的省际间粮食虚拟水流动量仍然呈上升趋势^[24]。

随着国民膳食结构变化,动物产品消费需求增加,饲料粮食的省际间虚拟水流动规模不断扩大。2000—2013年,饲料消费需求牵引的由北向南的玉米虚拟水流动量增加了40%,而随后由南向北的猪肉流通使这部分玉米虚拟水流动的10%又返回了北方,饲料玉米的虚拟水2次流动现象在我国日趋明显^[25]。可以预见,随着“南猪北养”,已经承受饲料粮食生产水资源供需压力的目标养殖区,因饲养用水需求加大且易造成水污染,当地水资源短缺和水环境问题可能会愈加严峻。

4 结论与展望

毋庸置疑,应对和解决现代和未来复杂自然-经济-社会系统中的粮食安全和危机问题,农业实体水-虚拟水统筹管理必要而迫切。但是,过程水文学等相关的学科、理论与方法尚未成型,方兴未艾。为构建切实可行的实体水-虚拟水统筹管理理论与方法体系,保障粮食安全,本文初步提出3个主要发力点:

1) 突破实体水-虚拟水统筹管理技术和方法壁垒,凝练和解决粮食系统的过程水文学关键科学问题。首先,在以水量评价为主的实体水-虚拟水耦合流动量化框架与方法基础上,构建以水质评价为核心的量化技术,完善实体水-虚拟水耦合流动量化方法体系。其次,要建立面向全产业链各环节水资源量、质与效的实体水-虚拟水耦合流动过程评价方法或指标体系。再次,要建立农业全产业链实体水-虚拟水耦合流动优化配置方法,其关键技术为统筹考虑实体水、虚拟

水的水资源配置技术^[1]。与此同时,针对粮食生产与消费系统,进一步凝练“粮食生产耗水阈值”、“粮食消费与贸易虚拟水强度阈值”、“水资源约束下的粮食极限产量”、“合理消费与贸易结构下的粮食生产节水潜力”、“公共卫生紧急事件下的粮食与水系统支撑潜力”等现代与未来粮食系统的过程水文学关键科学问题,并探究应对与解决方案,夯实学科基础。

2) 着眼于全产业链广义水资源高效利用,深化体制机制改革,实现虚拟水管理落地。通过综合管理和提高农业全产业链产前、产中、产后三大环节水资源配置与利用效率,从“产前适水规划、产中高效节水、产后多元补偿”三方面入手,在保障或提高粮食生产能力与促进农业产地经济发展水平的前提下,实现区域广义农业水资源(蓝水与绿水)高效利用。研究制定区域农业水足迹与虚拟水控制标准,通过控制标准实施粮食生产用水与虚拟水补偿奖惩制度。以区域实体水消耗与虚拟水流动效率、效益最佳为目标优化区域粮食种植结构,以实现区域水资源最优配置,使虚拟水管理真正落地、可行。

3) 加强专业人才培养与支撑。学科的发展、管理制度的落实都离不开大量的专业人才支撑。虽然实体水-虚拟水耦合流动和过程水文学相关研究已成为当前国际水科学和环境管理领域前沿,然而,在我国仍属于小众研究方向。即使有越来越多的高校和科研单位涉足相关科学研究,人才培养体系仍非常薄弱。目前,国内只有西北农林科技大学开设了相关的本科选修课《看不见的水—虚拟水》、研究生选修课《水足迹与虚拟水概论》和大学MOOC《水足迹与虚拟水》。显然,只有极少数水利类学生可以建立系统的学科知识体系和了解掌握相关的实用技术。因此,建议共同探讨和完善与实体水-虚拟水统筹管理直接相关的学科人才培养方案,并扩大研究辐射面。为实现农业实体水-虚拟水统筹管理、全面贯彻最严格水资源管理制度、保障粮食安全提供充足的专业人才支撑。

参考文献:

- [1] 吴普特,卓拉,刘艺琳,等.区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价[J].科学通报,2019,64(18):1953-1966.
WU Pute, ZHUO La, LIU Yilin, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(18): 1953-1966.
- [2] 王浩,汪林,杨贵羽,等.我国农业水资源形势与高效利用战略举措[J].中国工程科学,2018,20(5):9-15.
WANG Hao, WANG Lin, YANG Guiyu, et al. Agricultural water resource in China and strategic measures for its efficient utilization[J].

- Engineering Science, 2018, 20(5): 9-15.
- [3] 国务院新闻办公室. 《中国的粮食安全》白皮书[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2019.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [5] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2019[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Chinese water resources bulletin 2019[M]. Beijing: China Water Power Press, 2020.
- [6] 吴普特. “北水南调工程”的警示与应对策略[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 121-123, 180.
WU Pute. Warning and strategy of north-to-south water transfer project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 121-123, 180.
- [7] 吴普特, 高学睿, 卓拉, 等. 过程水文学的方法框架与学科体系探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 1-7.
WU Pute, GAO Xuerui, ZHUO La, et al. Methodological framework and discipline system for process hydrology[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 1-7.
- [8] ALLAN J A. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits[J]. Ground Water, 1998, 36(4): 545-546.
- [9] CARR J. On the temporal variability of the virtual water network. Geophys. Res. Lett. 2012. 39(<https://doi.org/10.1029/2012GL051247>).
- [10] DODORICO P, CARR J A, DALIN C, et al. Global virtual water trade and the hydrological cycle: Patterns, drivers, and socio-environmental impacts[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(5): 053001.
- [11] 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[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 1-10.
WU Pute, GAO Xuerui, ZHAO Xining, et al. Framework of “two-dimension three-element” coupling flow of real water and virtual water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 1-10.
- [12] WANG W, ZHUO L, LI M, et al. The effect of development in water-saving irrigation techniques on spatial-temporal variations in crop water footprint and benchmarking[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123916.
- [13] 卓拉, 王伟, 冯变变, 等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 264-271.
ZHUO La, WANG Wei, FENG Bianbian, et al. Water footprint accounting and evaluation for wheat production in Yellow River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 264-271.
- [14] LUAN X B, YIN Y L, WU P T, et al. An improved method for calculating the regional crop water footprint based on a hydrological process analysis[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(10): 5 111-5 123.
- [15] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 651-660, 669.
WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651-660, 669.
- [16] CAO X C, WU P T, WANG Y B, et al. Assessing blue and green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(8): 3 165-3 178.
- [17] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444: 498-507.
- [18] LIU J, SUN S K, WU P T, et al. Evaluation of crop production, trade, and consumption from the perspective of water resources: A case study of the Hetao irrigation district, China, for 1960–2010[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 1 174-1 181.
- [19] ZHUO L, MEKONNEN M, HOEKSTRA A Y, et al. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961—2009)[J]. Advances in Water Resources, 2016, 87: 29-41.
- [20] 吴普特, 赵西宁, 操信春, 等. 中国“农业北水南调虚拟工程”现状及思考[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 1-6.
WU Pute, ZHAO Xining, CAO Xinchun, et al. Status and thoughts of Chinese “agricultural north-to-south water diversion virtual engineering”[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 1-6.
- [21] 吴普特, 王玉宝, 赵西宁. 2014 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
WU Pute, WANG Yubao, ZHAO Xining. China grain production water footprint and regional virtual water flow report in 2014 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016.
- [22] SUN S K, YIN Y L, WU P T, et al. Geographical evolution of agricultural production in China and its effects on water stress, economy, and the environment: The virtual water perspective[J]. Water Resources Research, 2019, 55(5): 4 014-4 029.
- [23] GAO J, ZHUO L, LIU Y L, et al. Efficiency and sustainability of inter-provincial crop-related virtual water transfers in China[J]. Advances in Water Resources, 2020, 138: 103560.
- [24] ZHUO L, LIU Y L, YANG H, et al. Water for maize for pigs for pork: An analysis of inter-provincial trade in China[J]. Water Research, 2019, 166: 115074.
- [25] XIE D, ZHUO L, XIE P X, et al. Spatiotemporal variations and developments of water footprints of pig feeding and pork production in China (2004—2013)[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 297: 106932.

Integrative Management of Physical Water and Virtual Water to Ensure National Food Security

WU Pute

(Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: The double whammy in Chinese agricultural production is the sustained water resources shortage and the change in concern over food production that has shifted from food security to the ways the food is produced. Improving integrative management of physical water and virtual waters is urgently needed to resolve these issues. This paper analyzed current situation and the outstanding problems in grain production and water resources utilization in China, and proposed that the key to achieve integrative management of physical and virtual waters is to develop process-hydrology based on the theory of coupled flow of the physical and virtual waters. This paper reviews the research results of our group over the past five years in process-hydrology in grain production and consumption systems in China. It highlights three areas required to construct applicable theory and methods for integrative management of physical and virtual water resources: ① breaking the technical and methodological barriers excising in integrative management of physical and virtual water, and refining and resolving key scientific issues in process-hydrology in grain production system; ② addressing efficient utilization of water resources in the whole industrial chains, improving reform of the system and its underlying mechanisms, and implementing virtual water management; ③ strengthening training and support of specialists in physical and virtual water management.

Key words: coupled flow of physical and virtual water; food security; process hydrology; whole industry chain; integrative management

责任编辑：乔冬梅