

DOI: 10.5846/stxb201905301133

黄金雨琪, 夏晓华, 陈占明. 全球价值链分工对生态要素空间转移的影响——以 iPhone6 的水资源利用为例. 生态学报, 2020, 40(7): 2473-2488.  
Huang J Y Q, Xia X H, Chen Z M. Impacts of global value chain on spatial transfer of ecological elements: A case study of virtual water use for iPhone6. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2473-2488.

# 全球价值链分工对生态要素空间转移的影响

## ——以 iPhone6 的水资源利用为例

黄金雨琪<sup>1</sup>, 夏晓华<sup>2</sup>, 陈占明<sup>2,\*</sup>

1 中国人民大学经济学院, 北京 100872

2 中国人民大学应用经济学院, 北京 100872

**摘要:**随着生产与贸易不断向全球化发展,经济活动对生态环境的影响已不限于单一地区内,而形成了牵一发而动全身的全局性问题。产品的全球价值链分工所引致的生态要素转移逐渐成为关乎国家资源安全、社会可持续发展的关键事宜。基于生态要素核算的思想,本文首次以典型高科技产品 iPhone6 为研究对象,基于其零部件价值拆解数据与全球供应商分布数据,运用混合多区域投入产出模型对其生产端所引起的水资源使用与转移进行了系统核算。主要结论包括:(1)总体上,生产每单位 iPhone6 需使用 7371m<sup>3</sup>水资源,其生产对全球水供应具有较强依赖性。(2)地区上,iPhone6 中体现的虚拟水主要来自 29 个国家或地区,围绕亚洲与欧美经济体形成两大集中分布;从国家看,苹果公司所在地美国仅占总量的 51.66%,其他国家中虚拟水贡献最高的是中国,占比为 39.05%。(3)生产中,主要引起了中国-美国、中国-日本、菲律宾和马来西亚-新加坡等从发展中国家向发达国家的大规模虚拟水转移,体现出 iPhone6 分工对全球水资源“纳贫济富”的再分配作用。(4)产业布局上,iPhone6 生产所涉及的经济体与经济部门的虚拟水体现强度均低于世界全部门平均水平,新兴智能产品呈现出相对高效的水资源生产力。根据结果分析,我国应基于自身发展中国家特点,在如 iPhone6 等高科技智能产品的生产中聚焦更为核心、资源环境友好的分工环节,或在相对非核心的分工中努力提高自身资源节约能力,落实产业结构与资源整合等方面的转型战略,以实现可持续发展目标。

**关键词:**全球价值链分工;生态要素转移;产业布局;虚拟水;高科技产品

## Impacts of global value chain on spatial transfer of ecological elements: A case study of virtual water use for iPhone6

HUANG Jinyuqi<sup>1</sup>, XIA Xiaohua<sup>2</sup>, CHEN Zhanming<sup>2,\*</sup>

1 School of Economics, Renmin University of China, Beijing 100872, China

2 School of Applied Economics, Renmin University of China, Beijing 100872, China

**Abstract:** With the globalization of production and trade, the impact of economic activities on ecological system is no longer a regional issue, but a matter of global importance. The transfer of ecological elements caused by the division of labor in global value chain (GVC) has gradually become a key issue related to the national resource security and social sustainable development. Based on the value disassembly and supplier distribution data of iPhone6, a hybrid multi-region input-output model is applied to the systematical calculation of virtual water use generated by its production. The results show that: (1) generally, 7371 m<sup>3</sup> of water resource is needed to produce an iPhone 6, whose production is strongly dependent on the global water supply. The components with largest water use in the manufacturing process are Main PCB, Cover Plate and Else,

基金项目:北京市自然科学基金面上项目(9192012)

收稿日期:2019-05-30; 网络出版日期:2020-01-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzhanming@ruc.edu.cn

Display/Touchscreen Module. (2) Regionally, virtual water embodied in iPhone6 mainly roots from 29 countries or regions, while 24 of them are in Asia and Europe. The United States, where Apple Inc. is located, accounts for only 51.66% of total virtual water, while China accounts for 39.05%, being the largest contributor among other economies. (3) During production, the substantial amount of virtual water transfers from the developing countries to the developed countries, such as China-US, China-Japan, Philippines and Malaysia-Singapore, reflecting the role of iPhone6 GVC in global water resources redistribution. (4) In terms of environmental concern, the virtual water intensity of economies and economic sectors involved in iPhone6 GVC is lower than that of the world average, showing better water management awareness and ability. These findings reveal the impact of iPhone6 production on global water budget, and actors in GVC should pay joint efforts to achieve environmentally friendly and sustainable iPhone6 production.

**Key Words:** global value chain; ecological elements; industrial distribution; virtual water use; high-tech products

金融、储运、通讯等方面的技术升级推动了贸易的全球化,凝聚于商品及服务中的各项要素随之发生跨国流动。国际分工的精细化发展使贸易对象更为多元,新兴国际产品的价值链中蕴含了更为复杂的要素流动关系。贸易与分工导致的要素流动中,包含着自然资源、污染排放等生态要素的转移与再分配,成为了影响各国环境、资源安全的重要因素。在全球经济一体化和产业链加速整合的背景下,如何更全面细致地衡量全球经济系统中的生态要素流动,是调整产业布局、追求经济可持续增长、维护国家环境资源安全的重要议题。

对生产效益最大化的追求致使国家和地区将产业布局向产品内分工、甚至零部件内分工渗透,引起全球资源的深度整合。本文选取高度集成的国际化产品 iPhone6 作为研究对象,旨在针对其精细分工与全球布局的生产特点,利用生态要素核算手段衡量 iPhone6 的生产对全球水资源再分配的影响。以此为例,可将微观商品与宏观的经济、环境影响建立联系,并由此开启更多对“新兴产品-新兴产业-新兴生产网络”的出现所致环境影响的全局性定量分析。

当前,各国环保意识加强,但通过调节水资源密集型商品分工贸易来管理区域水预算事务<sup>[1]</sup>的措施仍然较少。本文以 iPhone6 为例,基于系统分析思想对其生产中水资源直接及间接投入量进行核算,呼应了各国将经济活动与水资源管理事务相结合的需要,有助于为各国理解自身环境资源投入形势、参与国际合作和谈判提供方法借鉴,对加强水资源安全、维护全球水资源可持续发展具有重要意义。

## 1 研究概况

生产全球化背景下的理论发展可分为“价值链—全球商品链—全球价值链”三个阶段。首先,Porter<sup>[2-3]</sup>和 Kogut<sup>[4]</sup>分别以企业和商品为对象建立价值链理论,引发了学者对生产中价值增值的关注;其次,商品链<sup>[5]</sup>及全球商品链<sup>[6]</sup>理论指出了全球经济开放中投入与产销过程的市场化分离,描述了以商品为核心的全球资本流动与供销网络的形成;最后,全球价值链(Global Value Chain, GVC)理论整合同期旁系支论,对全球性跨企业、跨区域的网络组织在实现商品或服务价值而连接生产、销售、回收处理等各种增值活动的全过程进行了统一概述<sup>[7-9]</sup>。GVC 理论的形成与发展为泛经济学问题提供了新的结合尺度,如经济活动对环境承载力影响的全球性衡量、国家间产业合作与区域一体化发展等。

在理论演进的同时,价值分解的核算方法也在不断更新。原有的总值形式贸易数据存在重复计算、无法分离增加值、忽略利益输送等问题<sup>[10-11]</sup>,不能直接为 GVC 研究所用。为挖掘产品的“价值原产地”,许多学者对贸易分工中的增加值分解问题进行了研究,主要分为“中间贸易分解-垂直贸易分解-投入产出分解”三个阶段<sup>[12-17]</sup>。在此过程中,一些较新的方案包括“价值链分割”法<sup>[18]</sup>、GVC 核心指数法<sup>[19]</sup>、“碎片化生产”法<sup>[20]</sup>等开始进入研究者的视野。

经济全球化的加强导致商品的生产能力与消费需求的时空分离日益明显,一个国家或地区通过生产外包和贸易将环境资源等生态要素的直接投入转变成间接投入的现象越发显著。生态要素的系统核算方法则为

评估这种转变及其造成的影响提供了途径,当前主要分为基于过程的方法(Process-based Method)、基于网络的方法(Network-based Method)以及混合方法(Hybrid Method)。基于过程的系统核算方法在识别研究对象主要流程的基础上选取研究边界,进而构建详细的流程清单,然后对清单项目的隐含环境资源投入进行评估和综合,其特点是对技术细节和微观数据具有较高的需求,该方法以生命周期评估(Life-cycle Assessment)为代表<sup>[21-23]</sup>。基于网络的系统核算方法通常以宏观经济整体为研究对象,通过对其内在组成部分(通常是经济部门)的相互关联进行并行模拟以同时实现对整体和局部的隐含环境资源投入核算,其特点是对经济结构模拟和宏观经济数据具有较高的需求,该方法以投入产出分析(Input-output Analysis)为代表<sup>[24-28]</sup>。系统核算的混合方法则对基于过程和基于网络的方法进行组合,其代表是投入产出生命周期评估(Input-output Life-cycle Assessment)<sup>[29-31]</sup>。

上述方法的核算对象十分广泛,具体包括生态足迹<sup>[32-33]</sup>、水土资源<sup>[34-35]</sup>、能源<sup>[36-37]</sup>等资源型要素,以及温室气体<sup>[38-39]</sup>、污染物<sup>[40]</sup>等排放型要素。在使用生命周期法进行核算时,各类要素需基于生产或消费的具体环节进行层层剖析,不同种产业间的可比性较低;使用投入产出法进行核算时跨行业可比性较高,但在一些情况中精度不足;混合方法则结合了上述二者的优点,在保证一定精度的情况下提高了可比性。

以水资源核算为例,近年来国内外学者的在生态核算领域的应用重点主要集中在以下三个方面:一是对比不同区域、部门及产品的虚拟水投入强度,即单位价值蕴含的直接和间接的水资源投入量<sup>[41]</sup>,主要有对中国<sup>[42]</sup>、法国<sup>[43]</sup>、西班牙<sup>[44]</sup>等国家以及特定地区或产业<sup>[45-47]</sup>的计算,这些研究成果是各级决策者通过经济结构调控实现节水生产目标的重要依据;二是核算居民消费中隐含的虚拟水<sup>[48]</sup>及城市经济活动的“水代谢效率”<sup>[49]</sup>等,以比较各地用水“贫富差距”;三是分析生产贸易中水资源占用的时空转移现象,对全球<sup>[50-53]</sup>、国家<sup>[54]</sup>、河流域<sup>[55]</sup>、城市<sup>[56-57]</sup>等层面的对外贸易中水资源转移进行了核算,为总结资源再分配形势,加强区域间可持续经济合作,健全环境补偿机制等提供了参考。

目前,国内外关于 GVC 的认识与理论研究不断成熟,在此基础上的增加值分解、生态要素系统核算框架也日臻完善。然而,在实证应用方面仍然存在拓展空间:上述文献表明,现有研究主要从消费端入手,围绕粮食<sup>[58]</sup>、水泥<sup>[59]</sup>等直接用水量大的产品进行核算,而尚未有研究关注非粮食产品中高科技产品的大规模全球化生产对虚拟水流动造成的冲击。新兴产品的出现及其产业的布局看似与全球虚拟水预算平衡相隔甚远,实质上对国家产业升级、环境整治等发展战略密不可分。因此,本文致力于补充该子领域的研究,延续 GVC 理论背景,采用“生产碎片化”的价值拆解思路,方法上继承混合投入产出模型法,结合宏观与微观视角追踪产品生产引起的全球性水资源利用与转移,在研究对象上有所创新,从生产端入手,首次聚焦新兴高科技产品,拓展了生态要素核算的实证应用范围。

在高科技产品中,本文选取 iPhone6 进行研究,主要原因有以下五点:首先,近年全球电信市场发展势头良好,智能手机生产成为代表性新兴产业<sup>[60]</sup>;其次,苹果公司是智能手机市场中的代表性企业之一<sup>[61]</sup>;第三,iPhone6 机型是苹果公司产量最大、最畅销的代表性产品<sup>[62]</sup>;第四,iPhone6 拥有 200 家主要供应商,大部分为跨国公司,形成了以美国为主的“核心零部件生产网络”与以中国为主的“非核心零部件生产网络”,具有特征鲜明的全球性 GVC 分布;最后,iPhone6 的生产中许多环节都需要投入水资源,如手机盖板研洗用水、印刷电路板生产用水、金属冷却用水等,充分表明 iPhone6 是一种需要调动全球水资源生产的新型产品代表。如此,本文既能将目标锁定在特定产品之中,又能将视野置于系统性分析的高度之上,为后续同类研究提供了可行方案。

## 2 研究方法与数据说明

### 2.1 iPhone6 的增加值分解

本文根据<sup>[20]</sup>关于全球价值链生产碎片化的思路,设计了将 iPhone6 各零部件增加值按照全球价值链分工直接分解的执行框架。第一,设 iPhone6(售卖)的总价值为  $P$ ,  $P$  主要由成本  $C$  与利润  $R$  两部分组成,其中  $R$

归属于苹果公司总部所在经济体。

$$P = C + R \quad (1)$$

第二,根据 IHS Markit 提供的 iPhone6 详细拆机报告<sup>[63]</sup>,可将  $C$  按照各元件的成本按 200 家主要供应商<sup>[64]</sup>进行分解。其中  $i$  为供应商编号。

$$C = \sum_i C_i (i = 1, 2, \dots, 200) \quad (2)$$

第三,按照各供应商的主营业务分类信息,将供应商的增加值配份按不同经济部门进行分解。其中  $j$  为经济部门编号。

$$C_i = \sum_j C_{ij} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

第四,根据 Bloomberg 数据库、各供应商官网及财务报告提供的跨地区产能情况,将各供应商按部门分类的增加值配份进一步按生产地分解到世界各经济体中。

$$C_{ij} = \sum_k C_{ijk} (k = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

上式中  $k$  为经济体编号。

第五,为得到各经济体分部门的增加值配份,将上述以各供应商、各经济体、各经济部门分解而来的增加值按照经济体的各部门分别进行加总。例如,  $k$  经济体  $j$  部门所分得的增加值  $C_{jk}$  可表示为

$$C_{jk} = C_{1jk} + C_{2jk} + \dots + C_{ijk} \quad (5)$$

综上,iPhone6 的生产成本中各经济体分部门的增加值分配向量可表示为

$$C_{mn \times 1} = (C_{jk})_{mn \times 1} \quad (6)$$

依据本文计算运用的 Eora 数据库中多区域投入产出 (Multi-Regional Input-Output, MRIO) 核算表中的地区与部门分类,  $m = 189, n = 26$ 。

根据上文,iPhone6 的利润归属于苹果公司所在经济体即美国,且行业分类划分为电子通信业,故利润的分配向量可表示为  $R_{mn \times 1} = (f_{jk})_{mn \times 1}$ ,其中,当且仅当  $k = 181, j = 20$  时,  $f_{jk}$  为非零常数。因此,iPhone6 的增加值分解向量可表示为

$$V_{mn \times 1} = C_{mn \times 1} + R_{mn \times 1} \quad (7)$$

## 2.2 生态 MRIO 模型框架下的虚拟水计算

为计算每部 iPhone6 生产所引致的虚拟水使用与转移,本文构建了基于多区域投入产出 (Multi-Regional Input-Output, MRIO) 核算模型的生态要素核算框架,以此将淡水资源的提取与经济活动对其的使用建立联系,具体如图 1 所示。其中,位于第 I 象限的  $Z_{ji}^{rs}$  表示包含全部经济体的经济系统的中间投入与中间使用,位于第 II 象限的  $F_i^{rs}$  表示经济活动中的最终需求,位于第 III 象限的  $W_i^r$  表示各经济体分部门的水资源投入。各经济体的每个部门都可被视为联结水资源投入、商品生产和商品消费的节点。

首先,依照最基本的物质流动平衡关系,MRIO 生态要素核算框架中虚拟水流动存在如下等式

$$W_i^r + \sum_s \sum_j \varepsilon_j^s \times Z_{ji}^{rs} = \sum_s \sum_j \varepsilon_j^s \times (Z_{ji}^{rs} + F_i^{rs}) \quad (8)$$

特别地,  $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $n$  表示经济部门的个数;  $r, s \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $m$  表示经济体的个数;  $W_i^r$  表示投入到  $r$  经济体  $i$  部门的水资源;  $\varepsilon_j^s$  表示  $s$  经济体  $j$  部门的产出中所体现的水资源使用强度;  $Z_{ji}^{rs}$  表示从  $r$  经济体  $i$  部门转移到  $s$  经济体  $j$  部门的中间使用;  $F_i^{rs}$  表示  $s$  经济体  $j$  部门对  $r$  经济体  $i$  部门的最终需求。 $W_i^r$  的数值在水资源与经济系统的非接口部门(不直接从生态系统提取水资源的部门)中保持为零。若将各经济体的每个部门视为一个虚拟水分割市场,则皆有上述虚拟水算术平衡等式(8)成立。

将等式(8)中的平衡关系联立为方程组,在数学上可用矩阵的形式将其再现<sup>[65-67]</sup>为如下等式

$$W' + Z' \times E' = X' \times E' \quad (9)$$

其中 ' $'$  表示矩阵的转置,  $W = [W_i^r]_{1 \times mn}$ ,  $E = [\varepsilon_i^r]_{1 \times mn}$ ;  $Z = [Z_{ji}^{rs}]_{mn \times mn}$ ; 特别地,  $X = \text{diag}\left\{\sum_s \sum_j (Z_{ji}^{rs} + F_i^{rs})\right\}_{mn \times mn}$ , 表示向量  $\left[\sum_s \sum_j (Z_{ji}^{rs} + F_i^{rs})\right]$  的对角阵,且  $X = X'$ 。求解等式(9),得到

来源地/目的地	中间投入/消耗			最终需求
	经济体1	……	经济体 $m$	经济体1… 经济体 $m$
	部门1 …… 部门 $n$	……	部门1 …… 部门 $n$	
经济体1 部门1 …… 部门 $n$ ……	I ( $Z_{ji}^{rs}$ )			II ( $F_j^{rs}$ )
经济体 $m$ 部门1 …… 部门 $n$				
水资源投入	III ( $W_i^r$ )			

图 1 生态投入产出框架示意图

Fig.1 The scheme of ecological multi-regional input-output table

表示虚拟水投入强度的向量  $E$

$$E = W (X - Z)^{-1} \tag{10}$$

其中,  $E_{1 \times mn}$  的单位为“ $m^3 / \$$ ”, 将其左乘 iPhone6 的增加值分解向量  $V_{mn \times 1}$  ( $\$ / unit$ ), 二者乘积即为每部 iPhone6 生产所使用的虚拟水总量  $X$  ( $m^3 / unit$ )

$$X = E \times V \tag{11}$$

同理, 将 iPhone6 中各元件类别的价值分配信息的向量表示为  $U_i$ ,  $E \times U_i$  即为每部 iPhone6 中各类部件生产所使用的虚拟水量。向量  $V$  以及各部件价值分配向量  $U_i$  的核算依据见“2.3 数据说明”部分。

其次, 为获得 iPhone6 生产中引发的水资源再分配关系, 需要计算虚拟水转移矩阵。将 iPhone6 价值分解中的成本  $C$  归属于中间使用价值, 利润  $R$  归属于最终需求价值, 再分别右乘虚拟水强度向量的对角阵  $diagE$ , 由此得到每部 iPhone6 生产引发的虚拟水使用强度向量  $K$  和  $L$

$$K = diagE \times C \tag{12}$$

$$L = diagE \times R \tag{13}$$

分别计算出单位价值产出引发的中间投入转移矩阵  $B$  和单位价值产出引发的最终需求转移矩阵  $D$ , 再用 iPhone6 虚拟水使用强度向量对角阵  $diagK$  和  $diagL$  分别与  $B$  和  $D$  相乘, 得到单位 iPhone6 生产引发的虚拟水中间转移矩阵  $G$  和最终转移矩阵  $H$

$$G = diagK \times B \tag{14}$$

$$H = diagL \times D \tag{15}$$

……

最后, 先将  $G$  和  $H$  分别按照国别进行加总, 再把两部分相加, 得到单位 iPhone6 生产引发的水资源转移矩阵  $S$ 。

### 2.3 数据说明

首先, 为明确 iPhone6 的详细产品组成情况, 本文使用 IHS Markit 发布的 iPhone6 手机拆机报告<sup>[63]</sup>中各元件的数量、价值及供应商来源信息。iPhone6 产品元件详细分类见表 1。

其次, iPhone6 的全球价值链中绝大多数供应商为跨国公司, 拥有多个生产地。为将各供应商的生产成本与资源使用需根据其各产地的地理位置、生产规模和主营产品等信息分解到不同经济体的经济部门中, 本文

综合苹果公司官方网站<sup>[64]</sup>、Bloomberg 数据终端以及各供应商的官方网站上的公开数据,整理出 200 个主要供应商的详细信息(具体包括主营业务、产地分布、产能规模等),用以进行 iPhone6 的价值拆解与增加值分配。

表 1 iPhone6 细分部类与整合部类

Table 1 Aggregated categories and components of iPhone6 teardown

整合部类 Aggregated categories	细分部类 Specified categories	整合部类 Aggregated categories	细分部类 Specified categories
利润开发 Profit and Development	利润	其他部件 Other Enclosures	互联电路
劳动装配 Labor and Assembly	劳动		接口电路
附件包装 Accessories and Packaging	充电器		主板
	耳机		音量控制键模块
	数据线		电池
	包装及其他		扬声器
印刷电路板 Printed Circuit Board, PCB	天线模块		蓝牙/网络/天线
	相机开关模块		外壳及其他
	显示器及触屏模块		主摄像头模块
	前端麦克风模块		副摄像头模块
	接地点模块		螺丝
	Home 键模块		马达

最后,为使计算更好地囊括 iPhone6 生产分工中几个经济体量较小但重要的国家和地区,本文选用来自悉尼大学综合可持续发展分析中心<sup>[68-69]</sup>的多区域投入产出数据库(Eora-MRIO Database)的最新可获取数据——Eora26-2013MRIO 核算表。该表具有较高经济体分类精度,涵盖了全球 189 个经济体的 26 个部门,具体分类见表 2。

表 2 Eora 数据库经济部门分类

Table 2 Sectorial classification of Eora MRIO database

编码 Code	Eora 经济部门 Eora Economic Sectors	编码 Code	Eora 经济部门 Eora Economic Sectors
S1	农业	S14	建筑
S2	渔业	S15	维护和修理
S3	采掘业	S16	批发贸易
S4	食品饮料	S17	零售业
S5	纺织业	S18	餐饮住宿
S6	木制品与造纸业	S19	运输业
S7	石油、化工和非金属矿产品	S20	邮电
S8	金属制品	S21	金融中介和商业
S9	电气和机械	S22	公共行政
S10	运输设备	S23	教育、卫生和其他服务
S11	其他制造业	S24	个体经营
S12	回收	S25	其他
S13	电力、天然气与水	S26	再进出口

在 MRIO 模型中,可将农业部门(部门 S1)视为联结农业经济活动与自然生态系统水资源提取的接口部门,而电力、天然气和水力部门(部门 S13)可被视为联结非农业经济活动与自然生态系统水资源提取的接口部门。本文使用世界银行<sup>[70]</sup>2014 年统计的年度淡水提取数据来估计特定国家或区域领土内的水资源提取量  $W_i$ 。

### 3 结果描述与分析

#### 3.1 iPhone6 价值链及虚拟水投入量的类别分布

表 3 首列数据展示了 iPhone6 的各部类价值分布。每部 iPhone6 的总价值为 669.05 美元,包含了 24 种价值部类,共与 5 个经济部门的生产直接相关。按部类看,价值占比最大的为利润( \$ 467.90),其次为主板( \$ 99.30),占比第三大的是显示/触摸屏模块( \$ 33.54)。在 iPhone6 的全球价值链中,价值占比最高的前 5 位部类共占总价值的 94.15%,其余 16 个部类仅占总价值的 5.85%,分布较集中。

表 3 iPhone6 价值链及虚拟水投入量的部类分布  
Table 3 Value classification and virtual water of iPhone6 by category

部类 Categories	价值 Value/ \$	虚拟水 Virtual Water/m <sup>3</sup>	虚拟水强度 Virtual Water Intensity/(m <sup>3</sup> / \$)
总体 Total	669.05	7371.00	11.02
利润 Profit	467.90	3555.22	7.60
主板 Main PCB	99.30	1199.71	12.08
显示器及触屏模块 Display / Touchscreen Module	33.54	598.82	17.86
外壳及其他 Other Enclosures (Cover Plate and Else)	19.82	636.92	32.14
主摄像头模块 Primary Camera Module	9.32	392.74	42.14
Home 键模块 Home Button PCB	7.48	60.08	8.03
接口电路 I/O & Interface PCB	5.46	75.93	13.91
劳动 Labor	5.07	304.78	60.09
电池 Battery	4.77	142.89	29.96
副摄像头模块 Secondary Camera Module	2.17	110.60	50.97
蓝牙/网络/天线 BT / WLAN Antenna	1.63	18.86	11.54
扬声器 Loudspeaker	1.49	22.29	14.92
相机开关模块 Camera Flash / Sleep / Wake Button	1.49	31.42	21.11
耳机 Headset	1.35	25.77	19.09
互联电路 Interconnect PCB	1.34	20.45	15.32
天线模块 Antenna Interconnect PCB	1.32	19.06	14.49
包装及其他 Box Contents (Other)	1.23	65.08	52.82
接地点模块 Ground Contact PCB	0.98	19.97	20.39
充电器 Charger	0.90	31.71	35.10
马达 Motor	0.65	8.08	12.50
前端麦克风模块 Front Microphone PCB	0.63	13.61	21.60
音量控制键模块 Ring/Silent/Volume Button PCB	0.54	10.33	19.13
螺丝 Fastener	0.27	5.16	19.09
数据线 Lightning Cable	0.06	1.50	24.89

表 3 第二列为 iPhone6 生产中体现的虚拟水使用量。总体而言,每部 iPhone6 的生产需要使用 7371.00 m<sup>3</sup> 虚拟水,约等于填满 3.9 个标准游泳池的水量。分部类比较,虚拟水使用量最大的部类为利润(3555.22 m<sup>3</sup>),占虚拟水总使用量近 50%,其次为主板(1199.71 m<sup>3</sup>)、外壳及其他(636.92 m<sup>3</sup>)、显示器及触屏模块(第四,598.82 m<sup>3</sup>)。特别地,有 5 个部类虽然价值占比较低,但体现了更高的虚拟水使用量:劳动(304.78 m<sup>3</sup>)、主摄像头模块(392.74 m<sup>3</sup>)、副摄像头模块(110.60 m<sup>3</sup>)、电池(142.89 m<sup>3</sup>)和包装及其他(65.08 m<sup>3</sup>)。

如表 3 第三列所示,各部类的虚拟水强度(即每生产单位价值 1 美元所使用的虚拟水量,又称虚拟水使用强度、虚拟水投入强度)由虚拟水体现量除以价值分配量得到,iPhone6 生产的平均虚拟水强度为 11.02 m<sup>3</sup>/ \$。用水强度最大的 5 个部类依次为劳动(60.09 m<sup>3</sup>/ \$)、包装及其他(52.82 m<sup>3</sup>/ \$)、副摄像头模块(50.97 m<sup>3</sup>/ \$)、主摄像头模块(42.14 m<sup>3</sup>/ \$)和充电器(35.10 m<sup>3</sup>/ \$)。与虚拟水投入强度相对应的概念是水资源生产力,一个部类的虚拟水强度越低,则在同等用水量条件下所创造的价值越高,这意味着更高的水资源生产力。因此,就提高水资源生产力的前景而言,各经济体可通过参与更多 iPhone6 价值链中的低耗水强

度环节来靠近这一目标,例如提高下列环节的分工参与度:利润(7.60 m<sup>3</sup>/ \$)、Home 键模块(8.03 m<sup>3</sup>/ \$)、蓝牙/网络/天线(11.54 m<sup>3</sup>/ \$)和马达(12.50 m<sup>3</sup>/ \$)。

### 3.3 iPhone6 价值链及虚拟水投入量的地理分布

图 2 所示为 iPhone6 的虚拟水体现量的地理分布,其价值链主要涉及 29 个国家和地区,较为明显地形成了以中国为核心的东亚-东南亚生产网络,以及以美国为核心的欧美生产网络。从虚拟水占比上看,亚洲与北美地区是 iPhone6 生产中最主要的水资源来源地,虚拟水投入最大的 5 个经济体均在这两大洲:美国(3806.19 m<sup>3</sup>)、中国大陆(2392.83 m<sup>3</sup>)、中国台湾(485.46 m<sup>3</sup>)、韩国(218.56 m<sup>3</sup>)和泰国(87.38 m<sup>3</sup>)。可将虚拟水体现量较大的经济体分为两种类型:第一种因其价值分配量较大而体现出更大的虚拟水投入,如美国和韩国;另一种价值分配量并不大,但具有较大的水资源禀赋及虚拟水体现强度,如泰国、菲律宾和越南。后一种类型的经济体为了获得更多增加值收益,往往付出巨大的水资源代价。各经济体的虚拟水强度(或水资源生产力)进一步证实了上述结论:虚拟水强度最大(即水资源生产力最低)的经济体依次是印度(134.21 m<sup>3</sup>/ \$)、泰国(66.21 m<sup>3</sup>/ \$)、越南(33.65 m<sup>3</sup>/ \$)、中国大陆(26.30 m<sup>3</sup>/ \$)和菲律宾(24.18 m<sup>3</sup>/ \$)。

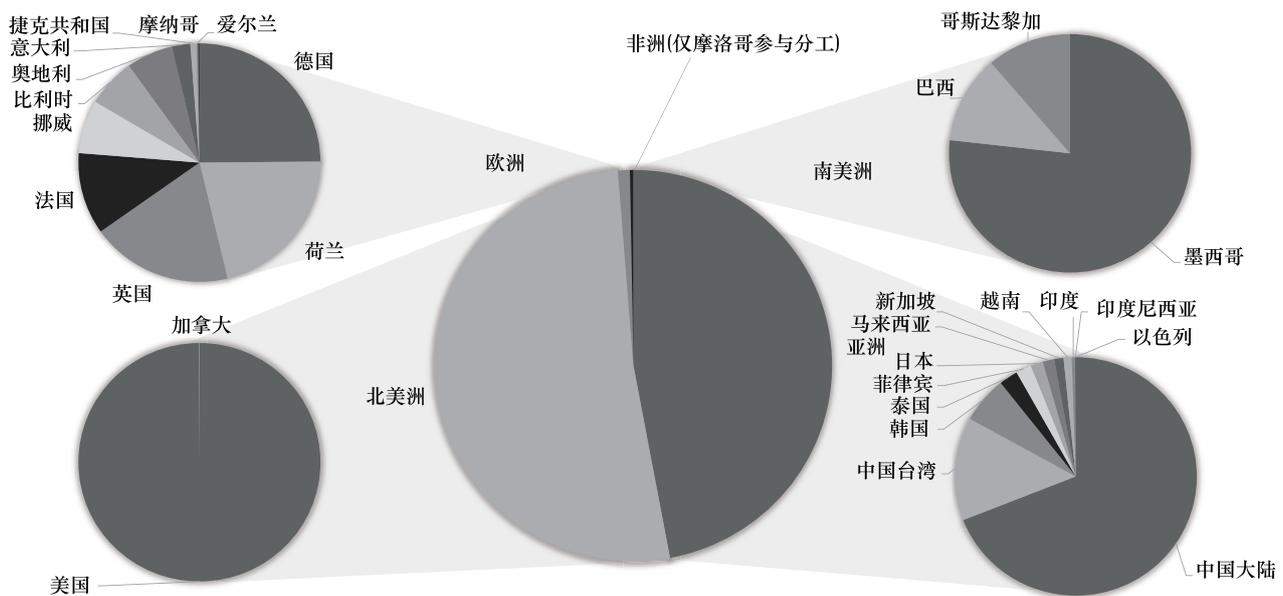


图 2 iPhone6 虚拟水体现量的地理分布

Fig.2 Value distribution of iPhone6 by region

图 2 至图 10 中各个弦图的弧边长度表示该经济体的价值/虚拟水流动性大小;与弧边颜色一致的弦为该经济体的价值/虚拟水流出,弦连接的异色弧边为该价值/虚拟水流汇入的对象经济体;弧边及弦均按照绝对值大小依次排序

图 3 所示为 iPhone6 虚拟水体现量的地理分布及部类分布。从地区参与分工种类看, iPhone6 的价值链高度集中于中国。中国参与了 23 种部类的价值链分工,是美国参与分工种类数量的近 2 倍。日本则参与了 10 种部类分工。其余区域中东亚地区参与分工的部类均不少于 5 种,而西亚与欧洲地区参与分工的部类均未超过 5 种,这是由于非核心零部件类别较多且分工集中在亚洲,核心零部件类别较少且分工分布在欧美所致:美国、欧洲供应商主要提供核心芯片、内存等核心零部件;亚洲的中国大陆和中国台湾地区供应商则主要从事印刷电路板、中央处理器芯片、声学组件以及结构件等非核心零部件的代工生产以及最终组装;日韩供应商则提供摄像头模组等光学组件、显示面板和部分芯片。因此,欧美的虚拟水强度及其体现量主要由主板、Home 键模块等核心部类的虚拟水强度及体现量决定,而亚洲的虚拟水强度及其体现量则主要由扬声器、音量控制键模块、相机开关模块、螺丝、耳机、电池、充电器及副摄像头模块、包装及其他等非核心部类及代工环节的虚拟水强度与体现量决定。

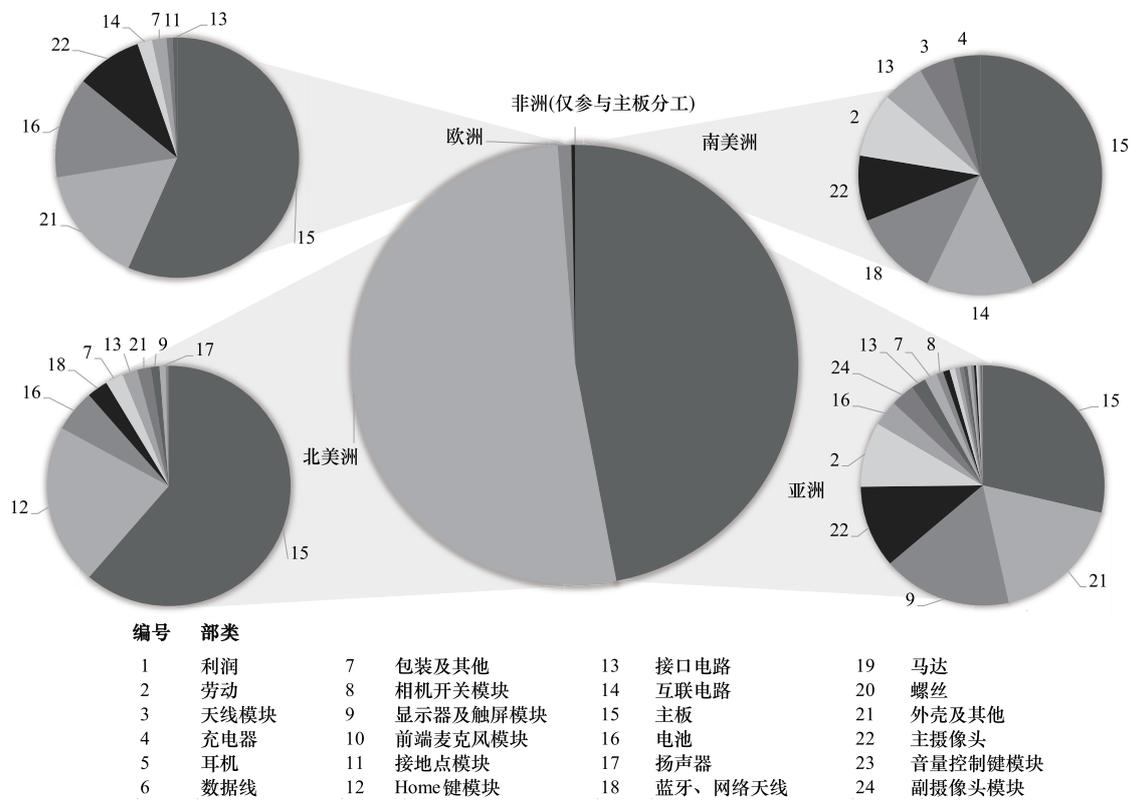


图3 iPhone6 虚拟水体量的部类及地理分布

Fig.3 Value allocation in each region by category of iPhone6

3.3 iPhone6 虚拟水的源汇(转移)关系

iPhone6 的生产使各地区水资源通过全球价值链分工在世界范围内基于生产端重新配置,虚拟水离开源头区域,基于投入产出关系最终汇入各个地区。图 4、图 5 将全球分为 29 个 iPhone6 生产的直接参与者经济体以及世界其他地区(Rest of the World, ROW)共 30 部分,描述了其中共 870 股价值流动及 870 股虚拟水流动。各支流代表着各经济体在生产 iPhone6 增加值过程中,经由全球投入产出关系所转运的隐含在中间产品中的虚拟水流动。

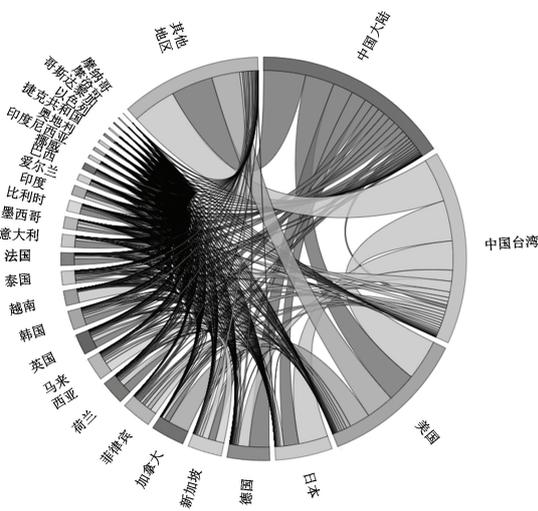


图4 iPhone6 价值转移

Fig.4 Value transfer of iPhone6

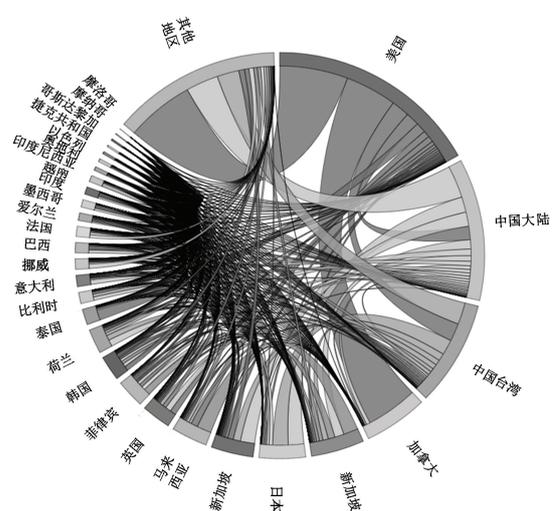


图5 iPhone6 虚拟水转移

Fig.5 Virtual water transfer of iPhone6

如图 4 所示,美国为最大的价值出口者,生产每部 iPhone6 将引起美国 8.23 美元的出口,位列其后的中国大陆、中国台湾、马来西亚和菲律宾均为发展中经济体。相对地,最大的价值进口者是 ROW( \$ 6.91, 主要由澳大利亚、中国香港、瑞士、哥伦比亚、瑞典的价值吸收构成), 其次为美国、加拿大、新加坡和日本, 全部由发达经济体组成。从贸易净值看, 前 5 大顺差者是美国( \$ 5.47)、中国大陆( \$ 5.33)、中国台湾( \$ 4.33)、菲律宾( \$ 1.11)和韩国( \$ 0.48), 其中有 4 个为联合国与 OECD 公认的发展中经济体; 而前 5 大的逆差者则是 ROW( \$ 6.91)、加拿大( \$ 2.61)、日本( \$ 1.69)、新加坡( \$ 1.52)和德国( \$ 1.03), 除 ROW 外均为发达经济体。在 iPhone6 价值链驱动的主要价值流中, 美国起主导作用, 且全球价值流动主要从发展中经济体流向发达经济体。

如图 5 所示, 中国大陆为最大的虚拟水出口者, 生产每部 iPhone6 将引起 240.94 m<sup>3</sup> 虚拟水由中国大陆向外转移, 其次为中国台湾、美国、菲律宾和马来西亚, 除美国以外均为发展中经济体。源于中国大陆的虚拟水中有 36% 最终汇入美国、德国和日本。相对地, 虚拟水流入最大的依次是 ROW( 166.69 m<sup>3</sup> ), 主要由中国香港、澳大利亚、西班牙、瑞典和瑞士的虚拟水吸收构成, 均为发达经济体。在 iPhone6 价值链驱动的虚拟水转移流中, 最大的 5 支虚拟水流动均源于中国台湾和中国大陆, 汇入 ROW、美国和日本, 说明中国为 iPhone6 价值链中最重要的虚拟水出口来源, 且虚拟水主要从发展中经济体汇入发达经济体。

为进一步研究 iPhone6 生产中的虚拟水转移, 图 6 至图 10 将 24 部类整合为 5 大类型, 分别描述其虚拟水流动关系, 以横向比较不同大类之间的转移特性差异。整合后 5 大类与细分部类的对应关系见上文表 1。

劳动装配大类中(图 6), 中国大陆是最主要的虚拟水出口者, 远超位列二三的印度和越南, 而主要的虚拟水进口者则是 ROW、美国和德国。该大类中最大的 3 支虚拟水净流出均源于中国大陆, 分别汇入 ROW、美国和德国。利润开发大类中(图 7), 美国是利润的归属地, 也是唯一的虚拟水供应者, 其流出的虚拟水主要汇入加拿大、ROW 和澳大利亚。配件与包装大类中(图 8), 共有 9 个经济体为虚拟水供应者, 其中中国大陆占虚拟水出口总量的 84.6%, 主要流向 ROW、美国及日本。至于分工最为复杂的 PCB 大类(图 9), 中国大陆、菲律宾和泰国是前 3 大虚拟水出口者, 而 ROW、新加坡和美国是前 3 大进口者。主要的虚拟水源汇流有中国大陆—ROW、中国大陆—日本、菲律宾—新加坡、马来西亚—新加坡、中国大陆—美国。值得注意的是, PCB 大类的价值链分工引发了虚拟水由水资源丰富的发展中国家菲律宾、马来西亚流向水资源匮乏的发达邻国新加坡, 这体现出东南亚国家之间紧密的区域间贸易、产业分工及资源再分配关系。其他部件大类(图 10)包含电池、相机组件等, 虚拟水流出最大的两个经济体中国台湾和中国大陆占大类总出口量 88.2%, 主要流向 ROW、

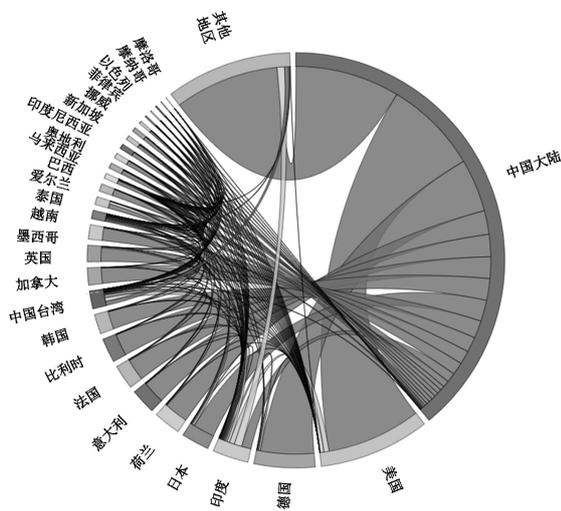


图 6 劳动装配部类虚拟水转移

Fig.6 Virtual water transfer in Labor and Assembly

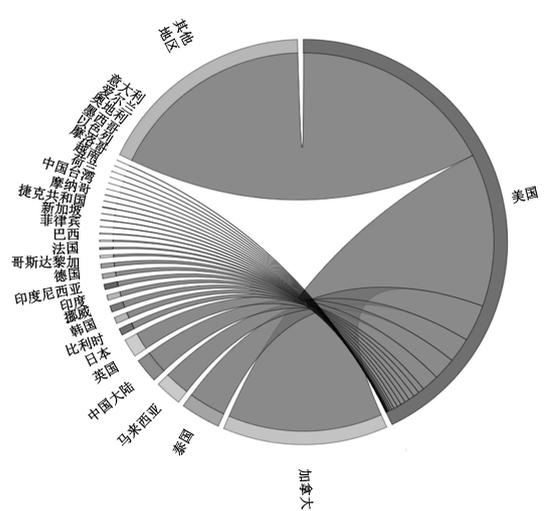


图 7 利润开发部类虚拟水转移

Fig.7 Virtual water transfer in Profit and Development

美国、日本和德国。特别地,经济相对发达的中国香港是被包含在 ROW 中的虚拟水吸收者,分别通过该大类向中国大陸和中国台湾吸收了 13.54 m<sup>3</sup>和 5.38 m<sup>3</sup>。

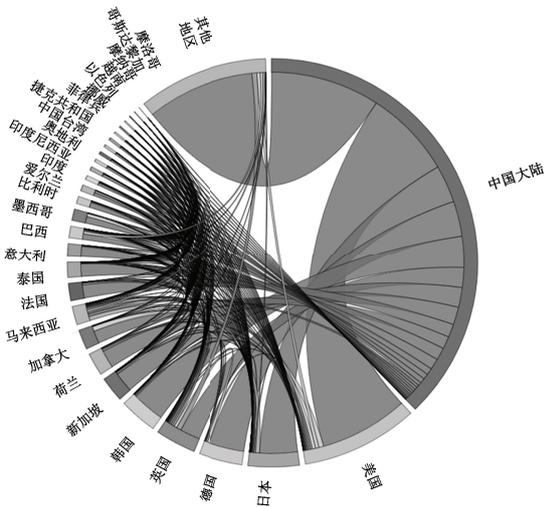


图 8 附件包装部类虚拟水转移  
Fig.8 Virtual water transfer in Accessories and Packaging

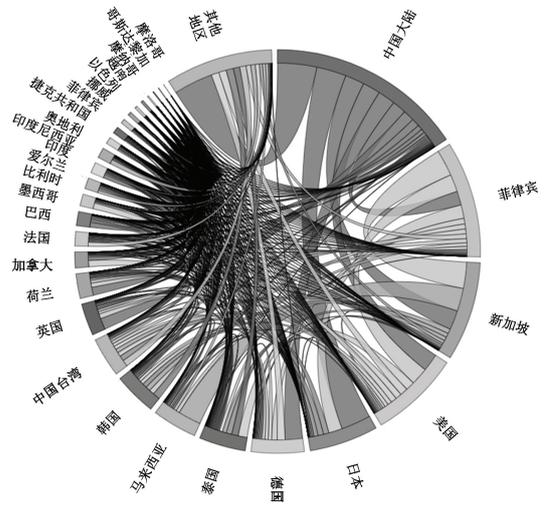


图 9 印刷电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 部类虚拟水转移  
Fig.9 Virtual water transfer in PCB

综合考虑各经济体虚拟水进出口, iPhone6 生产引发的虚拟水净流动总况见图 11。从净流量看,仅有的 5 个虚拟水净出口地均为发展中经济体(中国台湾、中国大陸、菲律宾、马来西亚、泰国),其中中国台湾(230.85 m<sup>3</sup>)和中国大陸(218.68 m<sup>3</sup>)的虚拟水赤字显著高于其他经济体。相对地,除 ROW 外最大的 5 个虚拟水净进口地均为发达经济体,每部 iPhone6 生产可为日本带来 65.43 m<sup>3</sup>的虚拟水净流入,德国(43.19 m<sup>3</sup>)次之,其次为加拿大、新加坡和美国。同时,ROW 所拥有的 166.69 m<sup>3</sup>虚拟水净流入说明, iPhone6 这种国际化产品的生产不仅对参与价值链分工的经济体的虚拟水再分配产生了显著作用,同时也对世界其他地区的水资源预算平衡造成了影响,评估其生产对环境的影响是一项需要站在全球视野高度考察的重要事务。总体而言, iPhone6 的全球价值链分工对发达经济体的水资源压力起到缓解作用,而对发展中经济体的用水压力则造成了更大的负担。

#### 4 结论与政策建议

为理解国际化新兴产品生产对生态要素转移的影响,本文选取 iPhone6 生产的水资源利用为案例,基于 GVC 理论、增加值分解框架与混合投入产出模型,运用 iPhone6 的供应商与价值拆解信息将其生产中各价值链环节的增加值归属在经济体间进行分配,并结合 Eora 数据库多区域投入产出表、各国年度取水量数据估算了每单位 iPhone6 生产所需要的虚拟水投入量,最后描述了其生产所引发的全球水资源再分配规律。在结果

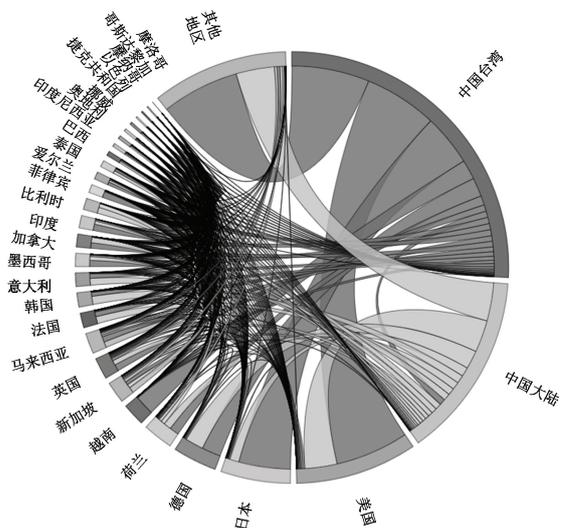


图 10 其他部类虚拟水转移  
Fig.10 Virtual water transfer in Other Enclosures

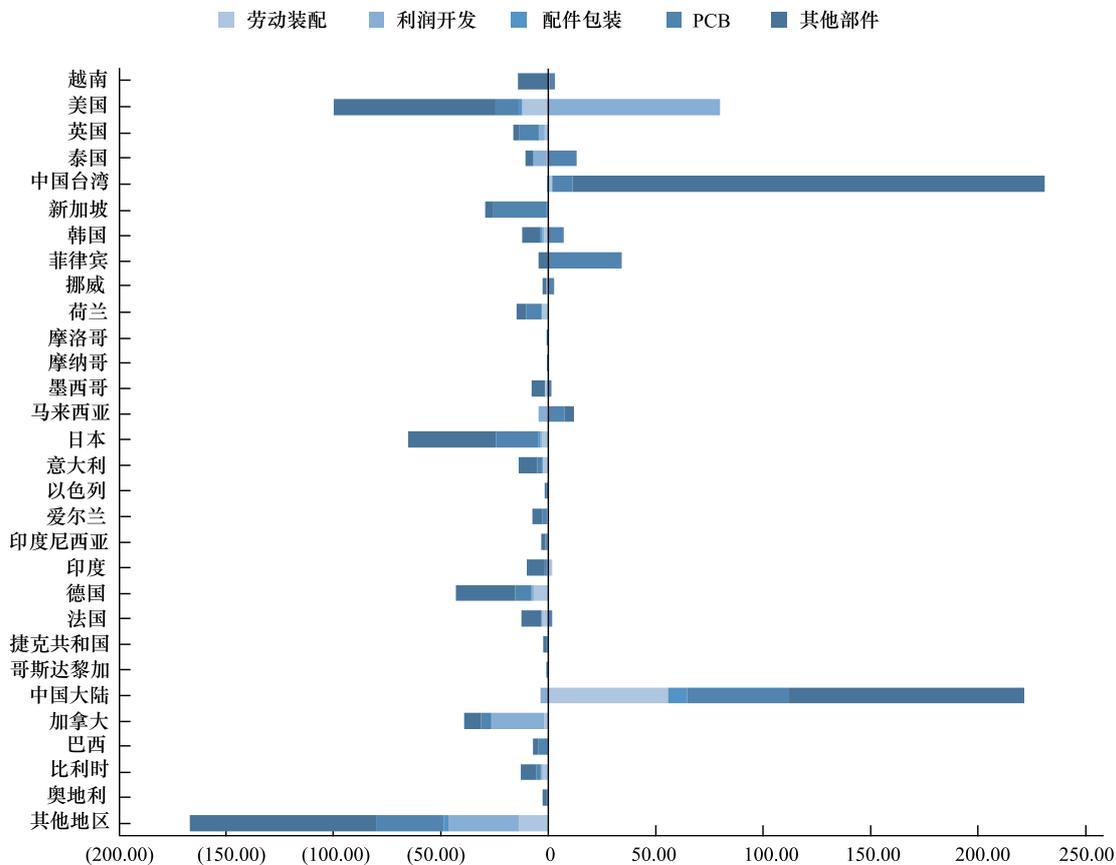
图 11 单位 iPhone6 生产引发的虚拟水净流动/m<sup>3</sup>

Fig.11 Regional net export of virtual water by aggregated category

描述与分析中,本文主要从零部件分类、地域分布两个维度考察了 iPhone6 的水资源利用与转移。本节将在此基础上,从经济部门、禀赋分工、转移关系方面进一步总结 iPhone6 产业布局的资源利用特征,并建议价值链上各国建立更平等互利的交换机制,以实现可持续发展的共同目标。

首先,iPhone6 的生产主要在水资源生产力更高的经济体和经济部门中进行,相比传统商品具有更强的资源节约特性。具体而言,本文计算了与 iPhone6 生产相关的 29 个经济体的 5 种经济部门中的平均用水强度 (Water Intensity, WI),并将其与 Eora 各经济部门 WI 的全球平均水平进行比较,如表 4 所示。可以看出,与 iPhone6 生产相关的 29 个经济体的 5 个经济部门 WI 水平均低于全球平均水平。由此表明:在相同部门中,29 个经济体的水资源生产力高于世界平均水平;而在 29 经济体中,5 个关联部门的水资源生产力也显著高于 26 全部门的平均水平。因此,iPhone6 的产业布局更倾向于水资源管理能力更强的经济体与经济部门。

第二,iPhone6 生产用水的地理分布极不均匀,折射出不同各经济体参与分工的不同禀赋特征。在 29 个关联经济体中,虚拟水体量的极差极大,为 0.11 m<sup>3</sup>至 3806.19 m<sup>3</sup>不等。在价值链分工竞争中,各经济体具有差距悬殊的水资源禀赋与经济发展水平,由此造成了截然不同的分工形式:一般而言,发展中经济体(如中国、泰国和菲律宾,2014 年度取水量均不低于 500 亿立方米,平均人均取水量 704 立方米)更倾向于利用水资源禀赋充实其国际竞争力,将大量水资源广泛投入到 iPhone6 多种部件的生产中;而发达经济体(如爱尔兰、加拿大、奥地利、比利时和英国,2014 年度取水量均不超过 500 亿立方米,平均人均取水量 467 立方米)则没有参与水资源密集型分工竞争的动机,更集中于特定部件类型(通常为水资源体现强度更低、增加值更高的类型)的专业化生产。因此,从 iPhone6 虚拟水体量的分布特征可知,各经济体基于不同的水资源条件、经济国情与地区状况,形成了差异化分工的局面。

表 4 iPhone6 生产关联经济体与全球各部门用水强度  
Table 4 Water intensity (WI) of related regions and world average

Eora 经济部门 Eora Economic Sectors	关联经济体的 WI WI of Related Regions	全球平均 WI WI of World Average
再进出口 Re-export & Re-import	1018.02	1361.96
农业 Agriculture	357.75	1307.76
电力、天然气与水 Electricity, Gas and Water	307.59	725.11
食品饮料 Food & Beverages	145.04	375.23
回收 Recycling	126.82	860.19
采掘业 Mining and Quarrying	93.26	263.64
纺织业 Textiles and Wearing Apparel	81.29	180.84
餐饮住宿 Hotels and Restaurants	61.19	103.17
木制品与造纸业 Wood and Paper	55.07	149.35
渔业 Fishing	43.93	68.92
其他制造业 Other Manufacturing	37.89	77.45
其他 Others	36.86	675.56
石油、化工和非金属矿产品 Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	33.44	98.87
金属制品 Metal Products	28.39	72.48
运输设备 Transport Equipment	25.70	64.35
零售业 Retail Trade	25.33	89.69
电气和机械 Electrical and Machinery	20.64	53.96
公共行政 Public Administration	18.47	59.94
个体经营 Private Households	17.54	242.23
运输 Transport	17.47	41.34
建筑 Construction	17.38	53.35
教育、卫生和其他服务 Education, Health and Other Services	17.18	60.03
维护和修理 Maintenance and Repair	12.22	52.24
金融中介和商业活动 Financial Intermediation and Business Activities	11.70	45.55
批发贸易 Wholesale Trade	11.31	122.30
邮电 Post and Telecommunications	10.75	45.64

第三, iPhone6 的生产对全球水资源再分配的影响主要体现在不同发展水平经济体之间虚拟水转移关系上。总体上看, iPhone6 各部类价值生产所体现的虚拟水投入量中, 有 26.17% 经由全球投入产出系统发生了跨区域转移, 隐含在区域间的大量虚拟水流动证实了产品内部的全球价值链分工对水资源再分配有重要影响。个体上看, iPhone6 生产中虚拟水转移依存度最高的 5 个经济体依次为法国、挪威、英国、荷兰和意大利, 均为发达国家, 依存度在 51.5% 至 61.5% 之间, 且除挪威虚拟水进出口基本持平以外, 其余 4 个经济体均有 11 m<sup>3</sup> 左右的虚拟水净流入。虚拟水转移依存度排名 6 至 8 位的是中国台湾、菲律宾和马来西亚, 均为发展中经济体, 依存度在 44.27% 至 48.01% 之间, 而这三个经济体却均有显著的虚拟水净流出。由此, 对于不同发展水平的经济体, 在 iPhone6 生产中的高虚拟水转移依存度会造成完全相反的影响: 对于发达经济体, 依存度越高, 越有利于它们向其他经济体攫取虚拟水剩余, 获得虚拟水净流入, 减轻本国的水资源使用压力; 而对于发展中经济体, 依存度的提高则会加速其水资源外流的趋势, 削弱其环境承载力, 对本国的可持续发展造成更大的压力。由于发展中经济体普遍存在生态治理压力, 上述不平等的水资源“掠夺”生产分工方式实质上十分脆弱, 如果没有有效的平衡措施, 长期会走向不可修复的失衡。

因此, 各国的水资源安全策略不应当是相互割裂的“用进口抵消出口”, 而应以生产共享的态度与贸易分工伙伴建立节水增效的共同目标。为保证高度依赖全球价值链分工的商品(如 iPhone6)的生产可持续性, 需要在发达经济体和发展中经济体之间建立良好的合作机制, 例如: 发达经济体可向发展中经济体提供经济与技术支持, 提高发展中经济体的水资源生产力、环境治理能力、科研开发能力等, 以维持发展中经济体水

资源的良性输出,从而获得稳定共赢的全球价值链分工体系。同时,作为水资源净流出者的发展中经济体,也需要从自身可持续发展角度理性衡量取水限度,避免水资源持续超用所引致的严重环境问题的发生。然而,本文所述的“虚拟水流动”尚未全部覆盖 iPhone6 生产所需水资源的完整生命周期。由于各供应商上游的价值链信息冗杂且数量庞大,本文假设各供应商的生产地为水资源初始来源,而未能核算核算每个生产地用水的初始来源。为进一步追踪隐含于产品生产中的虚拟水流动,未来研究可关注产品零件供应商的上游水资源初始来源的核算细化。

综上所述,以 iPhone6 为例的新兴产品生产往往需要各区域通过全球价值链框架进行分工合作,产品的不断增产将引起水资源等生态要素在全球范围内的再分配规模不断扩大。因此,新兴产业的生产布局应该在可持续的生态治理与各区域合作的基础上合理建立,并不断与时俱进,提高资源的综合生产力。随着决策者对水资源等生态要素在长期发展中重视程度的不断加深,本文的量化处理方式及案例分析有望在区域及全球层面为决策者提供行之有效的经验借鉴。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. National Water Footprint Accounts: The Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption. Value of Water Research Report Series No. 50. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE, 2011.
- [ 2 ] Porter M E. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance: With A New Introduction. New York: The Free Press, 1985.
- [ 3 ] Porter M. The Competitive Advantage of Nations. London: Macmillan Press, 1990.
- [ 4 ] Kogut B. Designing global strategies: comparative and competitive value-added chains. Sloan Management Review, 1989, 26(4): 15-28.
- [ 5 ] Wallerstein I. Historical Capitalism. London: Verso Books, 1983: 111.
- [ 6 ] Gereffi G, Korzeniewicz M. Commodity Chains and Global Capitalism. Westport, CT: Greenwood Press, 1994.
- [ 7 ] Krugman P. Increasing returns, imperfect competition and the positive theory of international trade. Handbook of International Economics, 1995, 3: 1243-1277.
- [ 8 ] United Nations Industrial Organization. Industrial Development Report 2002/2003: Competing Through Innovation and Learning. UNIDO, 2002. <https://www.unido.org/resources/publications/publications-type/sales-publications/industrial-development-report-2002-2003>
- [ 9 ] Sturgeon T J. How do we define value chains and production networks? IDS Bulletin, 2011, 32(3): 9-18.
- [ 10 ] 李昕, 徐滇庆. 中国外贸依存度和失衡度的重新估算——全球生产链中的增加值贸易. 中国社会科学, 2013, (1): 29-55.
- [ 11 ] Mattoo A, Wang Z, Wei S J. Trade in Value Added: Developing New Measures of Cross-Border Trade. Washington, DC: The World Bank, 2013.
- [ 12 ] Sanyal K K, Jones R W. The theory of trade in middle products. The American Economic Review, 1982, 72(1): 16-31.
- [ 13 ] Hummels D, Ishii J, Yi K M. The nature and growth of vertical specialization in world trade. Journal of International Economics, 2001, 54(1): 75-96.
- [ 14 ] Daudin G, Schweisguth D. Who Produces for Whom in the World Economy? No 2009-18, Documents de Travail de l'OFCE from Observatoire Francais des Conjonctures Economiques (OFCE). <https://EconPapers.repec.org/RePEc:fce:doctra:0918>. Accessed: 26-12-2018.
- [ 15 ] Koopman R, Powers W, Wang Z, Wei S J. Give Credit Where Credit is Due: Tracing Value Added in Global Production Chains. NBER Working Paper 16426. 2010. <http://www.nber.org/papers/w16426>
- [ 16 ] Koopman R, Wang Z, Wei S J. Tracing value-added and double counting in gross exports. American Economic Review, 2014, 104(2): 459-494.
- [ 17 ] 王直, 魏尚进, 祝坤福. 总贸易核算法: 官方贸易统计与全球价值链的度量. 中国社会科学, 2015, (9): 108-127.
- [ 18 ] Timmer M P, Erumban A A, Los B, Stehrer R, de Vries G. Slicing up global value chains. Journal of Economic Perspectives, 2014, 28(2): 99-118.
- [ 19 ] Wang Z, Wei S J, Yu X D, Zhu K F. Measures of Participation in Global Value Chains and Global Business Cycles. NBER Working Papers No. 23222. Cambridge, MA: The National Bureau of Economic Research, 2017.
- [ 20 ] Zhang Z K, Zhu K F, Hewings G J D. A multi-regional input-output analysis of the pollution haven hypothesis from the perspective of global production fragmentation. Energy Economics, 2017, 64: 13-23.
- [ 21 ] Guinee J B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(5): 311-313.
- [ 22 ] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, Hunkeler D, Norris G, Rydberg T, Schmidt W P, Suh S, Weidema B P, Pennington D W. Life cycle assessment: part I: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environment International, 2004, 30(5):

- 701-720.
- [23] Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S. Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1): 1-21.
- [24] Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. *The Review of Economics and Statistics*, 1970, 52(3): 262-271.
- [25] Costanza R. Embodied energy and economic valuation. *Science*, 1980, 210(4475): 1219-1224.
- [26] Turner K, Lenzen M, Wiedmann T, Barrett J. Examining the global environmental impact of regional consumption activities-Part 1: a technical note on combining input-output and ecological footprint analysis. *Ecological Economics*, 2007, 62(1): 37-44.
- [27] Peters G P, Andrew R, Lennox J. Constructing an environmentally-extended multi-regional input-output table using the GTAP database. *Economic Systems Research*, 2011, 23(2): 131-152.
- [28] Liu Z, Geng Y, Lindner S, Zhao H Y, Fujita T, Guan D B. Embodied energy use in China's industrial sectors. *Energy Policy*, 2012, 49: 751-758.
- [29] Bullard C W, Penner P S, Pilati D A. Net energy analysis: handbook for combining process and input-output analysis. *Resources and Energy*, 1978, 1(3): 267-313.
- [30] Suh S, Lenzen M, Treloar G J, Hondo H, Horvath A, Huppes G, Joliet O, Klann U, Krewitt W, Moriguchi Y, Munksgaard J, Norris G. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(3): 657-664.
- [31] Hendrickson C T, Lave L B, Matthews H S. *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach*. Washington, DC: Resources for the Future, 2006.
- [32] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [33] Moran D D, Wackernagel M C, Kitzes J A, Heumann B W, Phan D, Goldfinger S H. Trading spaces: calculating embodied ecological footprints in international trade using a Product Land Use Matrix (PLUM). *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1938-1951.
- [34] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible//Priorities for Water Resources Allocation and Management. London, United Kingdom: ODA, 1993.
- [35] Yu Y, Feng K S, Hubacek K. Tele-connecting local consumption to global land use. *Global Environmental Change*, 2013, 23(5): 1178-1186.
- [36] Odum H T. *Ecological and General Systems: An Introduction to Systems Ecology*, Revised Edition. Colorado: University Press of Colorado, 1994.
- [37] Chen G Q, Wu X F. Energy overview for globalized world economy: source, supply chain and sink. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 735-749.
- [38] Chen G Q, Chen Z M. Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: a 135-sector inventory and input-output embodiment. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(11): 3647-3732.
- [39] Su X, Zhang X. A detailed analysis of the embodied energy and carbon emissions of steel-construction residential buildings in China. *Energy and Buildings*, 2016, 119: 323-330.
- [40] Meng J, Liu J F, Guo S, Huang Y, Tao S. The impact of domestic and foreign trade on energy-related PM emissions in Beijing. *Applied Energy*, 2016, 184: 853-862.
- [41] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 35-48.
- [42] Zhao X, Chen B, Yang Z F. National water footprint in an input-output framework—a case study of China 2002. *Ecological Modelling*, 2009, 220(2): 245-253.
- [43] Ercin A E, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Sustainability of national consumption from a water resources perspective: the case study for France. *Ecological Economics*, 2013, 88: 133-147.
- [44] Duarte R, Sánchez-Chóliz J, Bielsa J. Water use in the Spanish economy: an input-output approach. *Ecological Economics*, 2002, 43(1): 71-85.
- [45] Wang Y, Xiao H L, Lu M F. Analysis of water consumption using a regional input-output model: model development and application to Zhangye City, Northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(10): 890-900.
- [46] Konar M, Dalin C, Hanasaki N, Rinaldo A, Rodriguez - Iturbe I. Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks. *Water Resources Research*, 2012, 48(7): W07509.
- [47] 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.
- [48] Yu Y, Hubacek K, Feng K, Guan D B. Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1140-1147.

- [49] 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.
- [50] Dalin C, Konar M, Hanasaki N, Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I. Evolution of the global virtual water trade network. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(16): 5989-5994.
- [51] Yang Z F, Mao X F, Zhao X, Chen B. Ecological network analysis on global virtual water trade. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(3): 1796-1803.
- [52] Chen Z M, Chen G Q. Virtual water accounting for the globalized world economy: national water footprint and international virtual water trade. *Ecological Indicators*, 2013, 28: 142-149.
- [53] Lenzen M, Moran D, Bhaduri A, Kanemoto K, Bekchanov M, Geschke A, Foran B. International trade of scarce water. *Ecological Economics*, 2013, 94: 78-85.
- [54] Zhang Z Y, Shi M J, Yang H, Chapagain A. An input-output analysis of trends in virtual water trade and the impact on water resources and uses in China. *Economic Systems Research*, 2011, 23(4): 431-446.
- [55] 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.
- [56] Wang Z Y, Huang K, Yang S S, Yu Y J. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42: 172-179.
- [57] Chen G Q, Li J S. Virtual water assessment for Macao, China: highlighting the role of external trade. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 93: 308-317.
- [58] Yang H, Wang L, Abbaspour K C, Zehnder A J B. Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(3): 443-454.
- [59] Miller S A, Horvath A, Monteiro P J M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 69-76.
- [60] Number of Smartphones Sold to end Users Worldwide from 2007 to 2020 (in Million Units). (2018-11-27) Retrieved November 27, 2018, from <https://www.statista.com/statistics/263437/global-smartphone-sales-to-end-users-since-2007/>
- [61] Global Market Share Held by Leading Smartphone Vendors from 4th Quarter 2009 to 3rd Quarter 2019. Retrieved November 27, 2018, from <https://www.statista.com/statistics/271496/global-market-share-held-by-smartphone-vendors-since-4th-quarter-2009/>
- [62] Apple iPhone Unit Production Volume by Model from 2013 to 2017 (in Millions). Retrieved November 27, 2018, from <https://www.statista.com/statistics/519658/iphone-unit-production-by-model/>
- [63] IHS Markit. Teardown-Apple iPhone 6 (A1549). (2014-11-06). <https://technology.ihs.com/510877/>.
- [64] 苹果公司官网 <https://www.apple.com/supplier-responsibility/pdf/Apple-Supplier-List.pdf>
- [65] Chen Z M, Chen G Q. Demand-driven energy requirement of world economy 2007: a multi-region input-output network simulation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2013, 18(7): 1757-1774.
- [66] Chen Z M, Chen G Q. An overview of energy consumption of the globalized world economy. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 5920-5928.
- [67] Zhang B, Qiao H, Chen B. Embodied energy uses by China's four municipalities: a study based on multi-regional input-output model. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 138-149.
- [68] Lenzen M, Kanemoto K, Moran D, Geschke A. Mapping the structure of the world economy. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8374-8381.
- [69] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Geschke A. Building eora: a global multi-region input-output database at high country and sector resolution. *Economic Systems Research*, 2013, 25(1): 20-49.
- [70] World Bank. Annual Freshwater Withdrawals, Total (Billion Cubic Meters). [https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.K3?end=2016&start=2016&view=bar&year\\_high\\_desc=true](https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.K3?end=2016&start=2016&view=bar&year_high_desc=true). Accessed: 10-3-2018.