

人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响

龙爱华^{1,2}, 徐中民¹, 王新华¹, 尚海洋³

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000;

2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044;

3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所应用水文生态研究室, 甘肃兰州 730000)

摘要: 21 世纪水资源短缺问题将成为全球资源环境的首要问题, 由于水资源的诸多问题与人类活动密不可分, 因此辨明人类活动各因素对水资源影响作用的大小, 并依此找寻发展的对策是当前水资源可持续利用研究的一个核心问题。在计算 2000 年中国的水足迹的基础上, 应用 STIRPAT 模型分析了中国水足迹的影响因素, 分解了人口、富裕和技术等对中国水资源的环境影响。结果表明: 2000 年, 中国水资源的消费足迹为 7678.45 亿 m^3 , 人均 609.3 m^3/a 。人口数量是当前我国水足迹的一个主要驱动因子, 富裕程度的提高会增加人类对水资源的总消费, 气候因素和区位条件对水足迹具有显著影响, 而提高土地生产能力对减少水足迹具有重要作用。在观测数据范围内, 分析结果并不支持环境 Kuznets 曲线存在的论断。最后分析讨论了水足迹研究需要进一步完善的问题以及 STIRPAT 模型实证分析的政策意义。

关键词: 水足迹; 人口; 富裕及技术; 环境影响; STIRPAT 模型; 环境 Kuznets 曲线

文章编号: 1000-0933(2006)10-3358-08 **中图分类号:** Q14 **文献标识码:** A

Impacts of population, affluence and technology on water footprint in China

LONG Ai-Hua^{1,2}, XU Zhong-Min¹, WANG Xin-Hua¹, SHANG Hai-Yang³ (1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Water Department, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. Laboratory of Watershed Hydrology and Ecology, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3358 ~ 3365.

Abstract: Growing evidence demonstrated that humans have dramatically altered the global environment. Identifying the specific forces driving environmental impacts is a hot topic in the field of sustainable development. One key limitation to a precise understanding of anthropogenic impacts is the absence of a set of refined analytic tools.

The water footprint index has been used as a comprehensive impact measure of water use in relation to consumption of people, which indirectly reflect anthropogenic pressure on the environment. Our empirical analysis show that the China's water footprint of China is 7678.45 $\times 10^8$ in 2000, which is 609.3 $\text{m}^3/(\text{cap} \cdot \text{a})$. The measure of water footprint allows comparison across types of impacts by estimating the quantity of water that would be required to support the material consumption of a nation or country. The difference between provinces (cities) is large: Qinghai province who has an average water footprint of 999 $\text{m}^3/(\text{cap} \cdot \text{a})$ is the largest one, while Guangxi province has the lowest average water footprint, which is 477 $\text{m}^3/(\text{cap} \cdot \text{a})$.

With a view to dismantling the anthropogenic driving forces of water footprint, the modified IPAT called STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population (P), Affluence (A) and Technology (T))-has been employed as a common analytic framework. Since T represents all factors that influence impacts other than population and affluence, the additional factors can be incorporated in the STIRPAT by disaggregating T in the original IPAT identity. Our analyses show that population is a major driver of water footprint, and it has a proportional effect (approximately unitary elasticity) on water footprint, and affluence monotonically

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (40235053); 国家自然科学基金资助项目 (40201019); 多地区和部门的气候变化影响和适应性评价 (AS25) 资助项目

收稿日期: 2005-07-09; **修订日期:** 2006-03-17

作者简介: 龙爱华 (1976 ~), 男, 湖南安仁人, 博士, 主要从事生态经济与水资源管理研究. E-mail: ahleng@lzb.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40235053, 40201019) and AS25 Project of AIACC

Received date: 2005-07-09; **Accepted date:** 2005-12-28

Biography: LONG Ai-Hua, Ph. D., mainly engaged in ecological economics and water resource management. E-mail: ahleng@lzb.ac.cn

increased the water footprint with a relative less degree than population. Natural location and climatic conditions appeared to affect the water footprint. Another important finding in the empirical study is that there is no evidence of an environmental Kuznets curve for water footprint within the range of calculated data. Some potential improvements in some further researches and suggestions to alleviate the water pressure were put forward in the last section.

Key words: water footprint; population; affluence and technology; environmental impact; STIRPAT model; environmental Kuznets curve

人类能真正利用的淡水仅占地球总水量的 0.26%,水资源短缺问题已成为全球资源环境的首要问题。随着世界人口增长和经济活动的扩大,人类对淡水资源的需求持续增长。当前,全球有 11 亿人口得不到安全的饮用水,24 亿人缺乏可靠的卫生用水,全球每年至少有 1500 万人死于食用污水而引起的疾病,与水污染有关的疾病每 8s 就夺去一个孩子的生命,水污染已使全世界 20%的淡水鱼种濒临灭绝;预计到 2025 年,全世界 40 多个国家和地区的 30 亿人口缺水,缺水难民将多达 1 亿人^[1]。资源性缺水 and 水质性缺水已成为全球的普遍问题。由于水资源的诸多问题与人类活动密不可分,因此解决水资源问题的重要工作之一就是要真实地衡量人类对水资源的占用状况。

水足迹指标是一个衡量人类对水资源系统真实占有量的简单而综合指标^[2]。传统的水资源利用指标数据通常仅呈现了居民家庭生活用水量、农业部门用水量和工业部门用水量等 3 个方面的水利用量信息,只记录了人类水资源利用的实体水数量或蓝水数量(蓝水一般指赋存于江、河、湖泊、含水层中的地表水与地下水数量,即通常所说的水资源^[3]),而忽略了通过作物等利用的“隐式”水量或绿水数量(绿水指赋存于土壤非饱和和含水层中、仅可由植物以蒸散发形式利用的土壤水^[3])。事实上,这部分“隐式”水量对人类社会极其重要。例如,全球谷类生产中,66%的作物需水来自有效降水,来自灌溉的作物需水量只占 34%。水足迹从消费角度衡量人类对水资源系统的真实占用,建立了水资源利用与人类消费模式的联系,同时由于水足迹概念将水问题拓展到了社会经济领域^[4,5],因而是当前测度人类活动对水资源系统环境影响的最好指标。

那么,人类活动中哪些因素是影响水资源的驱动因素?现有研究表明主要影响环境的人文因素有:人口、经济活动、技术、政治和经济制度、态度和信仰^[6,7]。为理解和解决面对的复杂环境问题,需要了解每一种人文驱动因素对环境影响作用的大小。从当前的研究来看,影响水足迹大小的主要因素有:受经济收入影响的物质消费量;受消费习惯、宗教信仰等影响的消费模式;受气候、技术水平和生产实践影响的水土资源生产能力^[4]。本文从中国 2000 年的水足迹衡量入手,以 2000 年中国 31 个省区的水足迹为观测指标,引入用于测算人口、富裕和技术条件变化对环境影响的随机回归模型——STIRPAT 模型^[8],分解了人口、富裕及技术等人文因素对水足迹的影响程度,并探讨了各省的水资源技术效率问题。

1 2000 年中国水足迹

1.1 计算路线及数据来源

当前,国际上计算水足迹的方法主要是自上而下法和自下而上法。自下而上法将所有消费的商品、服务与它们各自的虚拟水含量相乘加和得到,采用该方法需要注意的是商品的虚拟水含量会随地域和生产条件函数变化而变化。采用自上而下法时,区域水足迹等于总的区内水资源利用量加上区内虚拟水的净流入量。

水足迹核算的关键是产品虚拟水含量的衡量,包括农作物产品及其加工品、动物及畜产品、工业品的虚拟水含量的计算,具体计算方法见文献^[2,5]。理论上,各省区水足迹计算应包含因产品贸易而带来的虚拟水流动,但由于我国目前还缺乏省际间商品贸易记录,因此本文采用自下而上法计算各省的水足迹,即假设各省消费的产品均由本省生产,全国水足迹为各省水足迹之和。

FAO 推荐并改进后的 Penman-Monteith 方程当前计算作物蒸散量方面最成熟、可靠的方法之一。实例核算

中,农产品和动物产品的虚拟水含量计算采用上述方程并结合有关统计资料进行,其中气象数据为各省各气象观测站点的多年平均数据。由于工业产品虚拟水含量计算十分复杂,因此实例分析中采用当年工业耗水量作为一种粗略的替代;居民实体水消费(即城镇生活和农村生活服务)也采用耗水量数据;数据均取自各省(区、市)2000年水资源公报。

1.2 2000 年中国的水足迹

2000年,中国水资源的消费足迹为 7678.45 亿 m^3 ,人均 609.3 m^3 (表 1)。水资源足迹的前 10 位分别是河南、山东、江苏、广东、四川、河北、湖南、安徽、湖北和辽宁;水足迹最小的是西藏,仅 16.99 亿 m^3 。其中北方省份消费了 3558.85 亿 m^3 ,占全国水足迹总量的 46.81%,高于其人口比例(42.65%),与 1999 年中国的生态足迹分布类似^[9]。人均水足迹的前 10 位分别是青海、内蒙古、天津、黑龙江、新疆、宁夏、辽宁、甘肃、上海和山西,人均最低的是广西;总体上表现为北方省(区、市)高于南方省(区、市);超过全国平均量的 14 个省份中(表 1)有 10 个在北方,这可能与北方气候干旱、蒸腾蒸发需求较高有关;河北、河南、山东 3 个北方省份的人均低于全国平均水平,可能与它们是我国重要的粮食生产基地、粮食单产较高有密切关系。

表 1 2000 年中国水资源足迹*
Table 1 Water footprint(WF) of China in 2000

省市 Provinces	总足迹 Gross WF (10^8m^3)	人均水足迹 WF Per capita year ($\text{m}^3/(\text{person} \cdot \text{a})$)	水足迹强度 Intensity of WF ($\text{m}^3/\text{万元}$) ($\text{m}^3/10^4 \text{RMB}$)	省市 Province	总足迹 Gross WF (10^8m^3)	人均水足迹 WF Per capita year ($\text{m}^3/(\text{person} \cdot \text{a})$)	水足迹强度 Intensity of WF ($\text{m}^3/\text{万元}$) ($\text{m}^3/10^4 \text{RMB}$)
北京 Beijing	96.07	695	310	湖南 Hunan	373.59	580	1029
天津 Tianjin	79.84	798	443	福建 Fujian	211.36	609	525
河北 Hebei	395.19	586	765	广东 Guangdong	439.76	575	446
山西 Shanxi	257.97	716	1393	广西 Guangxi	214.02	477	1104
内蒙古 Inner Mongolia	231.28	973	1658	海南 Hainan	44.83	570	826
山东 Shandong	527.77	581	608	重庆 Chongqing	166.86	540	1047
河南 Henan	549.33	564	1037	四川 Sichuan	421.84	506	1059
辽宁 Liaoning	320.59	756	674	贵州 Guizhou	187.08	531	1994
吉林 Jilin	161.84	593	866	云南 Yunnan	259.94	606	1307
黑龙江 Heilongjiang	291.20	789	922	西藏 Xizang	16.99	648	1422
上海 Shanghai	123.18	736	213	陕西 Shaanxi	210.54	584	1284
江苏 Jiangsu	467.08	628	533	甘肃 Gansu	191.20	746	1944
浙江 Zhejiang	251.33	537	399	青海 Qinghai	51.75	999	1964
安徽 Anhui	365.35	610	1254	宁夏 Ningxia	43.50	774	1599
江西 Jiangxi	222.99	539	1110	新疆 Xinjiang	150.77	783	1049
湖北 Hubei	353.40	586	816	全国 China	7678.45	609	807

*受数据限制,未包括香港、澳门和台湾地区 As limited to data available, the calculation didn't include the districts of China: Hong Kong, Macao and Taiwan

据《2000 年中国水资源公报》,2000 年全国蓝水利用量(即统计用水量)为 5470.57 亿 m^3 ,扣除 1997~2001 年的平均净进口虚拟水量 100 亿 m^3 ,2000 年全国绿水利用量为 2107.88 亿 m^3 ,是当年农业用水量 3671.67 亿 m^3 的 0.5741 倍,是农业耗水(当年农业耗水率为 63%)的 0.9123 倍。实际上,由于蓝水利用中有很大部分属于灌溉损失,因此我国的绿水利用比例会比上述结果还要大,可见绿水利用对我国经济发展极其重要。

1.3 2000 年中国水足迹强度分析

为反映各省区的水资源利用效率,用 2000 年各省(区市)总人口的水足迹除以其国内生产总值(GDP),得

耗水量指在输水、用水过程中,以各种形式消耗掉,而不能回归到地表水体或地下水含水层的水量;这里同时暗含着各省当年的工业耗水全部为本省消费

本文的北方省份包括:黑龙江、吉林、辽宁、内蒙、北京、天津、山西、河北、河南、山东、陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆共 15 省(市、区)

绿水不能直接被工业生产和居民生活利用

到各省(区市)万元 GDP 水足迹——水足迹强度指标(表 1)。水足迹强度越大,表明单位水消费的 GDP 产出率越低。结果表明(表 1),2000 年中国的水足迹强度为 $807\text{m}^3/\text{万元}$,但各省(区市)的水足迹强度差别很大,其中贵州最高,青海、内蒙古、甘肃、宁夏、西藏 5 个省份的水足迹强度超过 $1400\text{m}^3/\text{万元}$ 。山西是我国重要的煤能源基地,火力发电等高耗水工业比重较大(2000 年以火电为主、同时包括蒸汽、热水的生产与供应业的工业增加值仅次于黑色金属冶炼及压延加工业、化学原料及化学制品制造业;规模以上工业万元产值用水量不含火电为 57m^3 、含火电为 86m^3),导致了较高的水足迹强度($1393\text{m}^3/\text{万元}$)。强度最低依次为上海、北京、浙江、天津、广东、福建、江苏,其中上海为 $213\text{m}^3/\text{万元}$;需要说明的是,受资料 and 当前研究水平的限制,本次核算的水足迹中未考虑水污染的水足迹,但显然这是下一步需要考虑的问题。总体而言,水足迹强度差异基本反映了各省(区、市)在水资源利用效益方面的明显差异,较好地表明了水足迹强度与自然条件状况、土地生产能力和区域经济发展水平密切相关,具体表现为:沿海低于内地,南方低于北方,东部低于西部,西北地区最高;经济发达省(市)低于欠发达省(区),城市化率高省份低于城市化率低的省份。

影响水资源足迹大小的因素很多,Chapagain 和 Hoekstra 的有关研究发现人类活动对水足迹的影响十分复杂,例如人均水足迹与人均收入之间呈现反向关系,即人均水足迹随经济发展逐渐减小;人均水足迹与气候、农作物产量、食物消费量及饮食模式、进口与国产比率等等诸多因素间的关系并不直接明显。可见,影响水足迹大小的各因素之间并不存在简单的单调关系,尤其与人类活动交织在一起后更加复杂难解。因此,为理解和解决面对的复杂水问题,十分重要的一步就是需要了解每一种人文驱动因素对水资源系统影响的大小,并依此找寻可能的水资源利用对策。

2 2000 年中国水足迹的 STIRPAT 模型分析

2.1 STIRPAT 模型简介

经典的 IPAT 等式($I = PAT$)指定环境影响(I)为人口(P)、富裕(A ,人均消费或生产)和技术(T ,单位消费或生产的环境影响)的乘积,建立了人文因素与环境影响之间的账户恒等式^[7,8,10,11]。尽管 IPAT 等式概念上也只是一个简单框架,但由于其简单性(融入了关键的人文因素,如人口、富裕和技术)、系统性(指定了环境影响的人文驱动因素与环境影响之间的数学关系式)和健全性(捕获了自然、社会科学的基本规律),自提出以来,以其为基础的应用非常广泛^[12]。由于经典的 IPAT 等式将人文驱动因素和环境影响之间简单地处理为单调关系(即驱动力与环境影响之间只存在同比例的变化),因而经典的 IPAT 等式并不十分适合衡量人文因素对环境的影响,并引起了较多的争论。为此,York 和 Dietz,Rosa 等将 IPAT 等式改造成随机形式的模型,即人口、富裕和技术的随机回归影响模型,简称为 STIRPAT 模型,其形式通常如下^[8]:

$$I = aP^bA^cT^de \quad (1)$$

式中, a 为标度该模型的常数项, b, c, d 是 P, A 和 T 的指数项, e 是误差项。显然如果假设 $a = b = c = d = e = 1$,STIRPAT 模型就还原成 IPAT 等式。由于当前缺乏统一的技术测量指标,实际应用中一般将 T 归于残差项,而不是单独估计。为测试人文因素对环境 I 的影响,通常将方程(1)转化为对数形式^[8]:

$$\ln(I) = a + b\ln(P) + c\ln(A) + e \quad (2)$$

式中, a, e 为方程(1)中 a 和 e 的对数。以对数的形式,驱动力的系数(b 和 c)表示如果其它的影响因素维持不变时,驱动力影响因素(P 或 A)变化 1%引起的环境影响变化百分比,这与经济学中的弹性分析方法类似。在实际应用中,可根据需要在方程(1)或方程(2)增加社会或其他控制因素来分析他们对环境的影响,但是增加的变量需要与方程(1)指定的乘法形式具有概念上的一致性。例如,如果综合的 T 中有一些可以测量,就可将等式(1)中的 T 分解成 $T_1, T_2, \dots, T_n$,由此等式(1)可相应扩展为:

$$I = aP^bA^cT_1^fT_2^f \dots T_n^f e \quad (3)$$

同理,可对(3)式进行类似等式(2)的变换。

从方程(1)可知,方程(2)或(3)的残差项的逆对数是维持基本的驱动力变量(P, A 或 T)不变时的环境影响。由于残差项包含了除 P, A 和能观测到的技术以外的其它影响因素,如经济结构、贸易能力、管理制度、消

费结构改善等广义的技术因素,因此残差项的逆对数可解释成技术的环境影响乘子^[8],本文将之理解为技术水效率,只是需要注意的是技术的环境影响乘子大表明技术水效率差,反之亦反。

2.2 指标选取和数据处理

基于以上考虑,选取人口、人均真实 GDP(采用 2000 年各省市的名义 GDP 除 1990 年以来的消费价格指数的变化得到的真实 GDP 数量)、单位面积粮食蒸腾需求量(粮食、作物是虚拟水消耗的最大类别^[2],因此用单位面积粮食需水来检验气候因素对水足迹的影响)、单方水产粮量 T_1 (用该指标表征农业实践和气候因素的综合影响)、单位粮食产量土地需求 T_2 (表征土地生产能力)作为水足迹的影响因素,构成 STIRPAT 模型(1)。

由于 STIRPAT 模型是随机形式,如果理论上合适,可在(2)式上增加人文驱动因素(如代表富裕的人均 GDP)对数形式的二项式或多项式来验证是否存在环境 Kuznets 曲线假说^[8]。为此,在 STIRPAT 模型(1)自变量中增加了人均真实 GDP 的二次平方项,构成 STIRPAT 模型(2)。为避免引入人均真实 GDP 的二次项与人均真实 GDP 的共线性问题,对人均真实 GDP 的二次项进行标准化处理。人均真实 GDP 二次项的具体处理过程为用人均真实 GDP 的对数减去人均真实 GDP 对数的平均值,然后平方来减少与人均真实 GDP 的共线性。

具体分析中,安徽、四川和贵州 3 省缺乏 1990 年来的消费者价格指数的变化数据,因此在分析中剔除了这 3 个省份。同时,由于单方水产粮与其他因素存在共线性问题,在分析中进一步剔除了该指标。

2.3 模型结果和分析

对上述模型采用最小二乘进行参数估计,得到水足迹与各影响因素间的 STIRPAT 模型见表 2。模型(1)拟合优度 98.3%,说明所选择的指标能解释的指标能解释中国 2000 年各省(市)水足迹的 98.3%,各系数均在 0.05 水平上显著不为 0,方程拟合非常好。人口数量对以水足迹为指标的水系统影响成正比,系数为 0.927,说明在其他条件相同的情况下,人口数量增加 1%导致总的水足迹增加 0.927%;从模型(2)看,人口数量对环境的影响弹性也接近 1,说明人口数量与对水系统的影响间存在同比例的关系,因此控制人口增长对减轻我国自然资源系统压力十分关键。人均 GDP 的回归系数为 0.103,并没有显示出水足迹与人均 GDP 有反向关系,而是随人均 GDP 提高 1%而增加 0.103%;这可能与我国当前所处的经济发展阶段有关。单位面积粮食作物蒸腾需求与水足迹的系数为 0.458,表明我国水资源利用对气候条件的依赖度很大,农业系统的气候脆弱度较高,抗干扰能力较弱,因此增强农业部门对气候的适应能力对我国水资源的可持续利用十分重要;另外该系数也解释了我国北方省份(市)水足迹比南方省份(市)高的原因,即北方单位面积粮食作物的蒸腾需求较高,从而使单位粮食作物的虚拟水含量高于南方。单位粮食产量土地需求系数 0.382 表明,单位面积粮食产量提高 1%,将使水足迹降低 0.382%,提高单位面积土地粮食产量是适应我国未来水资源需求增加和减轻水资源系统压力的重要手段。

表 2 人口、富裕及技术水平等环境作用因子对水足迹影响估计结果

Table 2 The parametric model of anthropogenic impacts on water footprint and estimated results

	模型(1) Model (1)	模型(2) Model (2)
常数项 Constant	5.771(8.253)	5.755(8.009)
人口 Population	0.927(39.902)	0.925(35.092)
人均 GDP Per capita GDP	0.103(2.144)	0.110(1.872 [*])
人均 GDP 平方项 Quadratic of per capita GDP		-0.37(-0.199)
单位面积粮食作物蒸腾需求 Crop transpiration demand per area	0.557(3.376)	0.556(3.296)
单位粮食产量土地需求 Land demand per food yield	0.309(3.361)	0.307(3.255)
R^2	0.983	0.985
F 统计量 F statistics	397.668	304.857
Durbin-Watson 统计量 Durbin-Watson statistics	1.902	1.891
样本量 Sample quantities	28	28

*表示在 0.1 水平显著;其他均在 0.05 水平显著;括号内是 t 检验数 *Represents the sig. level at 0.1, the other are all remarkable at 0.05; the numbers in the bracket are the values of t test

模型(2)在模型(1)的基础上分别增加了人均真实 GDP 的二次项,尽管回归系数为负(-0.37),但系数的

t 检验值显示该系数显著为 0,因而不能说明存在环境 Kuznets 曲线,表明经济发展并不是解决我国水问题的根本出路。事实上,一些有关环境 Kuznets 曲线的实证研究中也并没有出现预期的所谓环境压力转折点,相反,环境压力随经济同步增长^[13,14]。

在研究过程中,作者构建了多种表征消费结构差异的指标,试图分析水足迹与消费结构之间的关系,但分析结果并不支持二者之间具有直接关系。例如,由于粮食、肉类是全部虚拟水消费中的主要部分,也能较好地反映消费模式和消费数量的差异,因此用粮食与肉类消费虚拟水占全部虚拟水消费数量比例分析消费结构对水足迹的影响。尽管结果显示它们之间呈显著的负相关(相关系数 - 0.412,0.05 水平上显著),但在 STIRPAT 模型中系数显著为 0,因此有关消费结构与水系统压力之间的关系还需进一步探讨。

表 3 是基于 STIRPAT 模型(1)计算的各省残差项的逆对数。其中,海南、陕西、河北、吉林、广西、北京、宁夏、河南、天津、重庆、云南、浙江、湖北、山西的环境影响乘子低于当年全国的平均值(1.005),因此这些省(区市)的技术水效率好于平均状况,而其它残差项的逆对数大于 1.005 的省份则差于平均状况。在低于平均残差值的 14 个省(区、市)中,北方省(区、市)占 8 个;其中,水资源极度紧缺(或紧缺)的陕西、河北、北京、宁夏、河南、天津、山西等省(区市)^[15],近年来在水资源高效利用的制度改革和实用技术等方面做了大量工作,用水效率明显提高。例如,我国第一个节水型社会建设试点甘肃省张掖市从 2000 年开始,从经济社会发展和产业结构调整规划着手,通过明晰各级水权、引入市场机制、推行水票制度、建立用水协会、推进公众参与、强化制度改革等水务一体化改革,单方水 GDP 已从 2000 年的 2.81 元/m³ 提高到 2003 年的 3.72 元/m³。对其他 14 个残差项的逆对数大于 1.005 的省份而言,在不改变人口、富裕和土地生产能力的情况下,通过调整经济结构、改进管理制度、转变消费结构和加强公众教育等手段改善制度水效率的空间还较大;其中,青海、内蒙古、新疆、湖南、黑龙江、甘肃等省(区市)的经济结构调整、水管理制度改革对水资源可持续利用将具有重要作用。仅从水资源利用方面考虑,文献^[5]分析表明,调整经济结构(采用虚拟水贸易改变用水结构),甘肃省水资源配置效率将大大提高;文献^[16]研究表明,消费结构的不断多样化可降低水资源系统压力、提高水资源效率。

表 3 模型(1)中样本省份(28)及残差项的逆对数

Table 3 Provinces in the Sample and the antilog of residuals for model(1)					
省份和直辖市 Province and City	逆对数 Anti-logarithm	省份和直辖市 Province and City	逆对数 Anti-logarithm	省份和直辖市 Province and City	逆对数 Anti-logarithm
北京 Beijing	0.907	辽宁 Liaoning	1.036	湖北 Hubei	1.003
天津 Tianjin	0.945	吉林 Jilin	0.905	湖南 Hunan	1.148
河北 Hebei	0.868	黑龙江 Heilongjiang	1.111	福建 Fujian	1.035
山西 Shanxi	1.004	上海 Shanghai	1.024	广东 Guangdong	1.051
内蒙古 Inner Mongolia	1.192	江苏 Jiangsu	1.097	广西 Guangxi	0.899
山东 Shandong	1.007	浙江 Zhejiang	0.962	海南 Hainan	0.818
河南 Henan	0.942	江西 Jiangxi	1.051	重庆 Chongqing	0.958
云南 Yunnan	0.978	西藏 Xizang	1.037	陕西 Shaanxi	0.837
甘肃 Gansu	1.048	青海 Qinghai	1.219	宁夏 Ningxia	0.931
新疆 Xinjiang	1.126				

3 结论与展望

3.1 结论

作为一个综合反映水资源利用信息和测度人类对水资源系统压力的简化指标,水足迹方法从消费角度衡量人类对水资源系统的真实占用,建立了水资源利用与人类消费模式的联系,并将水问题拓展到了社会经济领域,因此水足迹指标是当前衡量人类活动对水资源系统环境影响的最好指标,可检验人类对水资源系统的综合环境影响。本文在计算 2000 年中国的水足迹的基础上,应用 STIRPAT 模型分析了中国水足迹的影响因

素,分解了人类活动对中国水系统的环境影响。

(1) 2000 年,中国水资源的消费足迹为 7678.45 亿 m^3 ,其中绿水利用量为 2107.88 亿 m^3 ,分别是农业用水量、农业耗水量的 0.574 和 0.912 倍,绿水利用在我国农业生产中发挥了极其重要的作用。2000 年,全国人均水足迹 609.3 m^3/a ,占全国人口的 42.65 % 的北方省份消费了全国水足迹的 46.81 %,人均水足迹高于南方,其中青海省最大(999 m^3/a),广西最小(477 m^3/a)。

(2) STIRPAT 模型实证分析表明,影响中国水资源压力的主要人文因素是人口、富裕、土地生产能力和对气候的适应能力。人口数量是当前水足迹的一个主要驱动因子,其对水足迹的影响几乎同比变化(人口数量对水足迹的弹性系数接近 1)。富裕程度的提高会增加人类对水资源的消费;气候因素和区位条件对水足迹具有显著影响,我国粮食生产对气候的适应能力还较小,脆弱性问题比较突出;2000 年,我国土地生产能力的水足迹弹性约为 0.31,因此提高单位面积土地生产能力是降低我国水资源系统压力的有效手段之一。

(3) 本文研究结果并不支持存在环境 Kuznets 曲线的论断。其中可能与本研究采用的是截面数据有关,且样本只有 28 个,数据变化范围不大,不足以检测出所选人文因素对水足迹的影响。另一个原因可能与本研究的水足迹计算是从消费角度测算的水利用状况有关。按照 Rothman 的推断,区域富裕程度的增加主要是提高了该区域通过贸易转嫁其环境影响的能力,即环境影响的外部化,因此从消费角度分析,环境的 Kuznets 并不存在^[17]。限于资料,本研究未考虑蕴涵在省(区)际贸易中的水贸易问题,而在当前的经济生产格局下,东部、南方省份在技术方面的相对先进性进一步放大了它们将其环境问题外部化的能力。因此,本文的分析还不能验证 Rothman 的推断。

3.2 展望

从本文构建的 STIRPAT 模型及实证分析看,减轻水资源系统的压力可以从控制人口、改变片面追求高的经济增长速度、提高土地生产能力、培育对气候变化的适应能力、调整经济结构、改善水管理制度及转变消费模式等入手。在现行体制下,需要实现各级政府的政绩考评体系由数量增长为中心转向以质量提高为中心,提高水资源利用技术效率;既关注灌溉农业对我国粮食生产的重要作用,更要重视农业生产中绿水资源的综合高效利用,积极开展抗旱、高产、优质作物的培育和推广;倡导合理的膳食结构,在满足营养需求的基础上尽量减少肉类的消费;在大的宏观尺度上,通过贸易方式将水足迹外部化。

从当前的研究看,水足迹研究尚存在一些需要完善的地方。一是在农作物虚拟水含量、动物及动物产品的虚拟水含量、工业产品虚拟水含量的计算方面值得完善;二是当前的水足迹研究将焦点仅集中在表征人类活动对水资源的数量影响方面,进一步的研究应将人类活动对水质的影响也包括进来;最后,需要进一步挖掘水足迹概念的深层意义,将它作为一个现实工具进行深入研究,如:消费模式如何影响水利用,未来的消费模式改变将会如何影响到水资源,如何将水足迹外部化以减轻缺水地区的水资源压力等等^[16],这对水资源可持续利用与水资源安全显然具有重要意义。

References:

- [1] Slobodan P Simonovic. World water dynamics: global modeling of water resources. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66:249 ~ 267.
- [2] Long A H, Xu Z M, Zhang Z Q. Estimate and analysis of water footprint in northwest China, 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 692 ~ 699.
- [3] Rockström J, Gordon L. Assessment of Green Water Flows to Sustain Major Biomes of the World: Implications for Future Ecohydrological Landscape Management. *Phys. Chem. Earth* (8), 2001, 6(11-12): 843 ~ 851.
- [4] Cheng G D. Virtual water — A strategic instrument to achieve water security. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2003(4): 260 ~ 265.
- [5] Xu Z M, Long A H, Zhang Z Q. Virtual water consumption calculation and analysis of Gansu Province in 2000. *Acta of Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 861 ~ 869.
- [6] Coatanza R, Jorgensen S E. Understanding and solving environmental problems in the 21th century, toward a new, integrated hard problem science. Amsterdam: Elsevier, 2002.
- [7] Xu Z M, Cheng G D. Impact of population and affluence on environment in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5): 767 ~ 773.

- [8] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 23: 351 ~ 365.
- [9] Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D, *et al.* Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 280 ~ 285.
- [10] Ehrlich P R, Holdren J P. The impact of population growth. *Science*, 1971, 171: 1212 ~ 1217.
- [11] Daily G C, Ehrlich P. Population, sustainability and earth's carrying capacity. *Bioscience*, 1992, 42: 761 ~ 771.
- [12] Dietz T, Rosa E A. effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997, 94: 175 ~ 179.
- [13] Li Y W, Xu Z M, Wang Y, *et al.* The environmental Kuznets (EKC) studies. *Journal of Ecological Economics*, 2005, 3(1): 59 ~ 65.
- [14] Jordi Roca, Emilio Padilla, Mariona Farre, *et al.* Economic growth and atmospheric pollution in Spain: discussing the environmental Kuznets curve hypothesis. *Ecological Economics*, 2001, 39(1): 85 ~ 99.
- [15] Xu Z M, Long A H. The primary study on assessing social water scarcity in China. *Acta of Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 982 ~ 988.
- [16] Long A H, Zhang Z Q, Xu Z M, *et al.* Analysis of water footprint and consumption pattern in Gansu Province. *Advance in Water Science*, 2005, 16(3): 418 ~ 425.
- [17] Rothman D S. Environmental Kuznets Curves — real progress or passing the buck? A case for consumption-based approaches. *Ecological Economics*, 1998, 25: 177 ~ 194.

参考文献:

- [2] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000 年的水资源足迹. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 692 ~ 699.
- [4] 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] 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用. *地理学报*, 2003, 58(6): 861 ~ 869.
- [6] 徐中民, 张志强, 张齐兵, 等译. 理解和解决 21 世纪的环境问题——面向一个新的、集成的硬问题科学. 郑州: 黄河水利出版社, 2004. 11 ~ 23.
- [7] 徐中民, 程国栋. 中国人口和富裕对环境的影响. *冰川冻土*, 2005, 27(5): 767 ~ 773.
- [9] 徐中民, 张志强, 程国栋. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力计算. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280 ~ 285.
- [13] 李玉文, 徐中民, 王勇, 等. 环境库兹涅茨曲线(EKC)研究进展. *生态经济学报*, 2005, 3(1): 59 ~ 65.
- [15] 徐中民, 龙爱华. 中国社会化水资源稀缺评价. *地理学报*, 2004, 59(6): 982 ~ 988.
- [16] 龙爱华, 张志强, 徐中民, 等. 甘肃省水足迹与消费模式分析. *水科学进展*, 2005, 16(3): 418 ~ 425.