基于三维水足迹-LMDI 的安徽省水资源压力及驱动力分析

熊鸿斌，周银双

（合肥工业大学 资源与环境学院，安徽 合肥 230009）

摘　要：[目的] 探究区域水资源压力状态和产生的原因，为区域合理开发和配置水资源提供理论依据。[方法] 通过构建三维水足迹模型，利用水资源可持续指数定性分析水资源可持续程度，并用对数平均迪氏指数(LMDI)分解法因素分解模型定量分析结构效应、技术效应、经济效应和人口效应对 2007—2016 年间安徽省水资源压力的影响。[结果] ①2007—2016 年间安徽省水足迹总体先增加后下降，其中比例达 97.88%～98.73%的内部水足迹中以农业生产用水比例最高且与总水足迹变化趋势一致；2016 年安徽省由北向南人均农业用水依次递减，其他类型水足迹以长江流域比例最高；②2007—2016 年间安徽省水足迹深度在 2～4 内波动并最终呈下降趋势且由北向南逐渐递减；2007—2016 年安徽省水资源整体可持续利用趋势在增强；③安徽省水足迹各驱动因素中，技术效应为逆向驱动，正向驱动中经济效应贡献值最大。[结论] 本文所用三维水足迹模型更能反映安徽省水足迹的实际情况；虽然水资源可持续利用趋势在增强，但还需优化水资源利用结构，加快提高水资源利用效率以缓解经济发展和人口增长带来的水环境压力。

关键词：水足迹；三维水足迹；足迹深度；水资源可持续指数；LMDI；驱动力

文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2019)05-0194-10　　**中图分类号**：X37，TV211.1

文献参数：熊鸿斌，周银双. 基于三维水足迹-LMDI 的安徽省水资源压力及驱动力分析[J]. 水土保持通报，2019，39(5)：194-203. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.027；Xiong Hongbin，Zhou Yinshuang. An analysis of water resources pressure and driving forces in Anhui Province based on LMDI-three-dimensional water footprint model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：194-203.

An Analysis of Water Resources Pressure and Driving Forces in Anhui Province Based on LMDI-Three-Dimensional Water Footprint Model

Xiong Hongbin，Zhou Yinshuang

（*School of Resources and Environmental Engineering*，*Hefei University of Technology*，*Hefei*，*Anhui* 230009，*China*）

Abstract：[Objective] This study aims to explore the regional water stress state and their causes and provides a theoretical basis for the development and allocation of rational water resources. [Methods] A three-dimensional water footprint model was built to analyze the sustainability of water resources by using the sustainability index of water resource. The logarithmic mean divisia index (LMDI) factor decomposition model was also applied to quantitatively analyze the structural，technological，economic，and population effects on water resources in Anhui Province from 2007 to 2016. [Results] ① From 2007 to 2016，the water footprint of Anhui Province，in which the internal water footprints accounted for 97.88% to 98.73%，at first increased and then decreased. The consumption of water by agriculture among the internal water footprints was the highest and showed the same variation as the overall water footprint. In 2016，the per capita agricultural water use in Anhui Province decreased from north to south，meanwhile，the Yangtze River basin accounted for the highest proportion in the other types of water footprint. ② During 2007—2016，the footprint depth of the Anhui Province fluctuated within 2～4 and eventually declined from north to south. The results indicated that the overall sustainable use of water resources in Anhui Province increased from 2007 to 2016. ③ The driving factors of the water footprint in Anhui Province showed that the technical effect was a reverse driving，and

收稿日期：2019-04-02　　**修回日期**：2019-05-02

资助项目：安徽省重大科技攻关项目“城镇污水深度处理与示范”(08010302114)

第一作者：熊鸿斌(1963—)，男(汉族)，安徽省合肥市人，博士，合肥工业大学教授，博士生导师，主要从事水污染处理技术研究、环境影响评价理论与方法。E-mail：xhb6324@sina.com。

the economic effect contributed the most to the positive driving. [Conclusion] The three-dimensional water footprint model used in this study can be a helpful tool to better reflect the actual situation of the water footprint in Anhui Province. Although of the use of water resources generally increased, optimizing the structure of the water resources utilization and accelerating improvements in the efficiency of water resource usage is necessary to alleviate the pressure on water resources resulting from economic development and population growth.

Keywords: water footprint; three-dimensional water footprint; footprint depth; water resources sustainability index; LMDI; driving force

水是一切生命活动的起源，人口的急剧增长和人类频繁的经济活动已经使得原本就很宝贵的淡水资源变得更加稀缺，水资源的供需矛盾日益加剧[1]，因此，有必要对各类水资源的压力及影响因素进行分析。根据英国学者 Tony Allan 于 1993 年提出的“虚拟水”概念(virtual water)和其他研究可知，人类对于水资源的消费并不仅限于当地直接利用的实体水，更多的则是包含在产品和服务中的虚拟水[2-4]。在此基础上，Hoekstra 等[5]类比“生态足迹”首次提出“水足迹(water footprint，WF)”的概念，以表征国家、地区或个人在一定时间内所消费的所有产品和服务所需要的水资源数量，反映了人类对水资源的真实占用情况。Hoekstra[5]在研究人类对自然资本占用方面对比了生态足迹和水足迹的异同点，认为二者皆是可持续性评价的重要补充部分。通过对生态足迹模型的不断改进和优化，有些学者认为由于未对自然资本的具体类型进行划分，生态足迹在体现资本存量恒定对维护生态系统健康稳定方面具有一定的局限性[6]，其中自然资本包含流量资本和存量资本两部分，是生态系统所提供的自然资源和生态服务的总称[7]。基于此，Niccolucci 等[8]提出了三维生态足迹模型，引入足迹广度和足迹深度的概念，精确的表征了人类对自然资本的流量消耗和存量占用，使其具备时空双重属性[9]，后经柳乾坤等[10]对三维生态足迹的完善，衍生出扩展的三维生态足迹模型。作为在生态足迹基础上衍生的水资源消费计算模型，水足迹同样具有类似的不足。水足迹将实体水和虚拟水关联起来，一定程度上为评价区域真实水消费提供新思路。国外研究主要包括国家及亚国家尺度水足迹的核算和比较分析[11-12]、产品水足迹和贸易虚拟水量的相关应用分析[13-14]以及水足迹与水安全分析[15]等；自程国栋[16]将“虚拟水”引入以来，国内研究除了从不同规模对水足迹进行核算和分析[17-18]外，还包括特定地区产品水足迹的核算与评价(尤其是缺水地区和大城市)[19-20]，结合环境、社会和经济等因素对区域水资源短缺程度和水污染严重程度的差异分析[21-23]、区域水足迹结构及影响因素分析[24-26]等。鉴于以往关于水足迹的研究主要集中在水资源供给和消费以及水赤字(盈余)等一维或二维角度，而对于水足迹三维角度的研究和造成水资源压力的驱动因素的分解研究成果较少。

安徽省位于长江中下游地区，气候宜人、土壤肥沃，农业资源和矿产资源等较为丰富，地形和生态系统多样，且东部紧邻浙、苏、鲁等经济较发达的长三角沿海省份，并位于珠三角和环渤海经济圈的中间区域，在长江流域发展中起到承东启西的作用，是连接长江经济带东、中、西部的“阳光地带”。因此，深入了解安徽省水资源利用情况和影响因素，有助于促进国家总体经济可持续发展。根据前人[27-28]及《安徽省水资源公报》对安徽省降雨量和丰、平、枯水年的划分可知，安徽省全年降水量虽然变化幅度不明显但整体呈增加趋势，且安徽省降水周期有缩短的趋势；空间上降水量自南向北有明显的递减规律，故本文以涵盖大部分丰枯状态的 2007—2016 年为研究时段对安徽省进行时序上的研究，同时对 2016 年安徽省不同流域进行空间上的研究，以水足迹和扩展的三维生态足迹模型为基础，构建三维水足迹模型，从足迹深度的角度形象地分析人类活动对水资源自然资本的消耗程度，以水资源可持续指标体系定性分析水资源的可持续发展趋势，并结合对数平均迪氏指数分解法(LMDI)分别从结构效应、技术效应、经济效应和人口效应 4 个方面对区域水足迹进行因素分解并分析，准确掌握安徽省水资源消费的实际状况，以期为当地水资源的科学管理和优化配置提供一定的理论基础。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

安徽省位于中国华东地区，地理坐标为东经 114°54′—119°37′，北纬 29°41′—34°38′，地形地貌复杂多样，境内主要有长江、淮河、新安江三大水系。整体气候位于暖温带与亚热带之间，四季分明，温暖湿润。全省平均降水量为 800～1 800 mm，年际降水变化较大。截至 2016 年底，全省土地总面积 1.40×10^5 km^2，年末常住人口 6.20×10^7 人，城镇化率达到 51.2%，全省水资源总量达 1.25×10^{11} m^3，比 2015

年多 36.2%，其中地表水资源量 1.18×10^{11} m^3，地下水资源量 2.19×10^{10} m^3，地下水资源量与地表水资源量不重复量 6.59×10^{9} m^3，全省人均水资源量为 2 018.23 m^3，比全国人均水平低 336.69 m^3，属于轻度缺水地区。

1.2 数据来源

农产品和动物产品单位质量虚拟水量借鉴 Hoekstra 与 Chapagain 两位学者的研究成果[13,29]，工业用水、居民生活用水、生态环境用水和可利用水资源量均来自《安徽省水资源公报》和《安徽省统计年鉴》，农产品和动物产品的产量数据、进出口贸易值、国内生产总值、常住人口数等均来自《安徽省统计年鉴》，部分无法直接获得的数据通过相关公式计算间接完善。考虑到数据的获取难易，本文以市为最小单位，根据三大水系的分布，将淮北市、亳州市、宿州市、蚌埠市、阜阳市、淮南市、滁州市和六安市划归为淮河流域，将合肥市、马鞍山市、芜湖市、宣城市、铜陵市、池州市和安庆市划归为长江流域，将黄山市划归为新安江流域，结合区域统计年鉴查找相关数据。

2 研究方法

2.1 水足迹计算

水足迹概念源于生态足迹，它是基于虚拟水基础的一个国家或区域居民生产和服务直接或间接消耗的水资源总量[30]。区域水足迹等于该区域居民所消费产品和服务的本地水资源利用总量和进口的虚拟水总量之和再减去出口的虚拟水总量，水足迹主要来自两方面：内部水足迹与外部水足迹[31]。内部水足迹是指为生产该地区居民所消费的商品与服务所利用的区域内水资源总量，数量上等于国民经济部门的本地水资源利用总量减去通过产品贸易而出口给其他区域的虚拟水量；外部水足迹是指进口虚拟水量减去向其他地区输出的进口产品再出口的虚拟水量。具体计算公式如下：

$$WF=IWF+EWF \tag{1}$$

$$IWF=WU_A+WU_I+WU_D+WU_E-VWE_{dom} \tag{2}$$

$$EWF=VWI-VW_{re\text{-}export} \tag{3}$$

式中：WE——水足迹；IWF——内部水足迹；EWF——外部水足迹；WU_A——本地农业生产用水量（不包括农业灌溉中损失的那部分水量）；WU_I——本地工业生产用水量；WU_D——本地居民生活用水量；WU_E——本地生态环境用水量；VWE_{dom}——本地出口其他区域的虚拟水量；VWI——本地进口其他区域的虚拟水量；$VE_{re\text{-}export}$——本地进口其他国家或地区输出的产品再出口的虚拟水量。

内部水足迹中，农业生产用水主要包括农产品生产用水和动物产品生产用水，鉴于农产品和动物产品生产过程中消耗水量较大，且受产品种类、生长周期等的影响，计算过程繁琐复杂，本文借鉴 Hoekstra 与 Chapagain 两位学者的研究成果，使用其计算的单位质量农产品和动物产品的虚拟水量；由于工业生产用水比例较小，且居民生活用水和生态环境用水基本都是实体水，故 3 者均引用安徽省水资源公报和统计年鉴等数据；本地出口其他区域的虚拟水量计算公式如下：

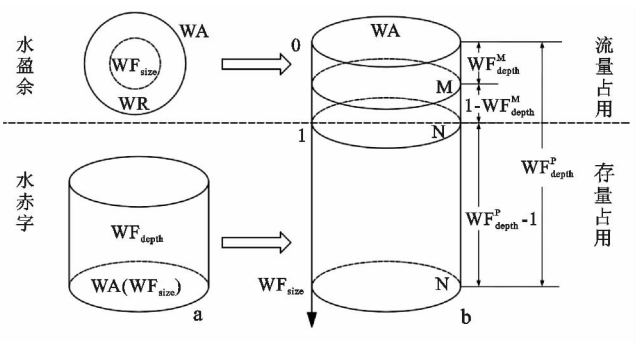
$$VWE_{dom}=\frac{出口贸易值}{生产总值}\times 总生产耗水量 \tag{4}$$

外部水足迹中，由于安徽省统计年鉴中进出口产品分类较粗略且缺乏详细的进出口贸易数据，故本地出口其他区域的虚拟水量采用间接方法计算[32-33]，不区分农业产品和工业产品且忽略进口产品再出口部分的虚拟水量（$VW_{re\text{-}export}$），故外部水足迹等于进口虚拟水量，计算公式如下：

$$EWF=VWI=\frac{进口贸易值}{生产总值}\times 总生产耗水量 \tag{5}$$

2.2 三维水足迹模型

类比扩展的三维生态足迹模型，本文在水足迹的基础上提出三维水足迹模型，从足迹深度的角度将水盈余和水赤字统一到同一个三维模型框架中，实现由一维水足迹计算水资源消费情况，经二维水足迹模型（图 1a）通过水盈余或水赤字核算人类水资源消费对自然水资源流量的占用，到三维水足迹从自然水资源存量角度分析人类活动对水资源的占用和透支程度，并用圆柱体体积的形式表示（图 1b），具体如下：



注：depth 为足迹深度；WF 为水足迹；WA 为区域可用水资源数量；BWR 为自然条件下的天然径流，即地表水和地下水之和再减去二者重复部分；EFR 为满足生态环境保护需求的用水量；N 为足迹深度临界点；M 为足迹深度随机点。

图 1 三维水足迹模型

三维水足迹模型公式如下：

$$WF_{depth}=\frac{WF}{WA} \tag{6}$$

$$WA=BWR-EFR \tag{7}$$

式中：WF_{depth}——足迹深度，且 $WF_{depth}\geqslant 0$；WF——水足迹；WA——区域可用水资源数量；BWR——自然条件下的天然径流，即地表水和地下水之和再减去二者重复部分；EFR——满足生态环境保护需求的用水量。

出于保护生态环境和稳定生物多样性的考虑，已有研究表明，需要从区域水资源总量中扣除一定水资源量才能得到区域可利用水资源量[34]。为与国内研究保持一致，本文扣除 60%的水资源份额。

当 $0\leqslant WF_{depth}\leqslant 1$ 时（如 M 点），此时水资源流量有结余，为水盈余状态，公式如下：

$$WF^{M}_{depth}=\frac{WF^{M}}{WA} \tag{8}$$

$$WF^{M}=WA\times WF^{M}_{depth} \tag{9}$$

$$WER^{M}=WA\times(1-WF^{M}_{depth}) \tag{10}$$

式中：WF^{M}_{depth}——M 点时的水足迹深度；WF^{M}——*M* 点的水足迹；WER^{M}——M 点时的生态盈余大小，即表示水资源流量除去水资源消费后的结余数量。

当 $WF_{depth}=1$ 时（如点 N），此时水资源流量与水资源消费数量相等，处于水盈余和水赤字的临界状态，公式如下：

$$WER^{N}=WA \tag{11}$$

式中：WER^{N}——N 点时的水足迹。

当 $WF_{depth}\geqslant 1$ 时（如 P 点），此时人类水资源消费耗尽了水资源流量，并占用了水资源存量，为水赤字状态，公式如下：

$$WF^{P}_{depth}=\frac{WF^{P}}{WA} \tag{12}$$

$$WF^{P}=WA\times WF^{P}_{depth} \tag{13}$$

$$WED^{P}=WA\times(WF^{P}_{depth}-1) \tag{14}$$

式中：WF^{P}_{depth}——P 点时的水足迹深度；WF^{P}——P 点时的水足迹；WED^{P}——P 点时的水赤字大小。

2.3　水资源可持续指数构建

根据水足迹的相关原理、构成以及和水资源利用之间的关系，本文通过水足迹增长指数（water footprint rate of change，WFR），可利用水资源增长指数（water availableness rate of change，WAR）和水资源可持续指数（water sustainability index，WSI）构建区域水资源可持续评价体系对研究区域的水资源可持续状态和能力进行评价[21]。

水资源可持续指数表示水足迹增长指数绝对值与可利用水资源增长指数绝对值的比值，该指数定量反映了区域水资源可持续利用能力的强度。其中，水足迹增长指数和可用水资源增长指数分别反映了一定时期内区域水资源耗用量和可利用量的变动幅度，其数值大小分别表明区域水足迹和可利用水资源增减速度的快慢，具体计算公式如下：

$$WSI=\frac{|WFR|}{|WAR|} \tag{15}$$

$$WFR=\frac{WF_2-WF_1}{WF_1}\times 100\% \tag{16}$$

$$WAR=\frac{WA_2-WA_1}{WA_1}\times 100\% \tag{17}$$

式中：WF_1，WF_2——前一年和后一年水足迹；WA_1，WA_2——前一年和后一年可用水资源。

需要说明的是，水资源可持续利用指数与水资源可持续利用能力在不同情况下关系也不同，具体情况分类见表 1。

表 1　区域水资源可持续性状态分类

WFR<0	WAR<0	WSI<1	不可持续
		WSI=1	平 衡
		WSI>1	可持续
	WAR>0	—	可持续
WFR>0	WAR<0	—	不可持续
	WAR>0	WSI>1	不可持续
		WSI=1	平 衡
		WSI<1	可持续

注：WFR 为水足迹增长指数；WAR 为可利用水资源增长指数；WSI 为水资源可持续指数。

① 当 WFR 和 WAR 正负不同时，水资源可持续状态处于绝对判断状态，因此不考虑水资源可持续指数与水资源可持续能力之间的关系；

② WFR<0 且 WAR<0 时，区域水足迹跌幅越是大于可用水资源量跌幅，则该区域水资源可持续利用趋势越强；

③ 当 WFR>0 且 WAR>0 时，区域水足迹涨幅越是小于可用水资源量涨幅，则该区域水资源可持续利用趋势越强。

2.4　LMDI 因素分解模型

对数平均迪氏指数分解法（LMDI）是迪氏指数法中一种完全的、不产生残差的分解分析方法，能够有效解决分解过程中出现“0”值和残差情况，所以应用最广泛[35-37]。其核心思想是将一个目标变量分解成若干影响因素变化的组合，从而可辨别各因素影响程度的大小，进而判定贡献较大的因素[38]。本文采用 LMDI 分解法分析安徽省水足迹的变动，分别从结构效应、技术效应、经济效应和人口效应 4 个方面分析水足迹，旨在探讨安徽省水足迹变动的主要影响

因素及其作用机理。本文利用 LMDI 模型构建水足迹指数分解模型具体如下：

$$WF_t=\sum_{i=1}^{4}WF_{it}=\sum_{i=1}^{4}\frac{WF_{it}}{WF_t}\frac{WF_t}{Y_t}\frac{Y_t}{P_t}P_t \tag{18}$$

$$\Delta WF=WF_t-WF_0=\sum_{i=1}^{4}S_{it}I_tR_tP_t-\sum_{i=1}^{4}S_{i0}I_0R_0P_0=\Delta WF_S+\Delta WF_I+\Delta WF_R+\Delta WF_P \tag{19}$$

$$S_{it}=\frac{WF_{it}}{WF_t};\ I_t=\frac{WF_t}{Y_t};\ R_t=\frac{Y_t}{P_t} \tag{20—22}$$

式中：WF_{it}——第 t 时期第 i 类水足迹；WF_t——第 t 时期水足迹；Y_t——第 t 时期国内生产总值 GDP（10^4 元）；P_t——第 t 时期的常住人口数（10^4 人）；S_{it}——第 t 时期第 i 类水资源利用占水足迹比重，表示结构效应；I_t——第 t 时期单位 GDP 水足迹，表示技术效应；R_t——第 t 时期人均 GDP，表示经济效应；P_t 表示人口效应；ΔWF 为水足迹变化量；WF_t 和 WF_0——第 t 年和基准年的水足迹；ΔWF_S，ΔWF_I，ΔWF_R，ΔWF_P——水足迹的结构因素、技术因素、经济因素和常住人口因素所引起的水足迹变化量。

利用 LMDI 分解法对上式进行分解，结果如下：

$$\Delta WF_S=\sum_{i=1}^{4}\frac{WF_{it}-WF_{i0}}{\ln WF_{it}-\ln WF_{i0}}\ln\frac{S_{it}}{S_{i0}} \tag{23}$$

$$\Delta WF_I=\sum_{i=1}^{4}\frac{WF_{it}-WF_{i0}}{\ln WF_{it}-\ln WF_{i0}}\ln\frac{I_t}{I_0} \tag{24}$$

$$\Delta WF_R=\sum_{i=1}^{4}\frac{WF_{it}-WF_{i0}}{\ln WF_{it}-\ln WF_{i0}}\ln\frac{R_t}{R_0} \tag{25}$$

$$\Delta WF_P=\sum_{i=1}^{4}\frac{WF_{it}-WF_{i0}}{\ln WF_{it}-\ln WF_{i0}}\ln\frac{P_t}{P_0} \tag{26}$$

3 结果与分析

3.1 水足迹时空差异及构成分析

3.1.1 水足迹时间上的变化分析 根据式(1)—(5)计算 2007—2016 年安徽省各类用水量，综合考虑进出口虚拟水量后，得到水足迹总量，计算结果如表 2 及图 2—3 所示。由图表分析可知，2007—2016 年安徽省水足迹总体呈现先增加后下降的趋势，内部水足迹和总水足迹走向一致，其中 2015 年安徽省水足迹最大，内部水足迹也最大；2007—2015 年安徽省水足迹年平均增幅 2.62%，2016 年相对于 2015 年降低 0.87%，其中，安徽省内部水足迹年平均增幅为 2.68%，外部水足迹 2007—2013 年持续波动，2013 年以后呈现下降趋势，年平均降幅为 10.54%，内部水足迹是外部水足迹的 46.27～77.62 倍，水足迹自给率为 97.88%～98.73%，这表明安徽省对外贸易不够发达，由于地处内陆，产品的虚拟水消费主要依靠本地水资源，且近年来安徽省城市化进程不断加快，主要依靠内部水资源供给无疑加剧当地经济发展矛盾。由图 3 分析可知，从水足迹构成来看，2007—2016 年安徽省农业生产用水占比最高，生态环境用水占比最小；农业生产用水中的农产品虚拟水量与农业生产用水变化一致，均先上升至 2015 年达到最大后下降，其中动物产品虚拟水量一直呈现增长状态，年平均增幅为 3.12%，这表明人们的生活质量提高的同时消费结构也在发生转变，人们对动物产品的需求在增大；工业生产用水由 2007—2010 年持续增加，然后呈现小幅度波动状态，这可能是由于“十二五”期间大量沿海工业企业的转移所引起的，与此同时，安徽省实行区域年度用水计划管理，积极落实用水计划和定额管理要求，有效降低各行业水资源浪费率；居民生活用水和生态用水则呈稳步增长状态，年平均增幅分别为 2.15%和 15.74%，这是由于人民生活水平的提高和环境保护意识的加强产生的结果。进出口虚拟水量在 2007—2010 年间变化趋势一致均呈现波动状态，2010—2013 年二者此起彼伏，2013 年后二者均呈现递减趋势，这表明相比进口产品，安徽省目前以出口产品为主，这在一定程度上加剧了当地水资源的压力。

表 2 2007－2016 年安徽省各类水足迹

年份	内部水足迹/10^8 m^3						外部水足迹/10^8 m^3		安徽省水足迹/10^8 m^3
	农业生产用水	工业生产用水	居民生活用水	生态环境用水	出口虚拟水量	合计	进口虚拟水量	合计	
2007	700.37	75.56	20.71	1.5	18.29	779.85	14.74	14.74	794.59
2008	726.86	85.4	21.52	1.63	21.98	813.43	17.58	17.58	831.01
2009	748.64	93.28	22.65	1.94	16.61	849.90	12.7	12.7	862.6
2010	761.63	94.32	23.4	2.3	18.9	862.75	18.06	18.06	880.81
2011	777.03	90.62	23.86	3.96	21.16	874.31	17.66	17.66	891.97
2012	806.99	97.02	23.96	3.78	28.85	902.90	13.56	13.56	916.46
2013	811.77	98.43	24.21	4.05	27.98	910.48	17.21	17.21	927.69
2014	840.89	92.71	24.5	4.65	26.44	936.31	14.93	14.93	951.24
2015	868.56	93.51	24.88	4.9	27.95	963.90	13.24	13.24	977.14
2016	854.62	93.09	25.08	5.59	22.08	956.30	12.32	12.32	968.62

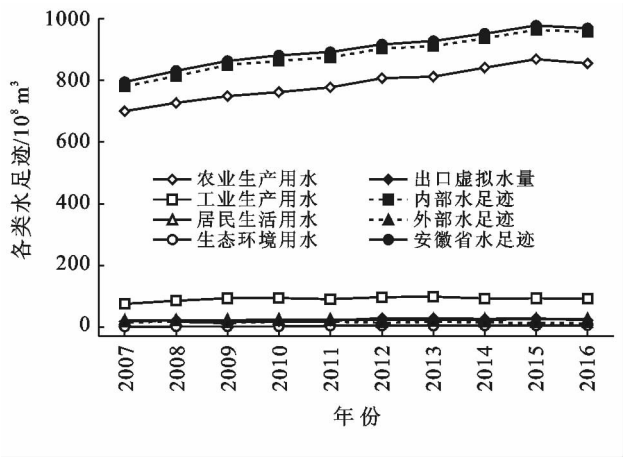


图 2　2007－2016 年安徽省各类水足迹

3.1.2　空间不同流域水足迹变化及构成分析　根据(1)—(5)计算 2016 年不同流域的水足迹,结果如表 3 所示。根据表 3 分析可知,就总体来看,安徽省由北向南分布的淮河流域、长江流域、新安江流域水足迹依次递减,淮河流域经济发展水平较低且人口最多,长江流域以工业发展为主且矿产资源丰富,新安江流域由于地处安徽最南边,旅游业较为发达,因而水资源压力相对较小;就结构来看,除了人均农业生产用水与人均水足迹均由北向南逐渐递减外,其他类水足迹均是以长江流域最高,这与安徽省经济发展状况和不同地域自然资源配置有关。安徽省由北向南依次为平原、丘陵和山区地带,地貌类型决定安徽北部以农业为主;由于不同流域含有不同工业结构的城市,如煤炭资源丰富的淮北和淮南,以钢和铜矿为主要资源的马鞍山和铜陵,这使得长江流域工业生产用水最高;除此之外,由于安徽省会合肥的大力发展,并不同程度带动周边区域,这使得长江流域和外部地区的贸易交流相比安徽其他地区程度更高,同时人们生活水平的提高和保护环境意识的增强使得当地居民生活用水和生态环境用水相对较高。

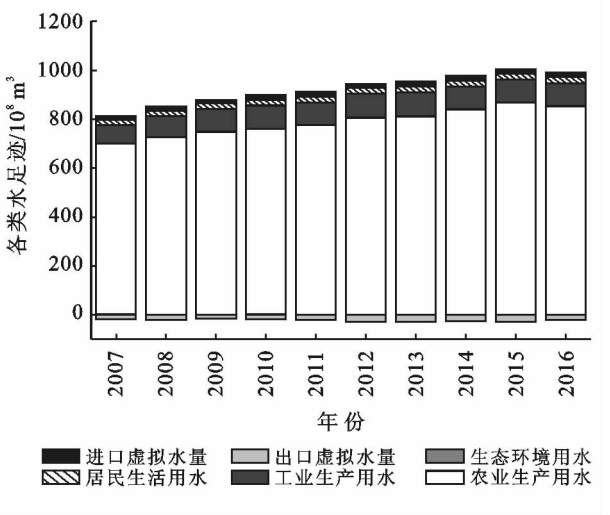


图 3　2007－2016 年安徽省水足迹构成

表 3　2016 年安徽省三大流域人均水足迹

流 域	人均农业生产用水/10^8 m³	人均工业生产用水/10^8 m³	人均居民生活用水/10^8 m³	人均生态环境用水/10^8 m³	人均出口虚拟水量/10^8 m³	人均进口虚拟水量/10^8 m³	安徽省人均水足迹/10^8 m³
淮河流域	1 724.98	70.87	37.42	3.53	16.63	4.36	1 824.53
长江流域	1 239.41	278.33	44.12	14.58	67.46	38.14	1 547.11
新安江流域	807.61	46.41	43.51	7.25	21.75	4.35	887.37

3.2　水足迹深度时空差异分析

2007—2016 年安徽省水足迹深度计算结果如图 4 所示。由图 4 分析可知,从总体变化趋势看,2007—2016 年间,安徽省的水足迹呈上升趋势,可利用水资源量 2007—2013 年呈小幅度波动状态,并于 2013 年后逐渐上升,此时可利用水资源量的增速明显比水足迹要大,这使得安徽省水足迹深度也在加速降低,这说明安徽省的自然可利用水资源虽不能满足当地的生产和消费,但总体正趋于良性发展。2007—2016 年安徽省水足迹年平均值为 9.00×10^{10} m³,可利用水资源量年平均值为 3.16×10^{10} m³,安徽省水足迹深度变化范围为 2～4,这说明安徽省的自然资源消费已经超过了该地区的自然资源流量,且消耗的自然资本存量相当于安徽省水资源 1～3 a 的自然资源积累,这表明安徽省水资源已经超负荷开发利用,从而占用保护生态环境和生物多样性用水,这在一定程度上增大了区域可持续发展的矛盾,为此可通过合理调整消费和产业结构、扩大贸易量或从其它地区调水或进口具有较高生产率地区的产品,降低本地水资源消费,以增加外部水足迹来维持安徽省的正常人民生活和发展水平。

根据表 4 分析可知,安徽省由北到南人均水足迹不断递减,人均可利用水资源量却在猛增,长江流域和新安江流域人均可利用水资源量分别是淮河流域的 3 和 12 倍,足迹深度中新安江流域小于 1,这表明目前该流域占用的只是当地水资源的流量资本,且该流域的水资源足以支撑当地发展;长江流域超出当前本地流量资本的 0.28 倍,淮河流域则还需要当地 3.66 a的水资源积累才能满足当地的发展需要。由此可见,安徽省内水资源分布不均匀,且资源分布的

差异和经济发展水平的高低使得水资源的利用方式和利用程度区别较大。

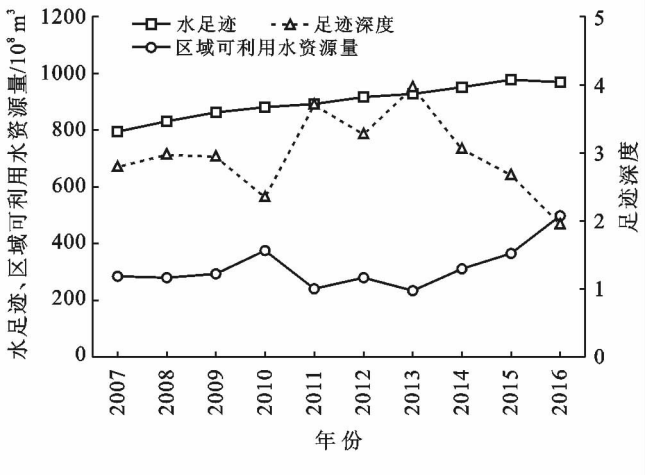


图 4 2007—2016 年安徽省水足迹、可利用水资源量和水足迹深度

表 4 2016 年安徽省不同流域的足迹深度

流 域	人均水足迹/10^8 m^3	人均可利用水资源量/10^8 m^3	足迹深度
淮河流域	1 824.53	391.42	4.66
长江流域	1 547.11	1 212.46	1.28
新安江流域	887.37	4 591.44	0.19

3.3 水资源可持续指数分析

根据式(15)—(17)计算安徽省水资源可持续指数,结果如表 5 所示。由表 5 分析可知,2007—2015 年间安徽省水足迹增长指数均为正值,2016 年为负值,水足迹经过较长时间增长趋势后开始呈现轻微下降趋势;;2007—2016 年安徽省可用水资源指数整体波动较大,但呈现曲折上升的趋势;根据水资源可持续利用判断表可知,安徽省整体可持续利用趋势在增强。究其原因,2007—2016 年安徽省人均 GDP 由 12 039.47 元增长到 39 091.47 元,增长了 2.25 倍,但万元 GDP 用水量从 305.9 m^3 下降到 120.5 m^3,这表明安徽省近年来在经济发展的同时水资源利用效率也在提高;研究时间段与“十二五”重合,在此期间安徽省积极响应国家政策,建立最严格的水资源管理体系考核工作,引水调水工程不断提速,这在一定程度缓解安徽省水资源的压力;与此同时,安徽省开展高效节水灌溉、高标准农业示范建设,启动百家企业节水等节水改造工程,使得工业农业水资源利用程度不断提高,这表明安徽省节约用水政策的实施对推进节水型社会建设起到初步效果。因此,制定合理的发展策略,在保证经济发展的同时合理调整产业结构,通过先进技术提高水资源利用效率和转化效率,大力推进节水型社会建设是安徽省保证水资源可持续发展的途径之一。

表 5 2008—2016 年安徽省水资源可持续状态

年份	水足迹增长指数(WFR)	可利用水资源增长指数(WAR)	水资源可持续指数(WSI)	状 态
2008	0.046	−0.019	—	不可持续
2009	0.038	0.048	0.785	可持续
2010	0.021	0.281	0.075	可持续
2011	0.013	−0.359	—	不可持续
2012	0.027	0.164	0.167	可持续
2013	0.012	−0.165	—	不可持续
2014	0.025	0.329	0.077	可持续
2015	0.027	0.174	0.156	可持续
2016	−0.009	0.362	—	可持续

3.4 水足迹环境压力的因素分解分析

为进一步探讨安徽省水足迹影响因素,以 2007 年为基准年,根据(18)—(26)计算安徽省水足迹的各驱动因素的贡献值见表 6 和图 5,由表 6 和图 5 分析可知,2008—2016 年安徽省各因素总效应一直为正值且总体呈现上升趋势,结构效应整体贡献不大;技术效应、经济效应均呈现上升趋势,年平均增幅分别为 28.97%和 27.5%,其中技术效应是抑制作用,经济效应是促进作用;人口效应在 2008—2009 年和 2015—2016 年均对水足迹增长起到促进作用,在 2010—2015 年水足迹增长起到抑制作用。总体来看,经济效应占比最大,其他依次为技术效应、人口效应、结构效应。

表 6 2008—2016 年安徽省水足迹分解效应

年份	结构效应/10^8 m^3	技术效应/10^8 m^3	经济效应/10^8 m^3	人口效应/10^8 m^3	合计/10^8 m^3
2008	0.001 6	−113.44	147.61	2.25	36.43
2009	0.012 3	−190.88	257.12	1.76	68.01
2010	0.014 9	−347.45	455.98	−22.32	86.22
2011	0.022 6	−518.84	637.11	−20.90	97.39
2012	0.011 1	−603.54	743.75	−18.34	121.88
2013	0.015 3	−692.08	837.61	−12.45	133.10
2014	0.032 2	−749.55	911.16	−4.99	156.65
2015	0.052 5	−783.90	962.66	3.74	182.55
2016	0.093 8	−868.35	1031.16	11.13	174.03
均值	0.028 5	−540.89	664.91	−6.68	117.36
比例	0.000 2	−4.61	5.67	−0.06	1

结构效应对安徽省水足迹的增长起到促进作用总体在 $1.60\times10^5\sim9.38\times10^6$ m^3 范围内波动,贡献

度均值为 0.02%,这表明安徽省用水结构虽有变动但效果不明显。2008—2011 年和 2012—2016 年结构效应均呈现增长趋势,后期增幅大于前期。总体来看,结构效应对安徽省水足迹的影响较小,考虑安徽省未来水资源的可持续发展,结构效应应当予以重视。

技术效应对安徽省水足迹的增加一直呈现逆向驱动且贡献值在不断增加,2008—2016 年技术效应对安徽省水足迹的年平均贡献值为 -5.41×10^{10} m^3,贡献值均值为 -461%,这表明安徽省水资源利用效率在不断提高,水资源的开发利用方式也在由粗放型向集约型转变。为响应国家实行最严格水资源管理制度,安徽省积极推动用水结构调整,努力提高水资源利用技术。

经济效应是引起安徽省水足迹增长的主要因素,2008—2016 年经济效应均呈正向驱动,且一直在增加,年平均贡献值达到 6.65×10^{10} m^3,贡献度均值 567%。正是由于经济效应的较高占比和快速增长,使得安徽省虽然水资源利用效率不断提高但水足迹依然呈现上升趋势。为加快安徽奋力崛起,"十二五"期间安徽省制定建设皖江城市带产业转移示范区规划以及合肥经济圈规划等一系列促进经济发展的政策,导致各类工业用水和农业用水增加,加速了水足迹总量的增长。

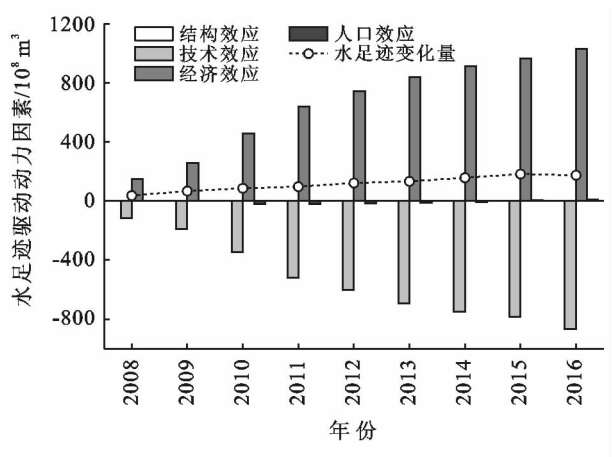


图 5　2007—2016 年安徽省水足迹驱动力因素贡献值

人口效应对安徽省水足迹的增长于 2008—2009 年和 2015—2016 年为正向驱动,2010—2014 年为逆向驱动,2010 年逆向驱动效果最强,人口效应对水足迹增长的平均贡献值为 -6.68×10^8 m^3,贡献度均值为 -6%。2008—2010 年人口减少 1.78×10^6 人,2010—2016 年间安徽省常住人口增长 2.39×10^6 人,增长比例为 4.01%,年平均增幅为 0.66%,高于全国人口年平均增幅 0.51%。快速增长的人口需要各农业生产和工业生产部门提供更多的生物资源,为满足人们的正常需求势必会使安徽省水足迹不断增加,因此需要安徽省加快与外界的贸易交流,从水资源丰富地区进口虚拟水含量较高的产品以缓解当地水资源压力。

3.5　水资源压力结果比较分析

本文根据夏富强等[39]的研究成果,利用已有的水资源压力评价模型分别从水资源人口压力、生态压力、经济发展压力和技术发展压力 4 个方面对安徽省 2007—2016 年的水资源压力进行计算,具体步骤见参考文献,本文在此不再赘述,结果如图 6 所示。

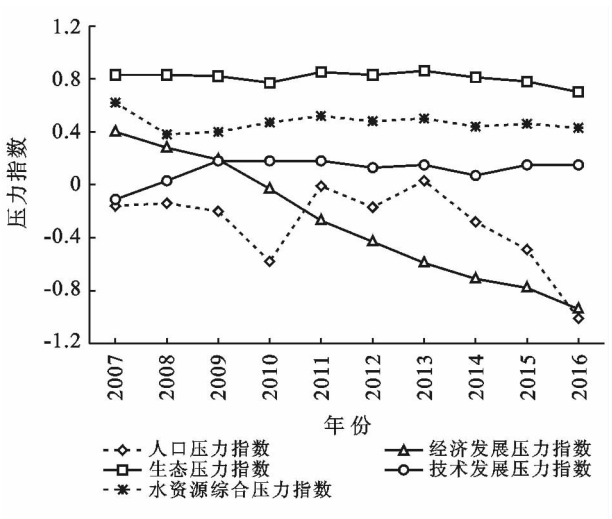


图 6　2007—2016 年安徽省水资源各压力指数趋势

通过对比分析可知,本文所得的水资源压力变化更为明显。夏富强等提出的方法中规定,当水资源各项压力指数小于 0 时,则认为该项指标不存在水资源压力。由此发现,2007—2016 年安徽省的人口和经济在大多数年份对当地水资源是不存在压力的,这与安徽省近年来人口和经济的发展现状显然是不符的。相对于已有的水资源压力评价模型,本文提出的三维水足迹模型不仅对消耗的实体水进行计算,同时考虑到消费产品和进出口贸易中所包含的虚拟水,同时从自然资本流量和存量的角度对区域水资源利用进行分析,使人们能够更为清晰的掌握当地水资源的利用与可持续发展状况,测算结果相对更为可靠。

4　讨论与结论

4.1　讨 论

本文类比扩展的三维生态足迹模型提出三维水足迹模型,该模型形象的表达了人类对水资源自然资本的流量消耗和存量占用,并将水盈余和水赤字融入到统一的模型之中,实现了水足迹研究的纵向扩展,

通过构建水资源可持续指标体系定性分析水资源可持续发展情况，并结合 LMDI 模型分别从结构、技术、经济和人口等要素进一步分析水足迹产生的原因和演变趋势，本文所得出的结论与近年安徽省的实际状况较吻合，能够较为准确的反映安徽省的水资源的利用状况，具有一定的现实意义，但仍存在些许不足有待进一步研究。

(1) 鉴于数据的难获取性，本文没有计算进口再出口产品的虚拟水量，针对该部分虚拟水量的计算，还需多方面考虑计算方法；

(2) 由于水资源压力受多种因素影响，可持续评价指标体系的全面性难以保证，因此还需进一步加强；

(3) 水足迹、生态足迹等同属足迹家族并分别从不同方面对区域资源进行衡量和研究，是充实可持续发展的重要内容，后期可就其他类足迹从三维角度开展进一步的探讨和分析。

4.2 结 论

(1) 根据本文计算可知，从水足迹来源来看，内部水足迹占总水足迹的 97.88%～98.73%，且内部水足迹中以农业生产用水为主，这与安徽省是农业大省的实际情况相吻合，表明安徽省对外贸易不够发达，产品的虚拟水消费主要依靠本地水资源，这与史策[40]的研究结果相一致；从水足迹构成来看，农业生产用水对内部水足迹影响最大；从安徽省南北差异来看，安徽省不同流域由北向南人均水足迹依次递减，其中农业用水与整体变化一致，其他类型水足迹均是以长江流域占比较高，这与安徽省南北资源分布差异和经济发展程度有关。因此，安徽省需要合理调整产业结构，提高水资源利用效率和转化效率，大力推进节水型社会建设工作，有效地降低各行业水资源浪费率。

(2) 从总体变化趋势看，2007—2016 年间，安徽省的水足迹和可利用水资源量不同程度均呈上升趋势；从水资源压力角度来看，2007—2016 年间安徽省水足迹深度变化范围为 2～4，于 2013 年开始加速下降，消耗的自然资本存量相当于安徽省水资源 1～3 a 的自然资源积累，2016 年安徽省由北向南不同流域足迹深度由 4.66 逐渐减小至 0.19，这表明安徽省新安江流域的水资源较为丰富，淮河流域的水资源压力较大，安徽省中北部水资源已经超负荷开发利用并占用了保护生态环境和生物多样性的用水，水资源虽趋于良性发展，但总体形势依然不容乐观。

(3) 从驱动力因素来看，本文利用 LMDI 模型分解的驱动力中，以经济效应和技术效应影响较大，且两者对水足迹的增长呈相反作用，其他均呈正向驱动且依次为人口效应和结构效应，这说明随着经济的发展，需要消耗更多的水资源以保证各生产部门的正常运行，但水资源的开发利用方式的转变有助于水资源利用效率的提高以缓解水资源压力，与此同时，合理调整水资源消费结构和人口消费定额同样有助于水资源发展的可持续性。

[参 考 文 献]

[1] 胡小飞，傅春，陈伏生，等. 基于水足迹的区域生态补偿标准及时空格局研究[J]. 长江流域资源与环境，2016，25(9)：1430-1437.

[2] Gleick P H. The world's water 2000—2001：The biennial report on freshwater resources[J]. Electronic Green Journal，2002，16(1)：210-212.

[3] 麻亮亮. 中国足迹家族与经济增长关系研究[D]. 北京：中央民族大学，2017.

[4] 黄芳，江可申，卢愿清，等. 中国碳强度的影响因素解析：基于 LMDI 分解方法[J]. 数学的实践与认识，2012，42(6)：40-46.

[5] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital：A comparison of ecological footprint and water footprint analysis[J]. Ecological Economics，2009，68(7)：1963-1974.

[6] Niccolucci V，Bastianoni S，Tiezzi E B P，et al. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. Ecological Modelling，2009，220(20)：2819-2823.

[7] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析：选取 11 个国家为数据源[J]. 生态学报，2015，35(11)：3766-3777.

[8] Niccolucci V，Galli A，Reed A，et al. Towards a 3D National Ecological Footprint Geography[J]. Ecological Modelling，2011，222(16)：2939-2944.

[9] 秦超，李君轶，陈宏飞，等. 基于三维生态足迹的陕西省自然资本动态研究[J]. 干旱区研究，2016，33(4)：837-842.

[10] 柳乾坤. 基于改进三维生态足迹模型的土地承载力指数研究[D]. 杭州：浙江大学，2016.

[11] Hoekstra A Y，Chapagain A K. Water footprints of nations：Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water Resources Management，2006，21(1)：35-48.

[12] van Oel P R，Krol M S，Hoekstra A Y. A river basin as a common-pool resource：A case study for the Jaguaribe basin in the semi-arid Northeast of Brazil[J]. International Journal of River Basin Management，2009，7(4)：345-353.

[13] Chapagain A K，Hoekstra A Y. The blue，green and grey water footprint of rice from production and con-

sumption perspectives [J]. Ecological Economics, 2011,70(4):749-758.

[14] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(9):3232-3237.

[15] Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability[J]. PLoS One, 2012,7(2):632-688.

[16] 程国栋.虚拟水:中国水资源安全战略的新思路[J].中国科学院院刊,2003,18(4):260-265.

[17] 龙爱华,徐中民,张志强.西北四省(区)2000 年的水资源足迹[J].冰川冻土,2003,25(6):692-700.

[18] 孙才志,刘玉玉,陈丽新,等.基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局[J].生态学报,2010,30(5):1312-1321.

[19] 张燕,徐建华,吕光辉.西北干旱区新疆水资源足迹及利用效率动态评估[J].中国沙漠,2008,28(4):775-780.

[20] 孙艳芝,鲁春霞,谢高地,等.北京市水足迹[J].生态学杂志,2015,34(2):524-531.

[21] 戚瑞,耿涌,朱庆华.基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J].自然资源学报,2011,26(3):486-495.

[22] 余灏哲,韩美.基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析[J].自然资源学报,2017,32(3):474-483.

[23] 熊鸿斌,周凌燕.基于水足迹·灰靶的安徽省水资源可持续利用评价[J].环境科学学报,2018,38(8):377-386.

[24] 宋智渊,冯起,张福平,等.敦煌 1980—2012 年农业水足迹及结构变化特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(6):133-138.

[25] 王晓萌,黄凯,杨顺顺,等.中国产业部门水足迹演变及其影响因素分析[J].自然资源学报,2014,29(12):2114-2126.

[26] 李泽红,董锁成,李宇,等.武威绿洲农业水足迹变化及其驱动机制研究[J].自然资源学报,2013,28(3):410-416.

[27] 聂兵,沈非,徐光来,等.安徽省近 50 年降水时空变化分析[J].安徽师范大学学报:自然科学版,2017,40(6):574-579.

[28] 江俊杰,孙卫国.1959—2007 年安徽省降水时空变化特征分析[J].中国农业气象,2012,33(1):27-33.

[29] 刘民士,刘晓双,侯兰功.基于水足迹理论的安徽省水资源评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):220-224.

[30] Hoekstra Y A, Hung P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J]. Global Environmental Change, 2005, 15(1):45-56.

[31] 赵晨,王远,谷学明,等.基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J].生态学报,2013,33(5):1636-1644.

[32] 潘文俊,曹文志,王飞飞.基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价[J].资源科学,2012,34(10):1905-1912.

[33] 刘梅,许新宜,王红瑞,等.基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J].自然资源学报,2012,27(6):1022-1034.

[34] 谭秀娟,郑钦玉.我国水资源生态足迹分析与预测[J].生态学报,2009,29(7):3559-3568.

[35] 赵自阳,李王成,王霞,等.基于指数分解法的河南省水资源生态足迹分析[J].水文,2017,37(4):57-61.

[36] Ang B W, Zhang Fuqiang. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies[J]. Energy, 2000,25(12):1149-1176.

[37] 孙才志,陈栓,赵良仕.基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J].自然资源学报,2013,28(4):571-582.

[38] 徐军委.基于 LMDI 的我国二氧化碳排放影响因素研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.

[39] 夏富强,唐宏,杨德刚,等.绿洲城市水资源压力及其对城市发展的影响:以乌鲁木齐为例[J].干旱区地理,2014,37(2):380-387.

[40] 史策.基于水足迹理论的安徽省农业水资源环境可持续利用评价[D].合肥:安徽农业大学,2018.