

【水环境与水生态】

# 山东省水生态足迹时空分布与驱动效应研究

陈正雷, 陈 星

(河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**利用改进的水生态足迹模型计算了山东省2007—2016年的水生态足迹和水生态承载力,分析评价了近年来山东省水生态足迹的动态变化与空间分布情况,并基于LMDI构建的水资源生态足迹分解模型分析了经济、结构、技术与人口效应的驱动效果,结果表明:2007—2016年山东省人均水资源生态赤字呈波动上升趋势,水环境生态赤字2010年前后差异明显,2010年后赤字值激增;2016年各市的人均水环境生态赤字均大于水资源生态赤字;经济、结构与人口效应对山东省水资源生态足迹的增长起正向驱动作用,技术效应则起抑制作用。

**关键词:**水生态足迹;水生态赤字;水资源;LMDI模型;山东省

**中图分类号:**TV213.4;X24 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1000-1379.2020.04.015

## Temporal and Spatial Distribution and Driving Effects of Water Ecological Footprint in Shandong Province

CHEN Zhenglei, CHEN Xing

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper used the improved water ecological footprint model to calculate the water ecological footprint and water ecological surplus/deficit of Shandong Province from 2007 to 2016, and analyzed the dynamic and spatial distribution of water ecological footprint in Shandong Province in recent years, then used LMDI to construct a water ecological footprint decomposition model to analyze the driving effects of economy, structure, technology and population effects. The results show that the ecological deficit of per capita water resources in Shandong Province show a volatility trend from 2007 to 2016, the difference between the water environment and ecological deficit is obvious around 2010 and the deficit value has been increased sharply after 2010. Besides, the per capita water environment deficit of each city in 2016 is greater than that the water deficit and the results of water resources ecological footprint decomposition show that the economic, structural and population effects positively promote the growth of water resources ecological footprint in Shandong Province, then the technical effect correspondingly negatively inhibits.

**Key words:** water ecological footprint; water ecological deficit; water resources; LMDI model; Shandong Province

生态足迹(Ecological Footprint)的概念最初由加拿大经济学家 William Rees 于1992年提出<sup>[1]</sup>。范晓秋<sup>[2]</sup>基于传统的生态足迹模型建立了水资源账户来表述水资源的社会经济和生态环境功能。洪辉<sup>[3]</sup>将水资源账户定义为传统生态足迹模型中水域账户的外扩,它包括淡水、水污染和水产品生态足迹3个二级账户。杨建军等<sup>[4]</sup>、刘子刚等<sup>[5]</sup>分别计算了西安市、湖州市多年的水生态足迹。目前,国内水生态足迹研究主要集中在模型改进、测度分析和模拟预测等方面。张义等<sup>[6]</sup>利用改进的水资源生态足迹模型计算分析了2003—2010年广西水资源生态足迹的变化趋势;关格格等<sup>[7]</sup>利用水资源生态足迹模型分析了山西省2005—2013年用水生态足迹和生态承载力的动态变化,并结合水资源可持续发展的各项指标评价了山西省水资源利用和发展的状况;金昌盛等<sup>[8]</sup>基于生态足迹模型测算了长江经济带及其各个省(市)的人均水资源生态盈亏,并运用灰色神经网络模型预测了

2016—2025年人均水资源生态足迹发展变化的趋势。水生态足迹及其相关研究模型与方法已成为研究区域水资源利用状况,判断水资源、水环境承载能力,以及评估区域可持续发展能力的重要方式。

山东省人均水资源占有量仅有350 m<sup>3</sup>左右,属于严重缺水地区。在经济发展与环境保护并重的今天,如何在保证山东省经济社会发展的前提下,兼顾水资源的合理利用和水环境的有效保护,已成为制约经济社会发展的一大瓶颈。笔者基于水生态足迹的相关理论,计算并分析了山东省各市的水生态承载力及利用状

收稿日期:2019-04-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407704);国家自然科学基金面上项目(51579148,51779146,51879163)

作者简介:陈正雷(1994—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为水文水资源

通信作者:陈星(1980—),女,新疆伊宁人,副教授,博士,研究方向为水文水资源

E-mail:chenxing@hhu.edu.cn

况,以期为山东省水资源的开发和合理利用提供参考。

## 1 研究区概况

山东省位于黄河下游,陆域总面积 15.71 万 km<sup>2</sup>,涉及黄河、淮河、海河三大流域,境内河网密布,黄河、京杭大运河是省内两大主要河道。山东省气候属暖温带季风气候类型,年降水量为 550~950 mm,降水年内分布很不均匀,夏季降水量占全年降水量的 50% 以上。此外,山东省还是中国的经济第三大省、人口第二大省,国内生产总值稳居全国第三名。

## 2 研究方法

### 2.1 改进的水生态足迹与水生态承载力模型

改进的水生态足迹与水生态承载力模型主要包括水量和水质两方面内容,即水资源账户和水环境账户。淡水资源的生态足迹指满足一定条件下水资源消耗量所需要的土地面积。水资源承载力指在一定发展趋势下,某地区水资源量对该地区持续健康发展的最大支撑能力。计算模型<sup>[9]</sup>:

$$EF_{FW} = N \times ef_{fw} = N(W_f / P_w) \quad (1)$$

$$EC_{WR} = N \times ec_{wr} = (1 - 0.6)(Q_w / P_w) \quad (2)$$

式中:  $EF_{FW}$ 、 $ef_{fw}$  为总淡水生态足迹和人均淡水生态足迹, hm<sup>2</sup>;  $N$  为人口总数;  $W_f$  为山东省人均消耗水资源量, m<sup>3</sup>;  $P_w$  为全球多年平均产水模数,代表的是全球水资源的平均生产能力,取 3 140 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;  $EC_{WR}$ 、 $ec_{wr}$  分别为总淡水生态消费和人均淡水生态消费的生态承载力, hm<sup>2</sup>;  $Q_w$  为山东省水资源总量, m<sup>3</sup>。

水污染生态足迹指一定条件下,吸纳某区域所排放的水体污染物所需要的土地面积。山东省水体主要污染物为 COD 和总氮,因此选取 COD 和总氮作为区域水污染生态足迹的计算对象。此外,由于两种污染物在对山东省水环境影响上具有明显重叠,因此选取其中的较大值作为改进的水生态足迹模型中最终的水污染生态足迹<sup>[10]</sup>。水环境承载力指为消解某一区域水体污染物,保持水体生态健康所需要的水资源用地面积。计算模型如下<sup>[10]</sup>:

$$EF_{WP} = \max(EF_{CODP}, EF_{Np}) \quad (3)$$

$$EF_{CODP} = C_{COD} / P_{COD} \quad (4)$$

$$EF_{Np} = C_N / P_N \quad (5)$$

$$CC_{WE} = N \times cc_{we} = \min(CC_{CODP}, CC_{Np}) \quad (6)$$

$$CC_{CODP} = 0.88(Q_{WP} U_{COD} / P_{COD}) \quad (7)$$

$$CC_{Np} = 0.88(Q_{WP} U_N / P_N) \quad (8)$$

$$Q_{WP} = Q_w - k Q_R \quad (9)$$

式中:  $EF_{WP}$ 、 $EF_{CODP}$  和  $EF_{Np}$  分别为山东省水污染、有机物(COD)和总氮污染生态足迹, hm<sup>2</sup>;  $C_{COD}$ 、 $C_N$  分别

为排入水体的有机物、总氮量, t;  $P_{COD}$ 、 $P_N$  分别为水体吸纳有机物和总氮的全球平均能力,取值分别为 0.062 893 t/hm<sup>2</sup>和 0.003 145 t/hm<sup>2</sup>;  $CC_{WE}$ 、 $CC_{CODP}$  和  $CC_{Np}$  分别为水污染、有机物污染和总氮污染的水生态承载力, hm<sup>2</sup>;  $cc_{we}$  为山东省人均水污染的水生态承载力, hm<sup>2</sup>/人;  $Q_{WP}$ 、 $Q_R$  分别为计算区域消纳水体污染物的水量和取水量, m<sup>3</sup>;  $k$  为山东省综合耗水率;  $U_{COD}$  和  $U_N$  分别为地表水Ⅲ类水(低于Ⅲ类水标准的水体的生态服务功能会衰退,甚至丧失)标准中有机物和总氮含量上限, mg/L。

水生态赤字/盈余指一个地区的水生态承载力与水生态足迹的差值,其计算公式<sup>[10]</sup>为

$$ED_{WR} / ES_{WR} = EF_{FW} - EC_{WR} \quad (10)$$

$$ED_{WE} / ES_{WE} = EF_{WP} - CC_{WE} \quad (11)$$

式中:  $ED_{WR} / ES_{WR}$  和  $ED_{WE} / ES_{WE}$  分别为水资源和水环境的水生态赤字/盈余,其值大于 0 为盈余、小于 0 为赤字。

水生态压力指数指区域水生态承载力与水生态足迹的比值,计算公式<sup>[10]</sup>为

$$EPI_{WR} = EF_{FW} / EC_{WR} \quad (12)$$

$$EPI_{WE} = EF_{WP} / CC_{WE} \quad (13)$$

式中:  $EPI_{WR}$ 、 $EPI_{WE}$  分别为水资源(淡水消费)和水环境(水污染消费)的水生态压力指数,  $EPI_{WR} / EPI_{WE} > 1$  时为不安全状态。

### 2.2 基于 LMDI 的水资源生态足迹分解模型

LMDI 模型是 IDA 模型的一个分支,对于变量不多且涉及时间序列性质指标数据群的分解效果良好,已被广泛应用于能源和环境经济等领域。水资源生态足迹分解模型<sup>[11]</sup>为

$$ef_t = \sum_{i=1}^3 ef_{it} = \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it}}{ef_t} \frac{ef_t}{\gamma_t} \frac{\gamma_t}{p_t} p_t \quad (14)$$

$$\Delta ef_t = ef_t - ef_0 = \sum_{i=1}^3 s_{it} i_t r_t p_t -$$

$$\sum_{i=1}^3 s_{i0} i_0 r_0 p_0 = \Delta ef_s + \Delta ef_i + \Delta ef_r + \Delta ef_p \quad (15)$$

式中:  $s_{it}$ 、 $i_t$ 、 $r_t$  分别对应  $\frac{ef_{it}}{ef_t}$ 、 $\frac{ef_t}{\gamma_t}$ 、 $\frac{\gamma_t}{p_t}$ ;  $t$  为年份;  $ef_t$  和  $ef_0$  分别为第  $t$  年和基准年(2007 年)的水资源生态足迹;  $ef_{it}$  为第  $t$  年第  $i$  类(生产生活、工业、生态)水资源的生态足迹;  $\gamma_t$  为第  $t$  年山东省的 GDP;  $p_t$  为第  $t$  年常住人口数;  $s_{it}$  为第  $i$  类水资源占总水资源生态足迹的比重,代表结构效应;  $i_t$  为单位 GDP 水资源生态足迹;  $r_t$  为山东省人均 GDP;  $s_{i0}$ 、 $i_0$ 、 $r_0$ 、 $p_0$  分别为基准年(2007 年)山东省第  $i$  类水资源占总水资源生态足迹的比重、基准年(2007 年)单位 GDP 水资源生态足迹、

基准年(2007年)GDP值和基准年(2007年)常住人口数;  $\Delta ef_i$  为水资源生态足迹变化量,  $\Delta ef_s$ 、 $\Delta ef_i$ 、 $\Delta ef_r$ 、 $\Delta ef_p$  分别代表结构、技术、经济及人口因素所引起的水资源生态足迹变化量。

经过 LMDI 分解的模型<sup>[12]</sup>为

$$\Delta ef_s = \sum_{i=1}^3 \ln \frac{s_{it}}{s_{i0}} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (16)$$

$$\Delta ef_i = \ln \frac{i_t}{i_0} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (17)$$

$$\Delta ef_r = \ln \frac{r_t}{r_0} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (18)$$

$$\Delta ef_p = \ln \frac{p_t}{p_0} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (19)$$

式中:  $ef_{i0}$  为基准年(2007年)第*i*类(生产生活、工业、生态)水资源的生态足迹。

### 3 结果与分析

#### 3.1 资料来源

采用的人口数、水资源总量、年降水量、国内生产总值、2007—2016年用水明细、有机物、氨氮排放量以及山东省各市相关数据等来源于《山东省统计年鉴》和《山东省水资源公报》。

#### 3.2 山东省水生态足迹与水生态承载力计算分析

(1)水资源和水环境账户计算结果分析。根据改进的水生态足迹和承载力模型计算得到山东省2007—2016年人均水资源用水足迹及人均水资源承载力、人均水环境用水足迹及人均水环境承载力,见表1。从表1可以看出,2007—2016年山东省人均N足迹均大于人均COD足迹,说明山东省近年来水环境污染压力主要来自于氮污染;2011—2015年,山东省人均COD、N足迹分别为0.227 0~0.261 7  $\text{hm}^2/\text{人}$ 和0.393 2~0.456 5  $\text{hm}^2/\text{人}$ ,相较其他年份数值明显偏大,可见山东省虽然在“十二五”期间经济迅速发展,但是以持续增长的环境污染为代价的。

表1 山东省2007—2016年人均水生态足迹与承载力

年份	$\text{hm}^2/\text{人}$					
	人均水资源足迹	人均水资源承载力	人均COD足迹	人均COD承载力	人均N足迹	人均N承载力
2007	0.074 65	0.052 65	0.097 8	0.072 6	0.208 3	0.072 5
2008	0.074 36	0.044 47	0.091 7	0.054 5	0.190 1	0.054 5
2009	0.073 98	0.038 33	0.086 9	0.041 0	0.180 8	0.041 0
2010	0.073 96	0.041 11	0.082 4	0.047 7	0.176 5	0.047 7
2011	0.074 04	0.045 95	0.261 7	0.058 5	0.456 5	0.058 4
2012	0.072 93	0.036 05	0.252 3	0.037 7	0.442 8	0.037 7
2013	0.071 31	0.038 18	0.241 2	0.043 0	0.422 1	0.043 0
2014	0.069 79	0.019 32	0.231 4	0.002 7	0.402 9	0.002 7
2015	0.068 81	0.021 79	0.227 0	0.009 0	0.393 2	0.009 0
2016	0.068 52	0.028 22	0.067 8	0.023 6	0.199 4	0.023 6

(2)山东省水生态足迹、水生态承载力分析。根据水生态赤字的计算模型,山东省2007—2016年人均水资源、水环境账户生态赤字和相应变化曲线见图1和图2。根据计算结果,2007—2016年山东省人均水资源生态足迹呈逐渐减小趋势,人均水资源承载力呈波动减小趋势,且下降幅度明显大于生态足迹的,因此人均水资源生态赤字呈波动上升趋势。可以看出,水资源承载力是影响山东省2007—2016年水资源生态赤字变化的主要因素。山东省水资源主要来源于区域降水,而山东省年际降水量波动较大,因此山东省年际水资源承载力波动较大。此外,2007—2016年山东省人均水环境生态赤字的变化规律与人均水环境生态足迹的变化规律一致,说明水环境生态足迹是影响山东省水环境生态赤字变化的主要因素。趋势线显示2011—2015年水环境生态赤字为0.4  $\text{hm}^2/\text{人}$ 左右,区域面临着严重的水环境压力。总体来说,2007—2016年山东省人均水环境生态赤字均大于人均水资源生态赤字,水污染是制约区域发展的主要因素。

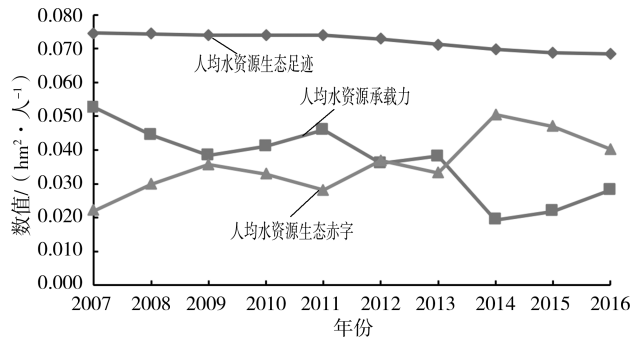


图1 山东省2007—2016年人均水资源生态足迹、承载力和生态赤字变化曲线

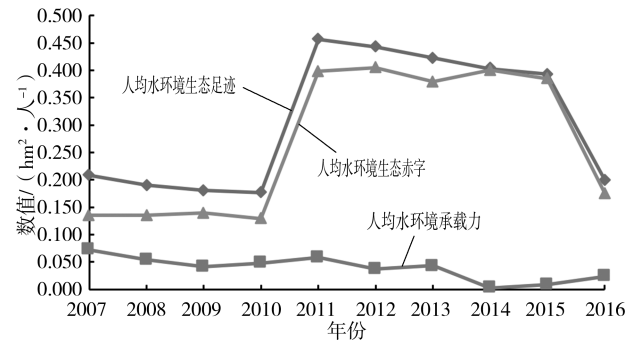


图2 山东省2007—2016年人均水环境生态足迹、承载力和生态赤字变化曲线

根据水生态压力指数的涵义与计算模型,计算得到山东省2007—2016年水生态压力指数,见表2。从表2可以看出,2007—2016年山东省水资源、水环境生态压力指数均大于1,表明山东省现状水资源、水环境处于不安全状态,水资源量越来越难以支撑高速发展的社会经济;从数值上来看,水环境生态压力指数更

为“病态”,2015年压力指数达到了40以上,2014年甚至达到了140以上,说明山东省水污染压力远大于水资源压力,今后的经济发展必须要重视水污染治理、水环境整治工作。

表2 山东省2007—2016年水生态压力指数

年份	$EPI_{WR}$	$EPI_{WE}$	年份	$EPI_{WR}$	$EPI_{WE}$
2007	1.417 9	2.870 9	2012	2.023 0	11.756 5
2008	1.672 4	3.489 1	2013	1.867 8	9.814 9
2009	1.930 1	4.412 8	2014	3.612 9	149.438 8
2010	1.799 2	3.703 9	2015	3.157 9	43.455 9
2011	1.611 4	7.810 2	2016	2.428 2	8.459 5

(3)山东省各市水生态足迹、水生态承载力对比。山东省包括济南、青岛等17个市,2016年人均水资源、水环境赤字计算结果见图3。从图3可以看出,2016年山东省各市人均水环境生态赤字均大于相应的水资源生态赤字。横向对比来看,2016年东营市水资源生态赤字是17个市中最小的,从当年水量数据分析,2016年东营市水资源量是总用水量的50%左右,即区域一半用水来自于其他市的引调水,水资源量稀缺,而区域水资源量是影响水资源生态足迹的关键因素;莱芜市和临沂市的水资源生态赤字较小,这与其用水量占区域水资源总量比例小有关系。水环境生态赤字方面,除青岛市外,2016年山东省各市的赤字都超过了0.10,面临的水环境问题较为严重。

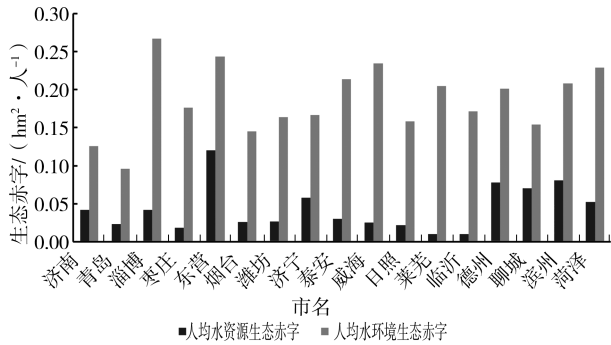


图3 山东省17市2016年人均水资源、水环境生态赤字

(4)基于LMDI的水资源生态足迹模型计算结果。以2007年为基准年,根据基于LMDI的水资源生态足迹分解模型,山东省2007—2016年水资源生态足迹见图4。由图4可知,经济效应、结构效应和人口效应为正值,对水资源生态足迹的增大起正向驱动作用,其中经济效应的驱动作用很强,说明近年来山东省经济的飞速发展导致水资源的需求增加,各方面用水量的增多导致水资源生态足迹增大;结构效应也起到了很强的正向驱动作用,虽然2007—2016年山东省生活、农业生产尤其是农业灌溉用水量呈逐年减小趋势,但由于生产生活用水量基数大,因此其对总的结构效应的影响较小,而近年来山东省工业和服务业的快速发展带来的工业、生态用水量增加导致水资源生态足迹增

大,是结构效应起正向驱动作用的最主要原因;人口效应虽然均为正值,但是数值都在0附近波动,驱动作用最弱;技术效应为负值,对水资源生态足迹的增大起负向驱动效果,且负向驱动的效果呈逐年上升趋势,生产技术的提高是山东省2007—2016年人均水资源生态足迹呈微弱下降趋势的最主要原因,创新技术手段、优化产业结构将成为未来山东省水资源可持续利用的重要保障。

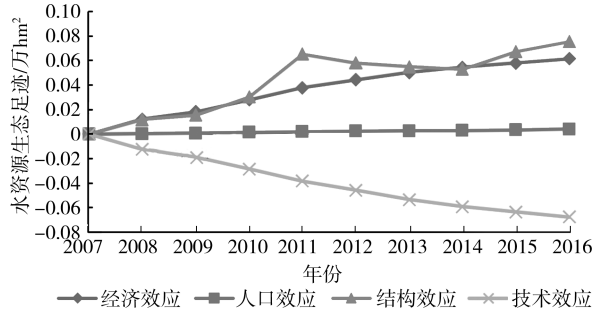


图4 山东省2007—2016年水资源生态足迹分解效应

### 3 结论

(1)2007—2016年山东省人均水资源生态足迹呈逐渐减小趋势,人均水资源承载力呈波动减小趋势且下降幅度明显大于生态足迹的,因此人均水资源生态赤字呈波动上升趋势。此外,2007—2016年山东省人均水环境生态赤字的变化规律与水环境生态足迹的变化规律一致,说明水环境生态足迹是影响近年山东省水环境生态赤字变化的主要因素。总体来说,2007—2016年山东省人均水环境生态赤字均大于水资源生态赤字,水污染是制约区域发展的主要因素。

(2)2007—2016年山东省的水资源、水环境生态压力指数均大于1,表明山东省现状水资源、水环境处于不安全状态,水资源量越来越难以支撑高速发展的社会经济;从数值上来看,水环境生态压力指数更为“病态”。

(3)2016年山东省各市的人均水环境生态赤字均大于相应的水资源生态赤字。横向对比来看,2016年东营市水资源生态赤字是17个市中最小的,莱芜和临沂的水资源生态赤字较小。水环境生态赤字方面,除青岛市外,2016年山东省各市的赤字都超过了0.10,面临的水环境问题较为严重。

(4)由山东省2007—2016年水资源生态足迹分解结果可知,经济效应、结构效应与人口效应对山东省水资源生态足迹增长起正向驱动作用,技术效应对山东省水资源生态足迹增长起抑制作用。

总体来看,山东省水资源总量不足、人均占有量少、水资源地区分布不均匀且年际年内变化剧烈。根据计算结果,山东省水环境污染问题较为严重;此外,

近年来山东省虽然经济发展迅速,但是发展的同时没有处理好与水生态环境保护之间的关系。为了满足社会经济的发展及人民对于水资源需求、水环境改善的迫切愿望,坚持最严格水资源管理制度,重视水资源科学开发与合理利用,探索新型环境与经济双赢的发展模式,实现水资源的可持续利用已刻不容缓。

参考文献:

[1] WAKEMAGEL M, REE W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island, BC, Canada: New Society Publishers, 1996: 3-45.

[2] 范晓秋.水资源生态足迹研究与应用[D].南京:河海大学,2005:3-15.

[3] 洪辉.基于生态足迹法的西安市水资源生态足迹研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007:5-25.

[4] 杨建军,洪辉,付娜,等.水资源生态足迹消费账户及其计算模型:以西安市为例[J].安全与环境学报,2010,10(1):122-126.

[5] 刘子刚,郑瑜.基于生态足迹法的区域水生态承载力研

究:以浙江省湖州市为例[J].资源科学,2011,33(6):1083-1088.

[6] 张义,张合平,李丰生,等.基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J].资源科学,2013,35(8):1601-1610.

[7] 关格格,贾陈忠,秦巧燕.基于水生态足迹的山西省水资源利用研究[J].人民黄河,2017,39(7):96-99.

[8] 金昌盛,邓仁健,刘俞希,等.长江经济带水资源生态足迹时空分析及预测[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):59-66.

[9] 方伟成,孙成访,郭文显.基于LMDI法东莞市水资源生态足迹影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):115-117,123.

[10] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等.水资源生态足迹计算方法[J].生态学报,2008(3):1279-1286.

[11] 潘真真,苏维词,王建伟,等.基于生态系统供给及净化服务功能的贵州省水生态占用研究[J].环境科学学报,2017,37(7):2786-2796.

[12] 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.

【责任编辑 吕艳梅】