

# 基于指数分解法的河南省水资源生态足迹分析

赵自阳<sup>1</sup>, 李王成<sup>1,2,3</sup>, 王霞<sup>1</sup>, 崔婷婷<sup>1</sup>, 程载恒<sup>1</sup>, 刘学智<sup>1</sup>, 王帅<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;

3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**水资源生态足迹模型为水资源可持续利用的综合评价提供了新方向。首先分析了河南省 2005~2014 年间的水资源生态足迹和生态承载力的动态变化, 然后利用指数分解法中的 LMDI 模型对水资源生态足迹的影响因素进行了深入研究。结果表明:(1)2005~2014 年间河南省水资源生态足迹总体稳中有升, 贡献大小依次为农业用水>工业用水>生活用水>生态环境补水;(2)万元 GDP 水资源生态足迹逐年下降, 水资源利用效率不断提高, 但 10 年间均出现不同程度的水资源生态赤字, 水资源利用前景不容乐观;(3)4 种分解因素对水资源生态足迹增长的推动作用大小排序为: 结构效应>经济效应>人口效应>技术效应, 但经济效应有逐渐赶超结构效应的趋势。

**关键词:**河南省; 水资源生态足迹; 生态承载力; LMDI; 因素分解

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2017)04-0057-05

## 1 引言

随着社会的发展, 生态环境问题愈加严峻。为了对地球自然资源的消耗情况进行合理的评价分析, 20 世纪 90 年代初 William E. Rees 和 Mathis Wackernagel 提出了生态足迹模型, 随后在水资源领域得到广泛应用, 并逐渐发展成为基于虚拟水理论的水足迹模型和水资源生态足迹模型<sup>[1]</sup>。其中水资源生态足迹模型由于综合性强和易于操作等优点, 迅速得到推广和应用。但是目前对于水资源生态足迹的研究主要集中在水资源生态足迹账户划分<sup>[2-3]</sup>、水资源生态足迹研究与预测<sup>[4-5]</sup>和水资源生态承载力分析<sup>[6-7]</sup>等几个方面, 而对于更深层次的水资源生态足迹的影响因素研究却比较少。

指数分解法<sup>[8]</sup>的基本思想是将一个目标变量分解为若干个影响因素变量的组合, 从而确定各个因素的影响程度, 最终可以把各种因素对目标变量的贡献区分开来单独研究。本文首先分析了河南省 2005~2014 年间的水资源生态足迹、生态承载力、生态盈余(赤字)和万元 GDP 水资源生态足迹的变化趋势, 然后

利用指数分解法中的 LMDI 模型对水资源生态足迹的影响因素进行了深入研究, 为政府部门衡量水资源利用现状, 科学管理水资源提供依据。

## 2 研究区概况

河南省位于我国中部偏东、黄河中下游地区。全省由南向北平均气温为 15.7~12.1℃, 年均降雨量 532.5~1 380.6mm, 年均日照 1 848.0~2 488.7h。省内河流大多发源于西部、西北部和东南部山区, 流域面积 100km<sup>2</sup> 以上的河流有 493 条。全省多年平均水资源总量 4.05×10<sup>10</sup>m<sup>3</sup>, 居全国第 19 位, 人均水资源占有量不足 420m<sup>3</sup>。

## 3 研究方法

### 3.1 基于水资源生态足迹

#### 3.1.1 水资源生态足迹模型

根据水资源生态足迹的内涵, 将用水分为农业用水、工业用水、生活用水和生态环境补水四大类。水资源生态足迹账户的计算模型<sup>[9]</sup>如下表示:

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51169021, 51569022)

作者简介: 赵自阳(1991-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向为水资源高效利用。E-mail: zyzhao115@163.com

通讯作者: 李王成(1974-), 男, 陕西勉县人, 副教授, 主要研究方向为节水灌溉技术与理论、农业水资源高效利用。E-mail: liwangcheng@126.com

$$EF = \sum_{i=1}^4 EF_i \quad (1)$$

$$EF_i = N \times ef_i = \gamma \times \left[ \frac{W}{p_w} \right] \quad (2)$$

式中:  $i$  为水资源利用类型;  $EF$  为总水资源生态足迹 ( $\text{hm}^2$ );  $EF_i$  为第  $i$  类水资源生态足迹 ( $\text{hm}^2$ );  $N$  为人口数;  $ef_i$  为第  $i$  类水资源人均生态足迹 ( $\text{hm}^2/\text{cap}$ );  $\gamma$  为水资源全球均衡因子;  $W$  为消耗的水资源量 ( $\text{m}^3$ );  $p_w$  为水资源全球平均生产能力 ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )。

### 3.1.2 水资源生态承载力计算模型

水资源生态承载力是指一个地区在一定经济社会和科学技术发展水平下, 区域水资源系统对可持续发展的支撑能力<sup>[10]</sup>。计算模型<sup>[9]</sup>如下:

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times \psi \times \gamma \times \frac{Q}{p_w} \quad (3)$$

式中:  $EC_w$  为水资源承载力 ( $\text{hm}^2$ );  $N$  为人口数;  $ec_w$  为人均水资源承载力 ( $\text{hm}^2/\text{cap}$ );  $\gamma$  为水资源全球均衡因子;  $\psi$  为区域水资源的产量因子;  $Q$  为水资源总量 ( $\text{m}^3$ );  $p_w$  为水资源全球平均生产能力 ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ); 一个地区的水资源中只有 40% 用于人类活动, 因此在水资源生态承载力的计算中要乘以系数 0.4。

### 3.1.3 水资源生态盈余和生态赤字

将区域水资源生态足迹和生态承载力进行比较, 就产生了水资源生态赤字和生态盈余的概念<sup>[11]</sup>。具体如下所示:

$$\text{水资源生态盈余 (赤字)} = EC_w - EF \quad (4)$$

当结果为正时, 为水资源生态盈余, 表明区域水资源良性发展; 当为零时, 为水资源生态平衡; 当小于零时, 为水资源生态赤字, 表明不利于区域可持续发展。

### 3.1.4 万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 水资源生态足迹是指区域水资源生态足迹和当地 GDP 的比值, 主要用于衡量水资源的利用效率, 并且与水资源利用效率成反比<sup>[11]</sup>。如下所示:

$$\text{万元 GDP 水资源生态足迹} = \frac{EF}{\text{GDP}} \quad (5)$$

## 3.2 基于指数分解法

指数分解法<sup>[12-13]</sup>主要分为两种: 一种是以投入产出为基础的结构分解法 (SDA); 另一种是以解聚为基础的指数因素分解法 (IDA)。其中 IDA 法又可以分为基于 Laspeyres 因素分解法和基于 Divisia 因素分解法两种。其中对数平均 Divisia 因素分解法 (LMDI) 能够

有效地解决分解过程中出现的“0”值和残差情况, 所以应用的最为广泛。本文利用 LMDI 模型构建水资源生态足迹指数分解模型如下:

$$ef_t = \sum_{i=1}^4 ef_{it} = \sum_{i=1}^4 \frac{ef_{it}}{ef_t} \cdot \frac{ef_t}{y_t} \cdot \frac{y_t}{p_t} \cdot p_t \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta ef_t = ef_t - ef_0 &= \sum_{i=1}^4 s_{it} i_t r_t p_t - \sum_{i=1}^4 s_{i0} i_0 r_0 p_0 \\ &= \Delta ef_s + \Delta ef_i + \Delta ef_r + \Delta ef_p \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $s_{it} = \frac{ef_{it}}{ef_t}$ ,  $i_t = \frac{ef_t}{y_t}$ ,  $r_t = \frac{y_t}{p_t}$ ;  $ef_{it}$  为第  $t$  时期第  $i$  类水资源生态足迹 ( $\text{Mhm}^2$ );  $ef_t$  为第  $t$  时期水资源总生态足迹 ( $\text{Mhm}^2$ );  $y_t$  为第  $t$  时期国内生产总值 GDP ( $10^4$  元);  $p_t$  为第  $t$  时期的常住人口数 ( $10^4$  人);  $s_{it}$  为第  $t$  时期第  $i$  类水资源利用占总水资源生态足迹的比重, 代表的是结构效应;  $i_t$  为第  $t$  时期单位 GDP 水资源生态足迹, 代表技术效应;  $r_t$  为第  $t$  时期人均 GDP, 代表的是经济效应;  $p_t$  代表的是人口效应;  $\Delta ef$  为总水资源生态足迹变化量 ( $\text{Mhm}^2/\text{a}$ );  $ef_t$ 、 $ef_0$  分别代表第  $t$  年和基准年的水资源生态足迹 ( $\text{Mhm}^2$ );  $\Delta ef_s$ 、 $\Delta ef_i$ 、 $\Delta ef_r$ 、 $\Delta ef_p$  分别表示水足迹结构因素、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 ( $\text{Mhm}^2/\text{a}$ )。

利用 LMDI 分解法对上式进行分解, 结果如下所示:

$$\Delta ef_s = \ln \frac{s_{it}}{s_{i0}} \sum_{i=1}^4 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (8)$$

$$\Delta ef_i = \ln \frac{i_t}{i_0} \sum_{i=1}^4 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (9)$$

$$\Delta ef_r = \ln \frac{r_t}{r_0} \sum_{i=1}^4 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (10)$$

$$\Delta ef_p = \ln \frac{p_t}{p_0} \sum_{i=1}^4 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (11)$$

## 3.3 模型中相关参数的确定

本文所需的参数主要为水资源全球均衡因子  $\gamma$ 、区域水资源的产量因子  $\psi$  和水资源全球平均生产能力  $p_w$ 。本文根据黄林楠<sup>[9]</sup>的研究, 取水资源全球均衡因子为 5.19, 区域水资源产量因子为 0.78, 水资源全球平均生产能力为  $3140 \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

## 3.4 数据来源

本文中计算所需的数据来源于 2006~2015 年的《河南省统计年鉴》和 2005~2014 年的《河南省水资源公报》。

4 结果与分析

4.1 基于水资源生态足迹

对河南省 2005~2014 年间的水资源生态足迹进行计算,计算结果见表 1 和图 1。从中可以看出,在农业用水、工业用水、生活用水和生态环境补水四类水资源生态足迹中,农业用水生态足迹占据绝大部分,

2005~2014 年间平均为 21.28Mhm<sup>2</sup>,年均占有率为 57.62%,2006 年甚至达到了 65.44%。其次为工业用水和生活用水,年均水资源生态足迹分别为 8.89Mhm<sup>2</sup>和 5.68Mhm<sup>2</sup>,年均占有率分别为 24.09%和 15.48%。而生态环境补水生态足迹最少,年均水资源生态足迹为 1.05Mhm<sup>2</sup>,年均占有率仅为 2.81%。

河南省总水资源生态足迹历年都会有所变化,但总

表1 2005~2014年河南省历年水资源生态足迹  
Table1 The water resources ecological footprint in Henan province from 2005 to 2014

年份	农业用水生态 足迹/Mhm <sup>2</sup>	工业用水生态 足迹/Mhm <sup>2</sup>	生活用水生态 足迹/Mhm <sup>2</sup>	生态补水生态 足迹/Mhm <sup>2</sup>	总水资源生态 足迹/Mhm <sup>2</sup>	水资源生态承 载力/Mhm <sup>2</sup>	水资源生态盈 余(赤字)/Mhm <sup>2</sup>	万元 GDP 生态 足迹/10 <sup>-3</sup> hm <sup>2</sup>
2005	18.94	7.56	6.20	0.00	32.70	28.80	-3.89	3.82
2006	24.55	7.99	4.33	0.65	37.52	16.59	-20.92	3.54
2007	19.85	8.73	5.16	0.85	34.59	23.99	-10.60	2.80
2008	20.85	8.50	6.97	1.29	37.61	19.16	-18.45	2.51
2009	22.82	8.84	5.91	1.04	38.63	17.05	-21.58	2.14
2010	20.76	9.18	5.97	1.21	37.13	27.58	-9.54	1.91
2011	21.59	9.39	5.18	1.70	37.86	16.91	-20.95	1.64
2012	22.40	10.00	5.29	1.75	39.44	13.69	-25.75	1.46
2013	22.40	10.05	5.50	1.11	39.05	11.10	-27.95	1.21
2014	18.63	8.69	6.34	0.94	34.59	14.61	-19.98	0.99

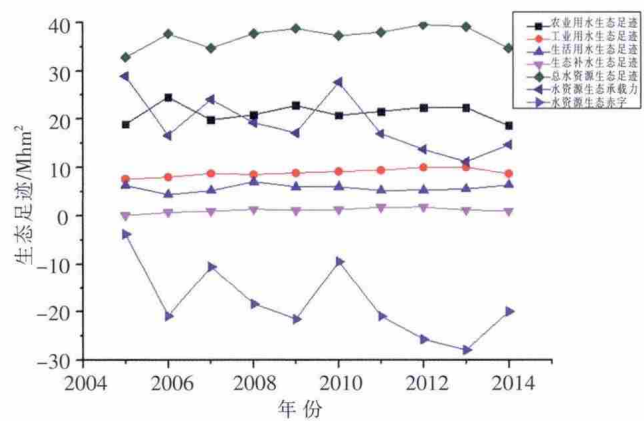


图1 2005~2014 年河南省水资源生态足迹变化趋势图  
Fig.1 The variation of the water resources ecological footprint in Henan province from 2005 to 2014

体上呈缓慢上升趋势。2005 年最低为 32.70Mhm<sup>2</sup>,2012 年达到历年最高值 39.44Mhm<sup>2</sup>,增幅为 20.65%。从构成来看,农业用水生态足迹在 2012 和 2013 年达到次大值,都为 22.40Mhm<sup>2</sup>;在 2014 年达到最小值,为 18.63Mhm<sup>2</sup>。河南省农业用水生态足迹整体上处于稳定趋势,这主要是由于河南省是一个农业大省,农业居于领导地位。对于工业用水生态足迹,最大值出现在

2013 年,为 10.05Mhm<sup>2</sup>,最小值出现在 2005 年,为 7.56Mhm<sup>2</sup>;随着河南省近些年经济的快速发展,工业用水生态足迹整体上处于上升趋势。对于生活用水生态足迹,2005~2014 年间始终保持在 4Mhm<sup>2</sup>~7Mhm<sup>2</sup>之间,整体处于一种相对稳定状态。对于生态环境补水生态足迹,则呈现先上升后下降的趋势,2006~2012 年间由 0.6Mhm<sup>2</sup>增加到 1.75Mhm<sup>2</sup>,上升了 2.7 倍;而 2012~2014 年间则下降到了 0.94Mhm<sup>2</sup>,相对于河南省日益严重的环境污染问题,一定要大力加强生态环境补水。

水资源生态承载力直接反映一个区域水资源拥有量的情况。2005~2014 年间,河南省水资源生态承载力和降雨量呈极显著的正相关关系,相关系数达到了 0.9255,表明水资源承载力受这一自然因素的影响较大。10 年间,水资源生态承载力最大出现在 2005 和 2010 年,分别为 28.80Mhm<sup>2</sup>和 27.58Mhm<sup>2</sup>;水资源生态承载力最小则出现在 2013 和 2012 年,分别为 11.10Mhm<sup>2</sup>和 13.69Mhm<sup>2</sup>。万元 GDP 水资源生态足迹与水资源的利用效率呈反比,2005~2014 年间河南省万元 GDP 水资源生态足迹稳定下降,2005 年最大为

$3.82 \times 10^{-5} \text{hm}^2$ , 2014 年最小为  $0.99 \times 10^{-5} \text{hm}^2$ , 下降了 74.08%, 表明河南省 10 年间水资源利用效率稳步提高。但河南省水资源生态盈余(赤字)在 2005~2014 年间均为负值, 表明不利于可持续发展。其中赤字最大和最小出现在 2013 年和 2005 年, 分别为  $-27.95 \text{Mhm}^2$  和  $-3.89 \text{Mhm}^2$ , 差距达到 7.19 倍。经济的发展不应牺牲生态环境, 河南省政府部门应该大力调整产业结构, 实现生态与经济的和谐发展。

#### 4.2 基于指数分解法

为了深入研究影响水资源生态足迹变化的内部原因, 运用指数分解法中的 LMDI 模型对河南省水资源生态足迹进行因素分解, 并对变化趋势进行研究。由表 2 和图 2 可知, 结构效应和经济效应为正值, 表示对河南省水资源生态足迹的增长起到了正效应, 并且结构效应起到的作用最大, 经济效应次之; 技术效应为负值, 表明对河南省水资源生态足迹的增长起到负效应。方伟成<sup>[12]</sup>对东莞市水资源生态足迹的研究也得到相似结论。

由于各个行业用水量差别显著, 结构效应在河南省水资源生态足迹增长的过程中占据主导地位, 累积贡献率达到 811.22%。2006~2012 年间整体呈现高速增长模式, 2009 年由于受到全球经济危机的影响, 导致到 2010 年相对下降, 但下降幅度不大。从 2013 年开始, 由于河南省政府出台了一系列经济发展的新政策, 结构效应的影响下降, 经济效应的影响逐渐超过结构效应。

表2 2006~2014年河南省水资源生态足迹分解效应

Table2 The unpacking effect of the water resources ecological footprint in Henan province from 2006 to 2014

年份	结构效应	技术效应	经济效应	人口效应
2006	0	0	0	0
2007	17.99	-7.64	5.48	-0.09
2008	41.47	-14.80	14.74	0.16
2009	41.11	-25.10	26.23	0.59
2010	38.81	-25.76	25.27	0.06
2011	42.62	-28.90	29.26	-0.02
2012	42.91	-31.44	33.29	0.06
2013	34.48	-42.36	44.12	0.10
2014	16.76	-21.42	19.78	0.09

经济效应在河南省水资源生态足迹的变化中起着重要作用。与结构效应相似, 2006~2013 年间经济效应整体呈现高速增长模式, 2013 年更是达到历年最大值

$44.12 \text{Mhm}^2$ , 年均增长率达到 117.44%, 2014 年有所回落为  $19.78 \text{Mhm}^2$ 。2006~2014 年间整体经济效应的累计贡献率达到 591.22%, 更是在 2013 年之后年超过结构效应。这主要是由于近几年河南省经济高速发展, 从而对水资源的需求逐渐增加。

人口效应在河南省水资源生态足迹的增长中起到一定的作用, 但效果不显著。2006~2014 年间, 人口效应与常住人口增长率之间的相关系数为 0.58, 表明人口效应与常住人口增长率之间有着一定的相关关系。2007 年和 2011 年的河南省常住人口增长率为负, 所以人口效应也为负。从总体看, 河南省人口效应相对稳定, 一直在  $-0.1 \text{Mhm}^2 \sim 0.6 \text{Mhm}^2$  之间波动。人口效应虽然对水资源生态足迹的影响不明显, 但河南省是作为人口大省, 人口效应产生的影响必须重视。

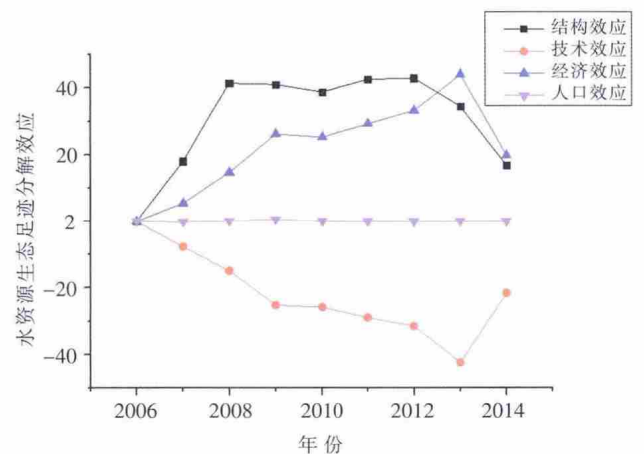


图2 2006~2014 年河南省水资源生态足迹分解效应图

Fig.2 The unpacking effect of the water resources ecological footprint in Henan province from 2006 to 2014

2006~2014 年间技术效应对河南省水资源生态足迹有着显著的抑制作用, 且抑制作用明显增强, 由 2007 年的  $-7.64 \text{Mhm}^2$  到 2013 年的  $-42.36 \text{Mhm}^2$ , 累积贡献率为  $-604.71\%$ , 仅次于结构效应的累计贡献率。而技术效应的年增长率先降后升, 2008 年增长率最大为 93.73%, 2010 年的增长率最低为 2.6%, 之后逐渐升高到 2013 年的 34.74%, 平均年增长率达到 75.8%。虽然技术效应对河南省水资源生态足迹起着明显的负效应, 但河南省整体的水资源生态足迹还是稳中有升。

## 5 结论

水资源生态足迹主要是用来评价一个地区的可



持续发展状况。河南省 2005~2014 年间,随着经济的不断发展,水资源生态足迹不断上升,对水资源的需求量也不断提高。其中对水资源生态足迹的贡献大小依次为农业用水、工业用水、生活用水和生态环境补水,这也与河南省农业大省的现状相符合。水资源生态承载力与降雨量密切相关,相关系数为 0.9255,万元 GDP 水资源生态足迹逐年下降,水资源利用效率不断提高,但 10 年间均出现不同程度的水资源生态赤字,水资源利用前景不容乐观。为了实现经济社会的可持续发展,应该不断优化水资源的利用效率和增加生态环境补水的力度。

在水资源生态足迹分解因素方面,结构效应对水资源生态足迹的增长起着主导作用;经济效应和人口效应对水资源生态足迹有着重要影响,尤其是经济效应在近几年逐渐赶超结构效应;而技术效应则与水资源生态足迹负相关,是抑制水资源生态足迹的关键。为了实现水资源的科学管理和有效利用,可以采取多种形式的水资源供给来确保水资源总量的相对稳定,减轻外界条件对水资源的影响。同时调整产业结构,在保持农业在经济发展中领导地位的同时,不断加大第二产业在产业结构中的比重,以实现水资源的可持续利用,使水资源生态足迹良性发展。

#### 参考文献:

- [1] 马晶,彭建.水足迹研究进展[J]. 生态学报, 2013,33(18):5458-5466. (MA Jing, PENG Jian. Research progress on water footprint [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(18):5458-5466. (in Chinese))
- [2] 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. (ZHANG Yi, ZHANG Heping, LI Fengsheng, et al. Dynamic analysis of the water resource ecological footprint of Guangxi based on an improved mode [J]. Resources Science, 2013,35(8):1601-1610. (in Chinese))
- [3] 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. (YANG Jianjun, HONG Hui, FU Na, et al. Water resource consumption statistics and calculation model for eco-environment footprint: a case study of Xi'an city [J]. Journal of Safety and Environment, 2010,10(1):122-126. (in Chinese))
- [4] 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. (TAN Xiujuan, ZHENG Qinyu. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(7):3559-3568. (in Chinese))
- [5] 李玉平,王晓妍,朱琛,等. 邢台市水资源生态足迹核算与预测研究[J]. 水土保持研究, 2014,21(3):227-230. (LI Yuping, WANG Xiaoyan, ZHU Chen, et al. Research for calculation and prediction of water resource ecological footprint in Xingtai city, Hebei province [J]. Research of Soil Water Conservation, 2014,21(3):227-230. (in Chinese))
- [6] 张建龙,冯慧敏. 基于生态足迹法的山西省水资源承载力研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2013,4 (1):61-65. (ZHANG Jianlong, FENG Huimin. Water resources carrying capacity in Shanxi province based on ecological footprint method [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2013,4(1):61-65. (in Chinese))
- [7] 陈栋为,陈晓宏,孔兰. 基于生态足迹法的区域水资源生态承载力计算与评价—以珠海市为例[J]. 生态环境学报, 2009,18(6):2224-2229. (CHEN Dongwei, CHEN Xiaohong, KONG Lan. The calculations and analysis of regional ecological water resources carrying capacity based on ecological footprint analysis method [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(6):2224-2229. (in Chinese))
- [8] 郭彩霞,绍超峰,鞠美庭. 天津市工业能源消费碳排放量核算及影响因素分解[J]. 环境科学研究, 2012,25(2):232-239. (GUO Caixia, SHAO Chaofeng, JU Meiting. Carbon emission accounting and decomposition analysis of energy consumption in the industrial sub-sectors of Tianjin city [J]. Research of Environmental Science, 2012,25(2):232-239. (in Chinese))
- [9] 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, 2008,28(3):1279-1286. (HUANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(3):1279-1286. (in Chinese))
- [10] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念机研究方法的探讨 [J]. 地理学报, 2010,65 (1):82-90. (DUAN Chunqing, LIU Changming, CHEN Xiaonan, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method [J]. Acta Geographica Sinica, 2010,65(1):82-90. (in Chinese))
- [11] 孟丽红,叶志平,袁素芬,等. 江西省 2007-2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J]. 水土保持通报, 2015,35(1):256-261. (MENG Lihong, YE Zhiping, YUAN Sufen, et al. Dynamic characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Jiangxi province during 2007-2011 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(1):256-261. (in Chinese))
- [12] 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. (FANG Weicheng, SUN Chengfang, GUO Wenxian. Analysis of influence factor of water resources ecological footprint in Dongguan based on LMDI method [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015,26(3):115-117+123. (in Chinese))
- [13] 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, 2013. (XU Junwei. Study on the Factors of China's Carbon Dioxide Emissions Based on LMDI [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2013. (in Chinese))

(下转第 51 页)

- 源科学, 2014,36(2):334-341. (MA Hailiang, XU Jia, WANG Pucha. Resource utilization and China's urbanization [J]. Resources Science, 2014,36(2):334-341. (in Chinese))
- [12]宋国君,何伟. 中国城市水资源利用效率标杆研究[J]. 资源科学, 2014,36(12):2569-2577. (SONG Guojun, HE Wei. Benchmarking of city water resource utilization efficiency in China [J]. Resources Science, 2014,36(12):2569-2577. (in Chinese))
- [13]高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2013,33(3):776-784. (GAO Yuanyuan, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. New model for water use efficiency evaluation of China and its application [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013,33(3):776-784. (in Chinese))
- [14]韩雅清,苏时鹏. 福建省水资源利用效率的静态与动态分析—基于 DEA-BCC 和 DEA-Malmquist 两步法[J]. 资源开发与市场, 2015,31(5):578-583. (HAN Yaqing, SU Shipeng. Static and dynamic analysis on water use Efficiency of Fujian Province - based on DEA-BCC and DEA-Malmquist model [J]. Resource Development & Market, 2015,31(5):578-583. (in Chinese))
- [15]张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2009. (ZHANG Defeng. MATLAB Neural Network Design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009. (in Chinese))

## Water Resources Utilization in Urbanization Progress of Chengdu City

PAN Xueqian, ZHAO Lu, SUN Juying, SUN Linbo, LI Ling, LEI Xiaozhang

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** According to the water balance analysis, the available total local water resources quantity is  $91.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ . The study was made on water consumption, utilization efficiency of water resources and its influence factors. The results show that the cumulative distribution curve of the utilization efficiency of water resources was V-shape from 2000 to 2014 in Chengdu, Sichuan Province and the utilization efficiency reached the lowest in 2009. Urbanization has obvious negative correlation on the utilization efficiency of water resources, while the development of industrialization and economic level can contribute to the utilization efficiency. By the analysis of water consumption structure, it can be concluded that urbanization has little effect on agricultural water consumption, mainly because Chengdu is rich of water resources. It is not obvious to occupy agricultural water consumption with the development of urbanization and industrialization. The water requirements in Chengdu was predicted to be  $40.02 \times 10^8 \text{ m}^3$  applying BP neural network, and the total local water resources quantity can meet the requirements in the study area.

**Key words:** water resources; wavelet analysis; utilization efficiency; urbanization; water consumption structure; IPAT Model

(上接第 61 页)

## Analysis of Water Resources Ecological Footprint in Henan Based on Index Factorizing Method

ZHAO Ziyang<sup>1</sup>, LI Wangcheng<sup>1,2,3</sup>, WANG Xia<sup>1</sup>, CUI Tingting<sup>1</sup>, CHENG Zaiheng<sup>1</sup>, LIU Xuezhi<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>

(1. Department of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Water-saving Irrigation and Water Resources Regulation and Control Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Water resources ecological footprint model offers a new method for evaluating the sustainable utilization of water resources. This study firstly analyzed the water resources ecological footprint and the ecological carrying capacity of water resources in the years from 2005 to 2014. And then used LMDI method to analyze that impact the water resources ecological footprint. The result show that The total water resources ecological footprint increased and the contribution size could be ranked as agricultural water > industrial water > domestic water > ecological water during 2005-2014. The water resources ecological footprint of ten thousand Yuan GDP is decreased year by year, which indicates that the water resources efficiency is increasing. But there is different levels of ecological deficit in the past 10 years, the water resources utilization prospect is still not optimistic. The contribution order of four index factorizes for water ecological footprint is as follows: water footprint structure effect > economic effect > population effect > technical effect, and the economic effect has a tendency to catch up the structure effect.

**Key words:** Henan Province; water resources ecological footprint; ecological capacity; LMDI; factor decomposition