

基于生态足迹的广西广西壮族自治区水资源生态特征 时空变化规律及其驱动因素分析

莫崇勋^{1,2,3}, 赵梳垭^{1,2,3}, 阮俞理^{1,2,3}, 莫细喜^{1,2,3}, 孙桂凯^{1,2,3}, 黄亚^{1,4}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构

安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室,

广西 南宁 530004; 4. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: [目的] 分析近 10 a 来广西壮族自治区水资源生态特征的时空变化规律, 探讨水资源生态足迹变化的驱动因素, 为该区或同类区域的水资源合理开发与利用管理提供参考依据。[方法] 基于生态足迹模型中的水资源生态足迹、水资源生态承载力及水资源生态容量指标分析 2008—2017 年广西壮族自治区水资源生态特征的时空变化规律, 并采用 LMDI 模型分析生态足迹变化的驱动因素及各地级市在关键驱动因素上的贡献比例。[结果] ①广西壮族自治区人均水资源生态足迹整体呈下降趋势, 平均下降速率为 $-0.0174 \text{ hm}^2/(\text{人} \cdot \text{a})$, 人均水资源生态承载力和生态容量整体呈波动上升趋势, 平均上升速率分别为 $0.3246 \text{ hm}^2/(\text{人} \cdot \text{a})$, $0.3421 \text{ hm}^2/(\text{人} \cdot \text{a})$, 三者空间上均呈一定的差异性和不平衡性; ②经济效应、人口效应是拉动该区水资源生态足迹增长的第一、第二因素, 贡献效率分别为 191.8%, 25.38%, 技术效应、结构效应是抑制水资源生态足迹增长的第一、第二因素, 贡献效率分别为 -238.0% , -79.18% ; ③南宁市、桂林市在结构效应和技术效应上对减少水资源生态足迹的空间贡献比例最大。[结论] 广西壮族自治区水资源生态容量处于生态盈余状态, 该区的水资源利用效率逐渐提高, 水资源开发局势整体向好。但城市发展与规划存在较大差异, 需因地制宜地采取对策。

关键词: 生态足迹; LMDI 模型; 水资源; 时空变化; 驱动因素; 广西壮族自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0297-06

中图分类号: TV213.4, X826

文献参数: 莫崇勋, 赵梳垭, 阮俞理, 等. 基于生态足迹的广西壮族自治区水资源生态特征时空变化规律及其驱动因素分析[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 297-302. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.042; Mo Chongxun, Zhao Shutan, Ruan Yuli, et al. Spatial-temporal variation of water ecological characteristics of Guangxi Zhuang Autonomous Region and its driving factors based on ecological footprint model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 297-302.

Spatial-temporal Variation of Water Ecological Characteristics of Guangxi Zhuang Autonomous Region and Its Driving Factors Based on Ecological Footprint Model

Mo Chongxun^{1,2,3}, Zhao Shutan^{1,2,3}, Ruan Yuli^{1,2,3}, Mo Xixi^{1,2,3}, Sun Guikai^{1,2,3}, Huang Ya^{1,4}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi

530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of

Engineering Safety, Nanning, Guangxi 530004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and

Engineering Safety, Nanning, Guangxi 530004, China; 4. China State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Catchment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variations of the water ecological characteristics of Guangxi Zhuang Autonomous Region in recent 10 years, and the driving factors of the water ecological footprint changes were studied in order to provide reference for the rational development, utilization and management

收稿日期: 2020-06-16

修回日期: 2020-07-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“土石坝水库汛期分期调度与防洪安全风险评估研究”(51569003), “基于长短期优化调度嵌套的西南岩溶区流域水库智能调度决策研究”(51969004); 广西自然科学基金资助项目(2017GXNSFAA198361); 广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2019022; YCBZ2018023)

第一作者: 莫崇勋(1974—), 男(壮族), 广西壮族自洽区忻城县人, 博士, 博士生导师, 主要从事水文与水资源方面的研究。Email: 513882593@qq.com.

通讯作者: 阮俞理(1992—), 男(壮族), 广西壮族自洽区南宁市人, 博士研究生, 研究方向为水文与水资源。Email: yuliruan777@163.com.

of water resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region or similar regions. [Methods] Based on the water resources consumption ecological footprint, water resources ecological carrying capacity and water ecological capacity indexes in the ecological footprint model, the temporal and spatial variations of the water ecological characteristics in the study area from 2008 to 2017 were analyzed. LMDI model was used to analyze the driving factors of the ecological footprint changes and the contribution rate of each prefecture-level city in the key driving factor. [Results] ① The ecological footprint of water resources per capita presented an overall downward trend, with an average decline rate of $-0.0174 \text{ hm}^2 / (\text{person} \cdot \text{year})$. The water resources ecological carrying capacity and water resources ecological capacity showed a fluctuating upward trend, with the average rising rate of $0.3246 \text{ hm}^2 / (\text{person} \cdot \text{year})$ and $0.3421 \text{ hm}^2 / (\text{person} \cdot \text{year})$ respectively. All of them showed a certain differences and imbalances in space. ② Economic effect and population effect were the first and second factors to promote the growth of the water ecological footprint in the study area, contributing efficiency of 191.8% and 25.38% respectively. Technical effect and structural effect were the first and second factors restraining the water ecological footprint growth, with contributing efficiency of -238.0% and -79.18% respectively. ③ Nanning City and Guilin City contributed the most to reduce the water resources consumption ecological footprint in terms of structural effect and technical effect. [Conclusion] The ecological capacity of water resources in Guangxi Zhuang Autonomous Region was in an ecological surplus state. However, great differences existed among different cities in urban development and planning, so countermeasures should be taken according to local conditions.

Keywords: ecological footprint; LMDI model; water resources; temporal and spatial variation; driving factors; Guangxi Zhuang Autonomous Region

水资源生态特征时空变化规律及其驱动因素是当前水文水资源学科领域关注的热点之一^[1]。生态足迹模型因具有概念直观、操纵性强、区域可比性强等优点^[2-3]而被广泛运用于水资源生态特征时空变化规律研究,可用于客观地揭示自然资本与经济发展间的关系,如张洺也和赵春子^[4]采用该模型将水资源划分为生活、生产、生态子账户,并结合压力指数、泰尔指数分析了延边州的水资源生态环境;WANG等^[5]采用结合了均匀均衡和收益因子的改进生态足迹模型,分析了湖北省的水资源可持续利用状况;Li H.等^[6]采用结合土壤水分的改进生态足迹法,分析了黄河下游的水资源综合利用情况。已有研究侧重于从水资源生态足迹的账户划分及预测出发,对其驱动因素的研究相对较少。同时,目前用于定量分析资源利用驱动机制的主要方法有结构分解法(SDA)和指数分解法(IDA)^[7],其中IDA中的迪氏指数分解模型(LMDI)具有更好消除分解因素残差^[8],达到降低结果误差的优点,已被广泛应用于研究能源和水资源的驱动因素^[9-11]。上述研究主要集中在干旱^[1,12]、半干旱^[4,13]及经济发达地区^[14-15],而对于水资源丰富、经济落后地区的研究相对较少。广西壮族自治区地处我国西南边疆,降水丰沛的同时面临着水资源时空分布不均且局部地区干旱和洪涝日益加剧、区内生态—经济用水不协调的问题^[16]。以往针对广西水资源生态特征的研究,侧重于全区^[17]或某一城市^[18-19]在时

间序列上的变化,而鲜少涉及到地区差异性及其驱动因素的分析。因此,论文基于生态足迹模型分析广西地区水资源生态足迹、水资源生态承载力、水资源生态容量的时空变化规律,在此基础上采用LMDI模型分析引起生态足迹变化的驱动因素及各地级市在关键驱动因素上的贡献比例,以期为广西或同类区域水资源合理开发利用与管理保护提供参考依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 水资源生态足迹模型

(1) 水资源生态足迹(EF_w)为水资源生态足迹模型中用于衡量水资源消耗状况的指标,是指某一区域在某一时间段内,人类为维系正常生产生活所需占用的水资源生态生产性用地面积,可用于反映现有水资源的可持续性及其对生态系统的施压状况。

$$EF_w = N \cdot ef_w = N \cdot \gamma_w \cdot [W/P_w] \quad (1)$$

式中: EF_w 水资源总生态足迹(10^8 hm^2); N 为人口数(10^4 人); ef_w 为人均水资源生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); γ_w 为水资源的全球均衡因子; W 为人均水资源消耗量($\text{m}^3/\text{人}$); P_w 为水资源全球平均生产能力(m^3/hm^2)。根据黄林楠和张伟新^[20]基于WWF 2000对全球范围水资源生态足迹模型内关键参数的核算结果, γ_w 取 5.19, P_w 取 $3140 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

(2) 水资源生态承载力(EC_w)为水资源生态足迹模型中用于衡量水资源供给状况的指标,是指某一

区域在某一时间段内水资源最大供给量所能维系该区域资源、环境及社会可持续发展的能力。引入了产量因子的概念,使水资源生态生产性面积具备区域可比性,可用于反映不同区域间现有水资源对生态系统的支撑状况。计算公式为:

$$EC_w = N \cdot ec_w = 0.4 \times \Psi \cdot [Q/P_w] \quad (2)$$

式中: EC_w 为水资源生态承载力(10^8 hm^2); N 为人口数(10^4 人); ec_w 为人均水资源生态承载力($\text{hm}^2/\text{人}$); Ψ 为区域水资源产量因子; Q 为区域水资源总量(10^8 m^3); P_w 为水资源全球平均生产能力(m^3/hm^2)。

(3) 水资源生态容量(Budget)为水资源生态足迹模型中用于衡量水资源供需状况的指标,由水资源生态承载力与水资源生态足迹两者间的差值直接表示,可用于反映现有水资源供需的客观状况及区域的生产生活是否属于该区域生态系统可承载的范围。计算如下:

$$\text{Budget} = EC_w - EF_w = N \times (ec_w - ef_w) \quad (3)$$

式中:Budget 为水资源生态容量(10^8 hm^2),根据与 0 的大小关系划分水资源生态处境为水资源生态盈余、水资源生态平衡或水资源生态赤字^[18]。

1.2 LMDI 模型

借鉴 Kaya 恒等式在能源因素分解中的应用,运用迪氏指数分解法(LMDI)^[21] 构建广西地区水资源生态足迹 LMDI 分解模型,具体模型为^[13]:

$$\begin{aligned} EF_w &= \sum_i \sum_j \frac{EF_{w_{ij}}}{EF_{w_i}} \times \frac{EF_{w_i}}{T_j} \times \frac{T_j}{P_j} \times P_j \\ &= \sum_i \sum_j S_{ij} I_j G_j P_j \end{aligned} \quad (4)$$

式中: EF_w 为广西水资源生态总足迹(10^8 hm^2); i 为水资源生态足迹账户类型; $EF_{w_{ij}}$ 为 j 地区 i 账户的水资源生态足迹(10^8 hm^2); T_j 为 j 地区国民生产总值(10^8 元); P_j 为 j 地区年人口总数(10^4 人),代表人口发展水平; S_{ij} 为 j 地区第 i 类用水生态足迹对总用水生态足迹的占比,代表 j 地区用水结构; I_j 为 j 地区单位国民生产总值的水资源生态足迹($\text{hm}^2/\text{元}$),代表 j 地区的技术发展水平; G_j 为 j 地区人均国民生产总值(10^4 元/人),代表 j 地区的经济发展水平。

$$\Delta EF_w = EF_w^t - EF_w^0 = \Delta S + \Delta I + \Delta G + \Delta P \quad (5)$$

$$\Delta S = \sum_i \sum_j \frac{EF_{w_{ij}}^t - EF_{w_{ij}}^0}{\ln(EF_{w_{ij}}^t / EF_{w_{ij}}^0)} \times \ln \frac{S_{ij}^t}{S_{ij}^0} \quad (6)$$

$$\Delta I = \sum_i \sum_j \frac{EF_{w_{ij}}^t - EF_{w_{ij}}^0}{\ln(EF_{w_{ij}}^t / EF_{w_{ij}}^0)} \times \ln \frac{I_j^t}{I_j^0} \quad (7)$$

$$\Delta G = \sum_i \sum_j \frac{EF_{w_{ij}}^t - EF_{w_{ij}}^0}{\ln(EF_{w_{ij}}^t / EF_{w_{ij}}^0)} \times \ln \frac{G_j^t}{G_j^0} \quad (8)$$

$$\Delta P = \sum_i \sum_j \frac{EF_{w_{ij}}^t - EF_{w_{ij}}^0}{\ln(EF_{w_{ij}}^t / EF_{w_{ij}}^0)} \times \ln \frac{P_j^t}{P_j^0} \quad (9)$$

式中: ΔEF_w 为水资源生态足迹在从基准年到目标年

间的变化量($10^8 \text{ hm}^2/\text{a}$); $\Delta S, \Delta I, \Delta G, \Delta P$ 分别为结构效应、技术效应、经济效应和人口效应($10^8 \text{ hm}^2/\text{a}$),是指水资源生态足迹中由于结构因素、技术因素、经济因素和人口因素引起的水资源生态足迹变化量,通过 LMDI 加和分解即公式(6)~(7)进行计算。

1.3 数据来源

研究数据包括广西各地级市人口数、国民生产总值、水资源总量及用水账户明细,人口数和国民生产总值来源于《广西统计年鉴》(2008—2017 年);各地级市的水资源总量及用水数据来源于《广西水资源公报》(2008—2017 年)。其中,国民生产总值以 2008 年为基期进行实际国民生产总值的计算,以消除价格波动对计算的误差影响。

2 结果与分析

2.1 水资源生态特征时间变化规律

2008—2017 年广西地区的水资源生态特征表现为水资源生态足迹整体下降,水资源生态承载力和水资源生态容量历年波动整体上升(图 1),对历年结果做线性趋势拟合可知:人均水资源生态足迹的平均下降速率为 $-0.0174 \text{ hm}^2/\text{人}$,其中,2013—2017 年呈现较大的下降幅度;人均水资源生态承载力的总上升量达 $0.116 \text{ hm}^2/\text{人}$,平均上升速率为 $0.325 \text{ hm}^2/(\text{人} \cdot \text{a})$,最高值出现在 2008 和 2015 年,分别达到 $9.139, 9.513 \text{ hm}^2/\text{人}$,最小值出现在 2011 年,为 $3.109 \text{ hm}^2/\text{人}$,最值间相差 6.404 ;人均水资源生态容量的平均上升速率为 $0.3421 \text{ hm}^2/(\text{人} \cdot \text{a})$,最高值出现在 2008 年和 2015 年,达到 8.124 和 $8.617 \text{ hm}^2/\text{人}$,最小值出现在 2011 年,为 $2.146 \text{ hm}^2/\text{人}$,最值间相差 6.41 。

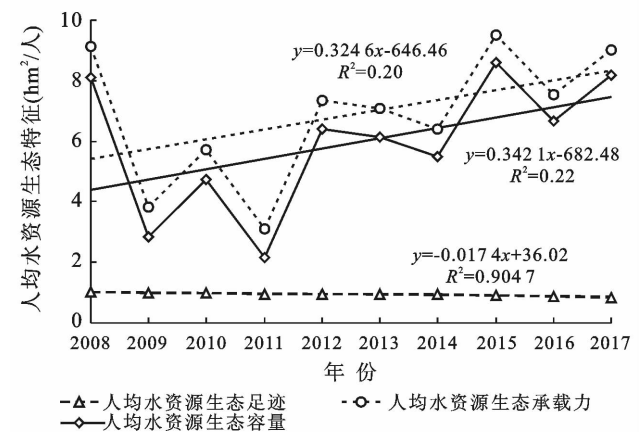


图 1 广西地区 2008—2017 年人均水资源生态特征

通过水资源生态容量直观地反映各项水资源供需状况及其与生态系统的关系(表 1),全区人均水资源生态容量值在 2008,2012,2017 年分别为 $8.124, 6.409$ 和 8.182 ,处于生态盈余状态且呈微弱增加趋

势;人均生态容量在时间上变化不显著,中间年份的变异系数数值较始末年份大,中间年份的最大值与极差的排序为中;地级市间人均水资源生态容量的相对差异度随时间无显著变化,但在空间上存在较大差异。

表 1 地级市尺度人均水资源生态容量的主要统计量

年份	全区值	最小值	最大值	极差	平均值	变异系数
2008	8.124	1.596	34.627	33.031	9.577	0.926
2012	6.409	1.609	32.713	31.104	8.388	0.987
2017	8.182	1.619	25.086	23.467	8.440	0.819
2008—2017	5.937	1.268	26.069	24.801	7.734	0.919

2.2 水资源生态特征空间变化规律

由图 2 可以看出,2008—2017 年广西地区的水资源生态特征在空间上呈现一定的差异性和不均衡性。核算期内广西地区的年均水资源生态足迹为 $0.938 \text{ hm}^2/\text{人}$,有 7 个地级市的人均水资源生态足迹高于全区均值;其中,来宾市以 $1.566 \text{ hm}^2/\text{人}$ 居全区之首,除此外,桂林市、贺州市、防城港市、北海市的年均水资源生态足迹达 $1.384, 1.123, 1.130, 1.114 \text{ hm}^2/\text{人}$,超过 1.100 ,属于人均用水消耗较大的地级市;年均水资源生态足迹最高的来宾市和最低的玉林市($0.613 \text{ hm}^2/\text{人}$)在数值上相差 2.55 倍。广西的年均水资源生态承载力为 $6.875 \text{ hm}^2/\text{人}$,有 7 个地级市的人均水资源生态承载力高于全区均值;其中,防城港市以 $27.105 \text{ hm}^2/\text{人}$ 居全区之首,除此外,桂林市、柳州市、贺州市的年均水资源生态承载力达 $18.127, 14.061, 11.451 \text{ hm}^2/\text{人}$,超过 10,属于水资源支撑社会可持续发展能力较大的地级市;年均水资源生态承载力最高的防城港市和最低的贵港市($2.793 \text{ hm}^2/\text{人}$)在数值上相差 9.70 倍。广西各地级市的年均水资源生态容量均大于 0,生态处境上属于水资源生态盈余。其中,柳州市、桂林市、防城港市、贺州市、河池市的年均生态容量高于全区均值($5.937 \text{ hm}^2/\text{人}$);年均水资源生态容量最高值出现在防城港市,达 $25.975 \text{ hm}^2/\text{人}$,最小值出现在南宁市,为 $1.310 \text{ hm}^2/\text{人}$,二者在水资源供给量反向相差 1.50 倍,年均 GDP 值反向相差 5.54 倍,年均人口密度反向相差 2.23 倍的情况下,水资源生态容量数值上相差 19.08 倍;反映了人均水资源生态容量在人口密度大且经济发展快的水资源相对匮乏城市,较易出现水资源供给矛盾,超过区域生态系统承载的范围。

2.3 水资源生态足迹驱动因素分析

由图 3 可以看出,广西地区水资源生态足迹驱动因素的分解结果表现为总效应、结构效应历年波动整体下降,技术效应整体下降,经济效应、人口效应整体上升。其中,经济效应和人口效应的分解值呈正数,正向拉动全区水资源生态足迹的增长,而结构效应和

技术效应的分解值呈负数,反向抑制全区水资源生态足迹的增长。对历年结果做线性趋势拟合可知:总效应的下降速率为 $4.40 \times 10^6 \text{ hm}^2/\text{a}$,时间变化上在 2008—2011 年呈正值缓慢上升,在 2011—2014 年由正转负大幅下降,而后呈负值又较快上升;结构效应的下降速率为 $4.10 \times 10^6 \text{ hm}^2/\text{a}$,核算期内的变化趋势与总效应一致;技术效应的下降速率为 $5.04 \times 10^6 \text{ hm}^2/\text{a}$,在核算期内始终呈负值;经济效益的上升速率为 $4.13 \times 10^6 \text{ hm}^2/\text{a}$,在核算期内始终呈正值;人口效应的上升速率相对较小,仅为 $6.10 \times 10^5 \text{ hm}^2/\text{a}$,可忽略不计。在正向拉动水资源生态足迹的效应中,经济效益的上升速率最大,在反向抑制水资源生态足迹的效应中,各效应下降速率的排序为:技术效应 > 结构效应 > 人口效应。

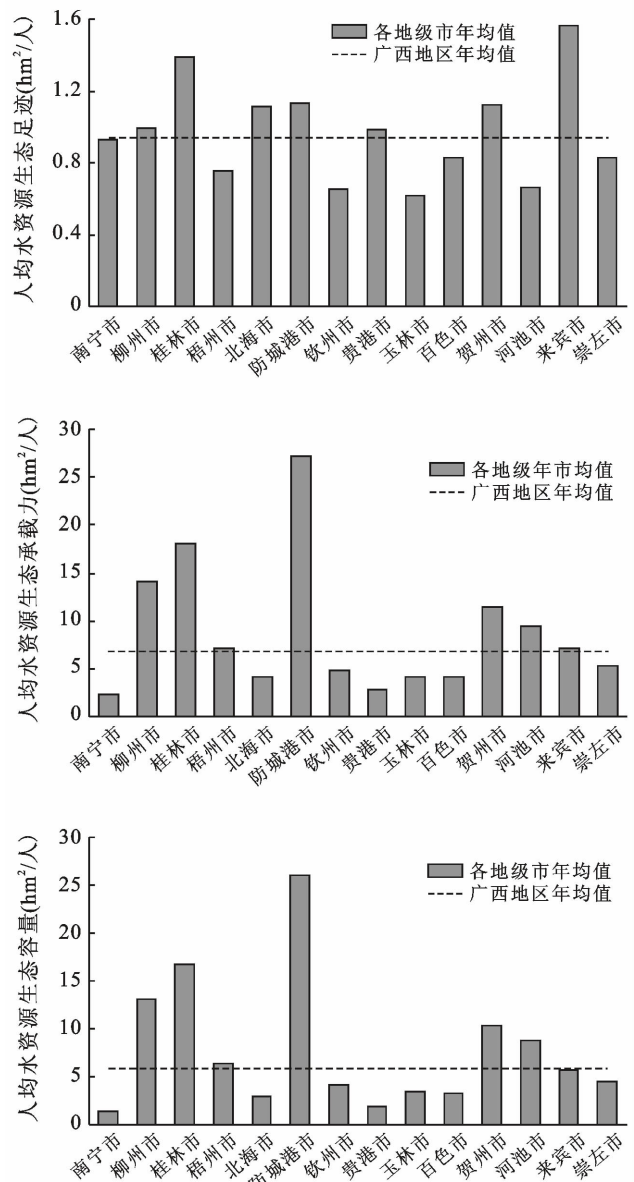


图 2 广西地区 2008—2017 年各地级市人均水资源生态特征

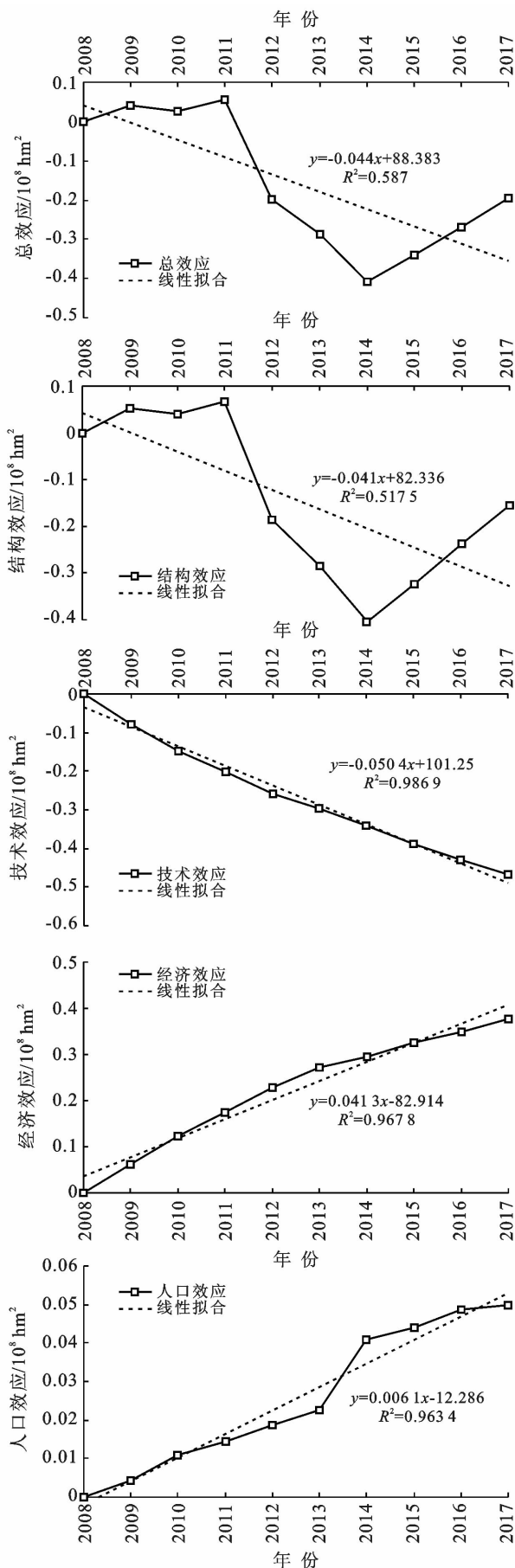


图3 广西水资源生态足迹驱动因素分解效应

通过累计变化量和累计贡献率进一步确定水资源生态足迹驱动因素中的关键驱动因素,为结构效应、技术效应和经济效应(表2)。核算期内,经济效应引起的水资源生态足迹累计增加 $3.78 \times 10^7 \text{ hm}^2$,累计贡献率为 191.8%,是拉动广西水资源生态足迹的第一因素;人口因素引起的水资源生态足迹累计增加 $5.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$,是拉动广西水资源生态足迹的第二因素,对于水资源生态足迹变化的作用不显著;技术效应引起的水资源生态足迹累计减少 $4.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$,累计贡献率为 -238.0%,是抑制广西水资源生态足迹增长的第一因素;结构效应引起的水资源生态足迹累计减少 $-1.50 \times 10^7 \text{ hm}^2$,累计贡献率为 -79.2%,是作为抑制水资源消耗的第二因素。

表2 广西水资源生态足迹驱动因素值

项目	累计变化量/ 10^8 hm^2	累计贡献率/%
结构效应	-0.156	-79.18
技术效应	-0.469	-238.07
经济效应	0.378	191.88
人口效应	0.050	25.38
总效应	-0.197	—

2.4 各地级市在关键驱动因素上的贡献率

图4为统计对广西水资源生态足迹关键驱动因素,即结构效应、技术效应和经济效应贡献最大的5个地级市。由图4可知,结构效应的增加效应主要分布在百色市、来宾市(2014—2017年)、钦州市,年均贡献比例为 125.3%,12.4%,12.4%。其中,百色市和钦州市的增加效应整体呈减少趋势,来宾市的增加效应呈稳定趋势;减少效应主要分布在南宁市、桂林市(2012—2017年),平均贡献比例为 -35%, -25%;技术效应的增加效应主要分布在梧州市,年均贡献比例为 19.3%,减少效应主要分布在南宁市、柳州市、桂林市、玉林市,年均贡献比例为 -17.1%, -10.6%, -27.2%, -12.1%,整体呈现减少效应;经济效应的增加效应主要分布在南宁市、柳州市、桂林市、贵港市,年均贡献比例为 18.5%,10.9%,20.5%,11.7%。全区各地级市的经济效应整体呈增长趋势,减少效应集中表现在梧州市,年均贡献率为 -22.2%,且在 2009—2011年后梧州市的较少效应呈稳定变小。

3 结论

(1) 广西 2008—2017 年人均水资源生态足迹整体呈下降趋势,人均水资源生态承载力整体呈波动上升趋势,人均水资源生态容量均处于生态盈余状态且整体呈微弱上升趋势,平均上升速率 $0.342 \text{ hm}^2/(\text{人} \cdot \text{a})$,全区年均水资源生态盈余为 $5.94 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$;区内

水资源生态容量分布不均,年均水资源生态盈余最大的防城港市与最小的南宁市在数值上相差 19.08 倍。

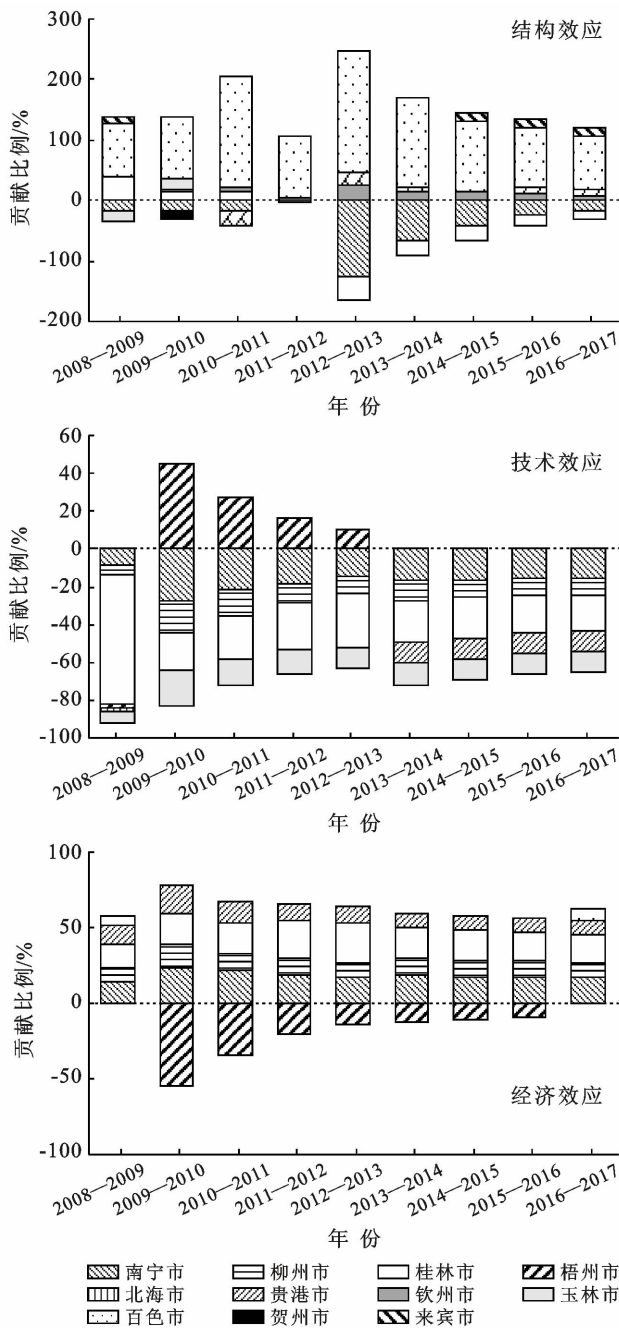


图 4 广西各地级市在关键驱动因素上的贡献比例

(2) 经济效益、人口效应是拉动广西地区水资源生态足迹增长的第一、第二因素,核算期内对水资源生态足迹的贡献效率分别达 191.80% 和 25.38%,人口效应的作用不显著;技术效应、结构效应是抑制水资源生态足迹增长的第一、第二因素,核算期内对水资源生态足迹的贡献效率达 -238.0%, -79.18%;反映了广西地区水资源利用效率的不断提高,该区正处于经济优化产业结构、发展绿色经济的关键节点。

(3) 水资源生态足迹驱动因素中的关键驱动因

素为结构效应、技术效应和经济效应。南宁市、桂林市在结构效应、技术效应中表现出较大的减少效应,在结构效应中对水资源生态足迹增长的平均贡献比例分别为 -35% 和 -25%,在技术效应中对水资源生态足迹增长的平均贡献比例为 -17.1%, -10.6%。除梧州市外,全区各地级市在技术效应上呈减少效应。全区城市在发展与规划上存在较大差异,建议针对地区间不同的生态—经济协调度因地制宜地采取对策。

[参 考 文 献]

- [1] 晓兰,王丹丹,王塔娜,等. 内蒙古东部地区水资源生态足迹比较分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(7): 193-199.
- [2] 焦雯珺,闵庆文,李文华,等. 基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2392-2400.
- [3] 杨倩,孙铖,李山勇,等. 湖北水资源生态承压能力的时空分异特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 289-295.
- [4] 张洛也,赵春子. 基于生态足迹法的延边州水资源生态环境研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2019, 51(3): 135-142.
- [5] Wang Huan, Huang Jiejun, Zhou Han, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110331.
- [6] Li Hui, Zhao Fen, Li Chunhui, et al. An improved ecological footprint method for water resources utilization assessment in the cities [J]. Water, 2020, 12(2): 503.
- [7] Hoekstra R, Vander B C S. Index decomposition analysis [J]. Energy Economics, 2003, 25(1): 39-64.
- [8] Ang B W, Huang H C, Mu A R. Properties and linkages of some index decomposition analysis methods [J]. Energy Policy, 2009, 37(11): 4624-4632.
- [9] Zhao Chunfu, Chen Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method [J]. Environmental science & technology, 2014, 48(21): 12723-12731.
- [10] 王丽琼. 基于 LMDI 中国省域氮氧化物减排与实现路径研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2394-2402.
- [11] Lei Hongjun, Xia Xunfeng, Li Changjia, et al. Decomposition analysis of wastewater pollutant discharges in industrial sectors of China (2001—2009) using the LMDI I method [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(6): 2226-2240.
- [12] 赵超,陆宝宏,崔冬梅,等. 基于生态足迹理论的宁夏水资源可持续利用研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 26-29.
- [13] 贾陈忠,乔扬源,关格格,等. 山西省水资源生态足迹时空变化特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 370-376.

(下转第 311 页)

[参 考 文 献]

- [1] 梁发超,刘黎明.基于地形梯度的土地利用类型分布特征分析:以湖南省浏阳市为例[J].资源科学,2010,32(11):2138-2144.
- [2] 简萍,李阳兵,王权.基于地形梯度的典型峰丛洼地区土地利用空间分布格局分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(5):1128-1139.
- [3] 宋戈,王盼盼.松嫩高原原县土地利用空间格局地形梯度特征分析:以巴彦县为例[J].地理科学,2017,37(8):1218-1225.
- [4] 牛志君,赵建利,王晓晴,等.基于地形梯度的冀西北山地丘陵区土地利用格局变化分析:以河北省怀来县为例[J].水土保持研究,2017,24(4):95-102.
- [5] 李靖,廖和平,蔡进,等.山地城市边缘土地利用格局与变化的地形梯度分布特征分析:以重庆市巴南区为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):296-305.
- [6] 徐小任,徐勇.黄土高原地区人类活动强度时空变化分析[J].地理研究,2017,36(4):661-672.
- [7] 原文超,徐明德,杨晨,等.基于适宜性评价的土地利用分区研究:以山西省汾阳市为例[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):210-217,225.
- [8] 李丹,韩书成,张燕纯,等.基于主成分与聚类分析法的城市土地利用规划分区研究:以广州市为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(6):130-136,143.
- [9] 国土资源部. GB/T21010-2017 土地利用现状分类[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [10] 张静,任志远.秦巴山区土地利用时空格局及地形梯度效应[J].农业工程学报,2016,32(14):250-257.
- [11] 喻红,曾辉,江子瀛.快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J].地理科学,2001,21(1):64-69.
- [12] 刘玲,王勇,谢世友,等.基于GIS的岩溶区土地利用的地形梯度分布研究:以西阳县板溪乡为例[J].中国岩溶,2013,32(4):462-471.
- [13] 臧玉珠,刘彦随,杨园园.山区县域土地利用格局变化及其地形梯度效应:以井冈山市为例[J].自然资源学报,2019,34(7):1391-1404.
- [14] 赵艳霞,武爱彬,刘欣,等.浅山丘陵区土地利用地形梯度特征与生态服务价值响应[J].水土保持研究,2014,21(3):141-145.
- [15] 李益敏,谢亚亚,蒋德明,等.怒江州斜坡地质灾害孕灾环境因素敏感性研究[J].水土保持研究,2018,25(5):300-305.
- [16] 樊勇,何宗宜,李敏敏,等.1980—2015年中国建设用地变化研究[J].测绘通报,2020(1):128-131.

(上接第296页)

- [22] 王晓娇,陈英,齐鹏,等.基于信息熵的张掖市土地利用结构分析及其灰色预测[J].干旱区研究,2011,28(1):92-97.
- [23] 彭大雨,鲁成树,曹海涛.基于信息熵的芜湖市土地利用结构时空变化分析[J].安徽农业科学,2018,46(7):18-21.
- [24] 谭永忠,吴次芳.区域土地利用结构的信息熵分异规律研究[J].自然资源学报,2003,18(1):112-117.
- [25] 李平,李秀彬,刘学军.我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J].地理研究,2001,20(2):129-138.
- [26] 尹炀,刘吉平,李晟铭,等.1960—2016年吉林省气温时空变化特征[J].安徽农业科学,2018,46(28):144-146.
- [27] 刘宝涛,刘惠清,郭佳,等.吉林省城市建设用地扩张时空特征及驱动因素分析[J].资源开发与市场,2018,34(10):1377-1382,1388.
- [28] Li Wenbo, Wang Dongyan, Li Hong, et al. Quantifying the spatial arrangement of underutilized land in a rapidly urbanized rust belt city: The case of Changchun City [J]. Land Use Policy, 2019, 83: 113-123.
- [29] 任永星,李晓燕,王宗明,等.1990—2015年吉林省西部耕地变化与“早改水”时空特征研究[J].遥感技术与应用,2019,34(5):1064-1072.

(上接第302页)

- [14] 赵春芳,董朝阳,伍磊,等.浙江省水资源生态足迹时空格局[J].水土保持通报,2016,36(1):242-248.
- [15] 张倩,谢世友.基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J].灌溉排水学报,2019,38(2):93-100.
- [16] 邓晓军,杨琳,吴春玲,等.广西水资源与社会经济发展协调度评价[J].中国农村水利水电,2013(3):14-17.
- [17] 张义,邹永福,李丰生,等.基于灰色神经网络模型的水资源生态足迹预测:以广西为例[J].人民长江,2017,48(1):37-42.
- [18] 张义.基于生态足迹模型的河池市水资源可持续利用评价[J].南水北调与水利科技,2013,11(4):26-30.
- [19] 莫崇勋,宋丽,蔡德所,等.广西北部湾经济区水资源承载能力演变分析[J].水力发电学报,2015,34(1):45-48,54.
- [20] 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.
- [21] Ang B W, Xu X Y, Su Bin. Multi-country comparisons of energy performance: The index decomposition analysis approach [J]. Energy Economics, 2015, 47: 68-76.