

吴昊,张兴奇,都金康.基于水足迹理论与LMDI模型的贵州省水资源利用评价[J].中国岩溶,2019,38(5):696-703.
DOI:10.11932/karst20190505

基于水足迹理论与LMDI模型的贵州省 水资源利用评价

吴昊,张兴奇,都金康
(南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023)

摘要:基于水足迹理论构建区域水资源利用评价指标体系,分析贵州省2000—2017年水足迹时间变化,并采用LMDI模型探讨人口、经济和技术等驱动因素对水足迹变化的影响程度。结果表明:贵州省总水足迹经历了先波动增长后减少再逐渐增加的过程;水资源自给率年均达到97%以上,对外依赖程度较低;水足迹经济效益值逐年增加明显,水足迹土地密度与总水足迹变化趋势一致,而万吨水足迹人口密度则与总水足迹变化趋势相反;水资源压力指数整体维持在40%以上,其中偏枯水年和枯水年水资源压力指数大于70%;人文驱动因素对水足迹变化的影响程度:经济效应>技术效应>人口效应,自然驱动因素中降水量是导致水足迹变化的主要因素。

关键词:水足迹;评价体系;LMDI模型;驱动因素;贵州省

中图分类号:TV213.4;P641.8 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)05-0696-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

水资源是人类生存和社会发展的物质基础,其科学管理与合理分配是促进一个地区人口、经济与环境协调发展的重要因素。近年来,社会经济的快速发展与人口的增长,使得水资源的需求量逐年增加,水资源供需矛盾日渐加剧。为定量评价人类活动对水资源的实际需求与消耗情况,引入水足迹理论及相关计算方法来估算实体水与虚拟水的消耗。水足迹从消费的视角研究水资源利用状况,有利于区域制订适宜的虚拟水战略来减缓水资源压力^[1]。

水足迹概念于2002年由荷兰学者Hoekstra提出,指一个国家、一个地区或一个人在一定时间内消耗的所有产品或服务所需要的水资源总量^[2]。当前国外学者对于水足迹开展了大量研究,有的学者从消费的角度出发,研究虚拟水在国际贸易之间的转移及其对水安全和水资源可持续利用的影响^[3-4];有

的学者侧重于对作物蓝水、绿水和灰水足迹进行分析以及生产过程中作物产品用水量的计算^[5-6]。而从国内水足迹的研究进展来看,有较多的研究将水足迹理论应用到区域水资源的评价。周玲玲等^[7]以即墨市(缺水城市)为研究对象,应用水足迹理论与DP-SIR模型构建了水资源可持续利用评价体系,并采用变异系数法和熵值法相结合的客观组合赋权法确定了指标体系权重;刘楚焯等^[8]运用水足迹核算方法分析了江苏省水足迹变化特征,并引入灰色模型预测研究区内水足迹发展趋势;何开为等^[9]基于水足迹理论评价了云南省农业水资源与经济系统的可持续发展状况,并定量分析了全省农业水资源的相对承载力。

贵州省作为南方典型的喀斯特缺水地区,水资源时空分布不均且开发利用困难,季节性缺水问题突出^[10],对其水资源的实际供给量与消耗量进行评价具有重要的理论和实践指导意义。而目前关于贵

第一作者简介:吴昊(1995—),男,硕士研究生,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:luckywhao@126.com。

通信作者:张兴奇(1964—),男,副教授,主要从事水资源与水土保持研究。E-mail:zxqrh@nju.edu.cn。

收稿日期:2018-10-28

贵州省水资源的研究多集中于承载力、水安全以及水压力等单一层面的分析^[11-12],缺乏对水资源利用的综合评价,因此有必要引入一套水资源利用综合评价体系对贵州省水资源利用状况进行整体分析。为此,本文基于水足迹理论构建了区域水资源利用综合评价体系对贵州省的水足迹变化进行时间变化分析,并运用LMDI模型分析影响贵州省水足迹变化的驱动力因素,以期对贵州省水资源优化配置与可持续利用提供参考。

1 研究区概况

贵州省位于中国西南部,与云南省、四川省、重庆市、湖南省和广西壮族自治区为邻。全省土地总面积约 17.6 万 km²,占我国国土面积的 1.8%。贵州省喀斯特地貌分布非常广泛,峰丛和洼地大面积发育,形成了独特的喀斯特生态系统。区内属亚热带湿润季风气候,降水时空差异显著,多年平均降雨量为 1 179 mm。贵州省河网密度大,河流多发源于中部和西部,向南、北、东方向呈扇状放射^[13]。其中,苗岭以北属于长江流域,以南属于珠江流域。全省多年平均径流量为 1 062 亿 m³,占全国的 3.74%,居全国第九位。贵州省作为典型喀斯特地区,水资源呈现出脆弱性特征,主要表现为储水蓄水能力低、季节性干旱频繁以及水环境易受污染且难以治理等^[14]。工程性缺水问题随着近年来贵州省大型水源工程建设的全面推进,得到了明显改善。

2 研究方法

2.1 数据来源

贵州省水资源指标数据以及社会经济数据来源于《贵州省水资源公报》(2000-2017)^[15]和《贵州省统计年鉴》(2018)^[16]。

2.2 水足迹计算方法

根据区域水足迹的定义,一个地区的水足迹等于外部水足迹与内部水足迹之和。

水足迹计算公式^[17]为:

$$WFP = IWF + EWF \quad (1)$$

式中:WFP为一个国家或地区的总水足迹;IWF为生产该地区居民所消费的商品与服务所利用的区域内部水资源总量,即内部水足迹;EWF为其他国家或地

区生产、并为本国或本地居民消费的产品和服务所消费的虚拟水量,即外部水足迹。

内部水足迹计算公式为:

$$IWF = AWU + IWU + DWU + EWU - VWE \quad (2)$$

式中:AWU为地区农业生产用水量;IWU为地区工业生产用水量;DWU为地区城市居民公共生活用水量;EWU为地区生态环境用水量;VWE为本地出口虚拟水量。

进出口贸易商品的虚拟水含量,常采用万元产值用水量与工业用水定额进行估算,由于受到流域内实际统计数据的局限,本文采用间接估算方法计算贵州省出口虚拟水含量,不区分工业产品和农业产品,即出口虚拟水量=出口贸易值/生产总值×总用水量。

外部水足迹计算公式为:

$$EWF = VWI - VWE_{re-export} \quad (3)$$

式中:VWI为本地区从其他国家或地区输入的虚拟水含量;VWE_{re-export}指的是从其他国家或地区向本地区输入的虚拟水量中又出口的那部分虚拟水量。

鉴于难以获得进口产品再出口的虚拟水含量值,本文采用进口虚拟水量来代替外部水足迹,即进口虚拟水量=进口贸易值/生产总值×总用水量。

2.3 基于水足迹的水资源评价指标体系的构建

本文基于水足迹理论建立贵州省区域水资源利用评价指标体系,包含水足迹结构指标、水足迹效益指标和水足迹压力指标(表1)。

2.4 基于LMDI模型的水足迹驱动力因素分析

LMDI模型是由Ang等^[18]提出的一种可将研究对象拆分成若干影响因子的对数分解法。该方法由于不产生无法分解的残差,且适用范围较广,因此可测度不同影响因子对于研究对象的影响程度及其驱动力的分析^[19]。本文基于LMDI模型将水足迹变化的驱动因素分解为人口效应、经济效应与技术效应三个方面,其表达式如下:

$$WFP = \sum_i WFP_i = \sum_i P_i \times \frac{GDP_i}{P_i} \times \frac{WFP_i}{GDP_i} \quad (4)$$

式中:WFP为水足迹总量,亿 m³;WFP_i为第 i 年水足迹,亿 m³;P_i为第 i 年人口总数,人;GDP_i/P_i为第 i 年人均 GDP,表示经济驱动因素,万元/人;

表1 基于水足迹理论的区域水资源利用评价指标体系

Table 1 Regional water resources utilization evaluation index system based on water footprint theory

水足迹指标		计算方法	含义	
水足迹结构指标	外部水资源依赖度(WD)	$EWFP/WFP \times 100\%$	区域对外部水资源的依赖程度	
	水资源自给率(WSS)	$IWF/WFP \times 100\%$	区域对本地水资源的利用程度	
水足迹效益指标	内部效益指标	万吨水足迹人口密度	$TP/WFP \times 100\%$	水足迹支撑人口能力
		水足迹土地密度	$WFP/A \times 100\%$	单位土地面积水资源的消耗情况
	水足迹经济效益值	$GDP/WFP \times 100\%$	万元GDP耗用的水足迹量	
	外部效益指标	水足迹净贸易量	$VWE - EWF$	水资源贸易中的地位与作用
水资源贡献率		$(VWE - EWF)/WA$	区域可利用水资源对其他地区的贡献水平	
水足迹压力指标	水资源压力指数(WPI)	$WFP/WA \times 100\%$	水资源消耗量占可用水资源量的比例	

WFP_i/GDP_i 为水足迹强度,亿 m^3 /万元,即第 i 年万元GDP的水足迹使用量,也是水足迹评价中的一个重要指标,表示技术驱动因素。

假设基准年水足迹为 WFP_0 , t 年的水足迹为 WFP_t ,从基准年到 t 年的水足迹变化量为 ΔWFP 。根据LMDI模型,结合驱动力分解公式,可将影响水足迹变化的因素进行分解,如下式:

$$\Delta WFP = WFP_t - WFP_0 = P_e + A_e + T_e \quad (5)$$

式中: P_e 为人口因素对水足迹变化量的贡献度,亿 m^3 ; A_e 为经济因素对水足迹变化量的贡献度,亿 m^3 ; T_e 为技术进步对水足迹变化量的贡献度,亿 m^3 。3个驱动因素贡献度的计算公式^[20]如下:

$$P_e = \Delta WFP \sum_t (\ln P_t - \ln P_0) / \ln \frac{WFP_t}{WFP_0} \quad (6)$$

$$A_e = \Delta WFP \sum_t (\ln \frac{GDP_t}{P_t} - \ln \frac{GDP_0}{P_0}) / \ln \frac{WFP_t}{WFP_0} \quad (7)$$

$$T_e = \Delta WFP \sum_t (\ln \frac{WFP_t}{GDP_t} - \ln \frac{WFP_0}{GDP_0}) / \ln \frac{WFP_t}{WFP_0} \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 贵州省水足迹总量变化

2000–2017年贵州省水足迹总量呈现先波动增加后减少再逐渐增加的变化过程(图1)。总水足迹最低值出现在2000年,为83.19亿 m^3 ;最高值出现在2017年,为101.76亿 m^3 。该时间段贵州省总水足迹的变化过程明显分为三个阶段:第一阶段为2000–

2010年,这一阶段总水足迹呈现整体上升、局部小幅波动的态势,水足迹总量由2000年的83.19亿 m^3 增长至2010年的100.43亿 m^3 ,年均增长率约为1.9%。第二阶段为2010–2013年,贵州省总水足迹与内部水足迹呈现明显的下降趋势。这是由于“十二五”期间,贵州省为应对旱灾建立了流域与区域管理相结合的水资源管理体制,全面推行用水总量控制,推进农业节水灌溉,提高工业用水重复利用率以及推进节水型城市建设,有效地促进了贵州省用水总量的减少。第三阶段为2013–2017年,贵州省总水足迹开始呈现上升趋势。这一时间段内贵州省地区生产总值由2013年的8116.34亿元增加至2017年的13540.83亿元,年平均增长率为13.7%,而且人口数量在2011年之后开始明显增加。经济社会的快速发展以及人口数量的增加大大提高了人们对于水资源的需求。贵州省人均水足迹与总水足迹的变化趋势具有相似性,虽然2010–2013年间为明显下降阶段,但整体上人均水足迹与总水足迹均表现为递增的变化趋势。

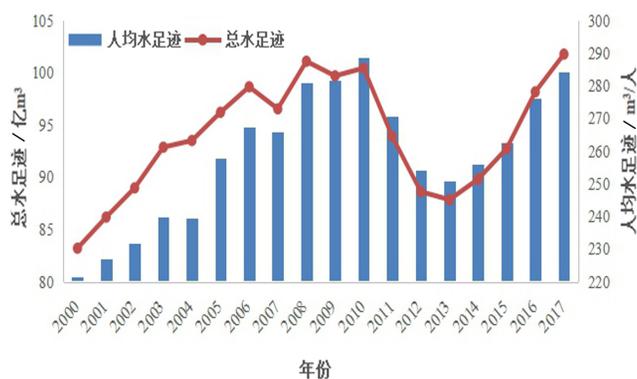


图1 2000–2017年贵州省水足迹与人均水足迹

Fig. 1 Water footprint and per capita water footprint of Guizhou Province from 2000 to 2017

3.2 贵州省水足迹结构变化

2000–2017年贵州省水资源自给率年均超过97%,远超当前中国和世界水资源自给率的平均值(分别为84.0%和93.6%),内部水足迹在研究时段均大于80亿 m^3 ,而外部水足迹均小于3亿 m^3 (表2)。由此可见,贵州省水资源基本可以达到自给自足的

状态,水资源自给率处于较高的水平^[21],这与贵州省充沛的降水量有密切关系。贵州省应充分发挥本地区水资源优势,对于进、出口产品结构进行合理优化配置,高效利用本地水资源,使其发挥出更大的经济效益。总体来说,贵州省水资源基本可以满足自身的用水需求,对外部水资源的依赖程度较低(<3%)。

表2 2000–2017年贵州省水足迹结构

Table 2 Water footprint structure of Guizhou Province from 2000 to 2017

年份	外部水足迹 /亿 m^3	内部水足迹/亿 m^3	水资源自给率/%	外部水资源依赖度/%
2000	1.31	81.88	98.42	1.58
2001	1.18	84.99	98.64	1.36
2002	1.21	87.76	98.64	1.36
2003	1.74	91.11	98.12	1.88
2004	2.44	91.05	97.39	2.61
2005	1.77	94.43	98.16	1.84
2006	1.66	96.98	98.32	1.68
2007	1.84	94.69	98.09	1.91
2008	2.82	98.26	97.21	2.79
2009	1.63	98.05	98.36	1.64
2010	1.81	98.61	98.20	1.80
2011	2.12	91.76	97.75	2.25
2012	1.50	87.11	98.31	1.69
2013	1.07	86.77	98.79	1.21
2014	0.94	88.86	98.95	1.05
2015	1.41	91.33	98.48	1.52
2016	0.55	97.61	99.44	0.56
2017	1.21	100.54	98.81	1.19

3.3 贵州省水足迹效益变化

2000–2017年贵州省水足迹效益值如表3所示。从内部效益来看,该时段贵州省万吨水足迹人口密度与水足迹总量变化趋势相反,具体表现为先降低(2000–2010年)后升高(2010–2013年)再降低(2013–2017年),近年来单位水足迹支撑人口的数量有下降的趋势。水足迹土地密度的变化趋势与水足迹总量变化趋势基本一致,2000–2010年水足迹土地密度缓慢增加,2010–2013年略有下降,2013–2017年水足迹土地密度又开始呈现缓慢增加的趋势。其中2017年水足迹土地密度最大,约为57 800 $m^3 \cdot km^{-2}$;2000年水足迹土地密度最小,约为47 200 $m^3 \cdot km^{-2}$ 。2000–2017

年水足迹经济效益值呈现明显增加的趋势,从2000年的12.38元 $\cdot m^{-3}$ 增长至2017年的133.07元 $\cdot m^{-3}$,年均增长率为15%,表明随着经济的发展和生产效率的提高,单位水资源创造的社会财富在不断增加,水资源利用方式由粗放型向节约型转变,水足迹产生的经济效益越来越大,用水效益在逐渐提高。从外部效益来看,贵州省水足迹净贸易量在2000–2017年间均为正值,说明贵州省输出的虚拟水量大于输入的虚拟水量,在虚拟水贸易中属于水资源输出地。水资源贡献率总体呈波动变化,2011–2017年水资源的贡献率大于2000–2010年,反映出贵州省对缓解其他地区的水资源压力做出了一定的贡献。

表3 2000–2017年贵州省水足迹效益值
Table 3 Benefit values of water footprint in Guizhou Province from 2000 to 2017

年份	内部效益指标			外部效益指标	
	万吨水足迹人口 密度/人·万t ⁻¹	水足迹经济效益/ 元·m ⁻³	水足迹土地密度/ 万m ³ ·km ⁻²	水足迹净贸易量/ 亿m ³	水资源贡献率/%
2000	45.15	12.38	4.72	0.98	0.53
2001	44.09	13.15	4.89	0.99	0.67
2002	43.13	13.98	5.05	0.92	0.54
2003	41.67	15.36	5.27	0.84	0.60
2004	41.75	17.95	5.31	0.82	0.54
2005	38.77	20.85	5.46	1.01	0.80
2006	37.41	23.71	5.60	1.30	1.05
2007	37.63	29.88	5.48	1.47	0.92
2008	35.58	35.25	5.74	0.82	0.47
2009	35.49	39.26	5.66	0.70	0.51
2010	34.64	45.83	5.70	1.01	0.70
2011	36.95	61.00	5.33	1.19	1.25
2012	39.32	77.63	5.03	2.82	1.91
2013	39.87	92.40	4.99	3.97	3.44
2014	39.06	103.57	5.10	5.19	2.81
2015	38.06	113.67	5.26	4.52	2.58
2016	36.22	120.14	5.57	2.11	1.30
2017	35.18	133.07	5.78	1.72	1.08

3.4 贵州省水足迹压力变化

由图2可知,2000–2017年全省水资源压力指数呈现波动变化的状态,整体维持在40%以上。根据水文径流丰、平、枯水年划分标准,将研究时段内的年径流量进行丰、平、枯水年的划分。2003、2005、2006、2009、2011以及2013年为偏枯水年与枯水年,其余年份为平水年,没有出现丰水年。在偏枯水年与枯水年中,除了2003年的水资源压力指数为66.7%外,其余年份对应的的水资源压力指数均超过70%,尤其作为典型枯水年的2011年,水资源压力指数达到了98.6%,可见年降水与径流量对水资源压力指数影响显著。2014–2017年虽然为平水年,但水资源压力指数开始回升,从48.7%增加至63.7%,这是由于随着城镇化发展速度的加快以及人口数量的增长,水资源系统所承载的生产生活用水压力又有所增加。水资源压力一方面来源于喀斯特地区水资源的开发利用程度低,可利用水资源远小于水资源总

量;另一方面则由于贵州省经济社会的快速发展对水资源的大量需求。贵州省需要提高水资源的开发利用效率,优化水资源配置,调整产业结构与消费结构,减小水资源压力,以促进水资源的可持续利用。

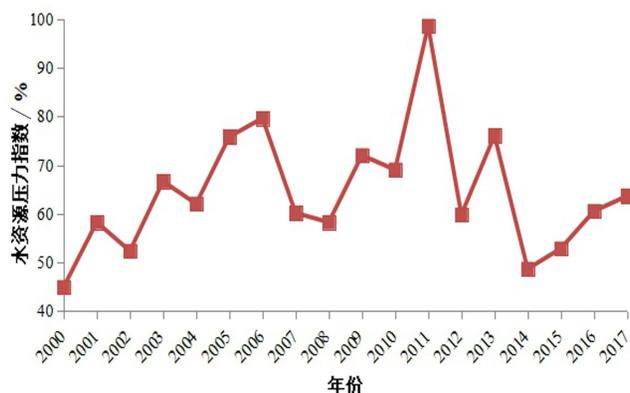


图2 2000–2017年贵州省水资源压力指数变化情况
Fig. 2 Changes of water resources pressure index in Guizhou Province from 2000 to 2017

3.5 贵州省水足迹变化的驱动力因素

3.5.1 基于LMDI模型分解的人文驱动因素

基于LMDI模型将影响贵州省水足迹变化的人文驱动因素分解为人口效应、经济效应和技术效应三个方面,各驱动力因素的贡献率如表4所示。

表4 2000–2017年贵州省水足迹驱动力贡献度

Table 4 Contribution degree of water footprint driving force in Guizhou Province from 2000 to 2017

驱动因素	多年平均贡献度/亿 m^3	贡献占比	驱动力方向
人口效应(P_e)	-11.34	0.68%	负向驱动
经济效应(A_e)	889.76	53.22%	正向驱动
技术效应(T_e)	-770.56	46.10%	负向驱动

从人口效应来看,贵州省的人口数量在2000–2017年间呈现先增后减、再趋于稳定、总体减少的变化过程(图3)。总水足迹虽然也存在波动变化过程,但总体表现为增加的趋势。2000–2004年总人口与总水足迹变化趋势相同,均表现为增加的态势,此时人口增加为正向驱动作用。2004–2010年,总人口与总水足迹变化趋势相反,此时人口数量表现为负向驱动效应。该阶段从人口内部构成来看,则表现为城镇人口数量缓慢增加而乡村人口数量缓慢减少,由于城镇地区相对于农村地区水利基础设施更加完备而且生产生活耗水量大,所以城镇人均生活用水量要明显高于乡村居民人均生活用水量。因此该时段虽然人口减少,但区域用水总量反而增加。2010–2017年,总人口与总水足迹的变化没有明显的相关性。总体来说,人口效应在研究时段表现为负向驱动力。由于人口数量在不同时间段对水足迹变化的驱动方向不一致,因此人口效应在人文驱动因素中的贡献占比仅为0.68%。

从经济效应来看,2000–2017年间,贵州省GDP从1 029.92亿元增长至13 540.83亿元,年均增长率为16.36%,经济增速居全国前列。经济快速发展加快了城市化的进程,使城乡基础设施建设更加完备、三大产业用水总量不断增加。因此,经济效应对于水足迹的影响方式为正向驱动。整体来看,经济效应对于水足迹变化的贡献率最大,占人文驱动因素中的53.22%。可见作为经济相对落后的贵州省而言,经济效应是影响其水资源利用量变化的最主要原因。

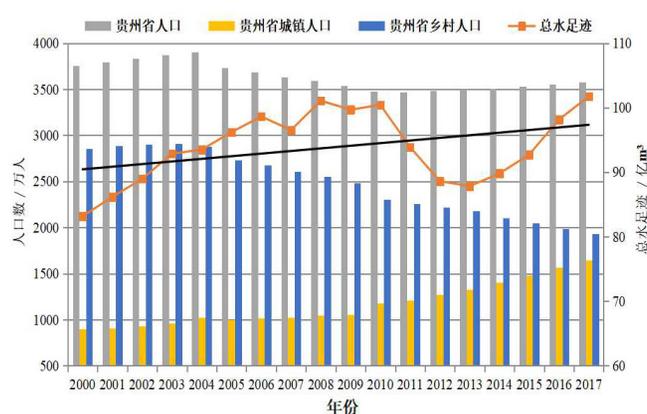


图3 2000–2017年贵州省人口结构与水足迹变化情况

Fig. 3 Changes in population structure and water footprint in Guizhou Province from 2000 to 2017

从技术效应来看,随着技术水平的进一步提高以及各种节水设备的投入使用,水资源的利用效率得到提升,单位产品的耗水量开始减少。因此,技术效应对水足迹表现为负向驱动的作用^[22]。整体来看,技术效应对水足迹变化的贡献率仅次于经济效应,占总贡献率的46.10%。

3.5.2 自然驱动因素

降水量是影响区域可利用水量的重要因素。2000–2011年总水足迹缓慢增加,降水量却波动下降,两者并没有较强的相关性(图4)。2011年为贵州省典型枯水年,降水量比多年平均降水量偏少30.4%,同年总水足迹明显下降,2013年总水足迹达到最低点。为应对旱灾,贵州省政府启动实施了《贵州省抗旱办法》,实行用水总量控制和用水效率控制。2014年之后水文年由枯水年转变为平水年,水资源供给相对稳定,加之经济的快速发展,总水足迹

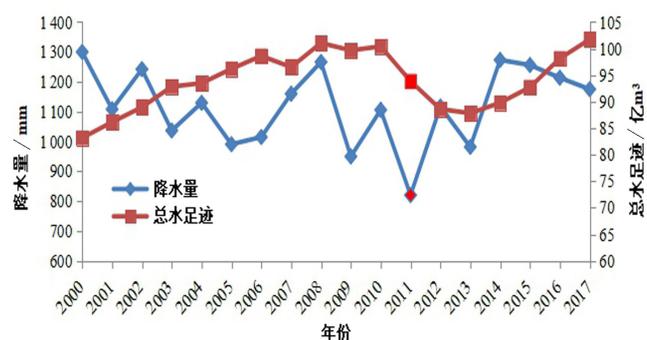


图4 贵州省降水量与总水足迹变化趋势图

Fig. 4 Trends of precipitation and total water footprint in Guizhou Province

又出现增加的趋势。由此可见,干旱缺水是导致总水足迹下降的一个重要原因。

4 结论与讨论

(1)2000–2017年间贵州省总水足迹经历了一个先波动增长后减少再逐渐增加的过程,人均水足迹的变化趋势与水足迹总量的变化趋势具有相似性。贵州省水资源自给率较高,常年保持在97%以上,水资源对外依赖程度较低,全省水资源量基本上能够满足自身生产生活需求。

(2)在贵州省水足迹效益指标中,2000–2017年水足迹经济效益值逐年增加明显,用水效益不断提高,水足迹土地密度的变化趋势与水足迹总量变化趋势基本一致,而万吨水足迹人口密度与水足迹总量变化趋势相反。

(3)贵州省作为水资源净输出地,对缓解其他地区水资源压力有一定的贡献。贵州省水资源压力指数在2000–2017年间呈现波动变化过程,整体维持在40%以上,枯水年和偏枯水年水资源压力指数大于70%,平水年则介于40%~70%。

(4)基于LMDI模型分析人文驱动因素对贵州省水足迹变化的影响程度为:经济效应>技术效应>人口效应,这与奚旭等基于IPAT-LMDI模型分析的中国水足迹变化驱动力中贵州省的情况相似^[22]。自然驱动因素中,降水量是影响水足迹变化的主要因素。

(5)为促进区域水资源可持续利用,贵州省应做好全面的水资源保护与合理利用规划。针对地形地貌等自然因素导致的水资源短缺,贵州省应加快蓄水、拦水等水利工程的建设,切实解决工程性缺水问题;针对人口、经济和技术等人文因素导致的水资源短缺,当地政府应当大力宣传水资源保护知识,不断增强人民的节水护水意识,以应对近些年水资源支撑人口能力下降的问题。由于经济和技术因素是影响水资源利用量变化的主要因素,有关部门还需要在经济发展的同时兼顾水资源的保护,对产业结构进行合理有效的调整,鼓励需水量较少的产业的发展,同时还要对生产生活中使用的节水技术进行大力推广,进一步提高水资源的利用率,从而促进贵州省水资源的可持续利用与发展。由于相关统计数据的时间系列长度有限,本文对于内部水足迹和外部水足迹的计算较粗略,对公式的改进是今后研究需

要加强的一个方面。同时,未来的研究还需考虑贵州省水资源空间分布的不均匀性,以便更好地优化配置区域内部水资源。

参考文献

- [1] 钱逸颖,董会娟,田旭,等.应对水资源危机的中国水足迹研究综述[J].生态经济,2018,34(7):162-166,173.
- [2] A Y Hoekstra, A K Chapagain. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2007, 21(1):35-48.
- [3] Marston L, Ao Y, Konar M, et al. High-Resolution Water Footprints of Production of the United States [J]. Water Resources Research, 2018, 54(3):2288-2316.
- [4] Chen Z M, Chen G Q. Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade [J]. Ecological Indicators, 2013, 28:142-149.
- [5] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives [J]. Ecological Economics, 2011, 70(4):749-758.
- [6] Xinchun C, Mengyang W, Rui S, et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China. [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610(1):84-93.
- [7] 周玲玲,王琳,余静.基于水足迹理论的水资源可持续利用评价体系:以即墨市为例[J].资源科学,2014,36(5):913-921.
- [8] 刘楚焯,赵言文,马群宇,等.基于水足迹理论的江苏省水资源可持续利用评价[J].水土保持通报,2017,37(6):313-320.
- [9] 何开为,张代青,侯璠,等.基于水足迹理论的云南省农业水资源承载力DEA模型评价[J].资源与水工程学报,2015,26(4):126-131.
- [10] 杨江州,许幼霞,周旭,等.贵州喀斯特高原水资源压力时空变化分析[J].人民珠江,2017,38(7):27-31.
- [11] 刘丽颖,杨清伟,曾一笑,等.喀斯特地区水资源安全评价模型构建及其应用:以贵州省为例[J].中国岩溶,2018,37(2):203-210.
- [12] 周亮广,梁虹.喀斯特地区水资源承载力评价研究:以贵州省为例[J].中国岩溶,2006,25(1):23-28
- [13] 苏印,官冬杰,苏维词.基于SPA的喀斯特地区水安全评价:以贵州省为例[J].中国岩溶,2015,34(6):560-569
- [14] 郭晓娜.西南喀斯特区水资源脆弱性评价[D].重庆:重庆师范大学,2017.
- [15] 贵州省水利厅.贵州省水资源公报(2000—2017)[EB/OL].
- [16] 贵州省统计局.贵州省统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2018.
- [17] 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.
- [18] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition [J]. Energy, 1998, 23(6):489-495.

- [19] 杨洋,丁镭,曾克峰.基于LMDI模型的广西水足迹驱动力分析[J].国土资源科技管理,2017,34(2):20-29.
- [20] 王云飞.基于水足迹理论的太原市水资源利用评价分析[J].黄河水利职业技术学院学报,2018,30(2):11-16.
- [21] 潘文俊,曹文志,王飞飞,等.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.
- [22] 奚旭,孙才志,赵良仕.基于IPAT-LMDI的中国水足迹变化驱动力分析[J].水利经济,2014,32(5):1-5,71.

Evaluation of water resources utilization in Guizhou Province based on water footprint theory and LMDI model

WU Hao, ZHANG Xingqi, DU Jinkang

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract Guizhou Province is located in southwest China with a total land area of about 176,000 km², accounting for 1.8% of the China's land area. Karst landforms are widely distributed in this region with a large area of peak-clusters and depressions, forming a unique karst ecosystem. This region has subtropical humid monsoon climate, featured by notable spatial and temporal differences of precipitation. As a typical karst region, it has water resource vulnerability, manifested by low water storage capacity, frequent seasonal drought, and the water environment is easily polluted and difficult to recover. In recent years, the engineering water shortage problem has been significantly improved with the comprehensive progress of large-scale water source project construction in Guizhou Province. In order to evaluate current situation of water resources utilization and the driving factors affecting water use in Guizhou Province, this work established a water resources utilization evaluation index system, based on the water footprint theory; and the analysis of temporal changes of the water footprints from 2000 to 2017 was carried out. The LMDI model was used to examine the impact extent of population, economic and technological driving factors on the changes of the water footprints. The results show that the total water footprint of Guizhou Province has experienced a process of growth from fluctuant to decreasing one and then gradually increase. The self-sufficiency rate of water resources is more than 97% per year, and the degree of external dependence is low; the economic benefit value of water footprints increases year by year. Water footprint land density is consistent with the trend of total water footprint. However, the population density of 10,000 tons of water footprint is inconsistent with the trend of total water footprint. The overall pressure index of water resources is maintained above 40%, of which the water stress index of semi-dry and dry years is greater than 70%. Based on the LMDI model, the impact degree of anthropogenic driving factors on the changes of water footprint, is in the order of economic effect>technical effect>population effects. Among them, economic effects account for 53.22% of the impact, while technical effects contribute 46.1% and population effects are only 0.68%. Precipitation as a main natural driving factor is also leading the changes in water footprint.

Key words water footprint, assessment system, LMDI model, driving factors, Guizhou Province

(编辑 黄晨晖)