2007—2016 年贵州省水资源生态足迹的演化特征

周子琴[1], 苏维词[1,2], 郑群威[1]

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘　要: [目的] 分析近 10 a 来贵州省及各地市的水资源生态足迹及其时空变化规律,揭示其主要影响因素,为该省社会经济发展与水资源可持续利用提供参考依据。[方法] 以贵州省为例,基于生态足迹模型,计算该省 2007—2016 年水资源生态足迹及水资源生态承载力,并分析其演化过程。[结果] ①贵州省水资源生态足迹由 2007 年的 1.62×10^7 hm^2 上升至 2016 年的 1.66×10^7 hm^2,整体呈波动上升趋势。水资源生态承载力小于生态足迹需水量,但生态承载力的年际变化明显,导致生态压力指数为 0.105～0.203。水资源存在 1.779～3.827 hm^2/人的生态盈余,可持续开发利用潜力较大。②从工业、农业、生活及生态各部分用水的人均生态足迹变化看,人均工业用水生态足迹下降明显,2007—2016 年下降了18.9%,主要得益于万元 GDP 生态足迹的持续下降;人均农业用水和生活用水生态足迹变化幅度小,分别维持在 0.085, 0.024 hm^2/人左右。③2014—2016 年贵州省各地州市人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力以及生态盈余的空间变化差异显著,整体上表现为与经济发展呈明显的正相关。经济较为发达的中西部地区,水资源需求量大,生态盈余较低;经济较为落后的东部地区,水资源需求量较小,生态盈余较大。[结论] 贵州省水资源消耗量减少,利用效率逐渐提高,水资源开发利用处于安全状态,可开发利用空间大。但贵州省 9 个市州水资源生态足迹与生态承载力存在严重分布不均的现象,需合理调配和利用。

关键词: 水资源生态足迹; 水资源生态承载力; 生态盈余; 贵州省

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2019)02-0227-07　　**中图分类号**: X826, TV211.1

文献参数: 周子琴, 苏维词, 郑群. 2007—2016 年贵州省水资源生态足迹的演化特征[J]. 水土保持通报, 2019,39(2):227-233. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.036; Zhou Ziqin, Su Weici, Zheng Qunwei. Evolution characteristics of water resource ecological footprint of Guizhou Province from 2007 to 2016[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(2):227-233.

Evolution Characteristics of Water Resource Ecological Footprint of Guizhou Province from 2007 to 2016

ZHOU Ziqin[1], SU Weici[1,2], ZHENG Qunwei[1]

(1. *School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing* 401331, *China*;
2. *Institute of Mountain Resources and Environment in Guizhou Province, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*)

Abstract: [Objective] This paper analyzed the ecological footprint of water resources and its spatial and temporal changes in cities of Guizhou Province, and also of province wide values in recent 10 years, and to recognize its main influencing factors in order to provide reference for social and economic development of the province and the sustainable utilization of water resources. [Methods] Taking Guizhou Province as an example, based on the ecological footprint model, the ecological footprint of water resources and the ecological carrying capacity of water resources in the province in 2007—2016 years were calculated, and its evolution process was analyzed. [Results] ① The ecological footprint of water resources in Guizhou Province increased from 1.62×10^7 hm^2 in 2007 to 1.66×10^7 hm^2 in 2016. The ecological carrying capacity of water resources was less than the water demand of ecological footprint, but the inter-annual variation of ecological carrying capacity was obvious, as a result, the ecological stress index was much less than 1. The water resources

收稿日期:2018-09-17　　**修回日期**:2018-10-05

资助项目:贵州省科技计划子专题"贵州省水资源分布与开发利用途径研究"(黔科合 J 重大字[2015]2001); 国家十三五重点研发计划课题"西部石漠化地区农村饮用水与污水处理关键技术研究与示范"(2016YFC0400708)

第一作者:周子琴(1995—),女(汉族),四川省德昌县人,硕士研究生,研究方向为水资源开发与保护。E-mail:cszhou_zq@163.com。

通讯作者:苏维词(1965—),男(苗族),湖南省绥宁县人,研究员,主要从事喀斯特地区资源环境与可持续发展方面的研究。E-mail:suweici@sina.com。

had an ecological surplus of 1.779～3.827 hm^2/person, so the potential for sustainable development and utilization was relatively large. ② Seeing from the changes in the per capita ecological footprint of water used in industry, agriculture, life and various ecological parts, the per capita ecological footprint of industrial water drooped significantly by 18.9% from 2007 to 2016, mainly because of the continuous reduction of ten thousand yuan GDP ecological footprint; The per capita ecological footprint of agricultural water and domestic water changed a little, which maintained at 0.085 hm^2/person and 0.024 hm^2/person, respectively. ③ The spatial variations of per capita ecological footprint of water and per capita ecological carrying capacity of water resources, as well as the ecological surplus in different cities and town in the Guizhou Province from 2014 to 2016 were significantly different. In an overall, the performance was significantly and positively correlated with economic development, while the central and western regions that had developed well in economy had a large demand for water resources and a low ecological surplus, and the eastern region where economy developed comparatively not well had a small demand for water resources and large ecological surplus. [Conclusion] The consumption of water resources in Guizhou Province was decreasing, the utilization efficiency was gradually improved. The development and utilization of water resources is in a safe state, and there is much room for the development and utilization, but the ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in 9 cities and counties of Guizhou Province were unevenly distributed, which needs to be reasonably allocated and utilized.

Keywords: the ecological print of water resources; the ecological capacity of water resources; ecological surplus; Guizhou Province

水资源作为人类生产生活必不可少的基本物质和基础性资源,对国民经济和社会发展有着不可替代的作用[1],是实现社会经济可持续发展的物质基础。随着人口激增、社会经济的迅速发展,人们对水资源的需求量在不断增大。因此及时掌握区域水资源足迹的动态变化及盈亏情况,对区域水资源可持续性利用具有重要意义。目前,区域水资源生态足迹的研究大多基于生态足迹的原理和方法,并根据研究区域的自然生态环境、社会经济发展特性进行适应性改进。目前相关研究主要集中在区域水资源生态足迹动态演变过程评估[2-4]、水资源负荷指数变化[4-5]、城市与乡村等人均水资源生态足迹差异及可持续利用现状[6-8]、区域水资源生态承载力研究[9]、水资源安全状态及水资源可持续利用评价[10-14]、经济发展与水资源协调及脱钩[13]等方面。这些前期研究工作主要是针对区域(或流域)水资源供给与生态环境建设、社会经济发展需求等供需情况或耦合状态开展了许多有益探讨,为区域水资源合理开发利用规划与调配等提供了某些科学依据。

贵州省是典型的喀斯特省份,具有地表地下二元三维水文地质地貌条件,水资源赋存规律复杂,山多坡陡谷深,地表渗漏严重,可方便开发利用的水资源并不多,属于典型的工程性缺水区,近年来,国家每年投入到贵州水利资金均在 1.75×10^5 元以上,工程性缺水问题已经大为改观,但由于贵州生态本底脆弱,坡陡土层薄、保水能力差,加上地形地貌复杂导致降雨不均匀,所以临时性干旱极易发生,特别是随着经济社会的快速发展及其对水资源需求增加,加上极端天气日趋增多,水资源季节性和局域性短缺很突出,在一定程度上影响到贵州经济社会持续稳定发展和生态建设。目前在中小尺度上针对贵州单个城市水资源足迹方面进行了个案研究[8,10,15-16],如采用生态足迹理论与方法测算了贵阳市 1998—2012 年水资源承载力演化[15];利用弹性网对 PLS 佐证分析 2002—2016 年贵阳市水生态足迹及驱动因素[8];分析了 2002—2014 年贵阳市水生态足迹变化特征并用 GRNN 预测了 2015—2019 年的变化情况[16];通过构建水资源生态足迹、水资源生态承载力模型及水资源生态安全评价模型,对六盘水市水资源生态安全进行了定量评价[10]等,但目前缺乏从整体的省域层面的研究。本文以贵州为例,分析了近 10 a 来贵州及各地市的水资源生态足迹及其时空变化规律,揭示其主要影响因素,为贵州社会经济发展与水资源可持续利用提供某些参考依据。

1 研究区概况

贵州省地处亚热带季风气候,降雨充沛,2007—2016 年的年均降水总量为 1.96×10^{11} m^3,年均径流量达 1.06×10^{11} m^3,人均水资源量为 2 648 m^3,属于我国人均水资源富集地区。但贵州降水空间分布不均,降水普遍集中于东部和南部地区,经计算 2007—2016 年贵州省降水季节变异系数最大值为 0.87,最

小值为 0.62,数值相差较大,说明贵州省降水季节和年际变化大,特别是贵州喀斯特发育典型性和区域的异质性,地表丰富的降水资源迅速转入地下,地表可方便利用的水资源不多,工程性缺水问题比较突出,而近年来贵州省社会经济的快速发展对水资源需求的增加,导致贵州水资源存在季节性和局域性短缺,水资源安全问题日渐突出。

2　数据来源与研究方法

2.1　水资源生态足迹模型

根据用水特性和水资源生态足迹的内涵,将用水分为生活用水、生产用水和生态环境用水三大类进行计算。水资源账户的计算公式如下[2]:

$$EF_m = N \cdot ef_m = N \cdot \gamma \cdot (W/p_m) \quad (1)$$

$$EF_\alpha = N \cdot ef_\alpha = \gamma \cdot W_\alpha / p_m \quad (2)$$

$$EF_\omega = N \cdot ef_\omega = \gamma \cdot W_\omega / p_m \quad (3)$$

$$EF_\mu = N \cdot ef_\mu = \gamma \cdot W_\mu / p_m \quad (4)$$

式中:EF_m——水资源总生态足迹(hm^2);N——人口数;ef_m——人均水资源生态足迹(hm^2/人);γ——水资源的全球均衡因子;W——人均消耗的水资源量(m^3);p_m——水资源全球平均生产能力(m^3/hm^2)。ef_α,ef_ω,ef_μ——人均生活用水生态足迹(hm^2/人)、人均生产用水生态足迹(hm^2/人)、人均生态用水生态足迹(hm^2/人);W_α,W_ω,W_μ——生活消耗的水资源量(m^3)、生产消耗的水资源量(m^3)、生态消耗的水资源量(m^3)。

本文采用基于 WWF 2000 年核算的均衡因子计算出的水资源的全球均衡因子为 5.19[16]。而水资源全球平均生产能力被定义为全球多年平均产水模数,为 3 140 m^3/hm^2[15]。

2.2　水资源生态承载力模型

由于一个国家和地区的水资源承载力中必须至少扣除 60%用于维持生态环境[17],故水资源生态承载力计算公式为:

$$EC_n = N \cdot ec_n = 0.4 \times \varphi \cdot \gamma \cdot Q/p_m \quad (5)$$

式中:EC_n——水资源承载力(hm^2);N——人口数;ec_n——人均水资源承载力(hm^2/人);γ——水资源的全球均衡因子;φ——区域水资源的产量因子;Q——研究区水资源总量(m^3);p_m——水资源全球平均生产能力(m^3/hm^2)。

根据文献[18—19],研究区水资源产量因子(φ)的计算公式为:

$$\varphi = V/V_d \quad (6)$$

式中:V——区域水资源量的平均生产能力即区域平均产水模数,贵州省水资源产量因子为 1.87[15];V_d——全球水资源量的平均生产能力即全球多年平均产水模数。

2.3　水资源生态盈余(生态赤字)模型

将区域内水资源消耗产生的生态足迹(EF_m)和生态承载力(EC_n)相比较,即可计算研究区的水资源生态赤字或生态盈余(EZ_r),由此判断研究区域内水资源的可持续利用情况[20]。

$$EZ_r = EC_n - EF_m \quad (7)$$

当 $EZ_r > 0$ 时,为水资源生态盈余;当 $EZ_r = 0$ 时,为水资源生态平衡;当 $EZ_r < 0$ 时,为水资源生态赤字。

2.4　生态压力指数

水资源生态压力指数又可称为水资源的匮乏度或水资源生态压力强度,是指一个国家或区域水资源生态足迹与水资源生态承载力的比值[6]。

$$EPI = ef_m/ec_n \quad (8)$$

式中:EPI——水资源生态压力指数。若 EPI>1,说明该区域水资源供给量不能满足消费量,水资源可持续利用受到影响,EPI 越大,水资源安全的压力就越大,越不安全;若 EPI=1,该区域水资源供需达到均衡,水资源安全处于临界安全状态或基本安全;若 0<EPI<1,说明该区域水资源供给量大于消费量,对水资源的开发利用处于相对安全状态[21-22]。

2.5　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与地区内生产总值(GDP)的比值,可以用来衡量水资源的利用效率,计算公式为:

$$EFI = EF_m/GDP \quad (9)$$

2.6　数据来源

本研究相关数据来源于 2007—2016 年《贵州省水资源公报》《贵州统计年鉴》以及《贵州省国土资源公报》(表 1)。

3　结果分析

3.1　贵州省水资源生态足迹与生态承载力变化分析

2007—2016 年贵州省水资源生态足迹历年有所波动,但波动范围较小,其中 2008 年达到历年最高值 1.68×10^7 hm^2,2012 年下降至最低值 1.51×10^7 hm^2。变化趋势可分为两个阶段(图 1):2007—2012 年水资源生态足迹呈现波动下降趋势,受当年降水量波动影响较大,同时受外出务工增多影响,省内常驻人口数量也逐年降低;2012—2016 年水资源生态足迹呈现持续上升趋势,其中 2012 年起降水总量开始回升,外出务工人员开始回流,常驻人口总量持续增长,对水资源的需求量增大,同时耕地面积逐年有所减少,因此水资源

生态足迹持续上升。从贵州省水资源生态承载力计算结果来看,各年份之间差异较大,呈波动变化趋势(图1)。研究时段贵州省降水量最高值出现在2014年,其水资源承载力也最高,达 1.50×10^8 hm²。2009—2011年西南大部分地区发生了3 a连续严重旱灾,其中2011年干旱是贵州同期灾害损失最大的一年,当年扣除蒸发量后的降水量比多年平均降水量偏少30.4%,年水资源总量同比常年偏少41%,水资源生态承载力也最低,仅有 7.74×10^7 hm²。经计算水资源承载力与历年降水量的相关系数高达0.961,因此干旱等自然灾害对贵州省水资源生态承载力影响较大。灾害频发不仅会造成严重的经济损失,而且已严重制约了社会经济的发展,水资源已成为贵州省社会经济发展中亟待解决的战略问题。

表 1 贵州省 2007—2016 年水资源基础数据统计

指 标	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
常驻人口/10^4	3 632	3 596	3 537	3 479	3 469	3 484	3 502	3 508	3 530	3 555
人均 GDP/元	7 940.8	9 904.2	11 062.1	13 228.4	16 041.7	19 743.9	23 173.8	26 509.3	29 857.3	33 127.2
年降水总量/10^8 m³	2 044	2 231	1 673	1 948	1 446	1 968	1 723	2 243	2 213	2 138
水资源总量/10^8 m³	1 055	1 141	911	957	626	974	760	1 213	1 154	1 066
用水总量/10^8 m³	98.02	101.90	100.38	101.45	95.08	91.52	92.00	95.31	97.49	100.31
农业用水量/10^8 m³	52.84	54.6	53.43	52.82	44.06	50.28	48.24	50.39	54.22	56.41
工业用水量/10^8 m³	31.79	33.75	34.14	34.32	40.09	24.99	27.02	27.66	25.50	25.68
生活用水量/10^8 m³	12.83	13.06	12.26	13.69	10.4	15.66	16.05	16.56	17.02	17.35
生态用水量/10^8 m³	0.56	0.49	0.55	0.62	0.53	0.59	0.69	0.70	0.74	0.88
耕地面积/10^4 hm²	448.75	448.53	449.62	456.63	456.01	455.44	455.26	454.39	454.10	453.41

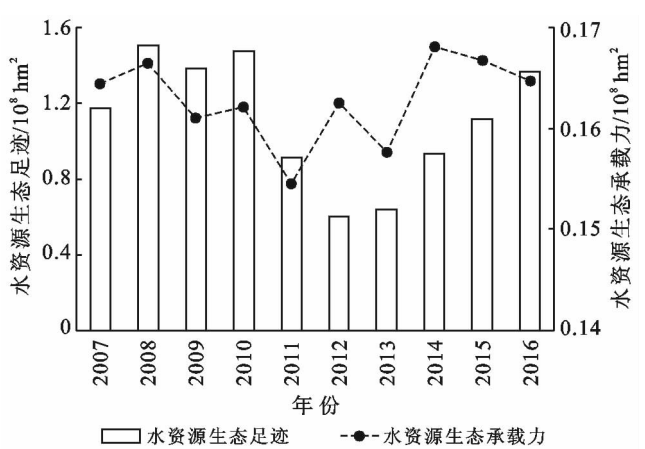


图 1 2007—2016 年贵州省水资源生态足迹和水资源生态承载力

通过比较人均水资源生态足迹和水资源生态承载力之间的关系可以有效判断一个地区的水资源利用状况(图2)。2007—2016年贵州省人均水资源生态足迹维持在0.434～0.482 hm²/人,最高值出现在2010年,最低值出现在2012年,2013年,最大值和最小值之差仅为0.048 hm²/人,说明贵州省水资源人均生态足迹总体平稳,波动幅度不大。历年人均水资源生态足迹不到0.49 hm²/人,但是随着经济的发展,人口的增长,城市化的发展,对水资源的需求量会持续增加。人均水资源生态承载力相对于人均水资源生态足迹,其变化幅度较大,与当年降水量关系密切。最高值出现在2014年,达到4.276 hm²/人,最低值出现在2011年和2013年,仅为2.232 hm²/人和2.512 hm²/人,主要受这两年降水量大幅度减少的影响。贵州省2007—2016年人均水资源生态足迹均低于当年人均水资源生态承载力,水资源处于生态盈余,满足可持续发展的要求。但各年的生态盈余大小有所差异,其中2014年达到最高值为3.827 hm²/人,最低值出现在2011和2013年,仅为1.779和2.247 hm²/人。在水资源生态足迹变化不大的情况下,生态盈余量主要取决于生态承载力的变化。

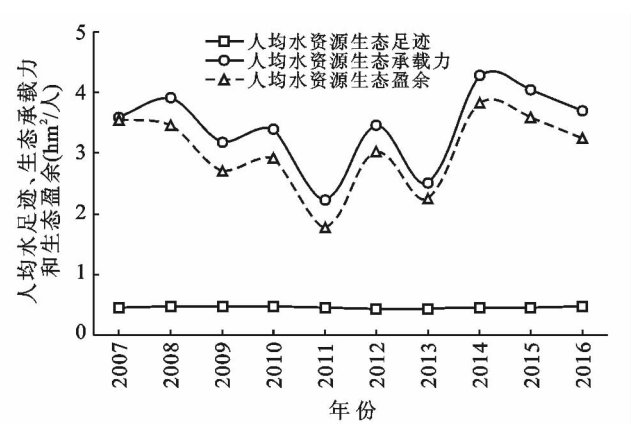


图 2 贵州省 2007—2016 年人均水资源生态足迹、生态承载力和生态盈余

贵州省2007—2016年各类用水人均水资源生态足迹账户中(图3),农业用水量最大,生态足迹为0.073～0.093 hm²/人,平均占水资源总生态足迹的53.06%,总体呈上升趋势,2013—2016年上升速度加

快,主要缘由是靠天吃饭的坡耕地面积减少,水浇地(特别是农业园区)面积增大,导致农业用水增加。人均工业用水生态足迹占 31.38%,维持在 0.041～0.066 hm^2/人,其中 2007—2011 年呈上升趋势,2011 年达到最高 0.066 hm^2/人,而 2012 年突然下降至 0.041 hm^2/人,这可能与贵州省 2012 年开始调整经济结构,大力发展绿色产业和打造以旅游业等低消耗产业为主导产业有关。人均生活用水生态足迹为 0.017～0.029 hm^2/人,占 14.91%,呈波动缓慢上升的趋势。受 2011 年旱灾的影响,人均农业用水和生活用水生态足迹都有明显下降,达历年最低值。人均生态用水生态足迹仅占 0.65%,历年变化范围为 0.000 8～0.001 5 hm^2/人。

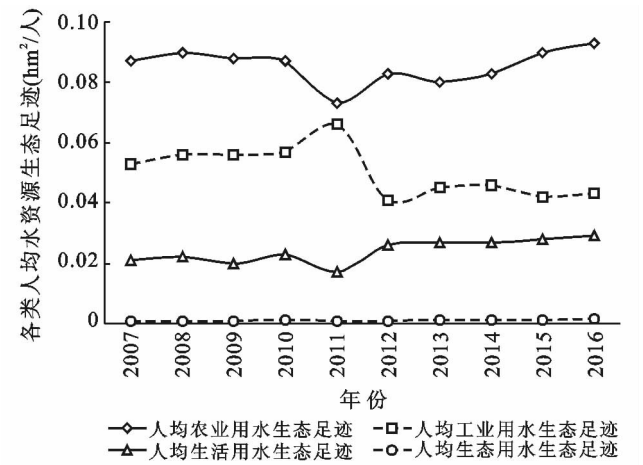


图 3　贵州省 2007－2016 年各类用水人均水资源生态足迹

3.2　贵州省水资源生态盈余及万元 GDP 生态足迹

万元 GDP 水资源生态足迹呈下降趋势(图 4),由 2007 年的 0.56 hm^2/万元下降到 2016 年的 0.14 hm^2/万元,年均降低 12.95%,2007 年是 2016 年的 4 倍,说明贵州省水资源利用率正逐年提高。

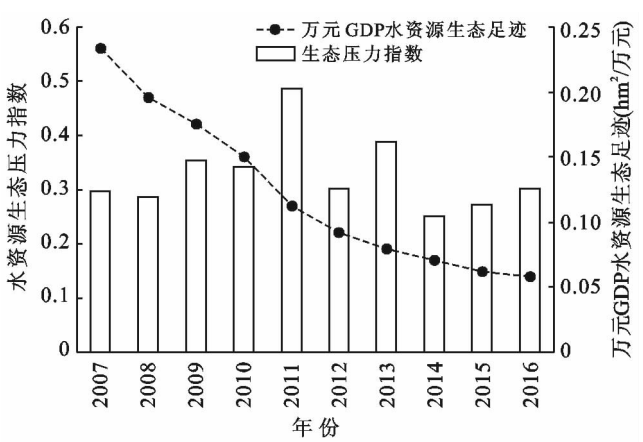


图 4　2007－2016 年贵州省万元 GDP 水资源生态足迹与生态压力指数

3.3　贵州省水资源生态压力指数

2007—2016 年贵州省生态压力指数为 0.105～0.203(图 4),变化幅度较大,但数值远小于 1,水资源利用尚处安全状态。由图 1 和图 4 对比得到,贵州省在 2014 年生态盈余最多,生态压力指数是最低的;在 2011 年,2013 年水资源生态盈余最少的时候,生态压力指数也是最高的,主要受这两年降水量减少的影响。因此足以说明生态压力指数变化趋势与水资源生态盈余量的变化是相辅相成的。

3.4　2014－2016 年贵州省各地州市水资源生态足迹与生态承载力

对 2014—2016 年贵州省 9 市(州)水资源生态足迹和水资源生态承载力进行分析。根据各地州市多年基础数据计算得出各地的水资源产量因子(表 2),由此计算各地州市的人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力以及人均水资源生态盈余。根据水资源生态足迹的内涵,社会发展对水资源的需求量越大,人均水资源生态足迹越高[3]。由附图 11 可以看出,2014—2016 年贵州省人均水资源生态足迹 3 a 平均值较高的地区位于遵义市、黔东南州、黔南州和安顺市,其中黔东南州和遵义市最高。由于黔东南州水稻田比重高,农业用水量大,导致人均水资源生态足迹较高;而遵义市工业经济规模总量位居全省第一,白酒产业的经济产值较高,对水资源开发利用程度较高。安顺市和黔南州的水资源较为丰富,水稻田比重较高,加之大力开发少数民族地区的旅游产业,人均水资源生态足迹相对较高。贵阳市是贵州省经济最发达的地区,人口密度大,以耗水较低的高新技术产业为主,因此人均水资源生态足迹反而低于黔东南州和遵义市。人均水资源生态足迹较低的地区位于毕节地区、铜仁地区、六盘水市和黔西南州。这些地区海拔较高,年平均降水量相对东部较少,加之第二产业比重较大,如六盘水市以煤炭、电力为主导产业,耗水量较多。由附图 12 可知,各地人均水资源生态盈余均未呈现生态赤字,说明贵州省各地州市的水资源供给充足,仍有一定的开发空间,但其空间分布不均,东西部差异较大。人均水资源生态盈余较大的地区位于贵州省东部及南部地区,其中以黔东南州最大,高达 12.81 hm^2/人,主要原因在于尽管黔东南州水田农耕地比重大,导致人均水资源生态足迹高,但黔东南降水充沛,喀斯特发育程度相对较低,是贵州地表水资源最丰富的地州,水资源生态承载力相对最高,因此人均水资源生态盈余最大。黔南州和铜仁地区的人均水资源生态足迹和生态承载力相对较高,人均水资源生态盈余仅次于黔东南州。遵义市、黔西南州

和安顺市的人均水资源生态盈余相对较低，但也在 2.0 hm^2/人以上。贵阳市、毕节地区和六盘水市处于河源区或分水岭地区，人口较多，工农业较发达，水资源相对较少，导致人均水资源生态盈余较低，其中贵阳市达最低值 0.42 hm^2/人，因此这些地区应该大力发展节水型产业体系，并提高民众的节水意识。

表 2 贵州省 9 市(州)水资源产量因子

市(州)	贵阳市	遵义市	安顺市	黔南州	黔东南州	铜仁地区	毕节地区	六盘水市	黔西南州
水资源产量因子	1.73	2.29	1.97	2.58	2.63	2.45	2.00	1.83	2.13

总体看来，2014—2016 年贵州省各地州市的万元 GDP 水资源生态足迹均呈递减趋势，说明各地州市的水资源利用率正逐年提高(图 5)。具体分析，经济最发达的贵阳市数值最低，仅有 0.06 hm^2/万元左右，说明贵阳市水资源利用效率最高。水资源短缺地区如毕节地区、六盘水市、黔西南州的水资源利用效率也较高。而万元 GDP 水资源生态足迹数值较高的区域位于黔东南州、黔南州、安顺市、铜仁地区、遵义市，主要与这些地区的产业结构有关，其中安顺市和铜仁地区水资源量较丰富，但经济发展较落后，水资源利用效率较低；黔东南州和黔南州水资源丰富，以旅游业、服务业为主导产业，对水资源开发利用程度较低；遵义市水资源生态足迹较高，经济基础好，主要以耗水型工业为主，水资源利用效率较低。

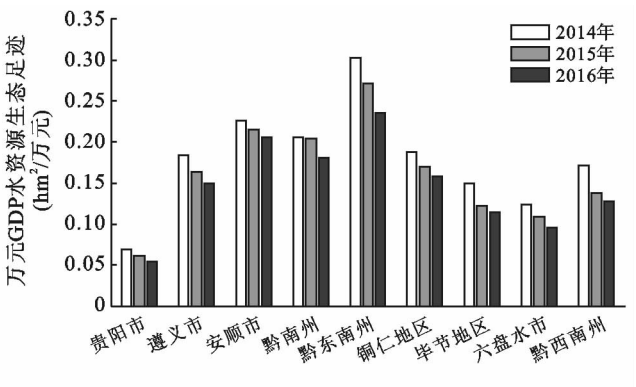


图 5 贵州省 2014—2016 年 9 市(州)万元 GDP 水资源生态足迹

4 结论与讨论

(1) 2007—2016 年贵州省人均水资源生态足迹呈波动上升趋势，但其数值相对较低，不到 0.49 hm^2/人。根据水资源生态足迹的内涵，社会发展对水资源的需求量越大，水资源开发利用程度越高，人均水资源生态足迹数值越高[15]。分析可看出，近几年贵州省经济发展迅速，2016 年 GDP 增速为 10.5%，跻身全国第 2 位，随着经济社会的快速发展和需水量的增加，人均水资源生态足迹呈上升趋势。但是贵州省经济基数较低，人均 GDP 在全国排名中靠后，经济发展的质量和潜力有待提升；同时贵州省喀斯特发育典型性和区域的异质性，地表丰富的降水资源迅速转入地下，地表可方便利用的水资源不多，导致对水资源的开发利用程度不高，因此人均水资源生态足迹数值相对较低。贵州省历年平均的人均农业用水、工业用水、生活用水和生态用水足迹分别为 0.085 4，0.050 5，0.024 和 0.001 04 hm^2/人，占人均水资源生态足迹总量的53.06%，31.38%，14.91%和 0.65%。其中贵州省农业用水比重最大，这是由传统的耕种方式和耕地面积增加引起的。为此要增强人们节水、保水意识，改变贵州省经济发展的生产和消费方式，调整和优化农业生产结构，走水资源节约、集约、高效型的循环经济发展道路。

(2) 2007—2016 年贵州省水资源生态承载力水平不稳定，波动较大。在干旱年份，水资源承载力降低，导致生态盈余减少。2007—2016 年贵州省各地州市均存在水资源生态盈余，其变化趋势与水资源承载力变化趋势相近，说明贵州水资源供给充足，在目前的经济发展状态下，能够满足区域的需要。万元 GDP 水资源生态足迹逐年下降，年均降低 12.95%，表明各地区对水资源的利用效率正在逐步提高，但还有很大的挖掘潜力。因此，基于贵州省岩溶地貌的特征，要加大水利工程的利用和建设，提高贵州蓄、提、引水的能力，提升对干旱灾害的应对能力。

(3) 在地区演化特征差异上，贵州省各地州市水资源在空间上分布极为不均，水资源分布与人口、经济的分布错位。东部地区人口密度小、降水充沛，人均水资源生态盈余较大；地处中西部以贵阳、毕节、六盘水等为代表的长江珠江分水岭地区、河源区降水相对较小，人口密度大，工农业较发达，导致人均水资源生态盈余较低，水资源承载力基本满足社会和经济的发展需要，但在干旱年份，会出现局部地区水资源供给不足，尤其是分散的农村地区表现比较明显，饮水安全问题尚未完全解决，这对区域的可持续发展造成影响。所以在中西部地区，尤其是贵阳市、毕节地区和六盘水市等地区应该加大产业调整力度，合理安排产业布局与生产，提高水资源利用效率，同时进一步

优化和完善大中小微型水利工程的建设与布局,提高应对极端气候的能力。另外,贵州省水资源生态压力指数远小于 1,水资源开发利用处于安全状态,可开发利用空间大。因此,要根据各地州市的自身特色,大力发展旅游业、高新技术产业等低耗水产业,同时贵州作为两江上游重要的生态屏障,要加强环境保护力度和水源涵养林的建设力度,合理开发水资源,提高水资源承载力,为两江中下游地区的用水安全提供支撑。

(4) 本研究所用模型能够较好地显示贵州省水资源开发利用状况,可为水资源管理与利用提供参考依据,但是也存在很多不足,仅对水资源量的生态足迹进行了研究,没有考虑工矿业发展及农业面源污染等对水质安全的影响,未考虑突发事件、极端天气背景下水资源承载力和水生态足迹变化情况,以后研究有待深入。

[参 考 文 献]

[1] 杜湘红,张涛. 水资源环境与社会经济系统耦合发展的仿真模拟:以洞庭湖生态经济区为例[J]. 地理科学,2015,35(9):1109-1115.

[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):4111-4124.

[3] 赵静,王颖,赵春子,等. 延边州水资源生态足迹与承载力动态研究[J]. 中国农业大学学报,2017,22(12):74-82.

[4] 张军,周冬梅,张仁陟. 黑河流域 2004—2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1779-1785.

[5] 张凤太,苏维词,周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1249-1254.

[6] 王文国,龚久平,青鹏,等. 重庆市水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 生态经济,2011(7):159-162.

[7] 王俭,张朝星,于英谭,等. 城市水资源生态足迹核算模型及应用:以沈阳市为例[J]. 应用生态学报,2012,23(8):2257-2262.

[8] 许国钰,任晓冬,杨振华,等. 利用弹性网对 PLS 佐证分析城市水生态足迹及驱动因素:以贵阳市为例[J]. 水土保持通报,2018,38(4):220-227,233.

[9] 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.

[10] 代稳,张美竹,秦趣,等. 基于生态足迹模型的水资源生态安全评价研究[J]. 环境科学与技术,2013,36(12):228-233.

[11] 杨晓俊,方传珊,侯叶子. 基于生态足迹的西安城市生态游憩空间优化研究[J]. 地理研究,2018,37(2):281-291.

[12] 杨丽娜. 基于生态足迹理论的武汉城市圈水资源可持续利用评价[D]. 湖北 武汉:华中师范大学,2016.

[13] 杨裕恒,曹升乐,刘阳,等. 基于水生态足迹的山东省水资源利用与经济发展分析[J/OL]. 排灌机械工程学报:1-10[2018-05-23]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180302.1015.030.html.

[14] 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):3329-3338.

[15] 吕添贵,吴次芳,李洪义,等. 基于生态足迹的水资源承载力评价研究:以喀斯特地区为例[J]. 中国国土资源经济,2017,30(5):42-47.

[16] 杨振华,苏维词,赵卫权,等. 基于 GRNN 模型的岩溶地区城市水生态足迹分析与预测[J]. 中国岩溶,2016,35(1):36-42.

[17] 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.

[18] 贾焰,张军,张仁陟. 2001—2011 年石羊河流域水资源生态足迹研究[J]. 草业学报,2016,25(2):10-17.

[19] 马静,汪党献,来海亮,等. 中国区域水足迹的估算[J]. 资源科学,2005,27(5):96-100.

[20] 邢清枝,任志远,王丽霞,等. 基于生态足迹法的陕北地区水资源可持续利用评价[J]. 干旱区研究,2009,26(6):793-798.

[21] 赵军凯,李九发,戴志军,等. 基于熵模型的城市水资源承载力研究:以开封市为例[J]. 自然资源学报,2009,24(11):1944-1951.

[22] 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.

[23] 方国华,罗乾,黄显峰,等. 基于生态足迹模型的区域水资源生态承载力研究[J]. 水电能源科学,2011,29(10):12-14.

[24] 汤冠华,刘永. 基于生态足迹模型的浙江省水资源生态承载力评价研究[J]. 浙江水利科技,2013,41(1):45-47.