

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.11.015

基于水足迹理论的重庆市水资源 利用时空分析与评价

宋继鹏, 程先, 刘秀华

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 定量分析和评价水资源时空利用情况对城市生态文明建设和区域协调发展具有重要意义。基于水足迹理论, 运用自上而下的水足迹计算方法, 结合水资源评价指标对重庆市水资源利用状况进行时空分析与评价。结果表明: ① 重庆市水足迹总量从 2005 年的 $315.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 稳步增长至 2019 年的 $357.15 \times 10^8 \text{ m}^3$, 内部水足迹特别是农业水足迹是重庆市水足迹变化的主导因素, 人均水足迹从 2005 年的 $1\ 127.88 \text{ m}^3/\text{人}$ 波动增长至 2019 年的 $1\ 143.14 \text{ m}^3/\text{人}$, 涨幅较小; ② 重庆市 38 个区县水足迹总量呈现出显著差异, 最高的江津区可达 $21.36 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最低的沙坪坝区仅为 $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同时, 各区县人均水足迹差异也较大, 最高的潼南区为 $2\ 124 \text{ m}^3/\text{人}$, 最低的沙坪坝区为 $18 \text{ m}^3/\text{人}$; ③ 重庆市 2005—2019 年水资源自给率一直保持在 97% 以上, 整体的水资源压力指数和匮乏指数都保持在 1 以下, 但近年来水资源负载指数一直为 II 级; 同时, 2019 年重庆市有 32 个区县的水资源自给率大于 95%, 但主城都市区和渝东北的部分区县水资源压力指数和水资源匮乏指数较高, 有 20 个区县水资源负载指数等级为 I 级, 大部分位于主城都市区。重庆市水资源和水足迹的时空分布差异显著, 需进一步优化用水结构和协调不同区县的水资源分配。

关键词: 水足迹; 水资源利用; 时空分析; 区县; 重庆市

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)11-0166-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatio-Temporal Analysis and Evaluation of Water Resources Utilization in Chongqing Based on Water Footprint Theory

SONG Jipeng, CHENG Xian, LIU Xiuhua

School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Quantitative analysis and evaluation water resources' spatio-temporal utilization is of great importance to the construction of urban ecological civilization and regional coordinated development. Based on the water footprint (WF) theory, the top-down calculation method of WF was used to analyze and eval-

收稿日期: 2021-09-14

基金项目: 河北省湿地生态与保护重点实验室(筹)开放基金项目(hklk201909); 西南大学博士基金项目(SWU119037); 国家自然科学基金面上项目(41771534)。

作者简介: 宋继鹏, 硕士研究生, 主要从事区域生态学方面的研究。

通信作者: 程先, 博士, 讲师。

uate the spatio-temporal characteristics of water resources utilization in Chongqing city by combining water resources evaluation indexes. The results showed that: ① The WF in Chongqing steadily increased from $315.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2005 to $357.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2019. The internal WF, especially the agricultural WF, was the leading driver for WF changes. The per capita WF fluctuated from $1\ 127.88 \text{ m}^3$ in 2005 to $1\ 143.14 \text{ m}^3$ in 2019, with a small increase. ② The total WF of 38 districts and counties in Chongqing showed significant differences, with the highest WF in Jiangjin District reaching $21.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ and the lowest WF in Shapingba District, only $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$. At the same time, the per capita WF of each district and county was also quite different, with the highest of 2124 m^3 in Tongnan District and the lowest of 18 m^3 in Shapingba District. ③ The water resources self-sufficiency rate of Chongqing remained above 97% from 2005 to 2019, and the overall water resource pressure index and scarcity index remained below 1. However, the water resource load index has been level II in recent years. Meanwhile, in 2019, there were 32 districts and counties whose self-sufficiency rates of water resources were more than 95%, but the water resource pressure and shortage indexes of some districts and counties in the main metropolitan area and northeastern part were relatively high. There were 20 districts and counties whose water resource load index was Grade I, and most of which are located in the main metropolitan area. The spatio-temporal distributions of water resources and WF in Chongqing were significant different, which requires further optimization of water use structure and coordination of water resources allocation among different districts and counties.

Key words: water footprint; water resources utilization; spatio-temporal analysis; district and county; Chongqing

水资源在人类的生存发展过程中起着基础性和战略性的作用,是生态环境和经济发展的主要限制要素^[1]。随着人口持续增长与社会经济快速发展,加上受到水资源时空分布不均、水污染日趋严重等一系列问题的影响,水资源供给和需求失衡问题进一步加重,经济和社会的持续发展也受到一定约束^[2]。为了更好地研究和应对水资源短缺、时空分布不均等问题,Allan^[3]于 20 世纪 90 年代提出了虚拟水的概念,用来表示在生产商品和服务的过程中所需要耗费的水资源数量。虚拟水与实体水不同,虚拟水是指商品或者服务中以“虚拟”形式存在的那部分“看不见”的水^[4]。真实、准确地计算人们在水资源方面的需求和消费数量,能够促使水资源在利用过程中更加合理^[5]。2002 年,Hoekstra 等^[6]在虚拟水理论的基础上提出了水足迹理论,将其定义为任何已知人口(一个国家、一个地区或者一个人)在一定时间内所消费的所有产品和服务所需要的水资源数量。该定义中的产品和服务涉及到人类生活和生产过程中每天必需的食物、日常生活用品、生活用水及生态环境用水^[7]。总的来说,水足迹概念的提出将实体水与虚拟水联系起来,是对水资源消耗和污染的定量化评价,为详细分析和深入研究某个国家或者区域在水资源占有和消费方面的真实数量提供了新的视角,并得到学者们的广泛关注^[8-11]。

目前,我国对水足迹的研究主要集中在 3 个方面:一是对某个或某些产品的水足迹核算^[12-14],如崔克蓉等^[15]以湖南水稻为研究对象,核算了湖南省 2002—2015 年水稻生产的水足迹,研究其变化特征及影响因素;二是对区域水足迹进行评价^[16-17],如余灏哲等^[18]以山东省及其 17 个地市为例,计算了该地区 2005—2014 年的水足迹,并分析了其水足迹时空特征;三是基于水足迹的区域水资源可持续性研究^[19],如刘楚焯等^[20]通过计算江苏省的水足迹(包含灰水在内),对其水资源的可持续利用情况进行了研究和分析。

重庆市境内有长江、嘉陵江等多条河流,虽拥有较大的过境水资源量,但水资源时空分布差异显著。重庆作为成渝双城经济圈的重要组成部分以及“一带一路”和长江经济带的重要连接点^[21],自直辖以来,GDP 由 1997 年的 1 525.26 亿元增长到 2019 年的 23 605.77 亿元,城镇化率由 31% 增长到 66.8%。经济的快速发展和城镇化水平的不断提高,导致重庆市水资源总消费量由 2001 年的 57.56 亿 m^3 增长到 2019 年的 76.47 亿 m^3 ,水资源压力不断增加。重庆市水资源压力状况受到了学者的关注,例如,邓晓军等^[22]从生产的角度计算了重庆市 2004 年的水足迹,谭秀娟^[23]采用自上而下的方法计算了重庆市 1997—2008 年的水足迹,

班荣船等^[24]在虚拟水和水足迹理论的基础上,对重庆市都市区 2001—2011 年食品水足迹进行了计算,并尝试分析其变化的影响因素。但是,已有研究多集中于重庆市级尺度,很少有针对区县等更小尺度的研究,并且缺乏对重庆市水资源利用状况的评价。基于此,本研究尝试在市级尺度的基础上,结合区县这一更小尺度,对重庆市及各区县的水足迹和人均水足迹进行定量研究,并结合水资源评价指标对其水资源利用状况进行时空分析与评价,以期对重庆市水资源合理配置与区域协同发展提供参考与依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 水足迹计算方法

目前,计算水足迹的方法主要是自下而上法和自上而下法。自下而上法是指水足迹由商品或服务的单位虚拟水含量与其对应的全部消费数量相乘再进行加和而得的计算方法,该方法的优点是相对简单,商品或服务的消费数量大多可在统计年鉴上查找获取,缺点是统计年鉴上某些年份的部分数据可能会缺失;自上而下法是指区域水足迹由区域内水资源利用量与虚拟水的净流入量加和而得的计算方法,该方法的优点是将水足迹按照内部、外部水足迹核算,并在此基础上对水资源外部依赖度等指标进行深入分析,但该方法需要详细的区域内商品流入及流出的数据,这部分数据较难获取^[25-26]。考虑到数据可得性与研究区实际情况,本研究采用自上而下法。

自上而下法的表达式为^[18,25]:

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

式中: WF 表示水足迹总量; IWF 表示内部水足迹,其含义为区域内供给本地人口所消费的产品与服务的水资源需求总量; EWF 表示外部水足迹,即从外部区域进口的虚拟水总量。

$$IWF = WU_A + WU_I + WU_D + WU_E - VWE_{dom} \quad (2)$$

式中: WU_A 为该区域的农业生产需水量(不含农业灌溉中的损失量),包括了农作物需水量(WU_{A1})与动物需水量(WU_{A2}); WU_I 为该区域工业生产需水量; WU_D 为该区域内人口生活用水量; WU_E 为该区域生态环境需水量; VWE_{dom} 为本区域向外出口的虚拟水量。

$$EWF = VWI - VW_{i-e} \quad (3)$$

式中: VWI 表示从区域外进口的虚拟水量; VW_{i-e} 表示向其他国家或地区输出的进口产品再出口的虚拟水量(考虑数据获取难度,忽略不计)。

1.2 主要产品虚拟水

目前,在虚拟水计算过程中,农作物产品和动物产品的虚拟水消费量是主体部分^[27]。本研究采用的单位农作物产品的虚拟水含量借鉴邓晓军等^[22]在重庆市的研究成果,单位动物产品的虚拟水含量参考 Chapagain 等^[28]的研究成果中关于中国的部分及邓晓军等^[22]在本研究区的相关成果,并根据重庆市实际情况选取了生产量较多的 7 种农作物产品和 4 种动物产品为研究对象,农作物产品分别是粮食、油料、甘蔗、烟叶、茶叶、水果和蔬菜,动物产品分别是猪肉、禽肉、禽蛋和水产品,其相应的单位质量虚拟水含量见表 1。

表 1 重庆市主要农产品单位质量的虚拟水含量

m³/kg

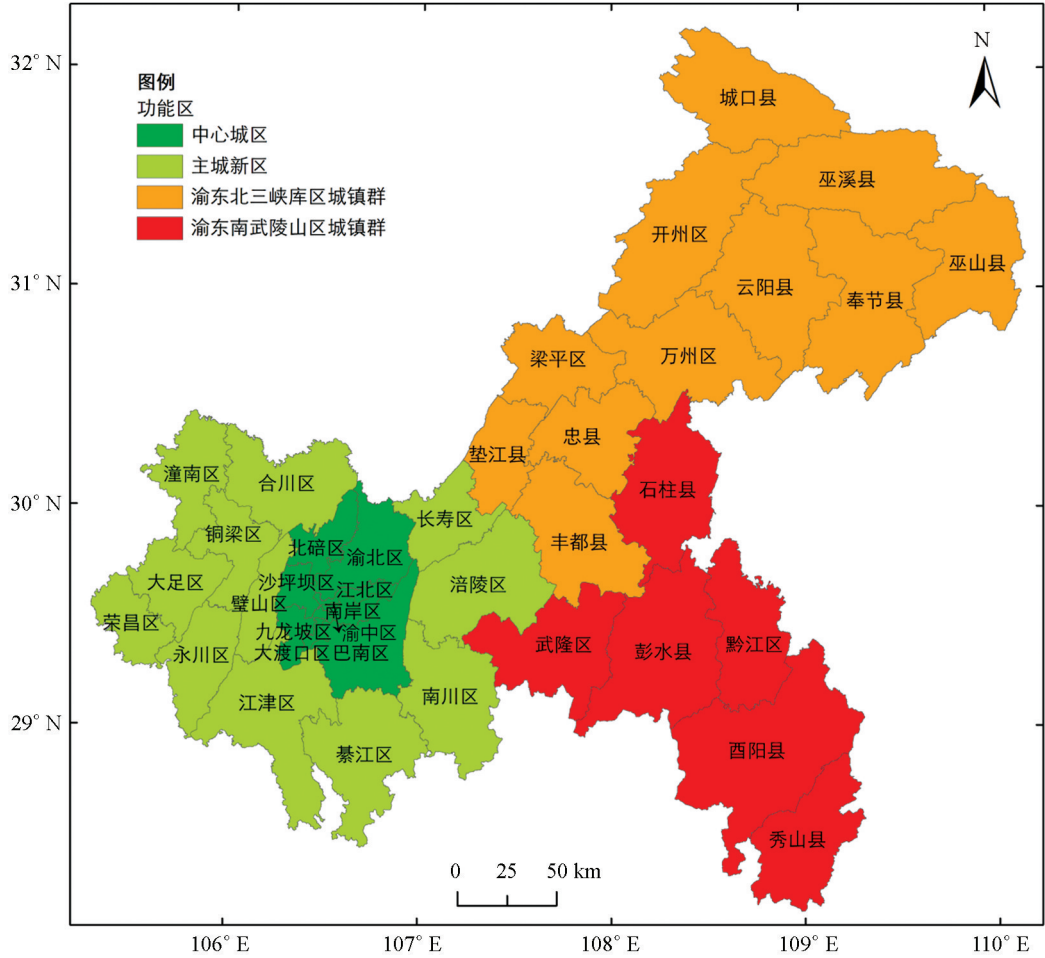
粮食	油料	甘蔗	烟叶	茶叶	水果	蔬菜	猪肉	禽肉	禽蛋	水产品
1.258 5	1.562 2	0.127 7	2.459 1	16.604	1.021 4	0.066 8	3.946	3.652	3.550	5.000

1.3 研究区概况与数据来源

重庆市总面积为 8.24 万 km²,辖有 38 个区县(26 个区、8 个县、4 个自治县)。2019 年常住人口数量为 3 124.32 万,城镇化率达到 66.8%。本研究参考《重庆统计年鉴 2020》划分出的“一区两群”对重庆市 38 个区县进行划分,具体见图 1。

本研究采用的数据主要包括社会经济数据和水资源数据两类。其中,社会经济数据包括常住人口数据,主要农产品、动物产品产量数据和国内生产总值(GDP),主要来源于《重庆统计年鉴(2006—2020 年)》和《重庆调查年鉴(2006—2020 年)》;水资源数据包括水资源总量、生活用水量、生态环境用水量和工业用

水量, 主要来源于重庆市水利局公布的 2005—2019 年的水资源公报(网址: http://slj.cq.gov.cn/zwgk_250/fdzdgnr/tjgb/szygb/list.html).



底图审图号为 GS(2019)3333 号.

图 1 重庆市行政区划图

1.4 基于水足迹的水资源评价指标体系

根据水足迹的原理、构成以及与水资源利用之间的关系, 参考威瑞等^[29]、侯林秀等^[30]和商庆凯等^[31]的研究成果, 提出相应的基于水足迹的区域水资源利用评价指标对区域水资源开发利用情况进行评价, 具体指标的计算方法及含义见表 2^[29-30]和表 3^[31].

表 2 基于水足迹的区域水资源利用评价指标体系

水足迹指标	计算方法	含义
水资源进口依赖度(IWD)	$(EWF/WF) \times 100\%$	区域依赖外部水资源的程度
水资源自给率(WSS)	$(IWF/WF) \times 100\%$	区域使用本地水资源的程度
水足迹经济效益(WFEB)	GDP/WF	单位水足迹量产生的经济价值
水资源净贸易量(WFNTV)	$VWE_{dom} - VWI$	水资源贸易中的地位和作用
水足迹价值兑换率(WFVCR)	VWI/VWE_{dom}	水足迹所表现的货币价值兑换比例
水资源压力指数(WPI)	$(IWF + VWE_{dom})/WA$	生产需水量对可用水资源量作用强度
水资源匮乏指数(WS)	WFP/WA	水资源紧缺状态
水资源负载指数(c)	$k \sqrt{pG}/WA$	区域水资源的开发利用前景

注: EWF 为外部水足迹(m^3), IWF 为内部水足迹(m^3), WF 为水足迹(m^3), VWI 表示该地区从区域外进口的虚拟水量(m^3), VWE_{dom} 为本地向外出口的虚拟水量(m^3), WA 为水资源总量(m^3), p 为人口(万人), GDP 为国内生产总值(亿元), k 为与降水有关的系数.

表 3 水资源负载指数分级

水资源负载指数	级别	水资源利用水平	今后水资源开发评价
$c \geq 10$	I	很高, 潜力不大	有条件时需要外流域补水
$5 \leq c < 10$	II	高, 潜力不大	开发困难
$2 \leq c < 5$	III	中等, 潜力较大	开发较难
$1 \leq c < 2$	IV	较低, 潜力大	开发较易
$c < 1$	V	低, 潜力很大	开发容易

2 结果与分析

2.1 水资源时空差异分析

2.1.1 水资源动态变化分析

如图 2 所示, 2005—2019 年重庆市水资源总量和人均水资源占有量变化趋势相似, 但不同年份间差异较大, 和降雨量存在较大的关系. 2007 年、2014 年和 2017 年水资源总量和人均水资源占有量较大, 其中水资源总量均大于 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水资源占有量均大于 $2000 \text{ m}^3/\text{人}$. 2006 年水资源总量和人均水资源占有量最小, 其中水资源总量仅为 $380.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水资源占有量为 $1354.41 \text{ m}^3/\text{人}$, 这是由于重庆市在该年遭受了特大旱灾, 属特枯年(2006 年水资源公报). 其余各年的水资源总量介于 $450 \times 10^8 \sim 605 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间, 人均水资源占有量介于 $1500 \sim 2000 \text{ m}^3/\text{人}$ 之间.

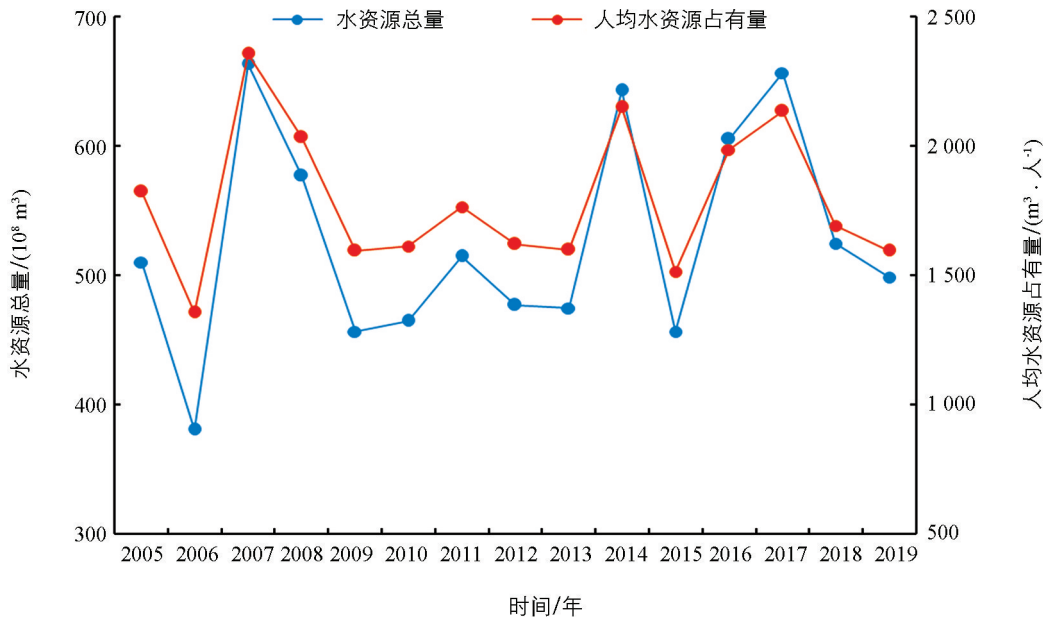
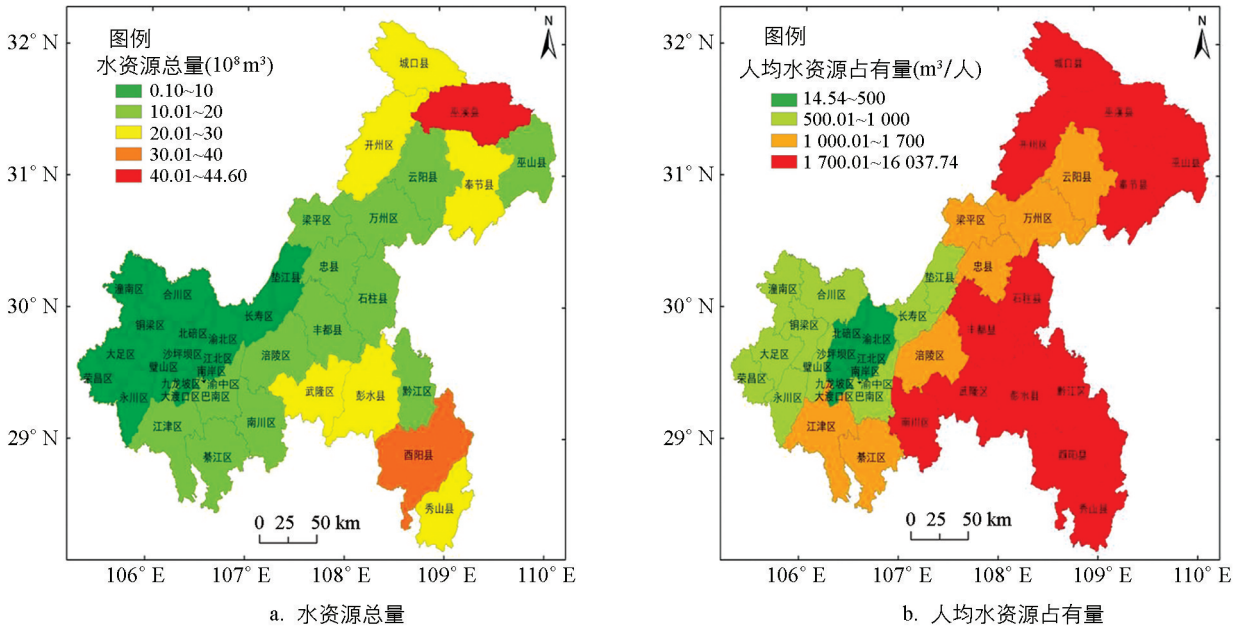


图 2 重庆市水资源动态变化

2.1.2 水资源空间格局分析

如图 3a 所示, 以 2019 年为例, 该年重庆市水资源总量空间分布差异较大, 水资源总量最高的区县分别是巫溪县($44.60 \times 10^8 \text{ m}^3$)和酉阳县($38.93 \times 10^8 \text{ m}^3$), 最低的区县依次是渝中区($0.10 \times 10^8 \text{ m}^3$)、大渡口区($0.43 \times 10^8 \text{ m}^3$)和江北区($0.95 \times 10^8 \text{ m}^3$), 呈现出西部低、东北部和东南部较高的态势.

重庆市各区县人均水资源占有量的差异更加明显(图 3b), 人均水资源占有量最高的两个县是城口县($16038 \text{ m}^3/\text{人}$)和巫溪县($11586 \text{ m}^3/\text{人}$), 而最低的渝中区仅为 $15 \text{ m}^3/\text{人}$. 按照“国际人口行动”提出的缺水标准(表 4^[31-32]), 38 个区县中处于严重缺水状态的区县有 8 个(21%), 中度缺水状态的有 10 个(26%), 水紧张状态的有 7 个(19%). 有 13 个(34%)区县不缺水, 均分布在渝东南.



底图审图号为 GS(2019)3333 号.

图 3 重庆市水资源总量和人均水资源占有量分布

表 4 国际公认缺水标准及 2019 年重庆市区县缺水情况

人均水资源占有量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	<500	500~1 000	1 000~1 700	$\geq 1 700$
缺水等级	严重缺水状态	中度缺水状态	水紧张状态	不缺水
区县数量	8	10	7	13

2.2 水足迹时空差异分析

2.2.1 水足迹时间变化特征分析

2005—2019 年重庆市水足迹计算结果见图 4a. 2005—2019 年, 重庆市水足迹除少数年份(2006 年、2018 年和 2019 年)外, 整体上呈现出稳步增长的趋势, 从 2005 年的 $315.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增长至 2019 年的 $357.15 \times 10^8 \text{ m}^3$. 其中, 内部水足迹特别是农业水足迹在水足迹总量中占据绝对比例, 外部水足迹占比很小, 表明重庆市水足迹变化的主导因素为内部水足迹.

内部水足迹变化趋势和水足迹总量一致, 整体上表现为增长的趋势, 但 2006, 2011, 2018, 2019 年出现回落; 外部水足迹则依次呈现出增长—减少—增长—减少的趋势, 其最高值($11.02 \times 10^8 \text{ m}^3$)出现在 2014 年, 之后出现显著的下降趋势. 图 4b 表明, 内部水足迹构成平均占比由大到小依次为农业水足迹、工业水足迹、生活用水量、出口虚拟水量和生态环境用水量. 其中生态环境用水量占比非常小, 多年来在内部水足迹中平均占比仅为 0.23%.

重庆市人均水足迹整体上呈现出先增后减的趋势(2006 年除外), 下降的转折点出现在 2018 年, 从 2005 年的 $1 127.88 \text{ m}^3/\text{人}$ 曲折增长至 2019 年的 $1 143.14 \text{ m}^3/\text{人}$, 涨幅较小.

主要农产品生产用水量结果见图 5. 在农作物虚拟水含量中, 粮食居于首位, 且远高于其他农作物, 除了 2006 年外, 2005—2019 年波动幅度较小; 水果位居第 2, 除 2018 年略有下降外, 其余各年呈现出持续增长的趋势; 虽然蔬菜单位虚拟水含量较低, 但由于其播种面积和产量较高, 虚拟水总量位居第 3, 多年来保持稳定小幅度上升的趋势; 油料和茶叶的虚拟水含量相差不大, 且变动趋势整体上一致; 虚拟水含量最低的农作物为烟叶和糖料,

在动物产品虚拟水含量中, 猪肉的虚拟水含量最多, 但从 2014 年开始呈现出下降的趋势, 特别是在

2017年后,出现了急剧的下降;其次是水产品,2005—2008年呈波动下降趋势,但在2008年之后转为增长,2011年超过禽蛋,之后一直保持快速增长的趋势;禽蛋位居第三,除2005年出现明显下降外,其余各年均较为稳定,且呈现出小幅度的上升趋势;禽肉虚拟水含量最低,在2007年之前没有显著的变化,2017年出现明显的下降,之后开始呈现出稳定的增长趋势。

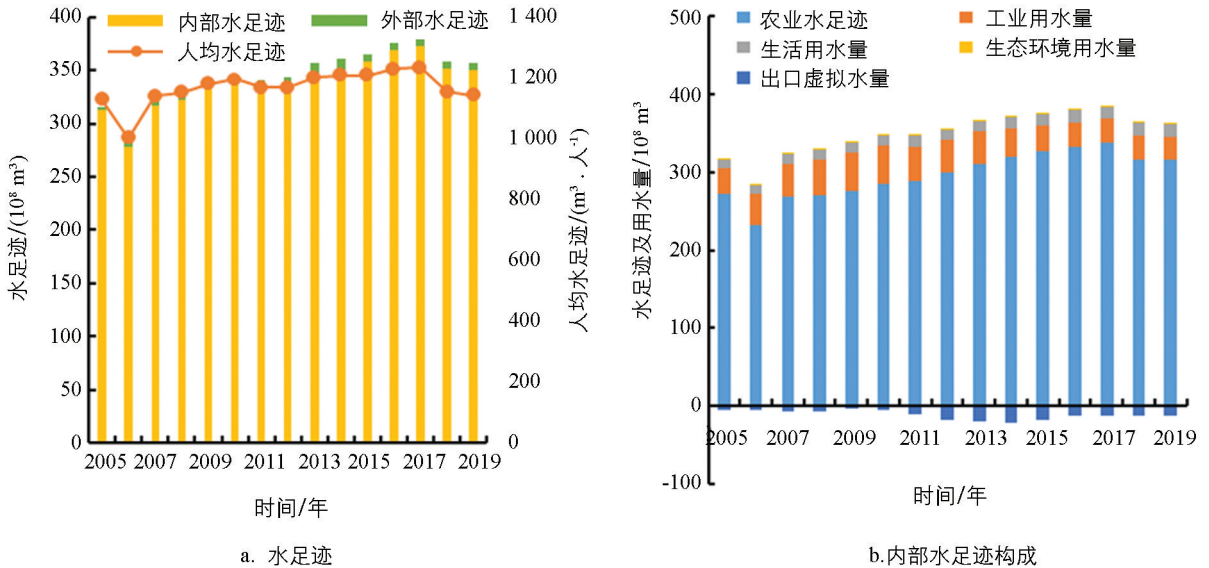


图 4 重庆市水足迹时间序列变化和内部水足迹构成及时间序列变化

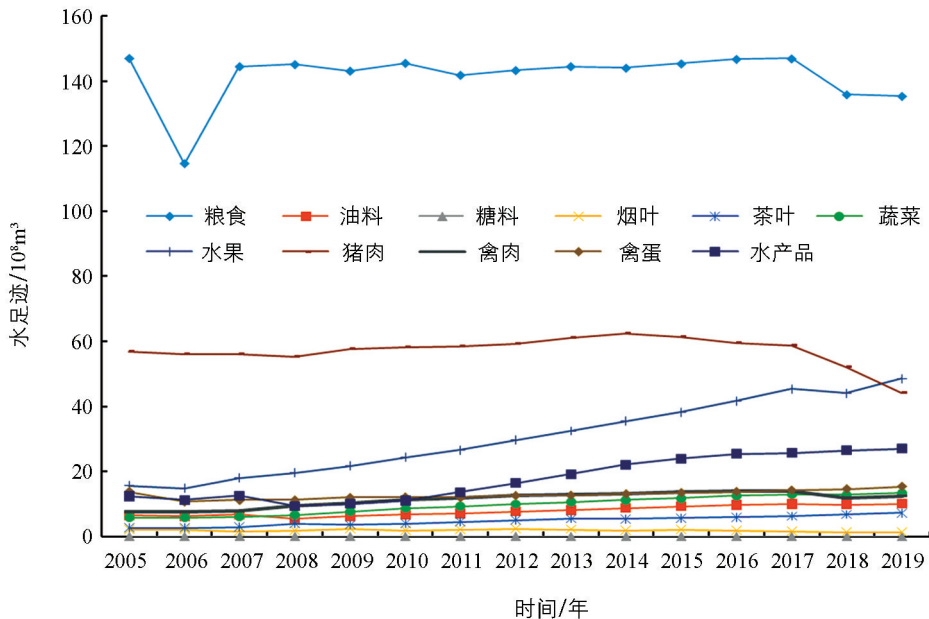
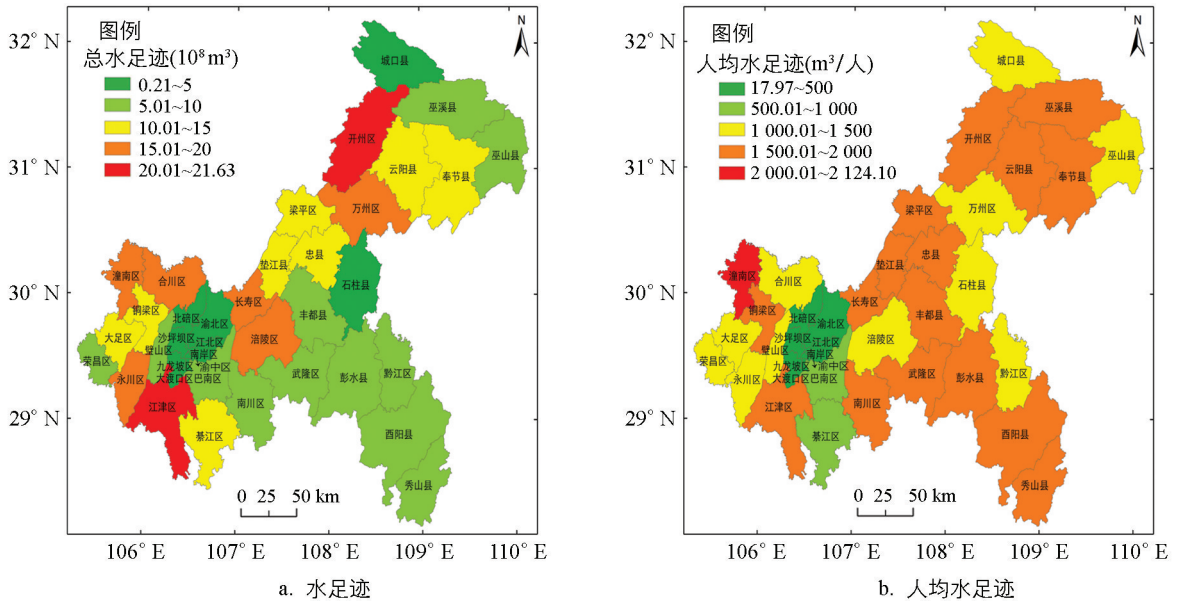


图 5 2005—2019 年重庆市农业水足迹构成及变化

2.2.2 水足迹空间差异特征分析

重庆市各区县水足迹差异较大(图 6a),水足迹最高的 3 个区县依次为江津区($21.63 \times 10^8 \text{ m}^3$)、荣昌区($20.21 \times 10^8 \text{ m}^3$)与合川区($19.66 \times 10^8 \text{ m}^3$);最低的 3 个区县依次为沙坪坝区($0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$)、渝中区($0.49 \times 10^8 \text{ m}^3$)和大渡口区($0.63 \times 10^8 \text{ m}^3$)。整体而言,主城新区和渝东北区县水足迹相对较高,渝东南相对较低,中心城区最低。

在人均水足迹方面(图 6b),各区县也呈现出显著的差异,最高的 3 个区县依次为潼南区($2124 \text{ m}^3/\text{人}$)、忠县($1978 \text{ m}^3/\text{人}$)和秀山县($1917 \text{ m}^3/\text{人}$),最低的 3 个区县依次是沙坪坝区($18 \text{ m}^3/\text{人}$)、渝中区($74 \text{ m}^3/\text{人}$)和大渡口区($174 \text{ m}^3/\text{人}$)。整体而言,位于中心城区的区县最低,主城新区次之,渝东北第 3,渝东南最高。



底图审图号为 GS(2019)3333 号.

图 6 重庆市各区县水足迹与人均水足迹分布

2.3 水资源利用评价指标结果分析

2.3.1 重庆市水资源利用评价指标时序变化

如图 7 所示, 重庆市水足迹自给率一直维持在 97% 以上, 主要是依靠消耗本地水资源, 水足迹经济效益保持连续快速增长, 表明消耗单位水资源所带来的经济效益越来越高. 2005—2019 年水资源净贸易量均为正值, 水足迹价值兑换率均小于 1, 意味着研究期内重庆市虚拟水贸易主要是输出水资源, 但年输出水资源量波动较大, 其中 2012—2015 年输出量最大.

2005—2019 年重庆市整体水资源压力指数和匮乏指数都在 1 以下, 表明长期以来重庆市水足迹未超过可用水资源的承载能力和范围, 水资源的利用情况较为乐观.

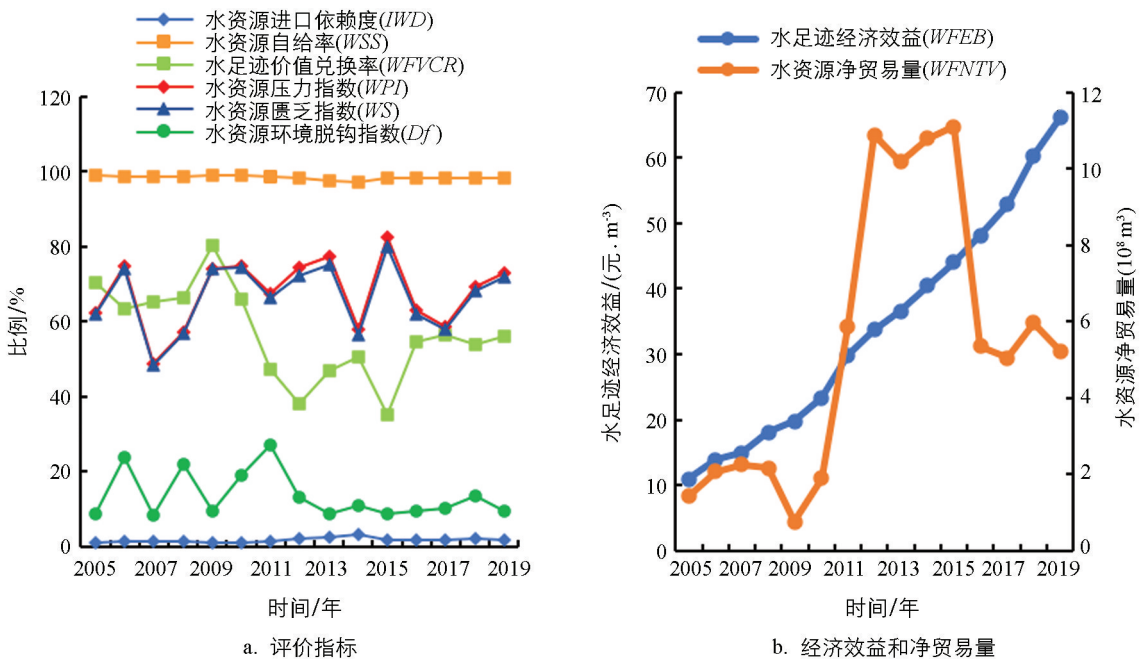


图 7 重庆市水资源利用评价指标及经济效益动态变化

为了更加深入地分析重庆市水资源利用情况,引入水资源负载指数进行计算.如表 5 所示,在研究期内,重庆市水资源负载指数整体呈波动上升趋势.其中 2005—2009 年和 2014 年,水资源负载指数为Ⅲ级,水资源利用水平中等,潜力较大,水资源开发较难;2010—2013 年和 2015—2019 年,水资源负载指数为Ⅱ级,表明近年来重庆市水资源利用水平高,潜力不大,水资源开发困难.

表 5 重庆市水资源负载指数分级

时间/年	水资源负载指数 c	级别	水资源利用水平	今后水资源开发评价
2005	2.85	Ⅲ	中等,潜力较大	开发较难
2006	4.50	Ⅲ	中等,潜力较大	开发较难
2007	2.39	Ⅲ	中等,潜力较大	开发较难
2008	3.21	Ⅲ	中等,潜力较大	开发较难
2009	4.71	Ⅲ	中等,潜力较大	开发较难
2010	5.04	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2011	5.05	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2012	5.88	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2013	6.35	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2014	4.45	Ⅲ	中等,潜力较大	开发较难
2015	7.44	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2016	5.40	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2017	5.16	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2018	7.28	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难
2019	8.16	Ⅱ	高,潜力不大	开发困难

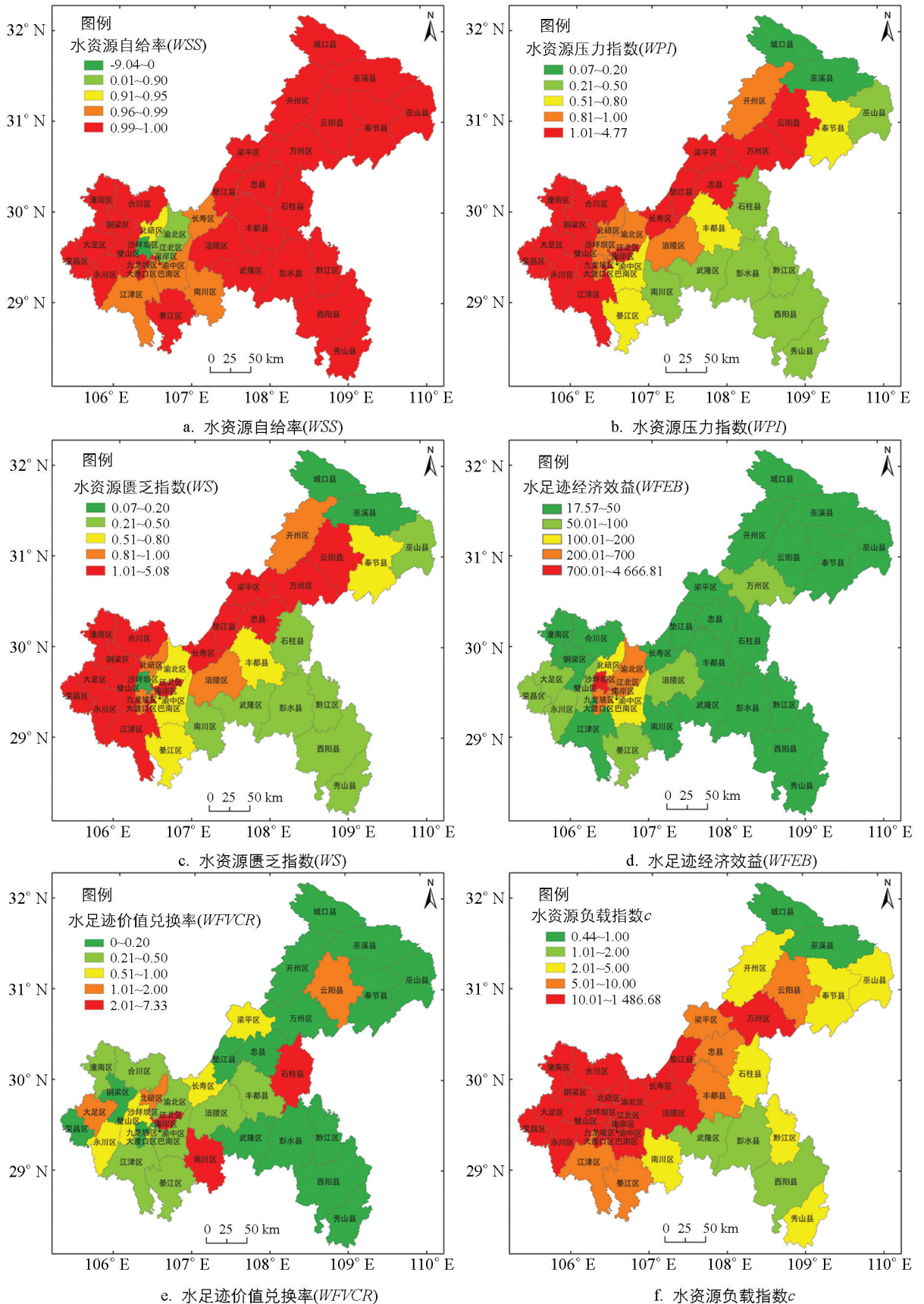
2.3.2 重庆市各区县水资源利用评价指标空间差异

1) 水足迹结构分析

如图 8a 所示,重庆市大部分区县水资源自给率都较高,有 32 个区县水资源自给率都高于 95%,只有沙坪坝区(-904.75%)、江北区(82.12%)、渝北区(85.37%)、南岸区(89.71%)、渝中区(90.49%)和北碚区(92.25%)等 6 个区低于 95%,其中沙坪坝区为负值,且绝对值较大,表明其水资源主要依靠外部供给.与之相对应的为水资源进口依赖度,结果表明,除沙坪坝和江北等上述 6 个区县外,重庆市水资源依赖度均较低,主要依靠自身的水资源供给.

2) 水资源生态安全分析

图 8b 和图 8c 表明,重庆市各区县的水资源压力指数和水资源匮乏指数结果较为相似.在水资源压力指数方面,低于 0.20 的有 2 个区县,分别是城口县和巫溪县,且均位于渝东北;位于 0.21~0.50 区间的有 8 个区县,且大部分位于渝东南;处于 0.51~0.80 区间的有 4 个区县,分别为巴南区、綦江区、丰都县和奉节县;处于 0.81~1.00 区间的区县有 7 个,大部分位于中心城区;大于 2.00 的区县有 16 个,主要位于主城区都市区和渝东北.在水资源匮乏指数方面,小于 0.20 的区县有 3 个,分别是沙坪坝区、城口县和巫溪县;处于 0.21~0.50 区间的区县有 8 个,主要位于渝东南;处于 0.51~0.80 和 0.81~1.00 区间的区县分别有 5 个,大多位于主城区都市区;大于 2 的区县为 17 个,主要位于主城区都市区和渝东北.



底图审图号为 GS(2019)3333 号。

图 8 重庆市区县水资源利用评价指标结果

3) 水足迹经济效益分析

在水足迹经济效益方面(图8d),大于200和位于100.01~200区间的区县分别有6个和2个,均位于中心城区;处于50.01~100区间的区县有7个,主要位于主城都市区;处于20.01~50区间的区县有22个,主要位于渝东北和渝东南;只有巫溪县低于20.

在水足迹价值兑换率方面(图8e),大于2的区县有5个;处于1.01~2区间的有3个;处于0.51~1范围内的区县有5个;处于0.21~0.5范围内的区县有8个,主要位于主城都市区;小于0.2的区县有17个,主要位于渝东南和渝东北.

在水资源负载指数方面(图8f),大于10的区县有20个,水资源负载指数等级为Ⅰ级,大都位于主城都市区(中心城区和主城新区),说明这些区县水资源利用水平很高,但水资源利用潜力不大,有条件时需要外流域补水;处于5~10区间的区县为6个,水资源负载指数等级为Ⅱ级,大多位于主城新区,这些区县水资源利用水平高,但水资源开发潜力不大,开发困难;处于2~5区间的区县有8个,水资源负载指数等级为Ⅲ级,大多位于渝东南和渝东北,这些区县水资源利用水平中等,水资源开发潜力较大,开发较难;处于1~2区间的区县有3个,水资源负载指数等级为Ⅳ级,均位于渝东南,这些区县水资源利用水平较低,水资源开发潜力大,开发较易;小于1的区县有2个,水资源负载指数等级为Ⅴ级,水资源利用水平低,水资源开发潜力很大,开发容易.

3 结论与讨论

运用自上而下法,从市级和区县两个尺度分别对2005—2019年重庆市及2019年38个区县的水足迹进行核算,并结合水资源评价指标对其水资源利用状况进行时空分析与评价.

1) 重庆市水资源时空分布差异明显,2005—2019年水资源总量和人均水资源占有量变化趋势相似,但不同年份间波动明显,和降雨量存在较大的关系.2005—2019年人均水资源占有量约为 $1\,787\text{ m}^3/\text{人}$,为中度缺水地区.2019年重庆市各区县水资源总量和人均水资源占有量空间分布差异均较大,呈现出西部低、东北部和西北部较高的态势,处于极度缺水和中度缺水状态的区县有18个(占比47%).随着人口不断增多和城镇化水平持续提高,重庆市水资源需求也日趋旺盛.重庆虽然是中西部地区唯一的直辖市,但其城乡、区域之间发展差距显著^[33].2020年,重庆市政府工作报告提出,重庆将制定“一区两群”协调发展实施意见,促进各个区域充分利用自身资源、凸显特色、协同发展,这表明重庆市将会迎来新一轮发展期.因此,重庆市在未来发展过程中必须充分认识到水资源这一限制因素,加强水资源管理,进一步提升水资源利用和分配效率,为各区域的协同发展提供支撑.

2) 重庆市水足迹从2005年的 $315.58\times 10^8\text{ m}^3$ 增长至2019年的 $357.15\times 10^8\text{ m}^3$.内部水足迹特别是农业水足迹为水足迹变化的主导因素,其构成平均占比由大到小依次为农业水足迹、工业水足迹、生活用水量、出口虚拟水量和生态环境用水量.虚拟水含量前两位分别是粮食和猪肉,远高于其他产品,这可能与重庆市人民的生活水平和饮食习惯有关.人均水足迹呈现出先增后减的趋势(2006年除外),从2005年的 $1\,127.88\text{ m}^3/\text{人}$ 曲折增长至2019年的 $1\,143.14\text{ m}^3/\text{人}$.重庆市各区县水足迹差异较大,水足迹最高和最低的分别为江津区($21.63\times 10^8\text{ m}^3$)和沙坪坝区($0.21\times 10^8\text{ m}^3$).整体而言,主城新区和渝东北区县水足迹相对较高,渝东南相对较低,中心城区最低;各区县人均水足迹也呈现出显著差异,位于中心城区的区县最低,主城新区次之,渝东北第3,渝东南最高.因此,重庆市应引导公众改变消费方式,多购买蔬菜和禽肉等虚拟水含量较低的农牧产品,并针对水资源利用实际状况制定相应的水资源管理政策.重庆作为长江上游重要的中心城市之一,在筑牢长江上游重要生态屏障工作中发挥着重要作

用^[21]。但其生态环境用水占比非常小, 多年来平均占比仅为 0.23%。因此, 重庆市需要进一步重视生态保护工作, 提升生态环境用水的数量与比例, 加大在生态保护工作方面的投入力度。

3) 重庆市 2005—2019 年水足迹自给率一直维持较高水平(97%以上), 整体的水资源压力指数和匮乏指数都保持在 1 以下, 并向其他区域输出水资源, 但水资源负载指数整体上呈波动上升趋势, 特别是 2015—2019 年水资源负载指数一直保持在 II 级, 表明重庆市水资源利用水平高, 潜力不大, 水资源开发困难; 大部分区县水资源自给率都较高, 主要依靠自身的水资源供给, 但水资源压力指数和匮乏指数较高的区县偏多, 且有 20 个区县水资源负载指数等级为 I 级。重庆无论是市级还是区县水足迹都已经达到较高水平, 特别是近年来水资源利用水平高, 潜力不大, 水资源开发困难, 水资源利用状况和水资源可持续利用前景不容乐观。因此, 重庆市应普及节水宣传教育, 让市民进一步认识到水资源的重要性和稀缺性, 引导公众养成水资源循环利用等节水习惯, 提高水资源利用效率^[4], 使重庆市在成渝双城经济圈建设中更好地发挥作用。

本研究计算的水足迹未包括工业产品, 但工业产品在生产过程中不仅会耗费很多的水资源还会导致大量污水和废水产生。因此, 未来研究过程中会加入一部分典型的工业产品。

参考文献:

- [1] 侯焮晨, 谢世友. 中小城市水资源生态足迹与生态承载力时空分析——以宿迁市为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(12): 134-141.
- [2] 郭晓娜, 苏维词, 杨振华, 等. 城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测 [J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 69-75.
- [3] ALLAN J A. Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. *Groundwater*, 1998, 36(4): 545-546.
- [4] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路 [J]. 中国科学院院刊, 2003(4): 260-265.
- [5] 程先, 孙然好, 陈利顶, 等. 基于农牧业产品和生活用水的京津冀地区水足迹时空特征研究 [J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4461-4472.
- [6] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of Water Resources: International Virtual Water Flows in Relation to Crop Trade. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 45-56.
- [7] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价 [J]. 自然资源学报, 2005(6): 115-121.
- [8] 黄晶, 王学春, 陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示 [J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 135-141.
- [9] 董蒙, 张军民. 新疆 2012 年水足迹计算与分析 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1162-1170.
- [10] 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(5): 96-100.
- [11] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 571-582.
- [12] 田园宏, 诸大建, 王欢明, 等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978—2010 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(6): 122-128.
- [13] 高海燕, 李王成, 李晨, 等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 110-118.
- [14] 严岩, 贾佳, 王丽华, 等. 我国几种典型棉纺织产品的工业水足迹评价 [J]. 生态学报, 2014, 34(23): 7119-7126.
- [15] 崔克蓉, 向平安. 湖南省水稻生产水足迹及其影响因素研究 [J]. 生态科学, 2020, 39(1): 176-182.
- [16] 胡婷婷, 黄凯, 金竹静, 等. 滇池流域主要农业产品水足迹空间格局及其环境影响测度 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3719-3729.

- [17] 祝稳, 赵锐锋, 谢作轮. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(01): 292-298, 304.
- [18] 余灏哲, 韩美. 基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(03): 474-483.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 陶春梅, 杨晓霞, 王文静. 重庆市旅游产业效率评价——基于超效率 DEA-MI 模型 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(05): 55-63.
- [22] 邓晓军, 谢世友, 王新华. 重庆市 2004 年的水足迹分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2007(5): 593-597.
- [23] 谭秀娟. 重庆市直辖以来水足迹研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [24] 班荣舶, 何太蓉, 舒瑞琴, 等. 重庆都市区居民食品水足迹消耗供需平衡研究 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 198-201.
- [25] 黄凯, 王梓元, 杨顺顺, 等. 水足迹的理论、核算方法及其应用进展 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 78-83.
- [26] 王新华, 张志强, 龙爱华, 等. 虚拟水研究综述 [J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 27-30.
- [27] 龙爱华, 徐中民, 王新华, 等. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响 [J]. 生态学报, 2006(10): 3358-3365.
- [28] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water Footprints of Nations Volume 1: Main Report. Virtual Water Trade: Value of Water Research Report Series No. 16. Delft UNESCO-IHE, 2004.
- [29] 戚瑞, 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.
- [30] 侯林秀, 温璐, 赵吉, 等. 基于水足迹法的阿拉善地区水资源利用评价与分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 35-41.
- [31] 商庆凯, 阴柯欣, 米文宝. 基于水足迹理论的青海省水资源利用评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(05): 70-77.
- [32] ROBERT E, PAMELA L. Sustainable Water: Population and the Future of Renewable Water Supplies [M]. Washington D C: Population Action International, 1993.
- [33] 顾汉龙, 冯淑怡, 曲福田. 重庆市两类城乡建设用地增减挂钩模式的比较 [J]. 中国土地科学, 2014, 28(09): 11-16, 24.

责任编辑 潘春燕