

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.06.017

成都市水资源生态足迹及承载力时空演变研究^①

熊娜娜¹, 谢世友^{1,2}

1. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 利用水资源生态足迹模型对成都市 2000—2015 年水资源生态足迹与生态承载力进行了研究。结果表明, 成都市历年水资源生态足迹值在 2000—2012 年呈上升趋势, 受成都市节水政策和产业转型影响, 2013 年相对降低, 2014 年和 2015 年趋于平缓; 水资源生态承载力与降水量呈正相关关系, 相关系数达 0.952, 旱情灾害影响成都市生态承载力水平, 2006 年与 2009 年的干旱使成都市水资源产生生态赤字; 万元 GDP 水资源生态足迹值逐年下降, 成都市水资源利用效率 16 年间增长 6.8 倍; 成都市各区县人均水资源生态足迹分布不均且在 2013—2015 年变化较大, 成都市规划发展的工业城市人均水资源生态足迹值高, 各区县处于人均水资源生态盈余状态, 但数值逐年下降, 水生态安全保障降低; 改变产业结构、提高水资源利用效率、增强水利设施对干旱等自然灾害的应对能力是成都市水资源可持续利用的基本途径。

关键词: 成都市; 水资源; 生态足迹; 生态承载

中图分类号: X826

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)06-0118-09

资源是人类进步和发展不可或缺的必需品, 在倡导可持续发展的全球化背景下, 对资源利用能力的衡量已是新的热点。生态足迹是基于土地利用面积核算和计量资源可持续利用的模型^[1], 1992 年由加拿大 Rees 等提出并不断完善和推广, 能够较为合理地揭示区域资源与经济发展的关系, 评价区域可持续利用能力, 它具有直观可靠的计算结果和简单的模型运算等特点^[2]。生态足迹具体是计算耕地、林地、化石能源等 6 类生态生产空间与维持人类资源消耗量和生态承载力的差值, 得出生态盈余, 继而可对地区可持续发展状况进行评价的模型^[3-4]。水资源作为生产、生活的消耗品, 在生态维持中亦发挥重要作用^[5]。将生态足迹模型用于水资源的评价中, 很多学者进行了探索并给予认同^[6]。学者们在不同区域尺度上, 对河南、四川、上海、重庆、安阳等进行了水资源生态足迹的计算, 表明了该模型对区域水资源评价具有良好的普适性^[7-11]。

成都市作为“西部之心”, 是重要的交通枢纽和农业生产城市^[12]。成都市在经济指标增长的同时, 水资源的消耗也在增加, 区域水环境面临巨大压力, 对可持续发展产生限制, 缓解生态压力已成必然。本文在生态足迹理论上, 利用成都市 2000—2015 年水资源相关数据, 采用生态足迹模型计算方法对水资源生态足迹、生态承载力和生态盈亏进行分析, 从时间和空间演变角度来测算和判断成都市水资源供需关系, 为成都市水资源开发利用、科学管理及可持续发展给出参考及建议。

① 收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAC09B01, 2006BAC01A16); 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA0002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2015C006, SWU114058)。

作者简介: 熊娜娜(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事地貌环境与应用地理方向的研究。

通信作者: 谢世友, 教授, 博士研究生导师。

1 研究区域概况

成都市纬度在 $30^{\circ}05'N-31^{\circ}26'N$, 经度是 $102^{\circ}54'E-104^{\circ}54'E$, 处四川省中部、四川盆地西部, 市内海拔最高处位于大邑县, 为 5 364 m, 海拔最低 387 m, 处东南部金堂区。成都市总面积 12 121 km², 辖 9 区 6 县 4 市(县级市)。成都市地形区包括龙泉山低山深丘区和金堂区沱江以东丘陵区、成都平原、龙门山和邛崃山山区, 地势走向西北高东南低。成都属亚热带湿润季风气候区, 雨热同期, 季节变化明显, 年均温 $15.2^{\circ}C \sim 16.6^{\circ}C$, 年降水 873~1 265 mm, 多年平均降水量为 $118.76 \times 10^8 m^3$ 。境内河流较多, 西南是岷江水系, 沱江水系处东南, 全市河流超过 40 条, 水域面积 700 km² 有余^[13]。

2 研究方法

2.1 水资源生态足迹模型

基于生态足迹模型建立的水资源生态足迹模型, 依凭用水特征和内涵, 参考黄林楠等^[14]研究成果, 将其概括为: 地区维持其人口生活与生产所消耗的全部水资源量, 其中耗损的水资源量基本包括生活用水、生产用水和生态环境用水。计算模型如下:

$$EF_w = N \times ef_w = N \times \gamma_w \times (W/P_w)$$

式中: EF_w 为水资源总生态足迹(hm²); N 为年末户籍总人口数; ef_w 为人均水资源生态足迹(hm²/人); γ_w 为水资源的全球均衡因子; W 为人均消耗的水资源量(m³); P_w 为水资源全球平均生产能力(m³/hm²)。

2.2 水资源生态承载力模型

建立水资源生态承载力模型的目的是为区域发展提供支撑, 当前学术界普遍认同的为: 在保证人类生产生活以及生态环境质量要求的基础上, 地域内水资源可以支持其人口和经济发展的作用力^[15]。水资源承载力是有限度的, 此限度是受到人类行为活动的影响, 超出限度后, 整个水资源环境系统中的结构和功能将会产生质变, 从而对人类生产生活产生影响并加以限制。当前使用频率较多的水资源承载力计算研究方法包含: 向量模法、系统动力仿真模型、模糊综合评价法、多目标决策分析法、基于生态理论的区域水资源承载法等^[16]。本文选用基于生态理论的水资源承载法作为研究水资源承载力的模型方法, 其计算模型为

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times \phi \times \gamma_w \times Q/P_w$$

式中: EC_w 为水资源承载力(hm²); N 为年末户籍总人口数; ec_w 为人均水资源承载力(hm²/人); ϕ 为区域水资源的产量因子; γ_w 为水资源的全球均衡因子; Q 为水资源总量(m³); P_w 为水资源全球平均生产能力(m³/hm²)。根据相关研究结果^[17], 发现有 60% 的水资源用于维持生态环境, 所以, 无论是何种空间尺度上的水资源承载力计算中, 要求乘以 0.4。

2.3 水资源生态盈余/赤字

生态盈余是水资源生态承载力与水资源生态足迹的差值, 是对区域内水资源消耗是否在承载范围内的衡量, 可用于评判区域内水资源的可持续利用状况^[18]。其计算公式如下:

$$\text{水资源生态盈余 / 赤字} = EC_w - EF_w$$

式中: 若 $EC_w > EF_w$ 时, 代表地区内水资源充足, 为水资源生态盈余状态, 水资源可持续利用状况良好; $EC_w = EF_w$ 时, 为水资源平衡状态; $EC_w < EF_w$ 时, 表明区域水资源亏欠, 不足以支持耗损需求, 其水资源出现生态赤字, 生态和经济发展将受到制约, 水资源不可持续。

2.4 万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 是水资源生态足迹与 GDP 值(G_{GDP})的比值, 可依据其大小权衡区域内水资源的利用效率, 若值越小, 则区域水资源的利用效率越高, 反之利用率低^[18]。其计算公式如下:

$$\text{万元 GDP 生态足迹} = EF_w / G_{GDP}$$

2.5 模型中参数的确定

研究中涉及的参数确定主要有:全球均衡因子 γ_w 、水资源全球平均生产能力 P_w 、区域水资源产量因子 ϕ 。其中全球均衡因子是为了将不同土地类型的单位生态生产能力转化成一个可比较的标准^[19],本文采用基于世界自然基金会(WWF)2000年合算的均衡因子计算出的水资源的全球均衡因子 5.19。参考相关研究成果^[20-22],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,取值 $3\ 140\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。区域水资源产量因子是地区内水资源平均生产能力与全球的水资源平均生产能力之比,而地区内水资源平均生产能力,即区域单位面积产水模数^[23]。计算公式如下:

$$\text{区域单位面积产水模数} = \text{区域水资源总量} / \text{流域面积}$$

因此,根据计算,成都市水资源多年平均生产能力为 $6\ 239.75\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{km}^2$,求得成都市的水资源产量因子约为 1.99,各区县产量因子也同理可得出:2013 年约为 2.42,2014 年约为 1.93,2015 年约为 1.61。

2.6 数据来源

成都市年末户籍总人口数(N)、成都市 GDP 数据来源于《2000—2015 年四川省统计年鉴》与《中国统计年鉴》;人均消耗水资源量(W)、水资源总量(Q)、流域面积、水资源生产账户等数据来源于《2000—2015 年成都市水资源公报》;成都市各区县人口数与 GDP 数据等来源于《2013—2015 年成都市统计年鉴》。

3 结果与分析

从时间角度收集、整理和计算了 2000—2015 年成都市水资源的各项指标,根据计算模型得出成都市水资源生态足迹和生态承载力、二者的差值生态盈余、万元 GDP 生态足迹和各生产账户在人均水资源生态足迹以及万元 GDP 中的历年变化。以空间角度利用 ArcGIS 技术对各区县的 2013—2015 年生态足迹及生态盈亏进行图像呈现和分析。

3.1 成都市水资源生态足迹和生态承载力

如图 1 所示,成都市生态足迹在 2000—2012 年总体上呈上升趋势,但在 2013 年有较小的回落,回落数值是 $1.71 \times 10^8/\text{hm}^2$,之后 2014 年和 2015 年处于平缓阶段,其中 2002 年是最低值,2012 年为最高值,最高值与最低值之间相差 $3.79 \times 10^8/\text{hm}^2$ 。其中 2013 年水资源生态足迹回落,主要是因为成都市响应号召于 2012 年开始实施推行严格的水资源管理制度,全面推进节水型社会建设,所以人均消耗水资源降低,用水效率得到提升,导致生态足迹有所降低。

成都市水资源生态承载力历年年份之间波动变化较大,最低值是 2006 年 $8.03 \times 10^8/\text{hm}^2$,最高值为 2011 年 $13.77 \times 10^8/\text{hm}^2$,且其他年份也呈高低不均分布。但从图 2 和图 3 以及分析的结果表明:成都市各年的水资源生态承载力与降水量存在显著正相关关系,相关系数达 0.952。2006 年和 2009 年成都市遭受严重干旱,春季中度干旱、夏季重旱,而后又遇上建国以来最严重特大伏旱,整个汛期没有出现大范围强降雨,全市主要河流水位普遍较低,没有达到多年平均值,超警戒水位洪水未发生。2012 年以及 2015 年降水较多年以来偏少,冬干春旱,但由于水利设施保障,没有出现严重旱情。所以降水量较少的年份,成都市生态承载力也处于低水平。

从图 4 可知,2000—2015 年成都市历年水资源万元 GDP 逐年降低,从 2000 年的 $0.54\ \text{hm}^2$ 降低到 2015 年 $0.08\ \text{hm}^2$,足足接近 6.8 倍,成都市水资源开发利用程度和利用效率在不断提高,并且抬升的程度较大,这与成都市认真践行全国水生态文明城市建设试点相关要求有密切关联,在提高水资源生态环境的同时,对水资源利用效率进行严格管理。

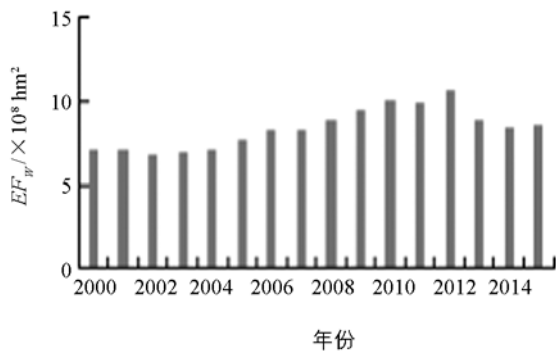


图 1 成都市历年水资源生态足迹

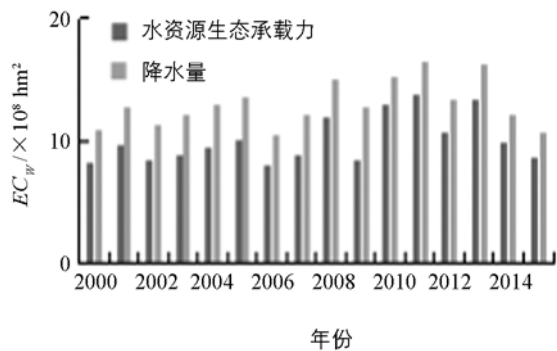


图 2 成都市历年水资源生态承载力与降水量

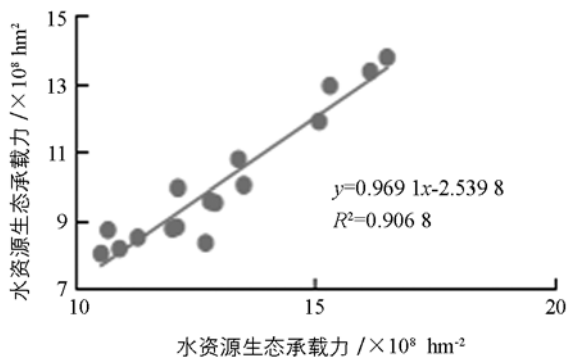


图 3 成都市降水量与水资源生态承载力相关关系

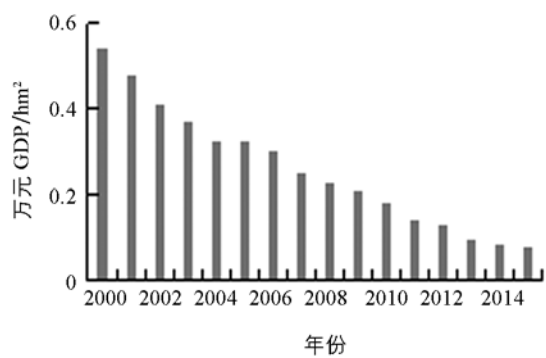


图 4 成都市历年水资源万元 GDP 生态足迹

从表 1 能够看出,成都市 16 年的人均水资源生态足迹变化幅度平缓,最高值出现在 2012 年为 $0.91 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$,最低值出现在 2014 年和 2015 年为 $0.59 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$;而人均水资源生态承载力历年的变化幅度较大,起伏不定,最高值是 2011 年的 $1.18 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$,最低值为 2015 年 $0.71 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$,其中 2006 年和 2009 年也处于低值阶段只有 $0.73 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$,主要受降水量减少影响,存在冬干春旱现象.成都市人均水资源生态足迹和生态承载力变化趋向与水资源总生态足迹和生态承载力相同.人均水资源生态盈亏除 2006 年和 2009 年外,均为正值,平均为 $0.2 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$,最高值是 2013 年 $0.5 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$,最低值为 2009 年 $-0.1 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$.综上所述,人均水资源生态足迹、生态承载力以及生态盈余历年的变化,与成都市当年水情和管理措施决策关联度较高,其中低值出现的年份包括 2006 年、2009 年、2014 年和 2015 年均是降水较多年平均偏少,有冬干春旱现象发生,但随着成都市水资源管理水平逐年提高,2014 年与 2015 年依托水利工程、抗旱措施得当才未造成生态赤字出现;2013 年发生“7.9”特大暴雨洪涝灾害,总体上成都市水资源处于生态盈余状况,其水资源仍具有可开发利用的空间.

表 1 成都市历年水资源人均生态足迹、人均生态承载力与生态盈亏

年份	人均生态足迹值/ ($\times 10^8 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	人均生态承载力/ ($\times 10^8 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	人均生态盈亏/ ($\times 10^8 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)
2000	0.7	0.81	0.11
2001	0.7	0.94	0.24
2002	0.67	0.83	0.16
2003	0.66	0.84	0.18
2004	0.68	0.9	0.22
2005	0.71	0.93	0.21
2006	0.75	0.73	-0.02
2007	0.75	0.79	0.05

续表 1

年份	人均生态足迹值/ ($\times 10^8 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	人均生态承载力/ ($\times 10^8 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	人均生态盈亏/ ($\times 10^8 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)
2008	0.79	1.06	0.26
2009	0.84	0.73	-0.1
2010	0.88	1.13	0.25
2011	0.85	1.18	0.33
2012	0.91	0.92	0.01
2013	0.62	1.12	0.5
2014	0.59	0.82	0.23
2015	0.59	0.71	0.12

数据来源:《成都市水资源公报》《四川统计年鉴》。

3.2 成都市三次产业水资源生态足迹变化

成都市的生态足迹各账户中,由于 2000—2007 年生态用水比例数据缺失,现取 2008—2015 年数据说明。从表 2 可得出,人均水资源生产性账户生态足迹用水一直占据多数,历年平均占有 55% 以上,2008—2012 年生产性用水比例波动不大,2013 年生产性用水比例降至历年最低;人均生活用水账户多年保持稳定比例之间,历年平均值为 0.1,最大比例 0.11,最低比例为 0.09;人均生态用水基本稳定,所占比例最小。

表 2 成都市人均水资源各账户生态足迹

年份	人均生产用水比例	人均生活用水比例	人均生态用水比例
2008	0.67	0.09	0.03
2009	0.72	0.09	0.03
2010	0.64	0.11	0.12
2011	0.60	0.10	0.15
2012	0.61	0.11	0.17
2013	0.34	0.10	0.01
2014	0.47	0.10	0.02
2015	0.47	0.10	0.02

数据来源:《成都市水资源公报》《四川统计年鉴》。

图 5 表明,在生产账户组成中,第二产业的人均水资源生态足迹一直高于第一产业及第三产业,平均所占比例为 0.44,第一产业平均所占比例 0.29,第三产业历年平均所占比例为 0.021。此外,第一产业与第二产业人均水资源生态足迹的计算值总体呈下降趋势,最高值与最低值都出现于 2009 年与 2013 年,2013 年大幅度下降,第一产业降低了 72%,第二产业降低了 64%,第三产业占比较小且历年稳定,波动不大。

从图 6 来看,三次产业的万元 GDP 生态足迹都呈下落趋势,足以及得成都市生产用水的利用效率在不断提高。第一产业计算值较第二、三产业大,其值下降幅度也最大,从 2008 年的 0.15 到 2015 年的 0.026,表明第一产业水资源利用效率在生产账户中最低,其利用率提升最大;第二产业万元 GDP 生态足迹值从 2008 年到 2015 年下降了 67%,利用率提升速率不及第一产业;第三产业计算值期间变化不大,平均维持在 0.005 左右。成都市的经济发展结构以第一产业为基础,农业用水需求较第二、第三产业大,但第三产业对 GDP 贡献率最大,对水资源需求较少。所以,总结得出:三次产业中第三产业水资源的利用效率最高,水资源不足的地区应大力发展第三产业,因地制宜提高水资源利用效率来促进经济发展。

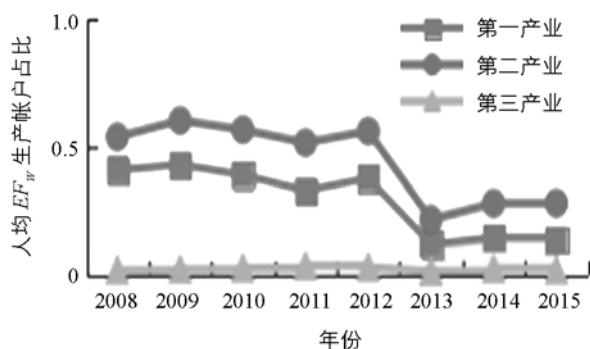


图5 人均水资源生态足迹生产账户历年变化

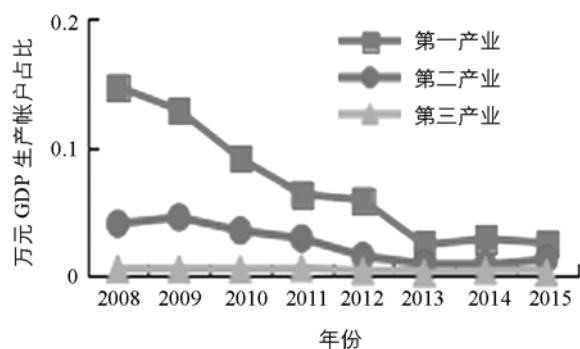


图6 万元GDP生态足迹生产账户历年变化

3.3 成都市各区县人均水资源生态足迹与生态盈亏

本文利用 ArcGIS 对 2013—2015 年成都市各区县的水资源生态足迹与生态盈亏状况采取图像方式呈现(图 7),能够直观从图像中得出:

2013—2015 年成都市各区县的人均水资源生态足迹变化较为明显,其中都江堰区、大邑县、金堂区、崇州区、邛崃区、新津区、成都市中心城区和青白江区在 3 年中较稳定,没有大的数值波动;新都区、蒲江区、郫县和温江区人均水资源生态足迹值降低;龙泉驿区和彭州区的值有相对上升。3 年中,青白江区的人均水资源生态足迹一直处于成都市最高值,均大于 $1 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$,青白江区是西南地区重要的工业区与物流枢纽地,是成都市第二产业基地,其第二产业发展需水较多;而人均水资源生态足迹值下降的区域处于区域经济结构更新,逐渐向如电子信息等领域第三产业发展方向的区域;作为成都市新型工业区的彭州区数值处于小幅度上升。

各区县人均水资源生态盈亏在 2013 年至 2015 年间呈下降趋势,但总体上均处于生态盈余状况。成都市北部和西部各县区生态盈余较中部、东部和南部高,都江堰区水资源最为丰富其波动值也最高,达 69%,成都市中心城区人均盈余最低,平均值小于 1,已处于生态盈余边缘。人均水资源生态是否盈余是对地区内水资源可持续利用状态的反应,逐年降低的人均生态盈余是水资源生态环境逐渐衰弱的警示,成都市水资源持续利用安全已受到威胁。

从图 8 可以看出,成都市各区县万元 GDP 水资源生态足迹空间差距较大,成都市中心城区 3 年均为最低,平均为 0.04 hm^2 ,其经济最为发达,水资源利用效率高;邛崃区水资源利用效率最低,邛崃区水资源较为丰富,但经济效益较低,所以主要是其经济结构影响区域的水资源利用效率;成都市东部和南部区县的水资源利用率较北部、西部高。总体上各区县万元 GDP 处于下降趋势,利用效率不断提高,邛崃区水资源利用效率提高幅度最大,龙泉驿区与温江区数值在 2015 年有较小回升,但数值差只有 0.01 hm^2 ,可忽略不计。

4 结论与讨论

基于生态足迹模型对成都市 2000—2015 年水资源生态足迹与生态承载力进行了研究,结果表明:

1) 成都市总生态足迹在 2000—2012 年处于上升趋势,2013 年有回落并逐渐稳定,人均生态足迹同总生态足迹涨落同步,平均水平达 $0.73 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。成都市作为中国西南地区规划发展战略的中心城市,随着经济发展力度的强化,人均水资源生态足迹在 2012 年起比以往年份上升,2013 年后成都市调整经济发展结构,加快建设水生态文明城市,对水资源消耗略有减少,从而逐渐趋于稳定。人口数增长与城市化进程的不断加快,使生活用水比例增加,产业用水比例相对减少,生态环境用水比例较稳定且比例最低。三次产业人均水资源生态足迹中,一、二产业处于下滑趋向,特别是在 2012 年和 2013 年之间的下降幅度最大。2013 年成都市被列为全国水生态文明城市建设试点城市,且受到“7·9”特大暴雨洪涝灾害影响,产业用水效率提升,消耗量减少。成都市万元 GDP 生态足迹历年来一直处于下降趋势,水资源利用率在 16 年间提升了 6.8 倍,综合开发能力提高。

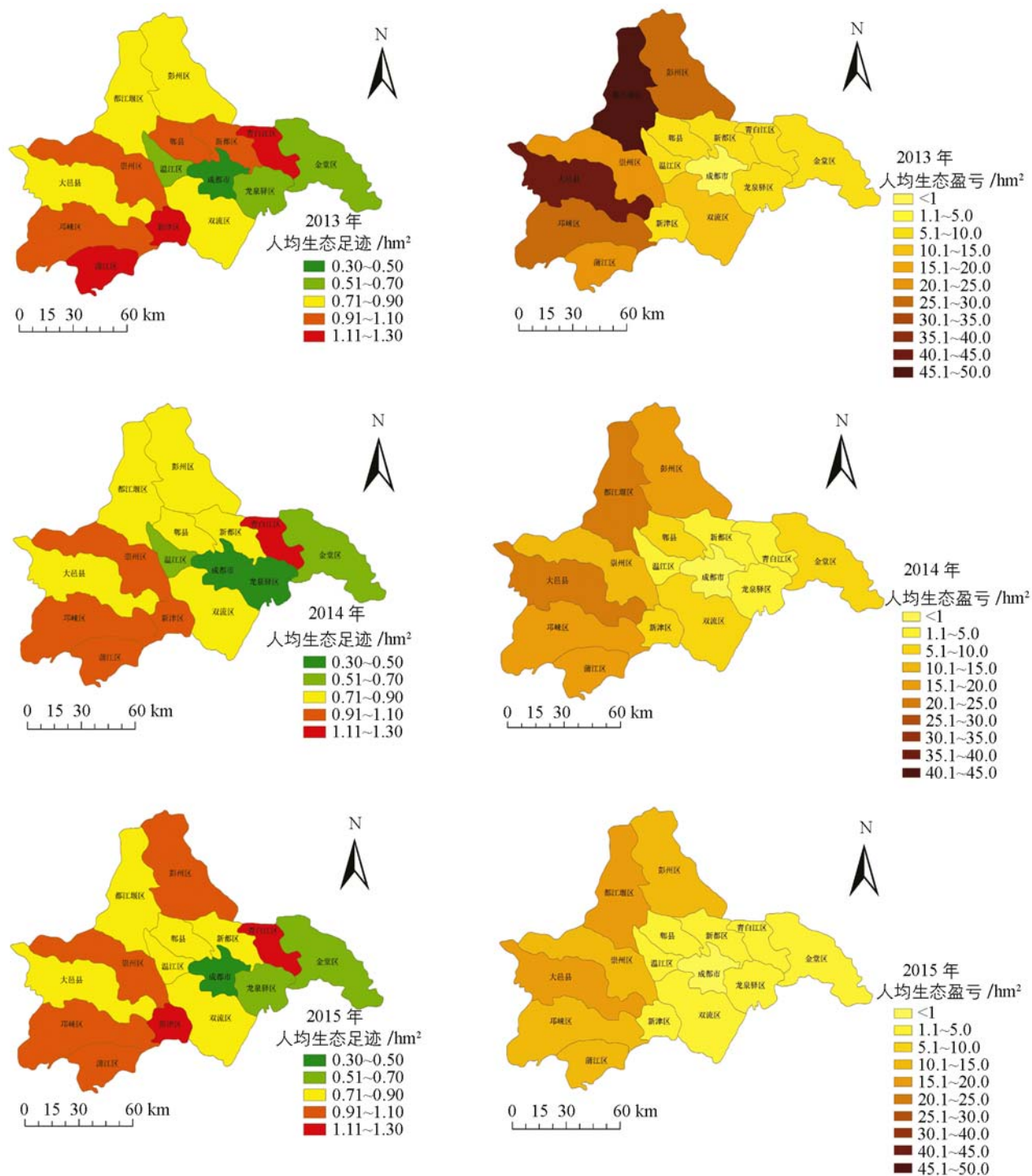


图 7 成都市各区县 2013—2015 年人均水资源生态足迹与生态盈亏

2) 成都市历年人均生态承载力达 $0.9 \times 10^8 \text{ hm}^2/\text{人}$, 与其他地区相比相对较高, 水资源生态承载力与区域降水量之间呈正相关关系, 相关系数达 0.952, 水资源生态承载力在旱情较严重的年度降低. 成都市 2006 年与 2009 年的旱情使水资源生态承载力降低, 从而出现生态赤字, 其他年份均是正值, 但生态盈余值历年来逐渐减少, 成都市的水资源生态环境不安全性加大.

3) 成都市各区县 2013—2015 年人均生态足迹空间分布不均且变化明显, 高值出现在成都市规划发展的工业城市中, 低值在中心城区和龙泉驿区, 区县间的产业结构影响水资源消耗, 从而导致人均水资源生态足迹空间分布的差异, 高耗水工业和农业提高了生态足迹值, 生态盈余相应减少. 人均生态盈亏体现了

各区县的水资源可持续利用安全状况,总体来说,成都市各区县都是生态盈余,水资源还能维持生产生活需求,但是整体人均生态盈余值下降,成都市东部和南部区县已处于生态盈余边缘.各区县人均水资源万元GDP都是下降趋势,水资源利用率不断提高,第三产业水资源利用率最高.

加强水利设施的建设,提高蓄、提、引水能力,增强对旱情的管理应对能力是缓解成都市水资源生态赤字的重要措施.成都市各区县应推进建设节水型农业和低耗水工业,调整产业结构,结合区域发展优势推进区域产业转型,提高水资源利用效率,促进水生态环境建设.

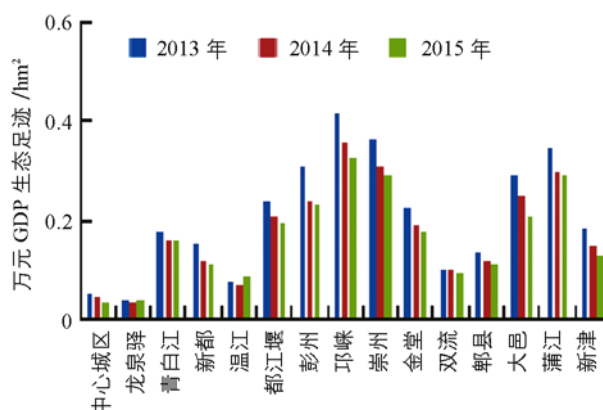


图8 成都市各区县万元GDP水资源生态足迹

参考文献:

- [1] 杨柳, 张明举. 基于生态足迹方法的区域发展可持续性评估——以重庆市为例 [J]. 西南农业大学学报(社会科学版), 2009, 7(6): 17-20.
- [2] REES W E. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves out [J]. Urbanisation, 2017, 2(1): 66-77.
- [3] WACKERNAGL M, RESS W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth [M]. Gabriola Island: NewSociety Publishers, 1996.
- [4] 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.
- [5] 崔莹, 谢世友, 柳芬, 等. 重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 115-123.
- [6] 李培月, 钱会, 吴健华, 等. 银川市 2008 年水资源生态足迹研究与分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 69-71.
- [7] 卢艳, 于鲁冀, 王燕鹏, 等. 河南省水资源生态足迹和生态承载力分析 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 182-186.
- [8] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1555-1565.
- [9] 丁华, 邱卫国. 基于生态足迹的上海市水资源生态承载力评价 [J]. 人民长江, 2013, 44(15): 19-21.
- [10] 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, 27(7): 159-162.
- [11] 张志高, 丁浩, 庞菲菲, 等. 安阳市水资源生态足迹与生态承载力研究 [J]. 陕西水利, 2017(4): 16-19.
- [12] 何光丙. “西部之心”的中国脉动——成都高新区合力打造国际化双创新高地 [J]. 中国高新区, 2016(17): 21-28.
- [13] 成都市统计局. 成都市统计年鉴 [EB/OL] (2013-10-25) [2016-09-15]. http://www.cdstats.chengdu.gov.cn/html/list_02010911.html.
- [14] 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): 1280-1286.
- [15] 熊升银, 苟兴才. 成都市水资源承载力影响因素的实证分析 [J]. 经济研究导刊, 2008(9): 161-162.
- [16] 李清龙, 闫新兴. 水环境承载力量化方法研究进展与展望 [J]. 地学前缘, 2005, 12(s1): 43-48.
- [17] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲. 生态环境需水量评估方法与例证 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(11): 1072-1082.
- [18] 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.
- [19] 官冬杰, 苏印, 苏维词, 等. 贵州省水资源生态足迹评价与预测 [J]. 重庆大学学报, 2015, 38(4): 112-120.
- [20] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [21] 王恒伟, 孙雯. 渭河流域水资源合作开发利益协调机制研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(8):

103-108.

[22] 李 晨, 徐云兰, 钟登杰, 等. 渗滤作用在雨水资源化中的应用研究进展 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(5): 126-139.

[23] 欧洋铭, 白若男, 朱国宇. 成都市水资源承载力动态变化及成因 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 110-114.

A Study of the Spatio-Temporal Evolution of Water Resource Ecological Footprint and Ecological Carrying Capacity of Chengdu

XIONG Na-na¹, XIE Shi-you^{1,2}

1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Key Laboratory of Eco-environment in the Three-Gorge Reservoir Region (Ministry of Education),
Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Using the ecological footprint model of water resources, the ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources of Chengdu from 2000 to 2015 were studied. The results showed that the ecological footprint value of water resources in Chengdu increased from 2000 to 2012 and was relatively low in 2013 due to the influence of Chengdu's water saving policy and industry transformation and tended to be stabilized in 2014 and 2015. The ecological carrying capacity of water resources was shown to be in a positive correlation with precipitation, r being 0.952. Drought disasters had a significant effect on the ecological carrying capacity, resulting in an ecological deficit of water resources in 2006 and 2009. The ecological footprint of water resources per wan yuan GDP (ten-thousand yuan GDP) declined steadily year by year, and the water use efficiency increased by 6.8 times in the 16 years. The per-capita ecological footprint of water resources in all districts and counties of Chengdu was unevenly distributed and varied greatly from 2013 to 2015. The per-capita water resource ecological footprint of industrial cities was high, and all districts and counties were in the state of per-capita water resources ecological surplus. However, the value decreased year by year, thus resulting in a reduced water ecological security. In conclusion, to change the industrial structure, improve the efficiency of water resource utilization and enhance the capacity of water conservancy facilities to combat drought and other natural disasters are the basic ways for the sustainable utilization of water resources in Chengdu.

Key words: Chengdu; water resource; ecological footprint; ecological capacity

责任编辑 汤振金