

四川省水资源生态足迹与水资源生态盈亏指数的时空分析

粟毅明¹, 马龙杰²

¹西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌

²中石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年9月15日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

摘要

利用水资源生态足迹模型计算四川省2016~2020年21个市(州)水资源生态足迹、水资源环境承载力、水资源生态盈亏指数, 运用空间自相关模型, 揭示了人均水资源生态盈亏指数时空聚集性特征。结果表明: 1) 2016~2020年四川省人均水资源生态足迹总体呈下降趋势, 人均水资源生态足迹呈现盆地中部与攀西地区高, 川西与川东地区低的分布特征。水资源生态承载力呈现空间分布不均, 西部高原山地地区水资源承载力高, 而东部盆地地区较低。2) 2016~2020年各市(州)万元GDP生态足迹呈逐年递减趋势, 说明水资源利用效率逐年提高。3) 2016~2019年部分地区存在面对水资源生态赤字问题, 2020年四川省21个市(州)均为水资源生态盈余, 但部分地区生态盈余较低。人均水资源生态盈亏指数存在显著的空间集聚特征, 空间局部特征以高-高型和低-低型显著。

关键词

四川省, 水资源, 生态足迹, 生态盈亏, 空间自相关

Analysis of Spatial-Temporal Characteristics of Water Resources Ecological Footprint and Water Resources Ecological Deficit/Surplus Index in Sichuan Province

Yiming Su¹, Longjie Ma²

¹Department of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang Sichuan

²Petroleum Exploration & Production Research Institute, Northwest Oilfield Branch Company, SINOPEC, Urumqi Xinjiang

作者简介: 粟毅明, 男, 硕士, 籍贯: 四川宜宾市, 出生于1992年10月, 工程师, 从事水文与水资源研究工作。Email: scybsym@163.com

文章引用: 粟毅明, 马龙杰. 四川省水资源生态足迹与水资源生态盈亏指数的时空分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(5): 458-467.
DOI: 10.12677/jwrr.2022.115050

Received: Sep. 15th, 2022; accepted: Oct. 21st, 2022; published: Oct. 28th, 2022

Abstract

The water resources ecological footprint model is used to calculate the water resources ecological footprint, water resources environmental carrying capacity and water resources ecological deficit/surplus index of 21 cities in Sichuan Province from 2016 to 2020. The spatial autocorrelation model is used to reveal the spatial aggregation characteristics of the water resources ecological deficit/surplus index per capita. The results show that: 1) From 2016 to 2020, water resources ecological footprint per capita in Sichuan Province generally shows a downward trend, and the water resources ecological footprint per capita is high in the central part of the basin and Panxi region and low in the western and eastern Sichuan. The spatial distribution of water resources ecological carrying capacity is uneven. The water resources carrying capacity in the western plateau and mountainous areas is high, while that in the eastern basin is low. 2) From 2016 to 2020, the water resources ecological footprint per 10⁴ yuan GDP of each city is decreasing year by year, which indicates that the utilization efficiency of water resources is improving year by year. 3) From 2016 to 2019, some regions faced the problem of water resources ecological deficit. By 2020, 21 cities in Sichuan Province were water resources ecological surplus, but the ecological surplus in some regions is low. The water resources ecological deficit/surplus index per capita has significant spatial agglomeration characteristics, and the spatial local characteristics are high-high type and low-low type.

Keywords

Sichuan Province, Water Resources, Ecological Footprint, Ecological Deficit/Surplus, Spatial Autocorrelation Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

四川作为千河之省，因水而兴，水资源总量丰富，但时空分布不均。同时四川地处长江、黄河的上游，承担着筑牢长江黄河上游生态安全屏障的重任，加强水资源的优化配置、集约节约利用水资源和水资源的保护十分重要。生态足迹模型是由加拿大学者 Willam Rees 于 1992 年最早提出，后由其学生 Wackernagel 不断完善，生态足迹模型为衡量区域资源可持续发展提供了较好的方法[1] [2] [3]。黄林楠[4]等学者对生态足迹模型进一步完善，提出了水资源生态足迹模型，并确定水资源生态足迹计算所需要的参数。近些年来，许多学者利用水资源生态足迹模型对不同区域或不同流域的水资源生态足迹、水资源生态承载力以及水资源的可持续利用进行了研究与分析[5] [6] [7] [8] [9]。有学者对水资源生态足迹变化的影响因素进行探索，如利用 LMDI 模型对水资源生态足迹变化的影响因素进行研究[10] [11] [12]。也有学者对水资源生态足迹进行预测分析，如利用 ARIMA 模型预测水资源生态平衡供需变化趋势[13]、利用 BP 神经网络预测水资源生态足迹与水资源承载力[14]以及使用灰色神经网络模型进行动态模拟并预测水资源生态足迹的发展趋势[15]。也有学者利用空间自相关分析法研究区域水资源生态压力空间[16]。本文利用水资源生态足迹模型对四川省 21 个市(州) 2016~2020 年水资源生态足迹、水资源生态承载力以及水资源生态盈亏指数进行了研究，运用空间自相关模型，揭示了人均水资源生态盈亏指数空间集聚特征，为四川省水资源可持续利用、生态环境保护以及高质量发展提供参考。

2. 研究方法 with 数据来源

2.1. 研究方法

1) 水资源生态足迹。基于生态足迹发展而来的水资源生态足迹，水资源生态足迹是指为了满足区域社会经济可持续发展所消耗的水量转换成相应账户的水资源用地面积，根据用水特征与内涵，将用水分为生产用水、生活用水和生态环境用水 3 个账户 [4] [7]。计算模型如下：

$$EF_w = N \times ef_w = N \times \gamma_w \times W / P_w \quad (1)$$

式中： EF_w 为水资源生态足迹(hm^2)； N 为人口数量； ef_w 为人均水资源生态足迹($hm^2/人$)； γ_w 为水资源全球均衡因子，本文采用世界自然基金会 2002 年的核算结果，水资源全球均衡因子取 5.19 [4]； P_w 为水资源全球平均生产能力，取值为 $3140 m^3/hm^2$ [7]； W 为人均水资源利用量(m^3)。

2) 水资源生态承载力。为某一区域在某时间段内，水资源能够最大支持该区域社会经济和生态系统可持续发展的供给能力 [4] [7]。计算模型如下：

$$EC_w = N \times ec_w = (1-a) \times \varphi \times \gamma_w \times Q / P_w \quad (2)$$

式中： EC_w 为水资源生态承载力(hm^2)； ec_w 为人均水资源生态承载力($hm^2/人$)； a 为区域水资源承载力用于维持生态环境的扣除部分，本文取 0.6 [4]； φ 为区域水资源产量因子，值为区域每平方公里平均产水量与水资源全球平均生产能力之比； γ_w 为水资源全球均衡因子； P_w 为水资源全球平均生产能力； Q 为区域水资源总量(m^3)。

3) 万元 GDP 水资源生态足迹。区域水资源生态足迹与该区域生产总值的比值，用来衡量区域的水资源利用效率。其值越大，区域水资源利用率越低；反之，区域水资源利用率越高。

$$\text{万元 GDP 水资源生态足迹} = EF_w / GDP \quad (3)$$

式中： GDP 为区域生产总值(万元)。

4) 人均水资源生态盈亏指数。对水资源可持续利用的度量，大小为人均水资源生态承载力与人均水资源生态足迹的差值。

$$ed_w = ec_w - ef_w \quad (4)$$

式中： ed_w 为人均水资源生态盈亏指数，当 $ed_w < 0$ ，表示人均水资源生态赤字，水资源不可持续利用状态；当 $ed_w > 0$ ，表示人均水资源生态盈余，水资源处于可持续利用状态；当 $ed_w = 0$ ，表示水资源利用处于平衡状态。

为进一步研究四川省市(州)人均水资源生态盈亏指数变化的空间差异特征，空间自相关分析法可以从整体上展现相关特征值在区域之间的空间集聚性，通常以全局莫兰指数 I 为指标测量某个区域特征值与其相邻区域特征值间的相互关联程度。全局莫兰指数 I 计算公式如下：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (5)$$

$$\text{其中 } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中： n 为研究区域内地域单元总数； \bar{x} 为各区域人均水资源生态盈亏指数的均值； x_i 与 x_j 为观测样本值， ω_{ij} 为空间权重矩阵的元素值； S^2 为指标样本方差。 I 的取值范围为 $[-1,1]$ ，若值为正，则表明研究区人均水资源生态盈亏指数存在空间正相关，数值越接近 1 代表空间集聚性越高。

局部空间自相关用以表示局部地区是否存在变量聚集现场。常以 LISA 聚类图与局部莫兰指数 I_i 进行表征，

I_i 计算公式为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

式中: I_i 为局部莫兰指数, 当值为正, 表示区域与其相邻区域存在正相关, 为负, 则反之。其他变量含义同前。

2.2. 数据来源

利用水生态足迹模型与空间自相关分析模型等方法研究四川省水资源生态足迹与水资源生态盈亏指数的时空分析, 涉及到四川省 21 个地级行政区的人口、辖区面积、GDP、水资源量、用水量等数据。研究数据来源 2017~2021 年《四川统计年鉴》与 2016~2020 年《四川省水资源公报》。

3. 计算结果与分析

3.1. 人均水资源生态足迹

2016~2020 年四川省人均水资源生态足迹分别是 0.54 hm²/人、0.54 hm²/人、0.51 hm²/人、0.50 hm²/人、0.47 hm²/人, 总体上呈下降趋势, 见图 1。工业用水量由 2016 年 55.83 亿 m³ 下降到 2020 年的 23.52 亿 m³, 处于下降的趋势, 其它用水量趋于平稳, 总用水量由 2016 年 267.25 亿 m³ 下降到 2020 年的 236.86 亿 m³, 这与四川省强化工业用水定额管理与加强企业节水技术改造是相辅相成的, 由水资源生态足迹的内涵可知, 社会需水量的减少, 导致人均水资源生态足迹下降。

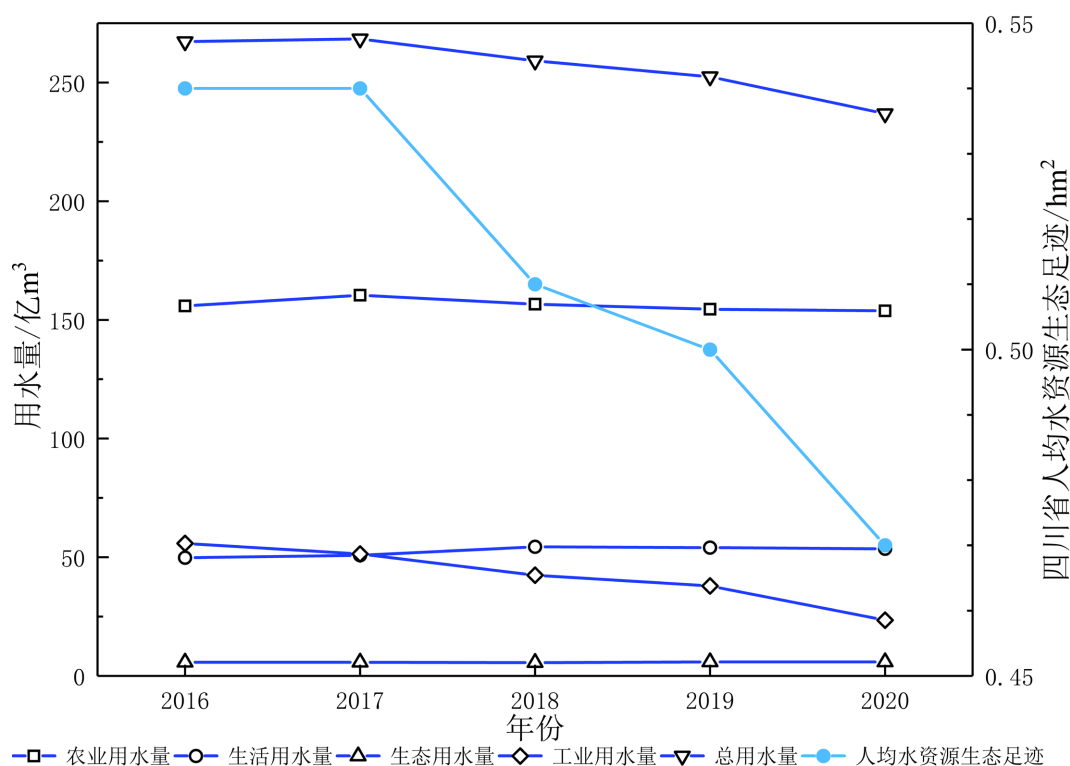


Figure 1. Water consumption and water resources ecological footprint per capita in Sichuan Province from 2016 to 2020

图 1. 2016~2020 年四川省用水量与人均水资源生态足迹

人均水资源生态足迹大小进行自然断点法分类, 见图 2。人均水资源生态足迹总体呈现盆地中部和攀西地

区高、川西与川东地区低的分布特征。五年人均水资源生态足迹均值排在前 3 位的是攀枝花市、德阳市、眉山市, 分别是 $1.05 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $0.85 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $0.73 \text{ hm}^2/\text{人}$, 这些城市是四川的重工业基地, 人均水资源生态足迹较高意味着这些区域人均水资源利用量较大。五年人均水资源生态足迹均值排在后 3 位的是巴中市、达州市、广安市, 分别是 $0.31 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $0.37 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $0.39 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。

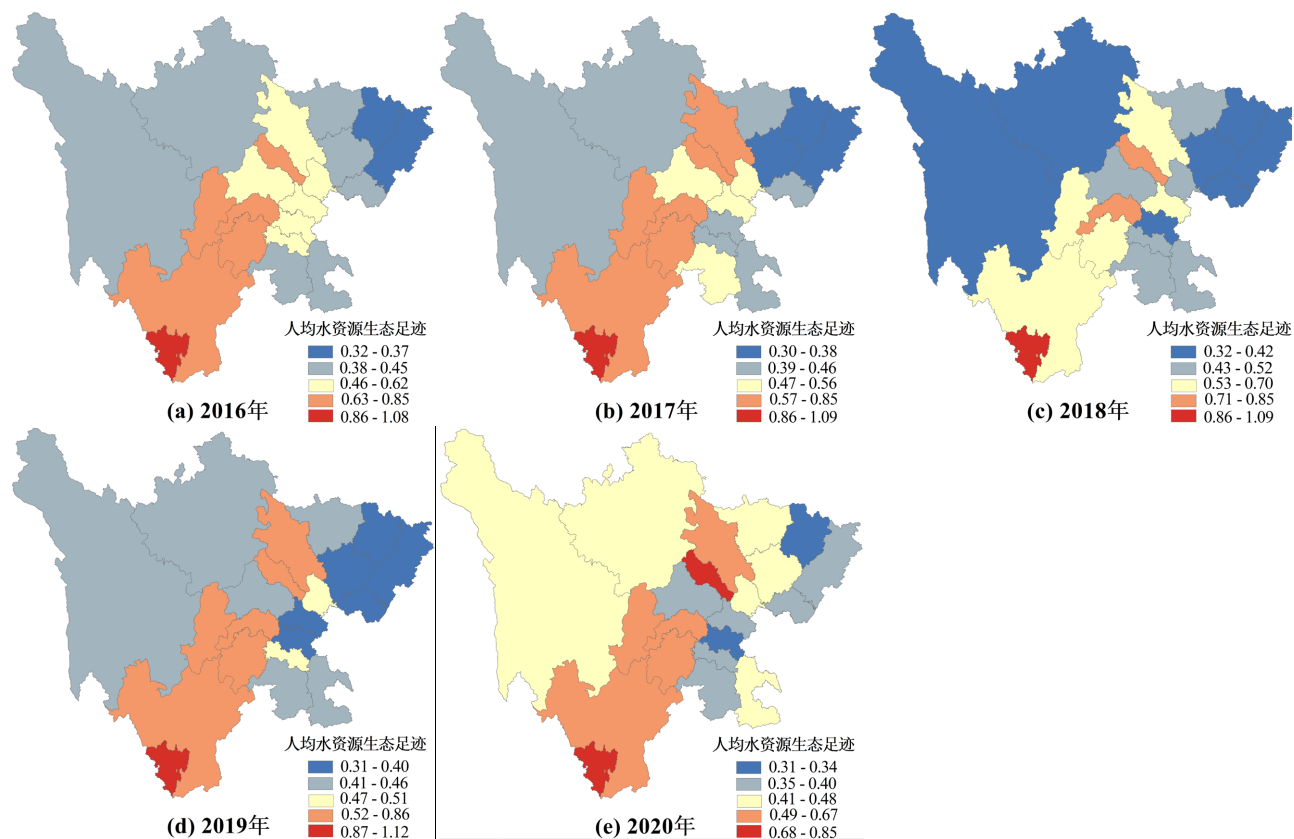


Figure 2. Water resources ecological footprint per capita from 2016 to 2020

图 2. 2016 年~2020 年人均水资源生态足迹

3.2. 人均水资源生态承载力

人均水资源生态承载力大小进行自然断点法分类, 见图 3。可以看出四川省水资源生态承载力是空间分布不均的, 主要呈现西高东低。人均水资源生态承载力排在前 3 位的是甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州与雅安市, 五年均值分别为 $59.53 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $59.21 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $28.98 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。其原因这些区域水资源量较大, 甘孜藏族自治州境内江河湖泊众多, 水系发达, 长江上游重要的干流金沙江、支流雅砻江和大渡河流经州内。阿坝藏族羌族自治州岷江干流及最大支流大渡河纵贯全境。雅安市地处“华西雨屏带”, 降水丰沛, 水系发达, 水网密集。水资源丰沛是三个地区人均水资源生态承载力位于前列的重要原因。而排在后 3 位遂宁市、内江市与自贡市人均水资源生态承载力五年均值分别为 $0.32 \text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $0.38 \text{ hm}^2/\text{人}$ 与 $0.47 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。

3.3. 万元 GDP 水资源生态足迹

根据 2016~2020 年四川省以及各地级行政区万元 GDP 水资源生态足迹, 绘制万元 GDP 水资源生态足迹柱状图, 见图 4。2016~2020 年四川省的万元 GDP 水资源生态足迹由 0.13 hm^2 降低到 0.08 hm^2 , 各市(州)也呈逐年递减趋势, 说明水资源利用效率逐年提高。2020 年四川省万元 GDP 水资源生态足迹排名后 3 的是成都市、宜

宾市、自贡市，分别是 0.046 hm²、0.065 hm² 与 0.066 hm²，说明水资源利用效率较高。

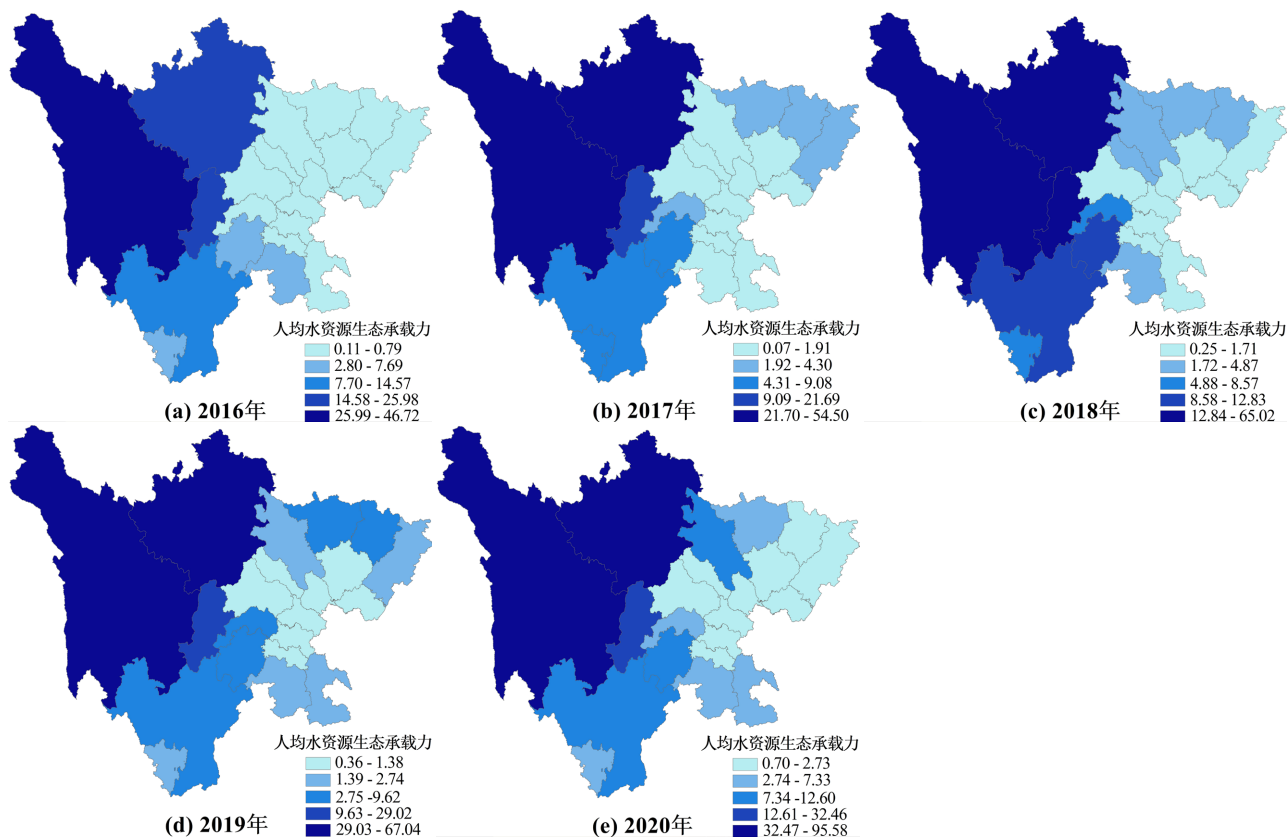


Figure 3. Water resources ecological carrying capacity per capita from 2016 to 2020

图 3. 2016 年~2020 年人均水资源生态承载力

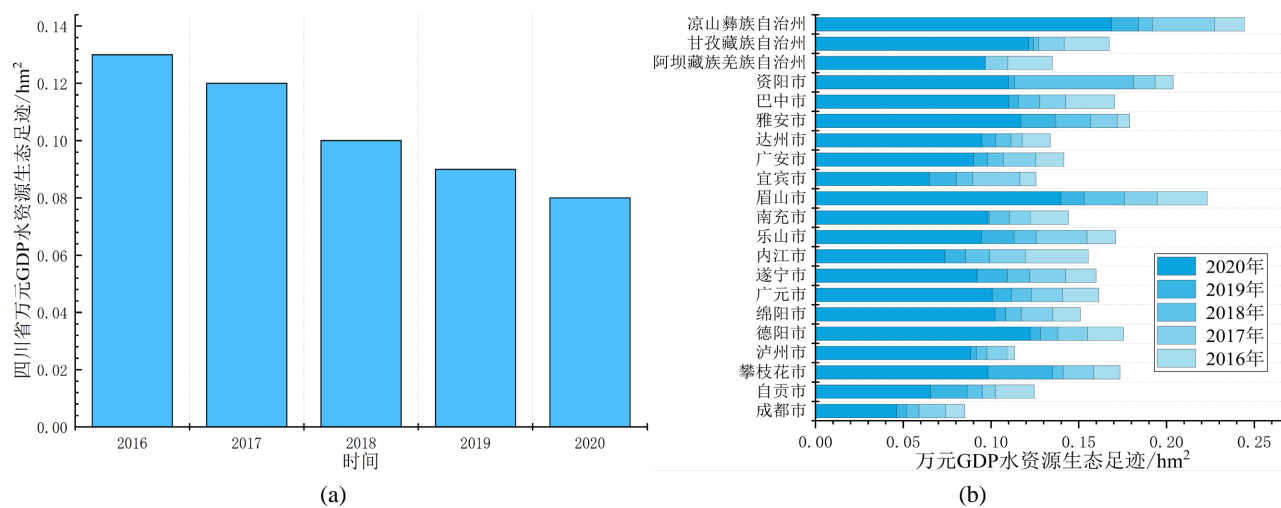


Figure 4. Water resources ecological footprint per 10⁴ yuan GDP from 2016 to 2020

图 4. 2016 年~2020 年万元 GDP 水资源生态足迹

3.4. 人均水资源生态盈亏指数

各地级行政区人均水资源生态盈亏指数见表 1。人均水资源盈余排名前 3 位的地区水资源丰富。甘孜藏族

自治州、阿坝藏族羌族自治州、雅安市五年均值分别为 59.11 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、58.77 $\text{hm}^2/\text{人}$ 、28.30 $\text{hm}^2/\text{人}$ ，从时间上来看，2016~2019 年部分地区存在面对水资源生态赤字问题，但到了 2020 年，四川省 21 个市(州)均为水资源生态盈余。

Table 1. Water resources ecological deficit/surplus index per capita (hm^2/cap)

表 1. 人均水资源生态盈亏指数(hm^2/cap)

地级行政区	2020	2019	2018	2017	2016	均值	排名
甘孜藏族自治州	78.34	52.19	64.60	54.09	46.32	59.11	1
阿坝藏族羌族自治州	95.10	66.60	60.62	46.00	25.53	58.77	2
雅安市	31.84	28.33	40.07	20.98	20.28	28.30	3
凉山彝族自治州	12.00	6.46	12.21	8.39	13.87	10.59	4
乐山市	10.30	8.95	11.95	4.95	6.97	8.63	5
攀枝花市	4.77	0.94	5.50	5.18	5.19	4.32	6
眉山市	3.55	4.38	7.82	1.62	2.03	3.88	7
广元市	6.89	4.57	4.16	2.66	0.91	3.84	8
巴中市	1.78	8.85	2.21	3.13	0.70	3.33	9
绵阳市	7.97	2.10	4.23	1.03	0.73	3.21	10
宜宾市	3.49	1.81	2.42	1.43	3.50	2.53	11
达州市	2.13	2.32	0.83	3.93	0.95	2.03	12
泸州市	3.38	2.03	1.28	0.89	2.10	1.94	13
德阳市	1.88	0.27	2.93	-0.48	-0.36	0.85	14
广安市	0.99	0.66	0.12	1.12	0.08	0.59	15
资阳市	0.96	0.53	0.71	-0.34	-0.21	0.33	16
成都市	0.62	0.28	0.74	-0.23	-0.21	0.24	17
南充市	0.28	0.98	0.04	0.04	-0.24	0.22	18
自贡市	0.54	0.12	-0.07	-0.37	-0.14	0.02	19
内江市	0.39	0.26	-0.15	-0.36	-0.28	-0.03	20
遂宁市	0.24	-0.15	-0.26	-0.32	-0.39	-0.18	21

本次通过对四川省 2016~2020 年人均水资源生态盈亏指数进行全局自相关莫兰指数 I 进行计算，如表 2 所示。全局莫兰指数 I 大于 0，且均通过正态统计量 Z 值、 P 值的检验标准，说明四川省 2016~2020 年人均水资源生态盈亏指数存在显著的空间相关性，即人均水资源生态盈亏指数存在较高或较低的市(州)倾向聚集状态。

Table 2. Global Moran's indexes of water resources ecological deficit/surplus index per capita from 2016 to 2020

表 2. 2016~2020 年人均水资源生态盈亏指数全局莫兰指数

年份	Moran's 指数	Z 值	P 值
2016	0.45	4.43	0.003
2017	0.37	3.55	0.011
2018	0.43	3.92	0.004
2019	0.33	3.26	0.014
2020	0.34	3.36	0.012

对局部莫兰指数进行可视化分析(LISA)。通过 LISA 聚类图识别四川省人均水资源生态盈亏指数的局部聚集区域,如图 5 所示。高-高表示高值与高值空间相关,即人均水资源生态盈亏指数高的区域与其相邻区域的值水平也高;低-低表示低值与低值空间相关,即人均水资源生态盈亏指数低值的区域其相邻区域的值也低。人均水资源生态盈亏指数高-高型集中在水资源生态承载力高的甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州与雅安市以及西北地区的阿坝藏族羌族自治,人均水资源生态盈亏指数低-低型集中在水资源生态承载力不足的东部地区,如资阳市、广安市、内江市与遂宁市等。

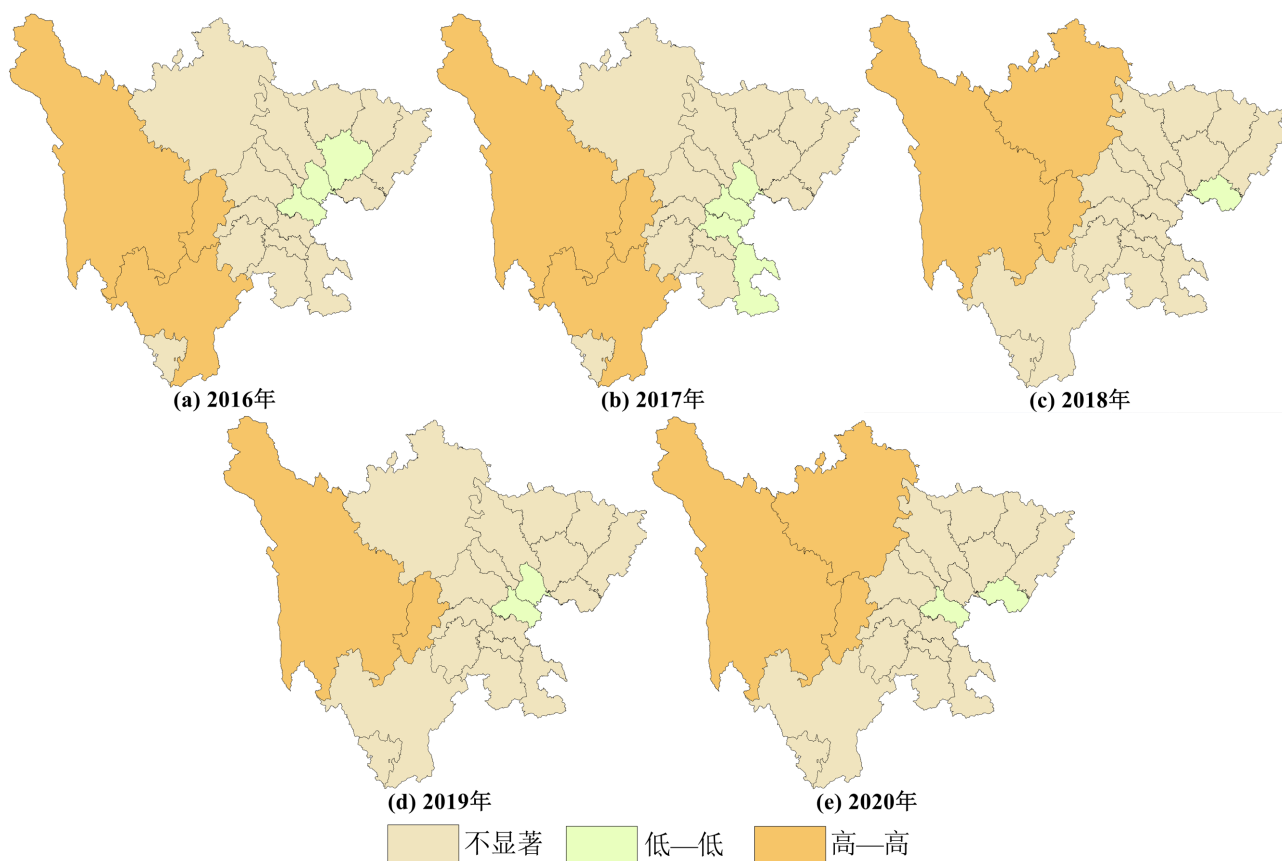


Figure 5. LISA cluster diagram of water resources ecological deficit/surplus index per capita from 2016 to 2020
图 5. 2016~2020 年人均水资源生态盈亏指数 LISA 聚类图

4. 结论与建议

2016~2020 年四川省人均水资源生态足迹总体呈下降趋势,四川省人均水资源生态足迹总体呈现是盆地中部与攀西地区高,川西与川东地区低的分布特征。万元 GDP 水资源生态足迹各市(州)呈逐年递减趋势,说明水资源利用效率逐年提高。四川省近些年不断强化水资源管理工作,节水型社会建设的全面推进,从而提高水资源利用效率。

从数据来看,虽然 2020 年四川省 21 个市(州)均为水资源生态盈余,但部分地区生态盈余较低,濒临生态赤字,在 2020 年之前部分地区甚至出现生态赤字,随着社会经济的发展需求,形势依然严峻。

人均水资源生态盈亏指数反映了区域水资源处于可持续利用状态,人均水资源生态盈亏指数存在显著的空间相关性。具有明显聚类性的地区主要集中在西部与东部地区。四川省西部高原山地地区水资源丰沛,水资源生态承载力位于前列,人均水资源生态盈亏指数较高。四川省东部地区,虽然水资源生态足迹不高,但水资源

匮乏, 水资源生态承载力也较低, 表现出人均水资源生态盈亏指数较低。四川省应该采取差别化的水资源管理策略, 对于人均水资源生态盈亏指数低-低型集中地区, 加大水利工程的利用与建设, 优化水资源配置, 采取有效措施保护水资源, 构建创新型用水管理制度, 实施高效率的水资源管理, 提高水资源承载力, 增大生态盈余, 避免生态赤字的发生。

基金项目

中国石油化工股份有限公司西北油田分公司项目(KJ202133)。

参考文献

- [1] WILLIAM, E. R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130. <https://doi.org/10.1177/095624789200400212>
- [2] WACKERNAGEL, M., WILLIAM, E. R. *Our Ecological footprint: Reducing human impact on the earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [3] WACKERNAGEL, M. An evaluation of the ecological footprint. *Ecological Economics*, 1999, 31(3): 315-320.
- [4] 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(3): 1279-1286.
HUANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, *et al.* Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(3): 1279-1286. (in Chinese)
- [5] 卢亚丽, 徐帅帅, 司保江, 等. 黄河流域九省(区)水资源环境承载力动态演变特征研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(11): 103-108.
LU Yali, XU Shuishuai, SI Baojiang, *et al.* Study on dynamic evolution characteristics of water resources environmental carrying capacity of nine provinces and regions of the Yellow River basin. *Yellow River*, 2021, 43(11): 103-108. (in Chinese)
- [6] 李菲, 张小平. 甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6): 1486-1495.
LI Fei, ZHANG Xiaoping. Spatio-temporal characteristics of ecological footprint and ecological carrying of water resources in Gansu Province. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6): 1486-1495. (in Chinese)
- [7] 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.
WANG Wenguo, HE Mingxiong, PAN Ke, *et al.* Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province. *Journal of natural resources*, 2011, 26(9): 1555-1565. (in Chinese)
- [8] 赵茂钦, 徐瑶, 李卫朋, 等. 川东北城市群水资源生态足迹时空变化分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(6): 73-78+106.
ZHAO Maoqin, XU Yao, LI Weipeng, *et al.* Spatial and temporal variation analysis on water resource ecological footprint of urban agglomeration of Northeast Sichuan Province. *Yangtze River*, 2020, 51(6): 73-78+106. (in Chinese)
- [9] 熊娜娜, 谢世友. 成都市水资源生态足迹及承载力时空演变研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(6): 118-126.
XIONG Nana, XIE Shiyu. A study of the spatio-temporal evolution of water resource ecological footprint and ecological carrying capacity of Chengdu. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2019, 41(6): 118-126. (in Chinese)
- [10] 朱正如, 湛雅琪, 曹永强, 等. 辽宁省水资源生态足迹时空特征及其影响因素分析[J/OL]. *长江科学院院报*, 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220421.1715.002.html>, 2022-09-15.
ZHU Zhengru, ZHAN Yaqi, CAO Yongqiang, *et al.* Spatial-temporal characteristics and influencing factors of water resources ecological footprint in Liaoning Province. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1-7. (in Chinese) <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220421.1715.002.html>, 2022-09-15.
- [11] 左其亭, 姜龙, 冯亚坤, 等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(10): 1-8+34.
ZUO Qiting, JIANG Long, FENG Yakun, *et al.* Spatio-temporal variation of ecological footprint of water resources in the Provinces in the Yellow River basin. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(10): 1-8+34. (in Chinese)
- [12] 方伟成, 孙成访, 郭文显. 基于 LMDI 法东莞市水资源生态足迹影响因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(3): 115-117+123.
FANG Weicheng, SUN Chengfang and GUO Wenxian. Analysis of influence factor of water resources ecological footprint in Dongguan based on LMDI method. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, 26(3): 115-117+123. (in Chinese)
- [13] 李雨欣, 薛东前, 宋永永. 中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1574-1584.
LI Yuxin, XUE Dongqian and SONG Yongyong. Spatio-temporal characteristics and trend warnings of water resources carrying capacity in China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1574-1584. (in Chinese)
- [14] 安慧, 范历娟, 吴海林, 等. 基于 BP 神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5):

1076-1087.

AN Hui, FAN Lijuan, WU Hailin, *et al.* Analysis and prediction of water ecological footprint of Huaihe River basin based on BP Neural Network. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(5): 1076-1087. (in Chinese)

- [15] 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.

ZHANG Yi, ZOU Yongfu, LI Fengsheng, *et al.* Prediction of water resources ecological footprint based on Grey Neural Network Model: Case of Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Yangtze River*, 2017, 48(1): 37-42. (in Chinese)

- [16] 张乐勤, 方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. *水资源保护*, 2017, 33(1): 24-29.

ZHANG Leqin, FANG Yuyuan. Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui province based on spatial autocorrelation analysis. *Water Resources Protection*, 2017, 33(1): 24-29. (in Chinese)