

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2022.06.010

西南地区水资源生态足迹 及承载力动态特征与预测分析^①

杨晓霖, 潘玉君, 李晓莉

云南师范大学 地理学部, 昆明 650500

摘要: 为保证西南地区水资源的可持续利用, 需开展水源地保护, 以实现西南地区水资源与社会、经济和生态环境的协调发展. 在测算西南地区 2003—2018 年水资源生态足迹、水资源生态承载力和水资源负载指数动态变化特征的基础上, 运用综合自回归移动平均模型 (ARIMA 模型) 对 2025 年西南地区水资源生态足迹、水资源生态承载力及水资源负载指数情况进行预测分析. 结果表明: ①2003—2018 年, 西南地区总水资源生态足迹有较大的区域差异, 贵州、四川水资源生态足迹呈上升趋势; 2019—2025 年, 西南地区总水资源生态足迹呈上升趋势. ②从水资源承载力来看, 四川水资源承载力最高, 云南较高, 贵州第 3, 重庆相对较低, 西藏最低, 在一定程度上与水资源承压指数的趋势相反; 从空间分布特征来看, 西藏水资源承载力最低, 四川水资源承载力最高. ③2003—2018 年, 西南地区水资源负载指数整体在 II 级以下水平. 研究显示, 西南地区水资源承载能力较大, 如不加以保护规范, 必然会抑制经济社会的发展, 因此协调好水资源同经济社会发展的互动关系至关重要.

关键词: 西南地区; 生态足迹; 承载力; 水资源; ARIMA 模型

中图分类号: X143

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2022)06-0058-10

Dynamic Characteristics and Prediction of Ecological Footprint and Carrying Capacity of Water Resources in Southwest China

YANG Xiaolin, PAN Yujun, LI Xiaoli

Department of geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

Abstract: In order to ensure the sustainable utilization of water resources in southwest China, the protection of water source should be carried out to realize the coordinated development of water resources, society, economy and ecological environment in southwest China. Based on the dynamic change characteristics of water resource ecological footprint, water resource ecological carrying capacity and water resource load index in Southwest China from 2003 to 2018, the ARIMA model is used to forecast and analyze the water resource ecological footprint, water resource ecological carrying capacity and water resource load index in Southwest China in 2025. The results show that: ①From 2003 to 2018, the total ecological footprint of water resources in Southwest China had great regional differences, and the ecological footprint of water re-

① 收稿日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671148;41971169;41261033); 研究生科研创新基金项目(ydsyjs2020065).

作者简介: 杨晓霖, 硕士研究生, 主要从事区域经济开发与管理方面的研究.

通信作者: 潘玉君, 教授, 博士研究生导师.

sources in Guizhou and Sichuan showed an upward trend; From 2019 to 2025, the total ecological footprint of water resources in Southwest China will show an upward trend. ②From the perspective of water resources carrying capacity, the water resources carrying capacity of Sichuan is the highest, Yunnan is the highest, Guizhou is the third, Chongqing is relatively the lowest, and Xizang is the lowest, which is contrary to the trend of water resources bearing pressure index to a certain extent. From the perspective of spatial distribution characteristics, the carrying capacity of water resources in Xizang is the lowest, and that in Sichuan is the highest. ③From 2003 to 2018, the overall water resource load index in Southwest China was below II level. The research shows that the large carrying capacity of water resources in Southwest China will inevitably inhibit economic and social development if it is not protected and regulated. Therefore, it is very important to coordinate the interaction between water resources and economic and social development.

Key words: southwest region; ecological footprint; carrying capacity; water resources; ARIMA model

水资源是可供人类直接利用,有一定数量并能不断更新的淡水^[1].至2030年全球可能将面临40%的淡水资源短缺,如何处理好水资源与人类生产、生活的关系显得尤为重要.联合国可持续发展目标提出,到2030年全球要大幅提高所有部门的水资源利用效率,确保解决水资源短缺和淡水供应大幅减少的迫切问题,实现人人享有清洁用水的可持续发展目标^[2].西南地区是目前我国水资源最丰富的地区,是我国产水能力最高的地区^[3],是长江、珠江、澜沧江等大江大河中上游流域所经过的地区.因此,研究西南地区水资源的可持续发展对西南地区乃至东部地区的水资源可持续综合利用具有重要的指导意义.水资源生态足迹和水资源承载力是衡量区域水资源可持续发展的重要方法.水资源生态足迹是一种定量测量人类对水资源利用程度的有效方法.水资源承载力是指在某一特定环境条件下,水资源承载数量的最高限度,即在保证人类生存的前提条件下,水资源的最大承受限度.国内外学者对水资源生态足迹和水资源承载力等相关问题进行了一系列的研究和探讨.

首先,国内外学者对其研究主要集中在水资源生态足迹及承载力评价指标的确定^[4],水资源生态足迹及承载力研究方法的探讨^[5-7],水资源生态足迹及承载力的优化配置研究^[8],水资源生态足迹及承载力的驱动因素分析^[9-10],水资源生态足迹及承载力的时空变化特征^[11-12],水资源生态足迹及承载力产业需求程度评价^[13-14]等方面.虽然研究方法多种多样,定性与定量研究并存,但在研究内容上多集中在水资源生态足迹、生态承载力的单因素研究与水资源生态足迹及承载力双因素的研究和预测上,尚没有结合水资源负载情况等3因素或多因素的综合研究与预测.从水资源生态足迹和承载力的视角去分析和预测水资源的可持续发展状况,仅能对水资源负载情况进行简单的反映,水资源负载指数将水资源生态足迹和水资源承载力相结合,对水资源过载程度进行了等级划分,进而更加全面地反映出区域水资源的承载能力和负载现状,为后续水资源管理和水资源的有效利用奠定初步基础.

其次,国内外学者运用多种预测方法对水资源生态足迹和承载力进行了一系列的预测尝试^[15-18].刘童等^[19]建立了系统动力学模型,模拟预测吉林省水资源承载能力,该方法依赖于已建模型的特定情境来模拟和预测未来水资源承载能力现状,能较好地突出内部结构的影响效应,但却会忽视外部变量对系统影响的不确定性干扰.刘志明等^[20]通过建立灰色预测模型,从较长时间尺度预测和分析了宜昌市水资源承载力状态,但灰色预测模型在建模过程中引入的灰导数和背景值会降低预测结果的精准性.因此,本文运用综合自回归移动平均模型(ARIMA模型)预测西南地区水资源生态足迹、承载力及负载指数的未来发展趋势,希望对解决西南地区水资源可持续利用问题和西南地区水功能的可持续循环绿色发展有所贡献.

基于上述研究背景,本文以西南地区为研究对象,研究西南地区水资源生态足迹、生态承载力和负载指数的动态变化特征并预测其未来发展趋势.通常对水资源可持续利用程度的衡量与研究是通过水资源生态盈余和生态赤字的互动关系来表示的.当某地区水资源生态承载力大于该地区的水资源生态足迹时,则表明该地区水资源相对丰盈,呈现为地区水资源盈余状态,表明该地区水资源的可持续利用程度较高,能较好地满足地区经济、社会、生态、环境的良性互动,实现地区的绿色循环发展;反之,则呈现为水资源赤

字状态^[21-23]. 在测算西南地区水资源生态足迹、生态承载力和负载指数动态变化特征的基础上, 运用 ARIMA 模型对西南地区水资源生态足迹、生态承载力及负载指数情况进行分析预测. 由于数据样本庞大, 逐年描述过于繁琐, 本文依据数据的真实性和研究的科学性原则选取了 2003 年、2008 年、2013 年、2018 年 4 个时间截面, 遵循以下研究框架进行系统阐述: ①测度 2003—2018 年西南 5 省(市)水资源生态足迹, 并分析其动态变化特征; 运用 ARIMA 模型对 2019—2025 年西南地区各省市水资源生态足迹进行分析与预测. ②测度 2003—2018 年西南 5 省(市)水资源承载力, 并分析其动态变化特征; 运用 ARIMA 模型对 2019—2025 年西南地区 5 省(市)水资源生态承载力进行分析和预测. ③运用西南地区各省市水资源总量、降水量、人口、GDP 等相关因子, 计算得出 2003—2018 年西南地区各省市的水资源负载指数, 并对 2019—2025 年西南地区各省市水资源负载指数进行分析与预测.

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

西南地区是我国 7 大地理分区之一, 位于东经 97°21′~110°1′, 北纬 21°08′~33°41′之间, 主要包括重庆市、四川省、云南省、贵州省和西藏自治区 5 个行政单元, 位于我国青藏高原东南部、四川盆地、云贵高原地区. 西南地区是我国大江大河的集聚区, 中部和北部河流多属于长江流域, 南部和西部河流则分属于珠江流域、元江流域、澜沧江流域、怒江流域、伊洛瓦底江流域、恒河流域和印度河流域, 水资源丰富. 西南地区属于我国经济区划中的西部地区, 经济发展水平相对较低. 因此, 如何协调好西南地区水资源的开发、利用和管理, 既有利于区域水资源的可持续利用, 又对我国其他地区和东南邻近国家的水资源可持续发展具有重要意义.

1.2 数据来源

测算水资源生态足迹、生态承载力和负载指数时所应用的指标为西南 5 省的水资源总量、地区用水总量、各生产部门用水量、降水量等水数据和国内生产总值、地区年末人口数等经济社会相关统计数据. 以上数据来自于《中国国家统计局年鉴 2019》、地区统计年鉴、地区环境发展公报等. 考虑到数据的科学性、一致性和可获取性, 选取研究区间为 2003—2025 年, 其中水资源生态足迹、生态承载力和负载指数动态变化特征的测算区间为 2003—2018 年, 预测区间为 2019—2025 年.

2 研究方法

2.1 水资源生态足迹

生态足迹是指能够持续不断地为人口提供消费资源并产生废物, 同时具有生物生产能力的地域空间(包括陆地和水域生态系统)^[24].

基于黄林楠等^[25]研究成果, 将水资源生态足迹概括为某地为维持该地区生产、生活、生态绿色循环发展所消耗的水资源总量, 其中最基本的水资源消耗类型为农业部门用水、工业部门用水、生活部门用水和生态部门用水. 计算公式:

$$\begin{aligned} EF_w &= N \times ef_w \\ &= N \times \gamma_w \times (W/P_w) \end{aligned}$$

式中, EF_w 为地区水资源总生态足迹(hm^2); ef_w 为地区人均水资源生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); N 为地区年末户籍总人口数; γ_w 为水资源的全球均衡因子; W 为地区人均消耗的水资源量(m^3); P_w 为水资源全球平均生产能力(m^3/hm^2).

2.2 水资源生态承载力

水资源生态承载力是指在绿色、可持续、良性循环利用的前提下, 水资源能够维系和支撑的最大人口数和经济规模总量. 水资源生态承载力是满足地区经济社会发展的最佳“生态线”, 该“生态线”的浮动变化主要受人类生产生活的影 响. 当超出这个“生态线”, 水资源环境系统中的结构和功能将会发生质变, 从而对人类行为活动产生负向影响^[26]. 基于应用生态学原理的水资源生态承载方法, 构建水资源生态承载力模型, 以此来衡量西南地区水资源生态承载程度的大小. 计算公式:

$$EC_w = N \times ec_w$$

$$= 0.4 \times \psi \times \gamma_w \times Q / P_w$$

式中, EC_w 为地区水资源承载力 (hm^2); ec_w 为地区人均水资源承载力 ($hm^2/人$); N 为地区人口数; γ_w 为水资源全球均衡因子; ψ 为水资源产量因子; Q 为地区水资源总量 (m^3); P_w 为水资源全球平均生产能力 (m^3/hm^2). 经计算, 重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区的水资源产量因子分别是 2.04, 1.76, 1.87, 1.84, 1.19.

2.3 水资源负载指数

水资源负载指数是指在某一特定区域内水资源与人口、经济和社会发展的相关关系. 水资源负载指数优于以上两个评价因子的地方就在于它既能反映水资源利用程度的高低, 又能对未来水资源开发难易程度进行判断^[27]. 计算公式:

$$C = k \sqrt{P \times G} / W$$

$$K = \begin{cases} 1 & R \leq 200 \\ 1.0 - 0.1(R - 200)/200 & 200 < R \leq 400 \\ 0.9 - 0.2(R - 400)/400 & 400 < R \leq 800 \\ 0.7 - 0.2(R - 800)/800 & 800 < R \leq 1\ 600 \\ 0.5 & R > 1\ 600 \end{cases}$$

式中, C 为水资源负载指数; P 为人口数量 (万人); G 为国内生产总值 (亿美元); W 为水资源总量 ($亿 m^3$); k 为同降水量相关的系数; R 为降水量 (mm). 根据水资源负载指数的分量等级标准, 得出等级评价表 (表 1).

表 1 水资源负载指数等级评价

级别	C 值	水资源利用程度及开发潜力	水资源进一步开发评价
I	$C \geq 10$	很高, 潜力很小	开发条件艰难, 必要时需外流域调水
II	$5 \leq C < 10$	高, 潜力小	开发条件困难
III	$2 \leq C < 5$	中等, 潜力较大	开发条件中等
IV	$1 \leq C < 2$	较低, 潜力大	开发条件较容易
V	$0 < C < 1$	低, 潜力很大	可兴修中小工程, 开发容易

2.4 ARIMA 模型

ARIMA 模型是由 Box 和 Jenkins 于 1970 年共同提出的综合自回归移动平均模型^[28]. 在实际问题的研究中, 我们通常遇到的序列为不平稳序列, 其往往呈现出明显的趋势性或周期性. 这时, 我们就不能认为该数列为均值不变的平稳数列, 更不能用平稳的 ARMA 模型来预测未来发展的趋势. ARIMA 模型是在对时间序列过去值和现值分析的基础上考察未来值的变化, 并能呈现出预测趋势, 是一种在短期预测中精度较高的预测模型^[29].

该研究采用一般的 ARIMA 模型方程, 即在一个非平稳时间序列 $Y_t \{y_1, y_2, y_3, \dots\}$ 中, 通过 $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$, $\Delta^2 Y_t = \Delta(\Delta Y_t) = \Delta(Y_t - Y_{t-1})$, \dots 等依次差分后形成平稳的时间序列 W_t , 使得 W_t 满足 ARIMA(p, q) 模型:

$$W_t = \varphi_1 W_{t-1} + \varphi_2 W_{t-2} \dots + \varphi_p W_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} \dots - \theta_q e_{t-q}$$

即 $\varphi(B)W_t = \theta(B)e_t$,

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 \dots - \varphi_p B^p$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 \dots - \theta_q B^q$$

且 $\varphi(B) = 0$ 与 $\theta(B) = 0$ 的所有根的模大于 1, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 是自回归参数; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 是滑动平均参数; 随机项 e_t 是服从 0 均值; 方差是 σ_e^2 的相互独立且呈正态分布的白噪声序列; W_t 则称为综合自回归移动平均序列, 即 ARIMA(p, d, q), 所以 ARIMA 模型的一般表示形式为

$$\varphi(B)(1-B)^d Y_t = \theta(B)e_t$$

其中, p 是自回归模型 AR 的阶数; d 是差分阶次; q 是移动平均模型 MA 的阶数.

3 结果分析

3.1 西南地区水资源生态足迹动态特征及预测分析

3.1.1 西南地区水资源生态足迹动态特征

2003—2018年西南地区总水资源生态足迹测算结果见图1, 2003—2018年西南地区部门用水生态足迹的测算结果见图2。

由图1可知, 2003—2018年, 西南地区的总水资源生态足迹在一定程度上反映了该地区水资源生态消费特征, 衡量了该地区水资源生态的可持续性, 是衡量西南地区水资源可持续性的生态底线标准。与此同时, 运用生态足迹模型的计算结果能定量衡量人类对自然生态系统影响程度的高低^[30]。当水资源生态足迹数值过高, 则表明人类与

水资源的供求关系紧张, 水资源生态足迹的压力较大; 当水资源生态足迹数值较小, 则表明人类与水资源的供求关系和缓, 水资源生态足迹的压力较小。西南地区2003—2018年的总水资源生态足迹, 在一定程度上反映了该地区水资源生态供求与生态消费程度的变化。从横向来看, 5省之间总水资源生态足迹存在较大差异, 四川省水资源生态足迹在5省中最高, 人类与水资源的供求关系最紧张; 西藏自治区水资源生态足迹在5省中最低, 人类与水资源的供求关系最和缓。主要原因是四川省人口众多, 经济相对发达, 生活部门用水量、产业发展用水量需求较大; 西藏自治区地广人稀, 经济发展相对落后, 生活部门用水量、产业发展用水量需求较小, 从纵向来看, 四川、贵州两省的水资源生态足迹呈上升趋势, 这是由于四川省人口数有较大幅度的增长, 贵州省用水总量越来越大, 并处于不断增大的发展趋势中; 重庆、云南、西藏3省水资源生态足迹呈下降趋势, 特别是2012年以来, 下降趋势愈为明显。在衡量水资源生态足迹可持续发展过程中, 既要考虑地区发展的经济效益, 同时也要考虑资源环境的可持续发展等问题。因此, 只有地区用水总量和人口规模相适应才能实现区域水资源生态足迹的可持续、绿色、良性循环发展^[31]。

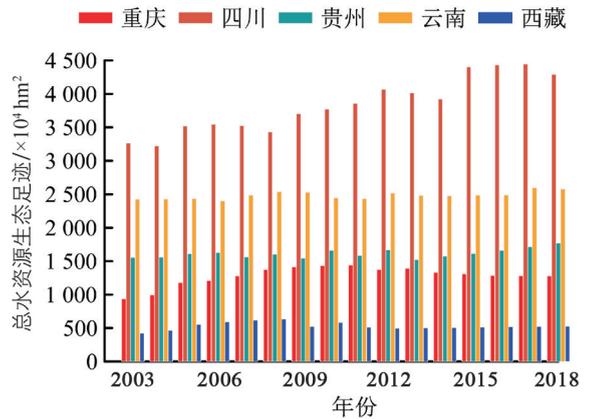
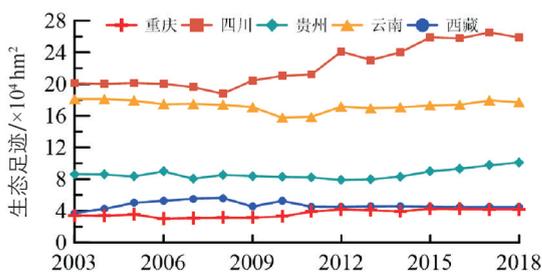
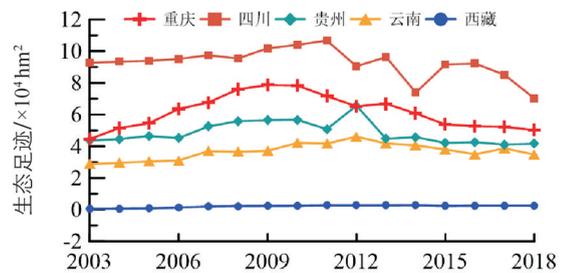


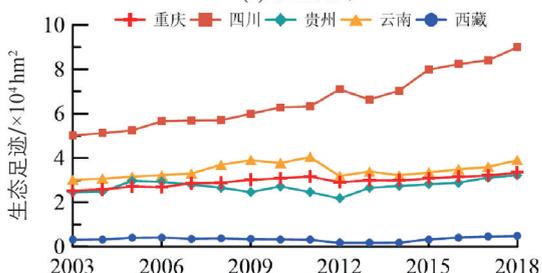
图1 西南地区总水资源生态足迹测算结果



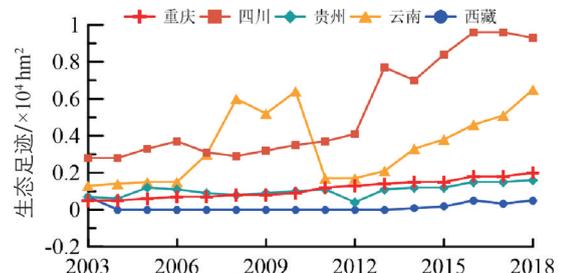
(a) 农业用水



(b) 工业用水



(c) 生活用水



(d) 生态用水

图2 西南地区水资源生态足迹测算结果

由图2可知,根据水资源生态足迹的构成可以得出,除重庆以外,四川、贵州、云南、西藏4省(自治区)的农业部门用水生态足迹远高于其工业、生活、生态部门用水生态足迹.重庆、四川、贵州、云南4省(直辖市)农业部门用水生态足迹呈“U”型发展趋势;西藏自治区则呈倒“U”型发展趋势.从5省农业部门的用水方向来看,长期以来主要用于农业灌溉,这是5省水资源时空分布不适宜农业生产等现实条件下所进行的必然选择^[32].

重庆工业部门用水生态足迹略高于农业部门用水生态足迹,主要原因是重庆市域面积有限,在产业结构发展中不适宜大规模发展农业,同时,工业、服务业发展水平较高.四川、贵州两省工业部门用水生态足迹在总水资源生态足迹中所占比重低于农业部门用水生态足迹,主要是因为四川为我国农业大省之一,农业发展始终为重要的战略性开发产业.贵州地区政策、特色农业的发展也是促进农业部门用水生态足迹较高的主要原因.云南工业部门用水生态足迹在总生态足迹中的占比在10%左右,西藏不足5%,这体现了两省份工业发展水平相对较低,结构比较单一,这是两省工业部门用水少的主要原因,但从趋势来看,自2003年以来工业部门用水的生态足迹呈上升趋势,由此可见,两省份的工业发展速度日益提升.

重庆、四川、贵州、云南的生活部门用水生态足迹均大于10%,说明这4省份人口相对较多,用水需求量较大;西藏自治区生活部门用水生态足迹不足1%,主要是因为人口稀少.从总体而言,生活部门用水生态足迹总体呈上升趋势.

生态部门用水生态足迹的平均值为 $0.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$,在总生态足迹中仅占0.99%.由于西南地区正处于经济社会发展的重要上升期,水资源利用的部门转移现象突出,生产生活部门用水不断侵占生态部门用水,致使生态部门用水形势更为严峻.

3.1.2 西南地区水资源生态足迹预测分析

经反复计算得出ARIMA(2, 0, 1)为最适宜模型,模型预测平均误差的绝对值分别为重庆0.29%,四川4.60%,贵州2.50%,云南0.79%,西藏5.10%.误差较小,在分析预测中越具有可行性.从预测结果(图3)可以看出,2003—2018年西南5省总水资源生态足迹的实测均值与预测均值相差较小,符合最优拟合.其中,重庆、四川、贵州、云南、西藏的实测值与预测值之差分别为0.0003, 0.0467, 0.0250, 0.0079, 0.0510.从各水资源账户的趋势走向来看,预计未来5年农业部门用水的生态足迹将呈上升趋势;除西藏自治区外,工业部门用水的生态足迹将较为稳定,波动不大;生活部门用水的生态足迹总体呈上升趋势,上升幅度趋缓,在20%左右;生态部门用水的生态足迹总体呈上升趋势,上升幅度较大,大致在2倍以上.

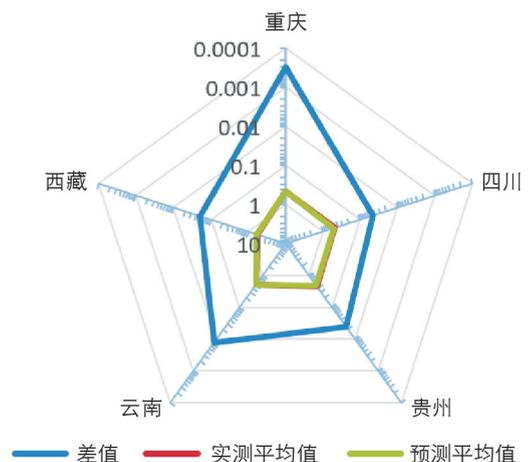


图3 西南地区总水资源生态足迹预测图

3.2 西南地区水资源承载力动态特征与预测分析

3.2.1 西南地区水资源承载力动态特征

从时间序列来看,西南地区水资源承压指数呈现出较明显的波动趋势.承压指数表示水资源所受到来自外界的压力,主要是社会经济发展等人类活动造成的影响.承压指数越大,所承受的外在压力越小,反之越大^[33].2003—2018年间,重庆水资源承压指数波动幅度最大,波动范围在0.4~0.9之间,水资源压力指数最高,水资源利用状况最佳;贵州省的波动幅度低于重庆市,波动范围在0.3~0.6之间,水资源压力指数较高,水资源利用状况较好;西藏自治区的水资源承压指数的波动范围在0.25~0.65之间,水资源承载力高,水资源利用状况好;云南省水资源承压指数的波动幅度较小,波动范围在0.2~0.3之间,水资源承载力较小,水资源利用状况较差;四川省水资源承压指数的波动范围在0.1~0.2之间,相比较水资源利用状况最差(图4).从水资源生态承载力来看(图5),四川省水资源生态承载力最高,云南较高,贵州第3,重庆相对较低,西藏最低,在一定程度上同水资源承压指数的趋势相反.

从空间分布特征来看,2003—2018年,西南地区水资源承载力总体分布较为稳定.西藏水资源承载力最低,四川水资源承载力最高(图6,数据取值范围包含前值).同2003年相比,2018年云南省、贵州省的水资源

承载力有较明显的提高. 重庆市在 2013 年水资源承载力略微降低, 主要是因为 2013 年我国步入经济发展新常态, 重庆市在产业转型发展时期进行了一系列过渡手段, 长期来看不会引起地区水资源承载力的巨大变化.

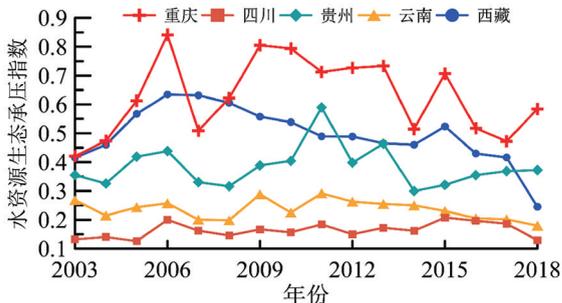


图 4 西南地区水资源承压指数的演变趋势

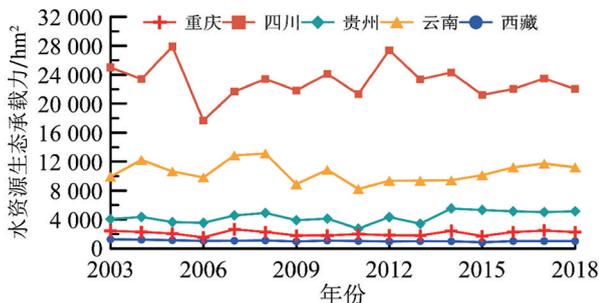
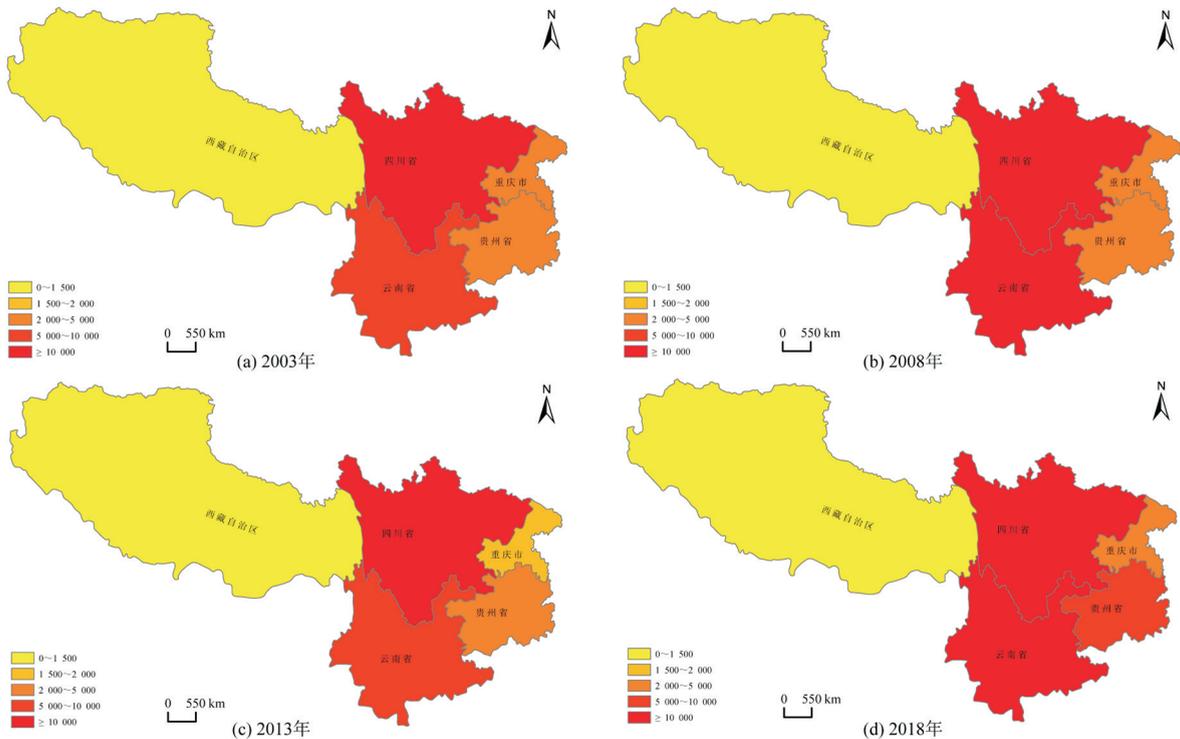


图 5 西南地区水资源生态承载力的演变趋势



审图号: GS(2019)1697 号

图 6 西南地区水资源承载力时空演变特征

3.2.2 西南地区水资源承载力预测分析

经反复计算得出水资源生态承载力的最优预测模型为 ARIMA(6, 0, 4)模型, 且模型预测的平均误差绝对值仅为 0.6%。因此, 应用 ARIMA(6, 0, 4)模型对西南 5 省水资源生态承载力进行短期预测具有科学意义.

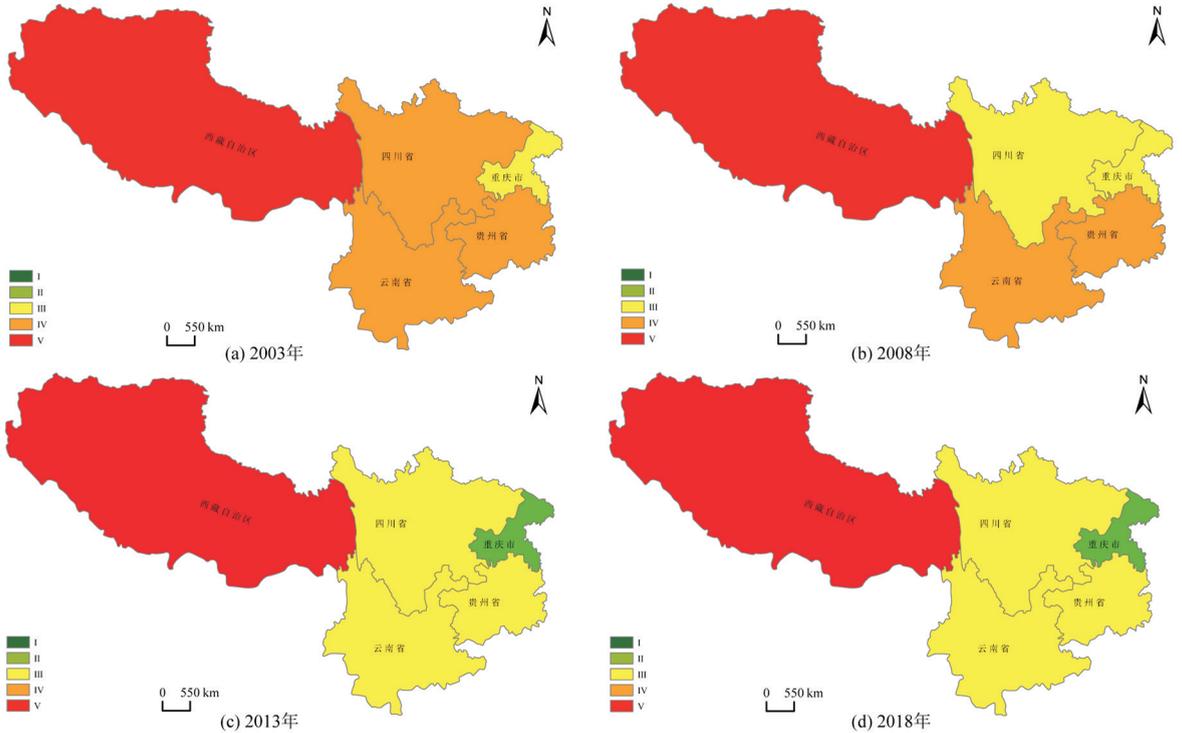
从预测结果来看, 西南地区 2019—2025 年的水资源承载力整体波动不大. 重庆水资源生态承载力呈下降趋势, 最低不会小于 $0.137 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 四川水资源生态承载力将会呈上升趋势, 最高不会大于 $2.86 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 贵州水资源生态承载力呈下降趋势, 最低不会小于 $0.26 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 云南水资源承载力呈上升趋势, 最高不会高于 $1.37 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 西藏水资源承载力呈波动下降趋势. 2019—2025 年水资源生态承载力下降趋势明显, 波动的趋势范围在 $0.075 \times 10^4 \sim 1.01 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 之间. 由于西藏自然环境的特殊性, 使得水资源生态承载力在一定程度上与其他 4 省相比有较大的事实差距.

3.3 西南地区水资源负载能力分析 & 预测

通过西南地区水资源负载指数的动态变化特征, 进一步研究西南地区水资源负载能力的大小. 水资源负载指数是囊括降水、水资源总量、人口以及经济规模等多部门要素的综合评价指标, 该指标能较为客观地衡量区域水资源利用程度的高低.

3.3.1 西南地区水资源负载能力分析

由图 7 可知, 2003—2018 年西南 5 省的水资源负载指数总体在 II 级以下水平. 重庆市的水资源承载力指数由 III 级过渡到 II 级, 预计如果不加以规范和控制可能会陷入开发程度很高、需外区调水的情境之中. 四川省的水资源负载指数由 2003 年的 IV 级转变为 2008 年的 III 级, 开发潜力由大向较大转变, 开发条件由容易向中等转变. 贵州省的水资源负载指数总体在 IV 向 III 级中转变, 2008 年后总体处于 III 级, 开发潜力较大. 云南省的水资源负载指数在 2008 年以前总体处于 IV 级水平, 在 2013 年后处于 III 级状态, 说明该阶段水资源利用存在一个较大的转折时期, 水资源开发潜力较大, 开发条件较容易. 西藏水资源负载指数一直保持在 V 级水平, 水资源开发潜力很大, 但开发条件是否容易有待商榷.

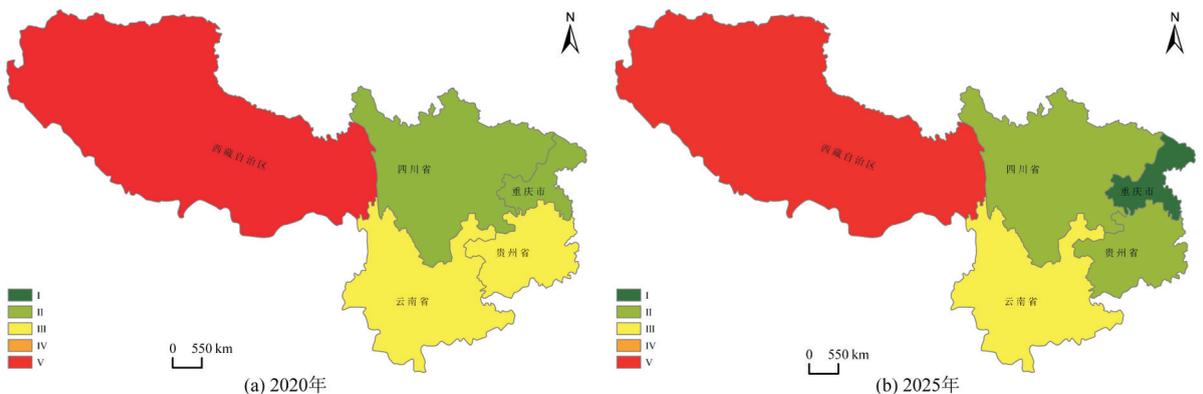


审图号: GS(2019)1697 号

图 7 西南 5 省水资源负载指数时空变化特征

3.3.2 西南地区水资源负载能力预测分析

从预测结果(图 8)可以看出, 2020—2025 年重庆水资源负载指数有从 II 级上升到 I 级的趋势. 四川水资源负载指数一直保持在 II 级状态, 短期内不会向 I 级转变. 贵州水资源负载指数有从 III 级向 II 级转变的趋势. 云南省水资源负载指数一直保持为 III 级状态, 短期内不会向 II 级转变. 西藏水资源负载指数较低, 一直保持在 V 级状态, 发展变化趋势不明显, 未来可能仍处于 V 级状态.



审图号: GS(2019)1697 号

图 8 西南 5 省水资源负载指数预测分析

4 结论与思考

4.1 结论

1) 2003—2018 年, 西南地区水资源生态足迹在一定程度上反映了西南地区水资源生态供求与生态消费程度的变化. 从空间分布来看, 西南地区总水资源生态足迹存在较大差异, 四川水资源生态足迹最高, 西藏水资源生态足迹最低; 从时间变化特征来看, 贵州、四川两省水资源生态足迹总体呈上升趋势, 重庆、云南、西藏 3 省(自治区、直辖市)水资源生态足迹总体呈下降趋势.

2) 从地区用水结构来看, 西南地区农业部门用水的主要方向是农业灌溉, 这是西南地区水资源时空分布不适宜于农业生产等现实条件下所进行的必然选择. 2019—2025 年间农业部门用水生态足迹将呈上升趋势; 除西藏外, 工业部门用水生态足迹将较为稳定, 波动不大; 生活部门用水生态足迹表现为上升趋势, 上升幅度趋缓, 在 20% 左右; 生态部门用水生态足迹总体表现为上升趋势, 上升幅度较大, 大致在 2 倍以上.

3) 从水资源生态承载力来看, 水资源生态承载力的关系由大到小为四川、云南、贵州、重庆、西藏, 在一定程度上与水资源承压指数的趋势相反; 从空间分布特征来看, 2003—2018 年, 西南地区水资源承载力呈现出较为稳定的分布, 西藏水资源承载力最低, 四川省水资源承载力最高. 从预测结果来看, 西南地区 2019—2025 年的水资源承载力整体波动不大, 较为稳定.

4) 从水资源负载指数来看, 2003—2018 年西南地区的水资源负载指数一直在 II 级以下水平. 其中, 重庆水资源负载指数由 III 级过渡到 II 级, 预计如果不加以规范和控制可能会陷入开发程度很高、需要外区调水的情境之中. 四川、贵州、云南省的水资源负载指数大致在 III 与 IV 中波动, 水资源开发程度较大. 西藏水资源负载指数始终保持在 V 级状态, 水资源开发潜力很大, 但开发条件是否容易有待商榷. 从预测结果可以看出, 2020—2025 年重庆水资源负载指数有从 II 级上升到 I 级的趋势, 负载能力更加严峻. 四川、贵州有向 II 级过渡的趋势, 但趋势尚不明显. 云南一直保持在 III 级状态. 西藏水资源负载指数最低, 始终保持在 V 级状态, 发展变化趋势不甚明显, 未来一段时间可能仍为 V 级.

4.2 讨论

水资源的开发与利用是关乎人民生活福祉的重要基础性工作, 水资源负载能力的高低对地区实现绿色循环可持续发展具有重要意义, 水资源生态足迹及生态承载力对衡量地区水资源的可持续利用与水资源区域管理具有重要作用. 应用生态足迹、承载力、负载指数 3 因素对水资源的可持续利用程度进行综合测算和评价, 应用 ARIMA 模型预测区域水资源的负载能力, 在一定程度上丰富了水资源负载能力的测度方法, 更加全面地反映出地区水资源负载能力的大小. 今后, 在测度地区水资源负载能力时可从更小尺度、更大范围去进行深入探讨, 同时可综合水质因素、水利因素对水资源负载能力的影响, 对区域水资源可持续发展的影响因子和驱动机理做进一步的分析和探讨.

参考文献:

- [1] 全国科学技术名词审定委员会. 地理学名词[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 周全, 潘若曦, 董战峰, 等. 中国落实《2030 年可持续发展议程》进展分析 [J]. 生态经济, 2020, 36(10): 179-184.
- [3] 陈传友. 西南地区水资源及其评价 [J]. 自然资源学报, 1992, 7(4): 312-328.
- [4] 唱彤, 郦建强, 金菊良, 等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 44-51.
- [5] 李治军, 董智, 陈末, 等. 基于模糊分析法的合肥市水资源承载力评价 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 44-46, 43.
- [6] 杨海燕, 孙晓博, 程小文, 等. 基于 VIKOR 法的潍坊市水资源承载力综合评价 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 716-723.
- [7] 叶飞, 金菊良, 方国华. 基于集对分析联系数的合肥市水资源承载力评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 85-90.
- [8] 杜煜. 洋河流域农业水资源承载力评价及优化配置研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [9] 陈正雷, 陈星. 山东省水生态足迹时空分布与驱动效应研究 [J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 76-80.
- [10] 董会忠, 姚孟超, 张峰, 等. 京津冀水资源承载力模糊评价及关键驱动因素分析 [J]. 科技管理研究, 2019, 39(23): 93-102.
- [11] 李菲. 甘肃省水资源生态盈亏的时空变化及影响因素分析 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [12] 赵茂嶽, 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.
- [13] 彭新沙. 基于生态足迹改进模型的长沙市工业生态足迹需求测度与分析 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.

- [14] 罗晓梅, 黄鲁成. 产业生态足迹评价体系构建及核算模型研究 [J]. 科技进步与对策, 2015, 32(2): 79-85.
- [15] KISSINGER M, DICKLER S. Interregional Bio-Physical Connections-A 'Footprint Family' Analysis of Israel's Beef Supply System [J]. Ecological Indicators, 2016, 69: 882-891.
- [16] HAN B L, OUYANG Z Y, LIU H X, et al. Courtyard Integrated Ecological System: an Ecological Engineering Practice in China and Its Economic-Environmental Benefit [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 1363-1370.
- [17] VINCENT C, HEINRICH H. Guidance on Typology, Reference Conditions and Classification Systems for Transitional and Coastal Waters[R]. Copenhagen: European Commission, 2002.
- [18] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 晋西黄土高原水资源植被承载力分析及对策建议 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 923-929.
- [19] 刘童, 杨晓华, 薛淇芮, 等. 系统动力学模型在吉林省水资源承载力的仿真应用 [J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 106-110.
- [20] 刘志明, 周真中, 王永强, 等. 基于灰色预测模型的区域水资源承载力预测分析 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 34-39.
- [21] REES W E. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [22] REES W, WACKERNAGEL M. Urban Ecological Footprints: Why Cities Cannot be Sustainable-And Why They are a Key to Sustainability [J]. Environmental Impact Assessment Review, 1996, 16(4-6): 223-248.
- [23] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National Natural Capital Accounting with the Ecological Footprint Concept [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [24] 刘东, 封志明, 杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 614-624.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力 [J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 689-699.
- [28] 张振龙, 孙慧, 苏洋. 新疆干旱区水资源生态足迹与承载力的动态特征与预测 [J]. 环境科学研究, 2017, 30(12): 1880-1888.
- [29] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 等. 城市水生态足迹变化分析与模拟 [J]. 资源科学, 2006, 28(5): 152-156.
- [30] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型 [J]. 生态经济, 2000, 16(10): 8-10.
- [31] 韩红蕾. 可持续绿色经济发展的影响因素和转化路径 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 74-79.
- [32] 陈建, 李云伍, 李伟清, 等. 中国西南地区农业水资源利用现状及对策 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 291-296.
- [33] 刘雁慧, 李阳兵, 梁鑫源, 等. 中国水资源承载力评价及变化研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1080-1091.

责任编辑 周仁惠