

中国水资源承载力时空变化与趋势预警

李雨欣 薛东前 宋永永¹

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

【摘要】: 水资源是制约社会经济发展的重要因素, 全面客观评价水资源承载状况, 对促进水资源利用与人口、经济、社会、发展相协调具有重要的理论和现实意义。以中国 31 个省(自治区、直辖市)为研究单元, 基于生态足迹模型测算 2003~2018 年中国省域水资源生态平衡供需情况, 并利用 ARIMA 模型预测其未来变化趋势。结果表明: (1) 2003~2018 年中国人均水资源承载力年际波动较大, 而人均水资源生态足迹呈现先增后降的小幅波动趋势, 人均水资源供需总体盈余, 但在降水量较少的年份逼近赤字边缘。(2) 中国水资源承载状况保持南方地区水资源供需有余, 北方地区水资源供需赤字的宏观格局, 人均水资源以有余区和超载区为主, 地区间水资源生态盈亏差异较大。(3) 中国的农业用水在 4 类账户中占比最高, 研究期内人均农业和工业用水足迹由增转降, 人均生活和生态用水足迹逐年递增; 除北京外, 其余省份的主要用水账户为农业和工业。(4) 中国人均水资源生态盈亏呈现出“整体平稳, 局部变化”的地域格局。15 年, 20 个省(自治区、直辖市)水资源生态超载加速。(5) 人均水资源生态盈亏未来将在 30° N~40° N 部分地区呈现恶化, 但在多数地区逐渐改善。其中东南和西北地区水资源生态环境改善潜力较大, 青藏高原将呈现恶化趋势, 晋、陕、豫、鲁、苏、辽地区可能形成重度预警区。

【关键词】: 水资源承载力 生态足迹 时空格局 ARIMA 模型

【中图分类号】: TV213.4 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)07-1574-11

水资源既是基础性的自然资源, 又是生态环境的控制性因素, 它是人类社会持续发展的物质基础和支持条件之一^[1]。中国疆域广阔, 大部分地区受季风气候影响, 水资源总量较为丰富, 但人均占有量仅为世界人均占有量的 25%, 被联合国认定为“水资源紧缺型”国家^[2]。特别是随着工业化和城镇化的快速推进, 生产和生活用水量显著增加, 水资源已成为制约中国社会经济可持续发展的限制性因素。水资源承载力(Water Resources Carrying Capacity, WRCC)作为刻画水资源对地区人口、经济和生态支撑程度的重要指标, 科学评估区域水资源承载力与水资源生态足迹, 监测和预判区域水资源可持续利用状态, 对于保障国家水资源安全, 推动资源环境与经济社会耦合协调发展具有重要的战略和现实意义。

国内外学者结合区域资源环境实际, 在水资源承载力研究方面取得了丰富的成果。在水资源承载力定义方面, 国外学者以“可持续利用水量”^[3]和“水资源供需比”^[4]来表征类似含义; 国内学者对水资源承载力的定义可大致归纳为水资源开发容量论^[5]和水资源支撑规模论^[6,7]等。在水资源承载力的评估方面, 学者们通过指标体系法^[8,9]、生态足迹法^[10-12]、BP 神经网络法^[13]和综合评价法^[14]等对水资源承载力的时空格局及其与社会经济发展的匹配程度进行分析。在水资源承载力预警方面, 国外学者对水资源承载力预警系统的研究多见于水资源可持续利用^[15,16]等相关课题, 国内学者则从定义、指标和方法等方面开展水资源预警研究。在预警定义上, 金菊良等^[17]认为水资源承载力预警是指在区域水环境承载力现状进行客观评价的基础上, 选定相关警情和警兆作为预警指标划定警戒阈值, 同时对未来某段时间水资源承载系统状况进行预测; 樊杰等^[18]认为资源环境承载能力监测预警是对承载力各构成要素及其组合的变化规律的预判。在预警指标方面, 学者们结合区域资源环境实际提出了 DPSIR 体系^[19]、

¹作者简介: 李雨欣(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市与区域发展. E-mail: liyx@snnu.edu.cn

薛东前 E-mail: xuedq@snnu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100101)

PSR 体系^[20]、“量-质-域-流”体系^[21]等。在预警方法上, ARIMA 模型^[22]、GM(1, 1)模型^[23]和系统动力学模型^[24]等动态预测方法运用较多。总体来看, 国内外学者在水资源承载力理论与方法研究中取得了丰富成果, 对水资源综合管理产生了较为广泛的影响。但现有研究主要关注区域和流域尺度水资源承载力现状评估, 对全国范围内的水资源承载力分析较少; 研究内容多以水资源承载力警情现状的静态分析为主, 对警情的时空演变和未来趋势预测探讨不足; 水资源承载力预警系统尚未形成统一的理论方法体系, 宏观尺度水资源承载力时空变化与趋势预警有待深入研究。

基于此, 本文选取中国 31 个省(区、市)作为研究单元, 运用生态足迹模型测算 2003~2018 年中国人均水资源承载力和人均水资源生态足迹, 从水资源生态盈亏角度评估各地区水资源的供需平衡状况, 并运用 ARIMA 模型预测未来人均水资源生态盈亏变化趋势, 评价各地区水资源利用的可持续性, 以期为中国水资源综合管理和优化配置提供理论参考和决策依据。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 水资源承载力模型

生态足迹法是基于区域水资源可持续利用, 将水资源量按照一定方法折算为土地面积, 从而提高各区域之间分析比较的准确性^[10]。这一模型由 William 于 1992 年首次提出^[26], 此后多位学者对该模型进行了完善^[27, 28]。运用生态足迹法测算区域水资源承载力, 主要是基于水资源供给的理论承载力, 表现为某一区域在某一发展阶段, 水资源最大供给量对该区域资源、环境和社会可持续发展的能力, 即水资源对生态系统和经济系统良性发展的支撑能力^[29]。测算模型如下:

$$EC_w = N \cdot ec_w = 0.4 \times \psi \times \gamma_w \times Q / p_w \quad (1)$$

式中: EC_w 为区域水资源承载力 (hm^2); N 为区域总人口数; ec_w 为人均水资源承载力 ($hm^2/人$); ψ 为区域水资源的产量因子, 是地区内水资源平均生产能力与全球水资源平均生产能力之比, 其中, 地区内水资源平均生产能力为区域单位面积产水模数, 为区域水资源总量与区域土地面积之比; 参考相关研究成果^[25], 全球水资源平均生产能力被定义为全球多年平均产水模数, 为 $3140m^3 \cdot hm^{-2}$; γ_w 为水资源的全球均衡因子, 本文采用黄林楠(2008)等^[25]学者基于世界自然基金会(WWF)2000 年核算的均衡因子计算出的水资源全球均衡因子 5.19; Q 为水资源总量 (m^3); p_w 为水资源全球平均生产能力 ($m^3 \cdot hm^{-2}$)。出于可持续发展的考虑, 一个国家或地区至少有 60% 的水资源需要用于维持生态系统良性发展, 因此在水资源承载力的测算中, 要求乘以系数 0.4。下同。

1.1.2 水资源生态足迹模型

水资源生态足迹是指维持人类生产生活和自然环境自身进化的水资源消耗量所需的面积^[28]。它主要是基于水资源需求的实际承载力, 将地区维持人口生活和生产所消耗的用水量转化为相应账户的人均水资源用地面积, 通过均衡化计算水资源账户的生态足迹。根据用水特性和内涵, 将耗损的水资源量分为农业用水(包括农田灌溉与林牧渔畜用水)、工业用水(指工矿企业的生产用水)、生活用水(包括城乡居民用水和公共用水)以及生态环境用水(包括部分河湖、湿地人工补水和城市环境用水)4 大类账户进行计算^[12]。计算模型为:

$$EF_w = N \times ef_w = N \times r_w \times (W / P_w) \quad (2)$$

式中: EF_w 为水资源生态足迹 (hm^2); N 为区域总人口数; ef_w 为人均水资源生态足迹 ($hm^2/人$); γ_w 为水资源的全球均衡因子; W

为人均耗水量 (m^3); P_w 为水资源全球平均生产能力 ($m^3 \cdot hm^{-2}$)。

1.1.3 水资源生态盈余(赤字)模型

将某一国家或地区所拥有的人均水资源承载力与人均水资源生态足迹相比较,就会产生人均水资源生态盈余(赤字),该指标可用来判断区域水资源消耗是否在其可承载和可持续利用范围之内^[10]。计算公式为:

$$\text{水资源生态盈余(赤字)} = ec_w - ef_w \quad (3)$$

式中:若 $ec_w > ef_w$ 时,为水资源生态盈余,表明该地区水资源需求量小于供给量,水资源可持续利用状况良好;当 $ec_w = ef_w$ 时,为水资源生态平衡,表明该地区水资源供需平衡,水资源安全处于临界状态;当 $ec_w < ef_w$ 时,为水资源生态赤字,表明该地区水资源紧缺,生态和经济发展将受到制约。

1.1.4 ARIMA 预测模型

ARIMA(Autoregressive Integrated Moving Average)模型是一套关于时间序列的分析预测方法,又被称为 Box-Jenkins 建模方法,简称 B-J 方法^[29]。ARIMA 模型克服了传统预测模型的不足,在充分考虑时间序列非平稳性的基础上,依据序列自身的演变规律建立推导机制,具有适应度高、灵活性强的优势,因此模型的预测精度较好。其数学表达式为^[30]:

$$Y_t = c + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \dots + \alpha_p Y_{t-p} + \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \beta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t-q} \quad (4)$$

式中: c 为常数; α_i 和 β_j 为回归系数; ε_t 为白噪声序列。

根据 ARIMA 模型建模流程,本文以计算所得的 2003~2018 年中国人均水资源承载力和人均水资源生态足迹作为样本,检验序列平稳性,若原序列为非平稳序列,则通过 d 次差分转化为平稳序列;根据自相关和偏相关函数图的拖尾和截尾特征,初步确定 p 和 q 的取值范围;运用 R^2 、MAPE、AIC 等准则逐步筛选出最优 p 、 q 值;在对模型的残差序列进行检验后,将其用于预测 2021~2035 年中国人均水资源承载力和人均水资源生态足迹,基于两者的预测值,进一步估算人均水资源生态盈亏的发展态势,从而预判未来中国水资源利用的可持续性。

1.2 数据来源及处理

本文中国行政区划矢量数据来源于国家测绘地理信息局标准地图服务网站 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>);年末常住人口数、水资源总量、农业用水、工业用水、生活用水和生态环境用水等数据来源于 2004~2019 年《中国统计年鉴》、中华人民共和国水利部公布的《中国水资源公报》和国民经济和社会发展统计公报。研究区域为中国 31 个省(自治区、直辖市),考虑到数据的完整性和可获得性,未包含港澳台地区。

2 结果与分析

2.1 中国水资源承载状况时空格局

2.1.1 水资源承载状况演化特征

通过公式(1)~(3)计算中国人均水资源承载力和人均水资源生态足迹,得到2003~2018年中国人均水资源生态盈亏状况(图1)。2003~2018年,中国人均水资源承载力年际波动较大,最小值出现在2011年,为 $0.880\text{hm}^2/\text{人}$;最大值出现在2016年,达到 $1.672\text{hm}^2/\text{人}$,增长89.90%,其大小变化趋势与历年降水量呈现极显著的正相关^[31],并围绕均值 $1.227\text{hm}^2/\text{人}$ 上下波动。人均水资源生态足迹维持在 $0.681\sim 0.751\text{hm}^2/\text{人}$ 之间,呈现先增长后下降的小幅波动趋势,最低值出现在2003年,最高值出现在2013年。这主要是由于2012年国务院出台《关于实行最严格水资源管理制度的意见》,进一步明确了水资源管理的“三条红线”,因此自2013年开始中国人均水资源生态足迹逐渐减少,水环境压力有所缓解。人均水资源生态盈亏变化趋势与人均水资源承载力变化趋势相近,最低值出现在2011年,为 $0.131\text{hm}^2/\text{人}$,最高值出现在2016年,为 $0.950\text{hm}^2/\text{人}$ 。总之,15年间中国人均水资源供需盈余,仍有一定的生态空间可供利用,但在降水量较少的年份逼近赤字边缘。

从各用水账户人均生态足迹看(图2),2003~2018年中国农业用水量最大,年均占比62.78%,其中,2003~2013年人均农业用水足迹呈现波动上升态势,而2013~2018年随着中国生态退耕、农业结构调整以及城乡建设挤占耕地,人均农业用水足迹逐年降低,年均下降34.68%;工业用水和生活用水年均占比分别为26.29%和35.06%,其中人均工业用水足迹维持在 $0.149\sim 0.179\text{hm}^2/\text{人}$ 之间,随着工业结构调整和节水效率提高,2011年为工业用水足迹由增转降的转折点;生活用水量受居民生活水平提升和生活习惯改变的影响而不断增加,导致人均生活用水足迹平稳上升,并于2018年达到最高值 $0.102\text{hm}^2/\text{人}$;生态环境用水量年均仅占4.01%,但随着国家对生态环境保护的重视,生态用水量呈逐年递增态势,15年间增长率为134.03%。

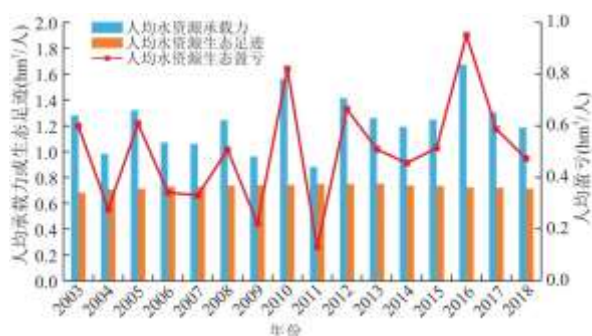


图1 2003~2018年中国人均水资源承载力、生态足迹和生态盈亏

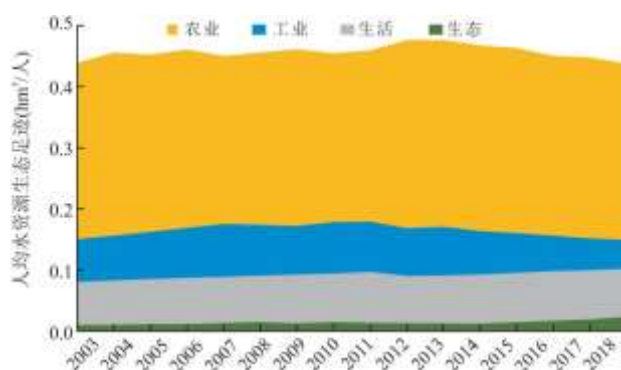


图2 2003~2018年中国各用水账户人均生态足迹

从人均水资源承载力和人均水资源生态足迹均值占比看(图3),2003~2018年,中国人均水资源承载力高值区主要位于南方地区,低值区主要分布于北方地区,与中国省际年降水量的空间分布格局具有一致性。其中人均水资源承载力最高的省份是西

藏, 为 $114.727\text{hm}^2/\text{人}$, 受夏季高山冰雪融水的作用, 水资源十分丰富, 加之人口稀少, 人均水资源承载力最大。海南、江西、福建等西南和东南地区受气候和地形的影响, 人均水资源承载力均较高。而河北、天津、宁夏等华北和西北地区年降水量较少, 人均水资源承载力较低, 其中宁夏深居西北内陆, 水资源严重短缺, 呈现资源型、工程型和水质型缺水并存的现象, 人均水资源承载力仅为 $0.006\text{hm}^2/\text{人}$ 。从人均水资源生态足迹看, 高值区主要位于新疆、宁夏、西藏等西部地区, 其中西藏地区由于人口稀疏, 人均量相对较大。而新疆和宁夏地区农业生产所占比重大, 耗水量多, 同时气候干旱少雨, 农业灌溉技术相对粗放, 人均水资源足迹分别达到 $4.041\text{hm}^2/\text{人}$ 和 $1.842\text{hm}^2/\text{人}$ 。北京、天津、山西等地区总水资源生态足迹大, 但人口分布众多且密集, 导致人均水足迹较小, 均低于 $0.340\text{hm}^2/\text{人}$ 。

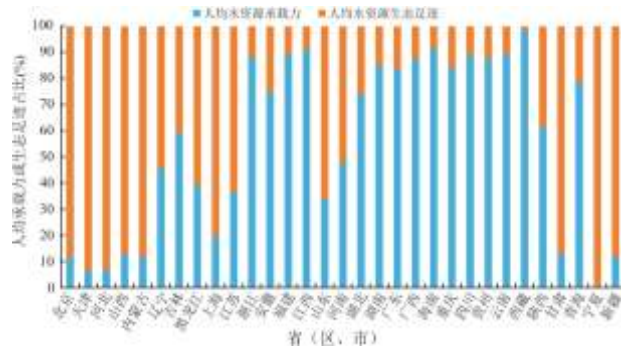


图3 2003~2018年各省份人均水资源承载力、生态足迹均值比例

从各用水账户人均生态足迹均值占比看(图4), 2003~2018年中国大部分省(区、市)水资源生态足迹的主要组成账户为农业和工业, 其中 28 个省(区、市)的首要组成账户为农业。新疆、宁夏农作物耗水量大, 农业用水足迹占比高, 分别达到 91.37% 和 89.43%; 上海、重庆经济发展水平高, 制造业集聚效应显著, 区域耗水量极大, 工业用水足迹占总用水足迹比重高, 分别为 64.46% 和 44.52%; 北京人口规模大且密度高, 生活用水足迹为首要用水账户, 占比达 43.01%; 生态用水足迹在北京、天津和内蒙古占比最高, 分别为 15.73%、7.96% 和 6.12%, 其中内蒙古人均生态水足迹最大, 2018 年达到 $0.160\text{hm}^2/\text{人}$ 。

2.1.2 水资源承载状况空间格局

根据 2003~2018 年中国 31 个省(区、市)人均水资源生态盈亏状况, 参考相关研究成果^[10], 采用 ArcGIS10.2 软件 Jenks 自然断点法, 将中国人均水资源生态盈亏划分为严重超载区(≤ -1.58)、超载区($-1.57 \sim 0.00$)、平衡临界区($0.01 \sim 1.30$)、有余区($1.31 \sim 15.56$)、富足有余区($15.57 \leq$) 5 种类型(图 5)。

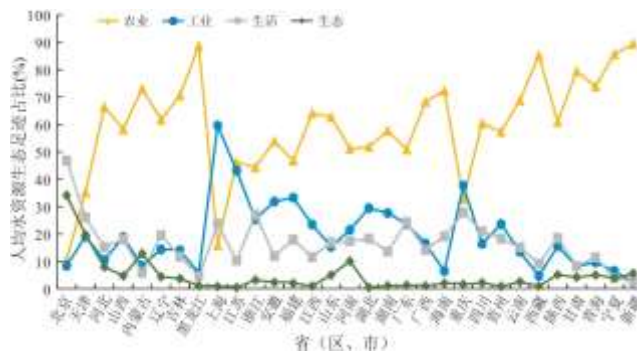


图4 2003~2018年各省份用水账户人均生态足迹均值比例

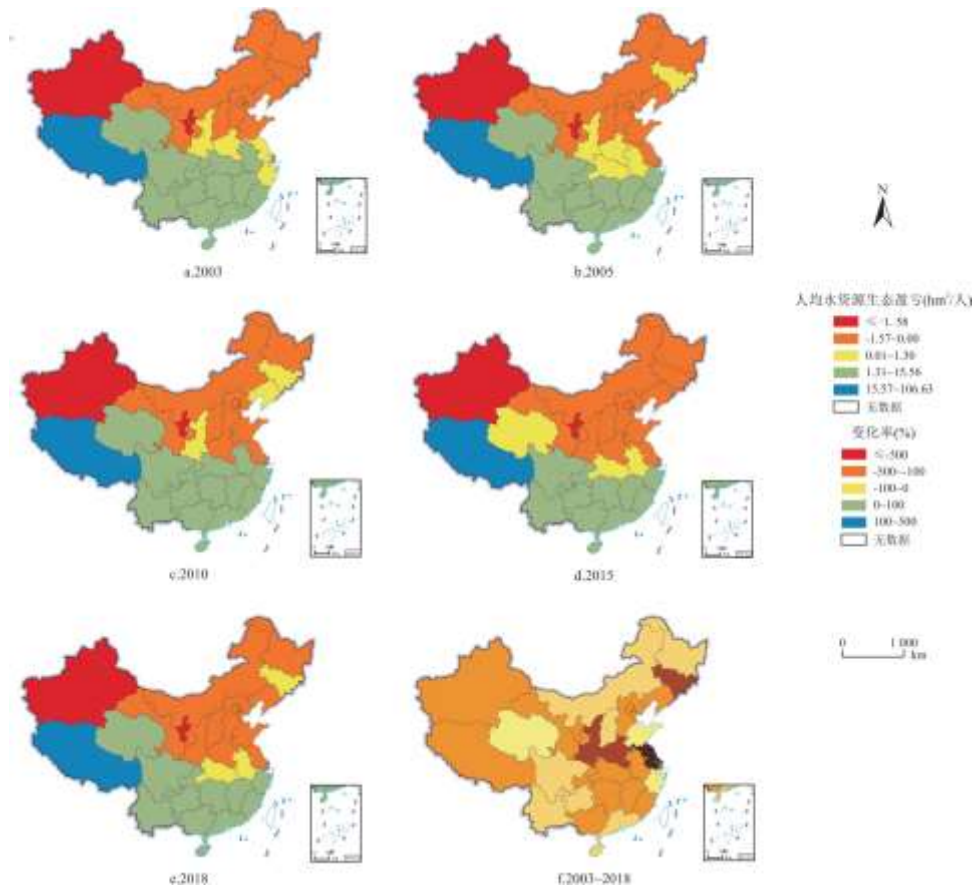


图 5 2003~2018 年中国人均水资源生态盈亏省域分异格局

注：本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号为 GS(2019)1825 号标准地图制作，底图无修改，下同。

由图 5 可以看出，2003~2018 年中国区域人均水资源生态盈亏空间差异性和集聚性显著，呈现南多北少的地域分布格局。从各省(区、市)15 年间人均水资源生态盈亏均值来看，处于生态盈余区的省份约占全国总省份个数的 54.84%；处于生态赤字区的省份约占全国总省份个数的 45.16%。总体上中国区域人均水资源以有余区和超载区为主，地区间水资源生态盈亏差异较大。

2003 年(图 5a)，西藏为人均水资源富足有余区，人均水资源盈余高达 142.16hm²/人，水资源量最为丰富，开发利用潜力巨大。水资源有余区主要位于华南、华中和西南地区，这些地区水资源储量较丰富，处于可持续发展的状态，可以在维持生态平衡的基础上充分发挥当地的水资源优势，提高水资源综合开发利用效率。水资源平衡临界区有陕西、河南、江苏和浙江，这些地区水资源供需相对盈余，水资源的开发利用暂时不会对生态环境产生负面效应，但随着社会经济的发展和生产生活规模的扩大，水资源极有可能成为未来区域协调发展的限制性因素。水资源超载区主要位于西北、华北和东北地区，区域人口密度大，水资源相对匮乏，尤其是黑龙江作为我国重要的商品粮基地，农业需水量大，人均水资源生态足迹达到 1.065hm²/人，超过全国均值 0.838hm²/人，从而造成水资源供需赤字；水资源严重超载区包括新疆和宁夏，该类地区属于资源型缺水地区，农业生产用水占比大，且灌溉方式传统粗放，导致水资源严重超载，区域用水环境和生态安全受到较大威胁。

2005 年(图 5b)，随着中国城镇化的快速推进，人均水资源生态足迹进入“高速增长”期，中国 18 个省(区、市)水资源生态盈余量出现不同程度的下降，其中，江苏由水资源平衡临界区下降为水资源超载区，安徽由水资源有余区下降为水资源平衡临界区。2005~2015 年(图 5c~d)，由于国家基本农田保护的加强和耕地保护红线的划定，抑制了耕地面积减少趋势，同时随着治

沟造地等工程的实施和农业灌溉条件的改善, 区域耕地面积逐步扩大, 各省(区、市)农业用水足迹明显增长, 并且随着国家生态文明战略的提出, 多地实施了重点水域的生态保护与修复工程, 使得各地区生态用水足迹显著增加, 在空间上表现为人均水资源生态足迹高值区逐渐向西部和南部拓展, 其中青海、吉林、河南和陕西人均水资源生态盈亏的规模等级出现不同程度的下降。2015~2018年(图 5e), 中国人均水资源生态盈亏总体格局比较稳定, 水资源有余区和超载区仍占据主导地位, 其中人均水资源生态盈余增长的省份占比 58.06%, 人均水资源生态盈余降低的省份占比 41.94%。

总体来看, 2003~2018年中国人均水资源生态盈亏呈现出“整体平稳, 局部变化”的地域格局。15年间, 中国 20个省(区、市)人均水资源生态盈亏下降, 水资源供需矛盾逐渐恶化(图 5g)。江苏、陕西、河南和吉林工农业耗水量大, 使得人均水资源生态超载恶化速度较快, 均由水资源平衡临界区降为水资源超载区, 其中江苏人均水资源生态盈亏下降幅度超过 500%, 水生态安全危机十分严峻; 东北、华北、西南和沿海地区的部分省份人均水资源生态盈亏有所改善, 其中浙江、山东和青海随着产业结构的优化升级, 水资源生态足迹逐渐减小, 社会经济发展对水资源的压力显著降低。

2.2 中国水资源承载力趋势预警

本文在 Eviews10.0 软件支持下, 利用 ARIMA 模型对 2021~2035 年中国及其 31 个省(市、区)的人均水资源承载力和人均水资源生态足迹进行拟合和预测, 进而得到人均水资源生态盈亏预测值(表 1)。

经过反复验证和计算, ARIMA(3, 1, 0) 和 ARIMA(2, 1, 2) 分别为中国人均水资源承载力和人均水资源生态足迹的最优模型。通过预测模型发现中国人均水资源承载力和生态足迹均有所增长, 但人均水资源承载力数值及增速始终大于人均水资源生态足迹, 因此水资源整体处于生态盈余且盈余量逐年增长, 处于可持续发展状态。同理, 模拟并预测 31 个省(市、区)人均水资源承载力及生态足迹, 从而进一步估计人均水资源生态盈亏态势。受限于篇幅, 本文仅列出各省份人均水资源生态盈亏的预测值。

将表 1 预测值转化为 2021~2035 年人均水资源生态盈亏时空变化趋势图(图 6), 分析中国省域水资源利用的可持续性。其中, 人均水资源生态盈亏值提高的区域为改善区, 人均水资源生态盈亏值下降的区域为恶化区。

由图 6 可知, 2021~2035 年中国人均水资源生态盈亏将在 30° N~40° N 部分地区呈现恶化, 但在多数地区逐渐改善。其中, 盈余改善区主要包括川、渝、鄂、皖、浙、闽、赣、湘、黔、滇、粤、桂、琼和青等地区。南方地区特别是东南沿海地区属于丰水区, 水资源承载力较大, 在高效经济和再生水政策的引导下, 通过推广产业节水技术和水体污染治理, 将显著提升水资源生态利用效率。

表 1 2021~2035 年中国省域人均水资源生态盈亏预测

地区	R ²		MAPE (%)		预测值 (hm ² /人)			
	ec _w	ef _w	ec _w	ef _w	2021 年	2025 年	2030 年	2035 年
中国	0.731	0.777	2.515	0.752	0.6747	0.7230	0.7834	0.8439
北京	0.721	0.986	4.505	0.955	-0.2181	-0.1846	-0.1428	-0.1010
天津	0.749	0.884	1.791	2.916	-0.2127	-0.1870	-0.1548	-0.1227
河北	0.812	0.971	3.711	0.963	-0.3279	-0.2987	-0.2728	-0.2308
山西	0.693	0.816	1.840	2.975	-0.2927	-0.3082	-0.3276	-0.3470

内蒙古	0.710	0.671	3.580	1.062	-1.1040	-1.1010	-1.0972	-1.0935
辽宁	0.781	0.614	2.334	1.709	-0.3134	-0.3171	-0.3217	-0.3264
吉林	0.675	0.875	2.819	3.198	-0.0267	0.4826	0.0069	0.0958
黑龙江	0.569	0.931	3.403	2.281	-0.4704	-0.4595	-0.4460	-0.4324
上海	0.728	0.944	4.038	3.195	-0.2164	-0.0285	0.2065	0.4414
江苏	0.544	0.831	4.471	2.592	-0.6875	-0.7019	-0.7199	-0.7379
浙江	0.817	0.979	2.457	1.193	5.1514	5.9013	6.8386	7.7760
安徽	0.516	0.820	3.371	0.812	1.2617	1.3687	1.5025	1.6362
福建	0.693	0.721	1.363	1.735	8.1170	8.9889	10.0788	11.1687
江西	0.628	0.655	2.381	3.430	9.2474	10.2371	11.4743	12.7114
山东	0.666	0.835	2.265	1.259	-0.2764	-0.3128	-0.3582	-0.4036
河南	0.560	0.657	1.772	1.790	-0.3232	-0.4135	-0.5265	-0.6395
湖北	0.586	0.773	4.268	2.806	1.5583	1.6510	1.7669	1.8828
湖南	0.799	0.722	3.807	1.321	4.1479	4.3214	4.5383	4.7553
广东	0.728	0.840	4.153	2.940	3.9878	4.2957	4.6807	5.0657
广西	0.695	0.665	2.078	2.046	7.1406	7.9969	11.1618	10.1377
海南	0.561	0.680	3.570	2.293	12.0601	13.8382	16.0608	18.2833
重庆	0.533	0.657	4.508	1.491	1.9136	2.8177	2.0685	2.8222
四川	0.670	0.716	2.487	3.952	3.0577	3.1195	3.1968	3.2741
贵州	0.623	0.708	3.523	3.246	3.5175	3.8183	4.1943	4.5704
云南	0.569	0.692	3.180	1.120	3.9265	3.8183	4.0881	4.1779
西藏	0.804	0.675	3.991	2.534	101.1001	105.9044	84.5008	84.5676
陕西	0.667	0.639	2.092	2.507	-0.0710	-0.1414	-0.2293	-0.3172
甘肃	0.538	0.695	2.649	1.401	-0.6047	-0.5845	-0.5593	-0.5340
青海	0.508	0.731	3.879	2.599	2.3156	2.5633	2.8730	3.1826
宁夏	0.626	0.684	2.735	3.681	-1.4860	-1.3588	-1.1992	-1.0395
新疆	0.527	0.807	1.362	2.246	-3.3786	-3.2953	-3.1913	-3.0872

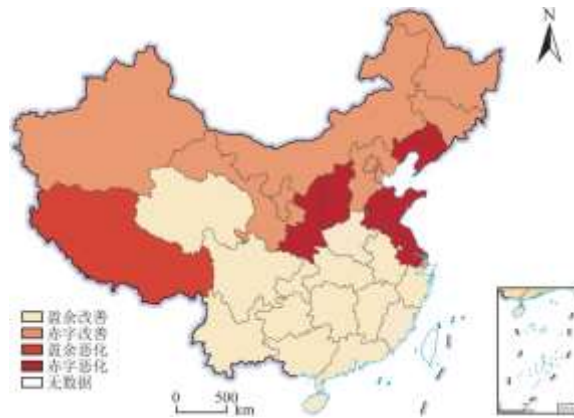


图6 2021~2035年中国人均水资源生态盈亏省域变化格局

赤字改善区主要位于京、津、冀、沪、黑、吉、新、甘、宁和内蒙古等地区。长期以来，北方地区特别是西北和东北地区水资源总量小，国家高度重视该地区的水资源管理和配置工作，坚持开展以农田水利为重点的水土保持工程建设，通过优化农业节水技术和发展绿色高效农业，区域节水和用水能力将逐渐好转^[9]；京津冀和上海地区随着政府、企业和居民生态保护意识的增强，水资源节约型社会的生产和生活消费模式将逐渐建立，通过采用生物高新技术，引进清洁生产工艺，不断提高水资源的循环利用，将逐渐恢复水资源生态系统功能^[21]。

盈余恶化区主要分布于青藏高原地区。青藏高原作为“亚洲水塔”，受高山冰雪融水的影响，水资源极为丰沛，且人口密度小，水资源供给远超当地所需，但随着20世纪50年代以来青藏高原气温快速升高，冰川退缩对青藏高原的水资源产生消极影响，水资源承载力持续降低^[32]。

晋、陕、豫、鲁、苏、辽地区是人均水资源生态盈亏的赤字恶化区，这些地区的生态赤字是水资源系统逐渐衰弱的警示，将严重威胁区域用水安全和区域生态平衡。山西、陕西、河南和山东人口稠密，水土资源不匹配，随着经济社会发展，水资源的过度开发将造成地表水严重污染和地下水位持续下降，人类活动强度与水资源承载力将出现严重失衡；辽宁作为中国重要的老工业基地和粮食生产区，为了满足日益增长的人口需求，水资源生态足迹逐渐增多，但由于水资源天然补给量少，导致水资源开发利用程度接近生态极限；江苏作为中国城镇化快速发展区，社会经济发展对水资源的强烈需求必将造成生态压力不断增加^[33]，区域水资源供给与需求的矛盾将长期存在。

资源环境问题的本质，是经济结构、生产方式和发展模式的问题^[34]。因此，中国在未来的水资源管理和调控中，在宏观层面上，应加强水资源的区域调度和分配，严守“三条红线”，落实“四项制度”，确保水资源区域配置相对均衡；在微观层面上，既要优化产业结构，改良作物品种，建立资源节约型的社会生产和消费模式，又要推进清洁生产，源头减污，提高污水处理效率，同时，要加快建立区域水资源预警体系，动态监测各水资源账户，从而实现水资源系统与社会经济系统的耦合协调发展。

3 结论与展望

本文以中国31个省(区、市)为研究区域，采用水资源承载力、生态足迹和生态盈余(赤字)模型，解析了2003~2018年中国水资源承载状况的时空变化特征，运用ARIMA模型预测了中国2021~2035年人均水资源生态盈亏状况。主要得出以下结论：

(1) 2003~2018年中国人均水资源承载力年际波动较大，人均水资源生态足迹呈现先增后降的变化趋势，人均水资源供需总体盈余，仍有一定的生态空间可供利用，但在降水量较少的年份逼近赤字边缘。

(2) 中国水资源生态承载状况呈现显著的地域差异性和空间集聚性，在地理空间上形成南方地区水资源供需有余，北方地区水资源供需赤字的宏观格局。全国人均水资源以有余区和超载区为主，地区间水资源生态盈亏差异较大。

(3) 在 4 大类用水账户中，农业用水量占比最高，生态用水量占比最低。15 年间，人均农业和工业用水足迹由增转降，而人均生活和生态用水足迹呈逐年递增态势。北京地区水资源生态足迹的首要账户为生活用水，其余省份的主要账户为农业和工业用水。

(4) 中国人均水资源生态盈亏呈现出“整体平稳，局部变化”的地域格局。15 年间，20 个省(区、市)人均水资源生态盈亏下降，水资源供需矛盾日益恶化，苏、陕、豫、吉人均水资源生态超载恶化速度较快，青、鲁、浙水资源生态足迹逐渐减小，水资源生态压力降低。

(5) 2021~2035 年中国人均水资源生态盈亏将在 $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 部分地区呈现恶化，但在多数地区逐渐改善。东南和西北地区水资源持续改善潜力较大；青藏高原地区水资源供给有余，但未来可能呈现恶化趋势；晋、陕、豫、鲁、苏、辽地区的水资源供需矛盾日益尖锐，未来可能呈持续恶化态势，形成水资源生态环境的重度预警区。

本文从人均水资源角度解析了中国省域水资源的理论承载力和实际承载力，并对用水账户的水资源保障情况进行了现状评价和趋势预警，研究结果既拓展和深化了水资源承载力理论，也为中国宏观层面水资源的协调管理和优化配置提供了科学依据。然而，本文提出的水资源账户划分及水资源承载力计算方法的科学性和适用性有待进一步检验和完善，同时，虽然本文构建的 ARIMA 模型对中国人均水资源承载力和生态足迹具有较好的拟合效果，但在微观尺度长时间段的预测中仍存在较大的不确定性。因此，微观尺度水资源承载力影响因素、水资源利用调控机制和预警方法研究是今后需要探索的重要方向。

参考文献:

- [1] 曹升乐, 于翠松, 宋承新, 等. 水资源预警理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020:2-3.
- [2] 彭珂珊. 21 世纪中国水资源危机[J]. 水利水电科技进展, 2000(5):13-16, 68-69.
- [3] FALKENMARK M, LUNDQVIST J. Towards water security: Political determination and human adaptation crucial[J]. Natural Resources Forum, 1998, 21(1):37-51.
- [4] MILANO M, RUELLAND D, DEZETTER A, et al. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin[J]. Journal of Hydrology, 2013, 500(11):114-126 .
- [5] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993(3):229-237.
- [6] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002(3):262-269.
- [7] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 2010, 65(1):82-90.
- [8] 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.
- [9] 热孜娅·阿曼, 方创琳, 赵瑞东. 新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7):1576-1585.

-
- [10]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.
- [11]陆砚池,方世明.中国省域水资源生态足迹格局均衡性研究[J].水土保持研究,2018,25(4):289-297.
- [12]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.
- [13]杨琳琳,李波,付奇.基于BP神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(2):216-222.
- [14]郭倩,汪嘉杨,张碧.基于DPSIRM框架的区域水资源承载力综合评价[J].自然资源学报,2017,32(3):484-493.
- [15]ZUO Q. Review of research methods of water resources carrying capacity[J]. Advances in Science & Technology of Water Resources, 2017, 37(3):1-6, 54.
- [16]REN C, GUO P, LI M, et al. An innovative method for water resources carrying capacity research—Metabolic theory of regional water resources[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 167:139-146.
- [17]金菊良,陈梦璐,郦建强,等.水资源承载力预警研究进展[J].水科学进展,2018,29(4):583-596.
- [18]樊杰,周侃,王亚飞.全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J].地理科学进展,2017,36(3):266-276.
- [19]周丰,郭怀成,刘永,等.湿润区湖泊流域水资源可持续发展评价方法[J].自然资源学报,2007(2):290-301.
- [20]朱玉林,李明杰,顾荣华.基于压力-状态-响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(12):2057-2064.
- [21]余灏哲,李丽娟,李九一.基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J].资源科学,2020,42(2):358-371.
- [22]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.
- [23]戴靓,陈东湘,吴绍华,等.水资源约束下江苏省城镇开发安全预警[J].自然资源学报,2012,27(12):2039-2047.
- [24]崔丹,陈馨,曾维华.水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例[J].中国环境科学,2018,38(3):1174-1184.
- [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]WILLIAM E R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity:What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2):121-130.
- [27]WACKENAGEL M, WILLIAM E R. Our ecological footprint:Reducing human impact on the earth. Gabriola Island[M]. B. C. : New Society Publishers, 1996, 2-17.

-
- [28]王刚毅, 刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价——以中原城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1):80-90.
- [29]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.
- [30]周侃, 刘宝印, 樊杰. 汶川 Ms 8.0 地震极重灾区的经济韧性测度及恢复效率[J]. 地理学报, 2019, 74(10):2078-2091.
- [31]任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 中国大陆降水时空变异规律——II. 现代变化趋势[J]. 水科学进展, 2015, 26(4):451-465.
- [32]赵忠瑞, 解传奇, 丹曲, 等. 西藏水资源生态足迹评价与动态预测[J]. 浙江大学学报(理学版), 2015, 42(5):559-566.
- [33]马海良, 施陈玲, 王蕾. 城镇化进程中的江苏水资源承载力研究——基于组合赋权和升半 Γ 型分布函数[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11):1697-1703.
- [34]党丽娟, 徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3):341-348.