

中国 31 省(市、自治区)水资源 承载力评价及预测研究

刘欢¹, 宋孝玉¹, 李磊¹, 晁智龙²

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省水文水资源勘测局, 陕西 西安 710068)

摘要:为评价我国省级水资源承载状况,基于水资源-社会-经济-生态环境 4 个子系统构建指标体系,采用层次分析法和熵权法组合赋权的 TOPSIS 模型对中国 31 省(市、自治区)2010—2019 年的水资源承载力进行综合评价,运用 M-K 检验法分析了其时空变化特征,并对评价结果进行障碍因子诊断,在此基础上采用 BP 神经网络预测出各省(市、自治区)2020—2025 年的水资源承载力。结果表明:(1)中国 31 省(市、自治区)水资源承载力呈现波动提升趋势,整体处于临界承载状态;(2)我国水资源承载力具有显著的地区分异规律,西南、华南、东北地区承载力较好,华北和西北最弱;(3)研究期内,水资源承载力在西北和东北地区表现为恶化,华南、华北部分地区也出现恶化情形,而华东、华中和西南大部分地区均有所改善;(4)产水模数、农用化肥使用量、人均水资源量、供水模数、人均综合用水量、废水排放总量和水资源开发利用率是对我国水资源承载力影响作用最强的 7 个障碍因子,且影响强度依次递减;(5)水资源承载力未来将在全国多数地区逐渐改善,而山东、河南、辽宁可能形成重度恶化区。

关键词:水资源承载力;TOPSIS 模型;障碍因子;BP 神经网络;中国 31 省(市、自治区)

中图分类号:S271;TV213.4 **文献标志码:**A

Evaluation and prediction of water resources carrying capacity in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China

LIU Huan¹, SONG Xiaoyu¹, LI Lei¹, CHAO Zhilong²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Shaanxi Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract: To evaluate the carrying capacity of provincial water resources in China, an index system was established based on four subsystems of water resources-society-economy-ecological environment. The TOPSIS model weighted by the combination of AHP and entropy method was used to comprehensively evaluate water resources carrying capacity of 31 provinces, municipalities and autonomous regions in China from 2010 to 2019. The model's temporal and spatial variation characteristics were analyzed combining with the M-K trend method. The obstacle factor diagnosis was carried out on the evaluation results. On this basis, BP neural network was used to predict the water resources carrying capacity of each province (municipality, autonomous region) from 2020 to 2025. The results showed that: (1) The water resources carrying capacity in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China showed a fluctuating upward trend and the overall state was in a critical carrying state. (2) The water resources carrying capacity in the country had significant regional differentiation pattern, with better carrying capacity in Southwest, South China, and Northeast China, and the weakest in North China and Northwest China. (3) During the study period, the water resources carrying capacity deteriorated in Northwest and Northeast regions, and some areas in South China and North China also deteriorated, while most areas in East China, Central China

and Southwest China improved. (4) Water production modulus, consumption of agricultural chemical fertilizer, water resources per capita, water supply modulus, comprehensive water consumption per capita, total wastewater discharge, water resources development and utilization ratio were seven obstacle factors that had the strongest influence on water resources carrying capacity in China, and the influence intensity decreased in turn. (5) In the future, the water resources carrying capacity will be gradually improved in most parts of the country, Shandong, Henan and Liaoning may form severe deterioration areas.

Keywords: water resources carrying capacity; TOPSIS model; obstacle factors; BP neural network; 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China

水资源作为基础性自然资源与战略性经济资源,支撑着社会经济的协调发展^[1]。中国水资源时空分配不均^[2],很多城市及地区在水质、水量等方面问题突出,因此,水资源能否有效支撑人口和社会经济的快速增长,并与社会、经济、环境协调发展成为目前研究热点^[3]。水资源承载力是衡量水资源与社会经济以及生态环境之间协调性的重要指标,可反映地区水资源的支撑能力。因此探讨中国水资源承载力的时空演变规律,监测和预判未来水资源可持续利用状态,对于保障国家水资源安全,促进地区经济与社会可持续发展具有重要现实意义。

目前,国外学者对水资源承载力的研究大多将其纳入可持续发展理论范畴中^[4-5],国内学者结合区域资源环境实际,从理论体系^[6-7]、研究方法^[8-9]、实证分析^[10-11]等不同视角,围绕水资源对区域经济社会支撑能力进行了多维探讨。从研究方法上看,以系统动力学法^[12]、生态足迹法^[13]、主成分分析法^[14]居多,也有采用确定指标权重与模型相结合的方法,如 AHP-TOPSIS 模型^[15]。从研究范围来看,学者们主要以国内重要流域对区域内部及周边省市的生态和社会经济影响为切入点,构建适宜的方法模型来评估其水资源承载力水平,如左其亭等^[16]建立“水资源-生态环境-经济社会”评价指标体系,通过 TOPSIS 模型对黄河流域九省(区)的水资源承载力进行测算;田培等^[17]采用熵权 TOPSIS 模型定量评价了长江中游城市群水资源承载力的时空变化过程。在全国范围上,刘佳骏等^[18]从系统论的角度出发,探讨中国水资源承载力在空间上的分布特点。整体而言,水资源承载力研究以区域性为主,侧重于对特定流域、个别省份或城市的研究,针对全国范围的研究较少;在全国性的研究中,多以解释水资源承载力空间分布为主,而对于水资源承载力的年际变化及未来承载状况探讨不足。本文在前人研究的基础上,以中国 31 个省(市、自治区)为研究对象,构建水资源承载力评价指标体系,采用

主客观综合赋权的 TOPSIS 模型综合评价中国 31 省(市、自治区)水资源承载力,以探讨中国水资源承载力的时空变化特征,并采用具有自学习和自适应功能的 BP 神经网络预测了未来水资源承载力状况,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参考。

1 研究方法

1.1 评价指标体系构建

影响水资源承载力的因素来自多个方面,不仅与水资源的先天条件直接相关,同时与社会、经济发展带来的压力以及生态环境治理力度等多方面有着密切联系。因此,水资源承载力系统是一个水资源-社会-经济-生态环境 4 个子系统之间相互耦合的多层次复杂系统。本文综合考虑 4 个子系统对中国水资源承载力的影响,参考相关国家标准并结合前人的研究成果^[19-21],遵循指标选取的科学性、客观性、代表性和数据可获取性等原则,选取各系统内指标,构成水资源承载力评价指标体系(表 1)。

1.2 研究方法确定

以中国 31 个省(市、自治区)为评价对象,在水资源承载力评价指标体系建立的基础上,采用层次分析法和熵权法组合赋权以确定各指标的权重,通过构建 TOPSIS 模型计算评价价值的大小以确定承载力水平的高低,从而对 31 省(市、自治区)2010—2019 年的水资源承载力进行综合评价;其次采用 Mann-Kendall 趋势法对各省(市、自治区)水资源承载力年际变化规律进行检验,以分析我国水资源承载力的时空变化特征,并通过障碍度模型识别出影响其水资源承载力的主要障碍因子;在此基础上,以诊断出的 7 个主要指标为依据,通过建立指标预测模型得到 2020—2025 年各指标值;最后以指标值和水资源承载力评价价值为输入参数,采用 BP 神经网络预测各省(市、自治区)未来 6 年的水资源承载力状况。

表 1 水资源承载力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water resources carrying capacity

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	计算方法 Method of calculation	属性 Attribute
水资源 子系统 Water resource subsystem		地表水资源占比 X_1 Proportion of surface water resources $X_1/\%$	地表水资源量/水资源总量 Surface water resources/total water resources	正向 Forward direction
		供水模数 X_2 Water supply modulus $X_2/(10^4\text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	供水量/区域面积总量 Water supply/total area	正向 Forward direction
		产水模数 X_3 Water production modulus $X_3/(10^4\text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	水资源总量/区域面积总量 Total water resources/total area	正向 Forward direction
		人均综合用水量 X_4 Comprehensive water consumption per capita X_4/m^3	用水总量/总人口 Total water consumption/total population	负向 Negative direction
		人均水资源量 X_5 Water resources per capita X_5/m^3	水资源总量/总人口 Total water resources/total population	正向 Forward direction
		水资源开发利用率 X_6 Water resources development and utilization ratio $X_6/\%$	供水量/水资源总量 Water supply/total water resources	负向 Negative direction
	社会 子系统 Social subsystem	人口自然增长率 X_7 Natural population growth rate $X_7/\text{‰}$	统计数据 Statistical data	负向 Negative direction
		人口密度 X_8 Population density $X_8/(\text{people} \cdot \text{km}^{-2})$	总人口/区域面积总量 Total population/total area	负向 Negative direction
		城镇化率 X_9 Urbanization rate $X_9/\%$	城镇人口/总人口 Urban population/total population	负向 Negative direction
		居民生活用水量 X_{10} Domestic water consumption rate $X_{10}/\%$	居民生活用水量/用水总量 Domestic water consumption/total water consumption	负向 Negative direction
		人均日生活用水量 X_{11} Daily domestic water consumption per capita $X_{11}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	生活用水总量/总人口/365 Total domestic water consumption/total population/365	负向 Negative direction
水资源 承载力 Water resources carrying capacity	经济 子系统 Economic subsystem	万元工业增加值用水量 X_{12} Water consumption per 10 000 Yuan of industrial added value $X_{12}/(\text{m}^3 \cdot (10^4 \text{ Yuan})^{-1})$	工业用水量/工业增加值 Industrial water consumption/industrial added value	负向 Negative direction
		工业用水率 X_{13} Industrial water consumption rate $X_{13}/\%$	工业用水量/用水总量 Industrial water consumption/total water consumption	负向 Negative direction
		万元 GDP 用水量 X_{14} Water consumption per 10 000 Yuan GDP $X_{14}/(\text{m}^3 \cdot (10^4 \text{ Yuan})^{-1})$	用水总量/GDP 总量 Total water consumption/total GDP	负向 Negative direction
		人均 GDP X_{15} GDP per capita X_{15}/Yuan	GDP 总量/总人口 Total GDP/total population	正向 Forward direction
		耕地灌溉率 X_{16} Irrigation rate of cultivated land $X_{16}/\%$	有效灌溉面积/耕地面积 Effective irrigation area/cultivated land area	正向 Forward direction
		生态环境用水率 X_{17} Ecological environment water consumption rate $X_{17}/\%$	生态用水量/用水总量 Ecological water consumption/total water consumption	正向 Forward direction
	生态环境 子系统 Ecological environment subsystem	造林总面积 X_{18} Total afforestation area X_{18}/hm^2	统计数据 Statistical data	正向 Forward direction
		生活垃圾无害化处理率 X_{19} Domestic garbage harmless treatment rate $X_{19}/\%$	统计数据 Statistical data	正向 Forward direction
		废水排放总量 X_{20} Total wastewater discharge $X_{20}/(10^4\text{ t})$	统计数据 Statistical data	负向 Negative direction
		化学需氧量排放占比 X_{21} Chemical oxygen demand emission ratio $X_{21}/\%$	化学需氧量排放量/废水排放总量 COD discharge/total wastewater discharge	负向 Negative direction
		氨氮排放占比 X_{22} Proportion of ammonia nitrogen emission $X_{22}/\%$	氨氮排放量/废水排放总量 Ammonia nitrogen discharge/total wastewater discharge	负向 Negative direction
		农用化肥使用量 X_{23} Consumption of agricultural chemical fertilizer $X_{23}/(10^4\text{ t})$	统计数据 Statistical data	负向 Negative direction

1.2.1 指标权重确定 将层次分析法主观赋权与熵权法客观赋权相结合,以确定各项指标的权重。

层次分析法主要计算过程:建立判断矩阵 $U = (u_{ij})_{n \times n}$,其中, n 为准则层个数或指标个数, u_{ij} 的取值范围为 1~9;计算判断矩阵的最大特征向量,根据公式 $UW = \lambda_{\max} W$,可得判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和对应的特征向量 w ;一致性检验,若一致性比率 $CR < 0.1$,则该矩阵一致性较强,经过归一化处理后,得到各指标权重 w'_j 。

熵权法主要计算过程:构建原始数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$,对数据进行标准化处理。正、负向指标的标准化公式分别为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \tag{1}$$

$$y_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \tag{2}$$

式中, x_{ij} 为第 i 个样本第 j 个指标的值; y_{ij} 为标准化后的指标值; $x_{\max j}$ 、 $x_{\min j}$ 分别为指标 j 下所有样本的最大值和最小值; m 为样本个数; n 为指标个数。

对标准化后的指标值进行归一化处理:

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \tag{3}$$

式中, p_{ij} 为归一化后的指标值。

计算第 j 个指标的信息熵 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) \tag{4}$$

计算第 j 个指标的权重 w''_j :

$$w''_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \tag{5}$$

基于层次分析法和熵权法权重计算结果,通过组合赋权确定各项指标的权重^[22-23],各指标综合权重 w_j 为:

$$w_j = \frac{w'_j w''_j}{\sum_{j=1}^n w'_j w''_j} \tag{6}$$

1.2.2 评价值计算及分类 得到各指标权重后,采用 TOPSIS 模型对水资源承载力进行综合评价。具体步骤如下:

(1) 基于经标准化处理的指标值,构造加权决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$:

$$r_{ij} = w_j y_{ij} \tag{7}$$

式中, w_j 为指标 j 的综合权重。

(2) 计算各指标的最优解 r_i^+ 和最劣解 r_i^- :

$$\begin{cases} r_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} \{r_{ij}\} \\ r_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} \{r_{ij}\} \end{cases} \tag{8}$$

(3) 计算各评价对象到最优解和最劣解的距离 D_i^+ 和 D_i^- :

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_j^+ - r_{ij})^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_j^- - r_{ij})^2} \end{cases} \tag{9}$$

(4) 计算各评价对象的评价值 T_i :

$$T_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \tag{10}$$

式中, $0 \leq T_i \leq 1$, T_i 越大,表示评价对象与最优方案越接近。借鉴已有研究成果^[24-25],本文将评价值 T_i 划分为 5 个等级,分别表示水资源承载力的 5 种状态,具体如表 2 所示。

1.2.3 评价值趋势检验 得到水资源承载力评价值后采用 Mann-Kendall 检验法(以下简称 M-K 检验)对其趋势变化进行检验。由于不受样本及其分布的影响,M-K 检验在水文学领域时间序列的趋势分析中运用十分广泛^[26-27]。本文采用 M-K 趋势检验法识别各省(市、自治区)水资源承载力年际变化规律,当 M-K 检验的统计量大于 0 时,评价值改善;小于 0 时,评价值恶化,再通过统计量绝对值的大小判断这种趋势是否显著。

1.2.4 障碍因子诊断 通过障碍度模型进行障碍因子诊断,识别影响各省(市、自治区)水资源承载力的主要指标,计算方法为:

(1) 计算各指标的因子贡献度 F_j :

$$F_j = w_j z_j \tag{11}$$

式中, w_j 为指标 j 的综合权重; z_j 为指标 j 所属准则层的权重。

表 2 水资源承载力分级标准

Table 2 Water resources carrying capacity classification standard

评价值 T_i Evaluation value T_i	等级评价 Grade evaluation	等级状态 Grade status
[0,0.3)	V 级 Five-level	严重超载 Severely overloaded
[0.3,0.4)	IV 级 Four-level	超载 Overloaded
[0.4,0.5)	III 级 Three-level	临界 Critical
[0.5,0.6)	II 级 Two-level	弱可承载 Weakly bearable
[0.6,1.0]	I 级 One-level	可承载 Bearable

(2)障碍度计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{F_j I_{ij}}{\sum_{j=1}^n F_j I_{ij}} \times 100\% \quad (I_{ij} = 1 - y_{ij}) \quad (12)$$

式中, P_{ij} 为第 i 个样本第 j 个指标的障碍度; I_{ij} 为指标偏离度; y_{ij} 为标准化后的指标值。

1.2.5 BP 神经网络预测 基于障碍度模型诊断出的影响各省(市、自治区)水资源承载力的 7 个主要指标,以全国及各省份“十四五”规划中相关数据为基准,采用 SPSS 软件优选出拟合程度较好的函数构建指标预测模型,对未来 6 年的指标数据进行预测。以 2010—2025 年的 7 个指标值和 2010—2019 年的水资源承载力评价值为输入参数,采用 BP 神经网络^[28]对 2020—2025 年中国及其 31 个省(市、自治区)的水资源承载力评价值进行预测。

为弥补指标数据序列长度较短的缺点,使模型具有更好的泛化能力和准确度,将每年的数据重复 2 次进行训练,以提高 BP 神经网络的预测精度。以 2010—2019 年的 7 个指标值为输入层,2010—2019 年的水资源承载力评价值为输出层,隐含层设置为 15 个,训练集、验证集、测试集比例为 13 : 4 : 3。通过多次试算和调整,神经网络较优的参数设置如下:激活函数为“Tansig”;训练函数为“Traingd”;训练方法为 Levenberg-Marquardt 算法;最大迭代次数为 1 000;初始学习因子为 0.05;目标误差为 10^{-3} 。保存训练出来的神经网络模型和结果,用来预测 2020—2025 年水资源承载力评价值。

1.3 数据来源

本文所涉及的指标数据主要来源于中国及其 31 省(市、自治区)2010—2019 年的《统计年鉴》、《水资源公报》、《环境统计年鉴》、《国民经济和社会发展统计公报》以及《国民经济和社会发展第十四个五年规划纲要》,多项指标数据的获取均基于基础数据计算得到。

2 结果与分析

2.1 水资源承载力评价结果

2.1.1 时间演变规律 运用组合赋权的 TOPSIS 模型计算中国 31 省(市、自治区)及其各子系统的水资源承载力评价值,数值越大,表明水资源承载力水平越高,评价结果如图 1 所示。由图 1 可知,研究期内,我国 31 省(市、自治区)水资源承载力综合系统的评价值 T_i 在 $[0.36, 0.57]$ 范围内波动,2010—2014 年水资源承载力先上升后下降,2014 年后逐年递增。其中 2013 年和 2019 年两年的 T_i 值较邻近年

份稍大,均高于 0.5,达到弱可承载状态;2014 年和 2015 年综合评价价值仅介于 0.3~0.4,水资源承载力不容乐观,处于轻度超载状态。对各子系统评价结果分析如下:

(1)水资源子系统评价值在 2010—2019 年波动幅度较大,其中 2011 年最低,为 0.34,主要原因在于 2011 年全国水资源总量比常年值少 16.1%,为 1956 年来最少的一年;到 2013 年增加至 0.63,这得益于我国最严格水资源管理制度的有效实施;2013—2019 年呈递减态势,水资源供需矛盾变得突出。

(2)社会子系统评价值在 2010—2017 年间逐年递减,到研究期期末有所提升。从原始数据来看,主要是因为 2018 年我国人口自然增长率显著下降,比上一年降低 1.51 个百分点,2019 年人口自然增长率仅为 3.34‰,达到 10 年最低,造成这一现象的主要原因是“全面两孩”政策在 2016、2017 年集中释放效应显著,而 2018 年政策集中释放效应明显弱化。人口自然增长率的变化引起社会子系统中其他指标的改变,从而影响承载水平。

(3)经济子系统评价值在研究期内持续提升,由 2010 年的 0.29 上升为 2019 年的 0.71。随着社会经济的迅速发展和现代化水平的全面提升,我国工业、农业用水效率逐步提高,经济子系统中各项指标的显著改善促使其承载力水平逐年提升。

(4)生态环境子系统评价值呈现先减小后增大的趋势,2010—2014 年降低,2014 年后持续提升。对指标层分析发现,自 2014 年后,我国生态环境用水率、造林总面积逐年增大,而废水排放总量、农用化肥使用量在不断地减小,这得益于我国相关环境管理措施的实施,例如 2015 年国家农业部制定了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》,大力推进化肥减量提效、农药减量控害,促进了农业可持续发展。

我国 31 省(市、自治区)水资源承载力受到以上 4 个子系统的综合作用,各子系统评价值在时间上表现出显著差异,但整体而言,2010—2016 年间综合评价价值同水资源子系统评价值变化趋势最为一致,这表明水资源子系统是制约我国水资源承载力提升的关键因素;2016 年后,社会、经济和生态环境等 3 个子系统评价值均显著提高,综合系统的评价值与水资源子系统变化趋势有差异,这表明仅仅依靠水资源子系统难以完全缓解社会经济发展带来的压力,要维持水资源的可持续发展,还需依靠水资源与社会经济及生态环境系统的协同作用。

2.1.2 空间分布特征

水资源承载力空间分布图

(图 2)显示,我国各省(市、自治区)水资源承载力

在空间分布上存在差异,但整体仍表现出较为显著的地区分异规律。2010 年,我国水资源承载力最好

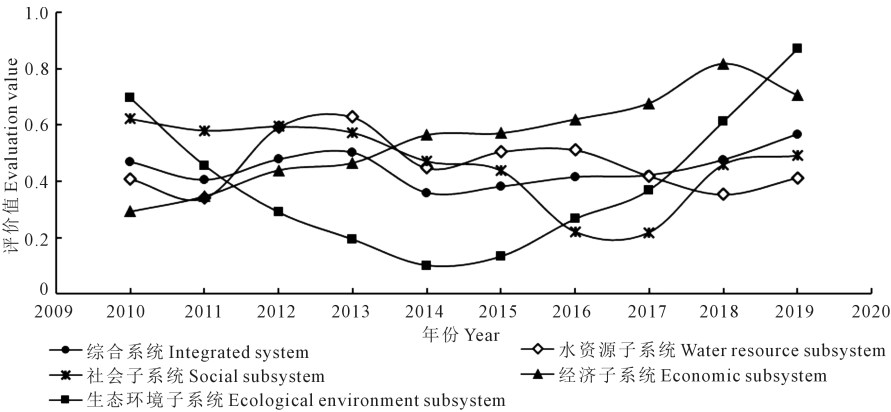


图 1 中国 31 省(市、自治区)水资源承载力演变趋势
Fig.1 Evolution trend of water resources carrying capacity in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China

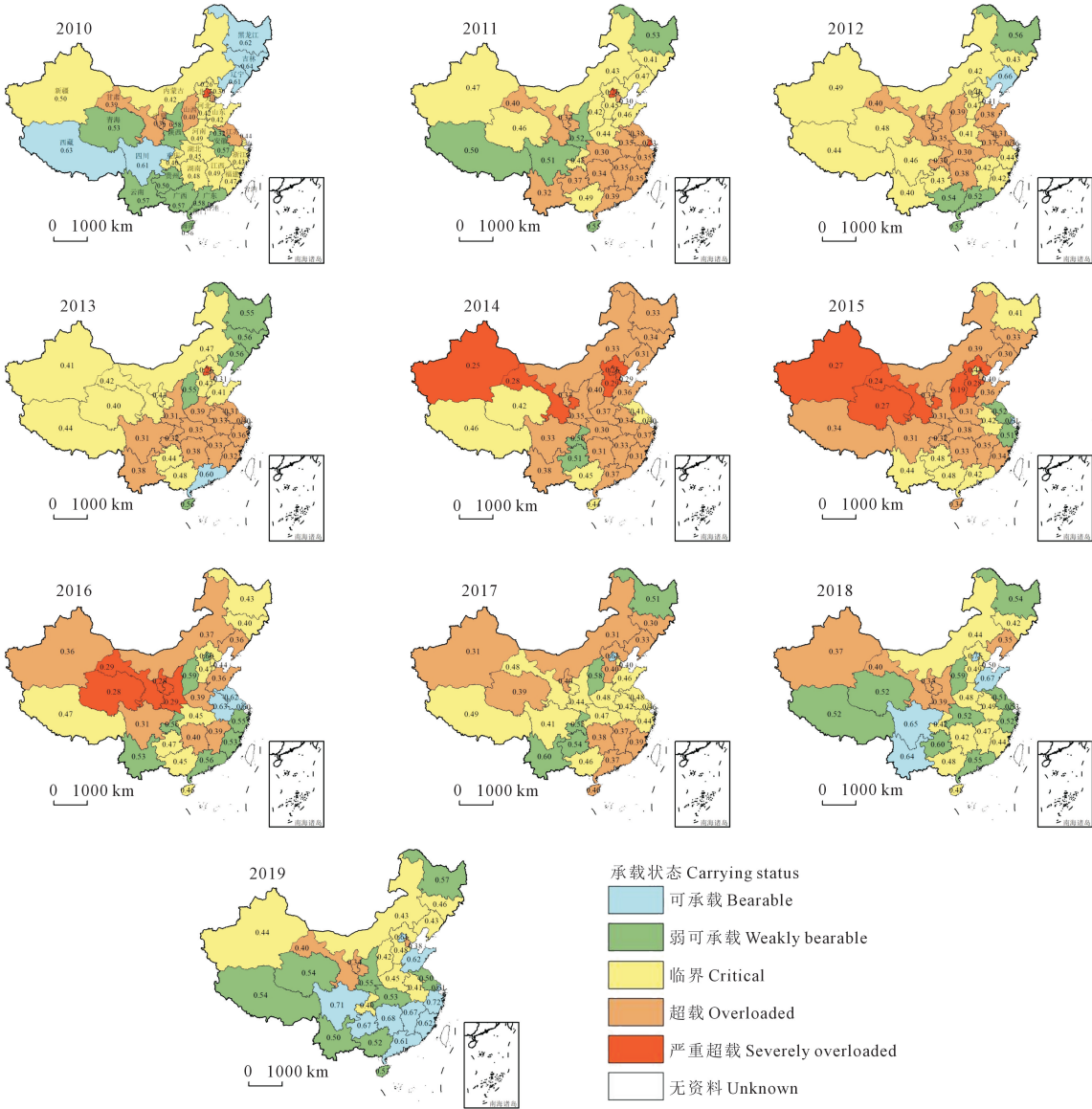


图 2 中国水资源承载力空间分布特征
Fig.2 Spatial distribution characteristics of water resources carrying capacity in China

的区域集中在东北地区,华南和西南达到弱可承载状态,华东和华中处于临界承载状态,水资源承载力最弱的区域集中在华北和西北地区。2010—2014 年,我国水资源承载力整体呈下降趋势,2014 年仅 有 8 个省(市)未超载,新疆超载最为严重,这主要是因为 2014 年新疆产水模数较 2010 年下降了 34.7%,人均水资源量下降了 37.9%。2014—2019 年,我国水资源承载力持续提升,至研究期末全国已无严重超载地区,处于超载状态的主要包括天津、甘肃、宁夏。对指标层分析发现,天津市水资源紧缺、人口密集,致使其人均水资源量在 31 省(市、自治区)中处于最低名次。甘肃、宁夏供水模数、产水模数均处于较低水平,其中宁夏多年平均产水模数仅为 $2.25\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$,水资源紧缺严重,不足以承载当地社会发展需求;同时,两地经济社会发展水平较为落后,用水水平低,例如宁夏历年人均综合用水量和万元 GDP 用水量均低于全国平均水平,这也是制约其承载力的重要因素。

2.2 水资源承载力时空变化特征

采用 M-K 趋势法对各省(市、自治区)水资源承载力年际变化规律进行分析,将水资源承载力随时间的变化程度划分为显著改善、不显著改善、无显著变化、不显著恶化、显著恶化 5 个等级,得到我国水资源承载力的时空变化特征如图 3 所示(见 235 页)。

2010—2019 年,西北地区水资源承载力普遍恶化,主要是由于该地区水资源紧缺逐年严重,且除陕西外,该地区其他省(自治区)用水水平较低;东北地区也出现恶化情形,与西北不同,尽管其承载力显著恶化,但由于承载本底较好,因此在研究期末并未达到超载状态,其中辽宁水资源总量下降使其承载力显著恶化;华南地区不显著恶化。我国水资源承载力呈现改善趋势的地区集中在华东、华中和西南,其中上海、江苏、浙江改善最为显著。上海承载力改善一方面得益于其用水水平的提高,另一方面,上海重视环境保护,采取了有效措施严格控制废污水的排放,农用化肥使用量也在逐年下降;江苏提升原因和上海有相似之处;浙江承载力改善主要源于当地水资源禀赋条件较好,产水模数、人均水资源量均较高。华北地区仅北京承载力改善显著,其变化与生态环境子系统相关指标的改善有密切联系,其中,生态环境用水率的增加对承载力的影响作用最强,2019 年北京生态环境用水率为 38.4%,较 2010 年提高了 2 倍以上,造林面积也在逐年增加,北京市对生态环境的管控力度逐年提高。

2.3 障碍因子分析

运用障碍度模型辨识中国各省(市、自治区)水资源承载力的主要影响因子,计算各指标在研究期内的平均障碍度,选出障碍度较高的评价指标作为主要障碍因子列于表 3,统计出各障碍因子出现的频度次数列于表 4(表 3 和表 4 中出现的符号指代同表 1)。可以看出,无论是各省(市、自治区)障碍度大小排名还是障碍因子出现频率排名,产水模数 X_3 、农用化肥使用量 X_{23} 、人均水资源量 X_5 、供水模数 X_2 、人均综合用水量 X_4 、废水排放总量 X_{20} 、水资源开发利用率 X_6 均位于前列,因此,这 7 项指标是影响我国水资源承载力发展的重要因子。

从各子系统来看,各省(市、自治区)障碍度排名前 7 的障碍因子中属于水资源子系统的评价指标均占半数以上,这说明区域水资源禀赋条件是影响各省(市、自治区)水资源承载力的关键因素。其中,产水模数在我国多个地区障碍度排名第一,是最具影响力的因子;供水模数在供水水平较低的省份居于首位,其中青海的障碍度最高;人均水资源量、人均综合用水量在人口较为密集的省市位于前列。社会子系统的人口自然增长率、人口密度以及城镇化率这几个指标作为部分地区的主要障碍因子影响其承载力水平,例如上海、天津等地。经济系统中的指标出现相对较少,这是由于随着社会经济的迅速发展,我国现代化程度不断提高,万元工业增加值用水量、万元 GDP 用水量的降低均表明各省市对水资源的利用效率逐步提高。生态环境方面,山东、河南、四川、新疆等省(自治区)作为农业大省(区),农用化肥使用量的障碍度较大;废水排放总量在部分省市排名靠前,其中广东的障碍度最大。

2.4 水资源承载力预测

采用 BP 神经网络对中国及其 31 省(市、自治区)水资源承载力评价价值进行预测,图 4 为中国最佳模型训练出的拟合值对原始数据的回归结果,拟合效果较好。将 2020 年预测值与现有实测数据进行对比(图 5),可以看出各省(市、自治区)水资源承载力预测值和实际值相差均在一个评价等级范围内,因此预测结果较为合理。

2020—2025 年水资源承载力空间分布图(图 6,见 235 页)显示:我国大部分省市均已达到临界承载水平以上,未来全国多数地区水资源承载力将逐渐改善。其中,持续改善区主要分布在长江中下游地区、东南沿海部分地区、西南地区以及京津冀等地,南方地区特别是长江中下游平原及东南沿海地

表 3 2010—2019 年中国 31 省(市、自治区)水资源承载力主要障碍因子及平均障碍度
Table 3 Main obstacle factors and average obstacle degree of water resources carrying capacity
in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China from 2010 to 2019

省(市、自治区) Province (municipality, autonomous region)								障碍度排序 Obstacle degree ranking							
								1	2	3	4	5	6	7	
北京								X ₃	X ₂₃	X ₂	X ₁₇	X ₅	X ₂₂	X ₁₂	湖北
Beijing								18.1	15.6	12.5	12.4	4.0	3.4	3.4	
天津								X ₃	X ₅	X ₂₀	X ₂₃	X ₂	X ₇	X ₄	湖南
Tianjin								25.4	17.5	10.9	10.2	8.9	5.5	5.3	
河北								X ₂₃	X ₃	X ₅	X ₂	X ₂₀	X ₄	X ₁₇	广东
Hebei								18.1	17.6	13.8	13.7	7.7	5.3	4.5	
山西								X ₄	X ₃	X ₅	X ₂₃	X ₂₀	X ₁₆	X ₆	Guangdong
Shanxi								19.6	17.3	16.2	7.7	7.0	4.8	4.3	
内蒙古								X ₃	X ₅	X ₂	X ₂₃	X ₂₀	X ₁	X ₄	广西
Inner Mongolia								22.6	16.2	14.3	11.6	5.9	4.3	4.1	
辽宁								X ₃	X ₅	X ₂	X ₄	X ₂₃	X ₁₂	X ₇	Guangxi
Liaoning								23.5	16.9	11.8	11.0	7.7	3.8	3.4	
吉林								X ₃	X ₂₃	X ₅	X ₄	X ₂	X ₂₀	X ₆	海南
Jilin								20.3	15.4	14.3	12.0	6.1	5.7	3.8	
黑龙江								X ₃	X ₂₃	X ₅	X ₄	X ₂	X ₂₀	X ₁₇	Hainan
Heilongjiang								19.4	16.4	14.2	11.0	4.9	4.5	4.3	
上海								X ₂	X ₃	X ₅	X ₂₃	X ₇	X ₆	X ₈	重庆
Shanghai								21.9	16.6	12.2	10.0	4.0	3.9	3.8	
江苏								X ₃	X ₂₀	X ₅	X ₂₃	X ₂	X ₂₂	X ₁₂	Chongqing
Jiangsu								20.3	17.9	14.3	10.5	5.3	3.8	3.6	
浙江								X ₂₁	X ₂	X ₃	X ₅	X ₁₂	X ₂₂	X ₂₀	四川
Zhejiang								15.8	11.9	11.4	10.2	9.8	7.7	6.6	
安徽								X ₃	X ₅	X ₄	X ₂₃	X ₁₆	X ₆	X ₂₀	Sichuan
Anhui								25.4	15.1	10.8	10.5	7.8	6.4	4.4	
福建								X ₃	X ₂₃	X ₅	X ₄	X ₂	X ₂₂	X ₂₁	贵州
Fujian								22.1	21.8	14.3	7.8	5.6	3.5	3.3	
江西								X ₂	X ₂₃	X ₃	X ₁₆	X ₅	X ₁₇	X ₂₀	Guizhou
Jiangxi								19.0	17.7	12.2	10.9	8.9	6.7	6.3	
山东								X ₂₃	X ₃	X ₅	X ₂	X ₄	X ₁₂	X ₁₆	云南
Shandong								25.1	14.1	11.3	9.9	6.9	3.9	3.1	
河南								X ₂₃	X ₅	X ₃	X ₁₆	X ₂₀	X ₄	X ₁₇	西藏
Henan								29.9	10.1	9.3	7.3	6.1	5.7	5.0	
															Tibet
															陕西
															Shaanxi
															甘肃
															Gansu
															青海
															Qinghai
															宁夏
															Ningxia
															新疆
															Xinjiang

表 4 2010—2019 年中国 31 省(市、自治区)水资源承载力主要障碍因子出现频率
Table 4 Occurrence frequency of main obstacle factors of water resources carrying capacity in
31 provinces, municipalities and autonomous regions of China from 2010 to 2019

障碍因子 Obstacle factor	排名 Rank	出现次数 Number of occurrences	出现频率 Frequency of occurrences	障碍因子 Obstacle factor	排名 Rank	出现次数 Number of occurrences	出现频率 Frequency of occurrence
X ₃	1	31	1.00	X ₆	7	9	0.29
X ₂₃	2	31	1.00	X ₁₆	8	9	0.29
X ₅	3	30	0.97	X ₇	9	7	0.23
X ₂	4	26	0.84	X ₂₂	10	7	0.23
X ₄	5	23	0.74	X ₁	11	6	0.19
X ₂₀	6	22	0.71	X ₁₇	12	6	0.19

区就水资源条件来说属于丰水区,在适当的管理与协调下有足够的能力供应当地社会经济的可持续发展,其水资源潜力相对较大,在高效经济和再生水政策的引导下,水资源承载力将持续提升。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,预计未来水环境与水生态状况会得到有效改善,承载力水平也将缓慢上升并达到稳态。西北地区水资源禀赋条件较为恶劣,长期以来该地区水资源总量小,产水模数和人均水资源量一直是影响其水资源承载力的主要障碍因子,且水环境和用水条件较差,国家高度重视该地区的水资源管理和配置工作,因此随着生态文明建设理念的不断深入,

西北地区水资源生态系统功能将逐渐增强。山东、河南、辽宁未来水资源承载力会出现恶化现象,这些地区恶化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生态平衡。山东、河南作为中国的粮食主产区,农用化肥使用量近 10 年来在 31 省(市、自治区)中一直位居榜首,且未出现明显减小趋势,预估未来农用化肥使用量仍是制约两地水资源承载力的主要因素;辽宁近年来水资源天然补给量逐年减少,为满足其经济社会发展,区域水资源开发利用程度已接近生态极限。

3 讨论

刘雁慧等^[29]对中国水资源承载力的空间分布情况进行研究,发现我国水资源承载力较好的区域主要集中在北纬 20°~35°及东北地区,而在北纬 35°~40°较差,本文在水资源承载力空间分布上的研究结果与之吻合。在探究我国水资源承载潜力上,应将水资源承载力的时空变化特征与未来变化趋势相结合。本研究显示,西南地区水资源承载潜力相对较大,未来应加大该地区水资源开发力度,充分发

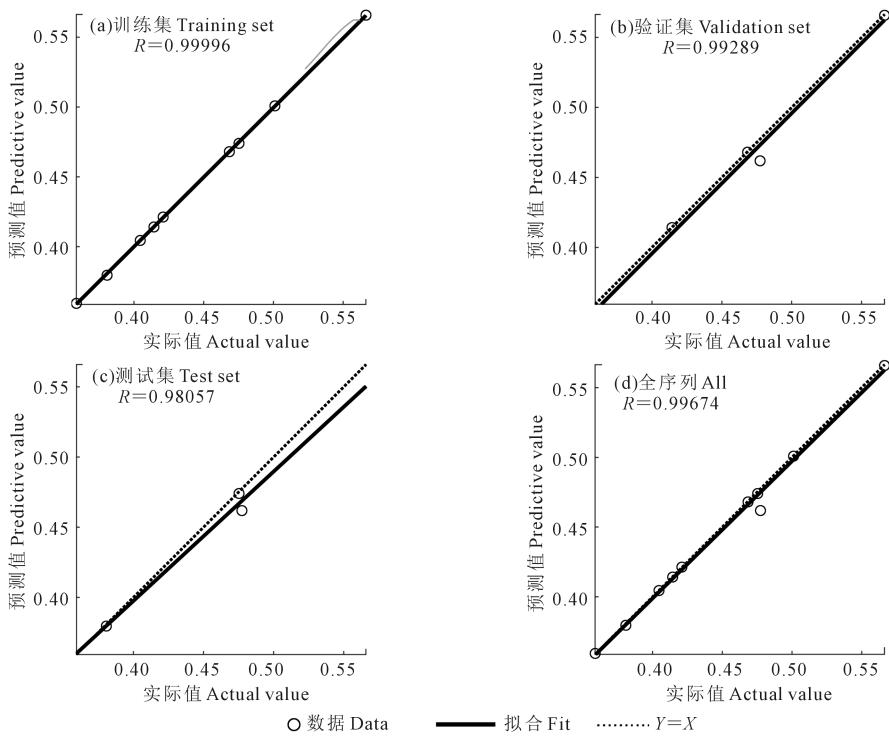


图 4 中国 31 省(市、自治区)水资源承载力评价值拟合结果

Fig.4 Fitting results of evaluation values of water resources carrying capacity of 31 provinces, municipalities and autonomous regions in China

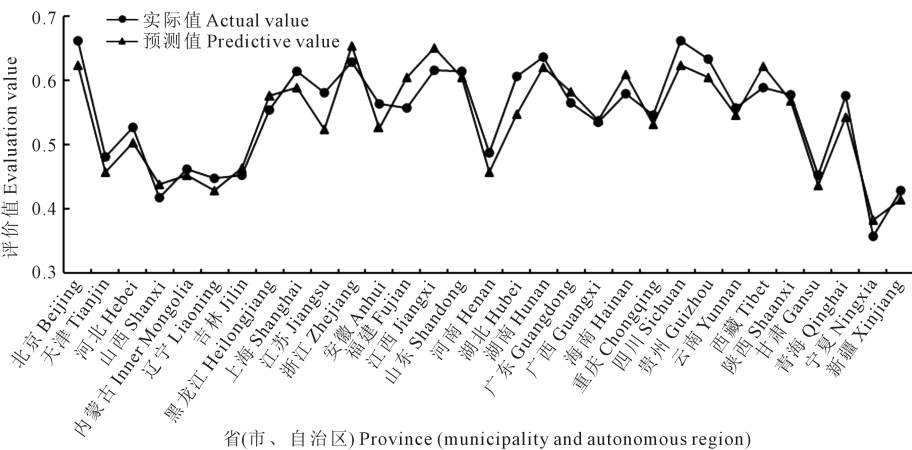


图 5 2020 年中国 31 省(市、自治区)水资源承载力预测值和实际值

Fig.5 The predicted and actual water resources carrying capacity of 31 provinces, municipalities and autonomous regions in China in 2020

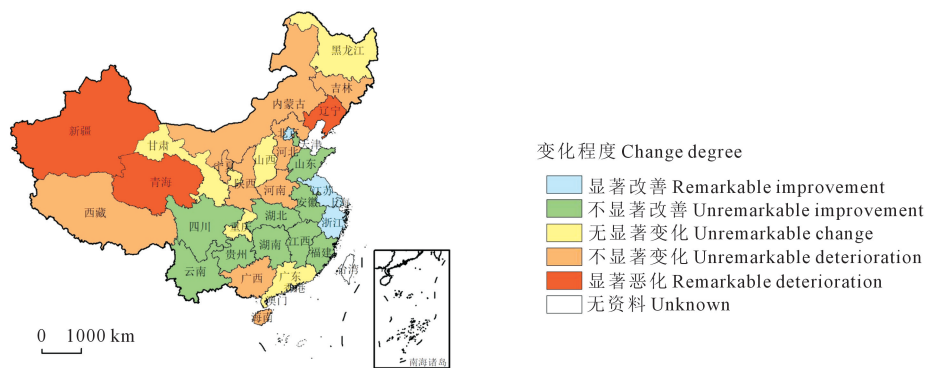


图 3 2010—2019 年中国水资源承载力时空变化特征

Fig.3 Temporal and spatial variation characteristics of water resources carrying capacity in China from 2010 to 2019

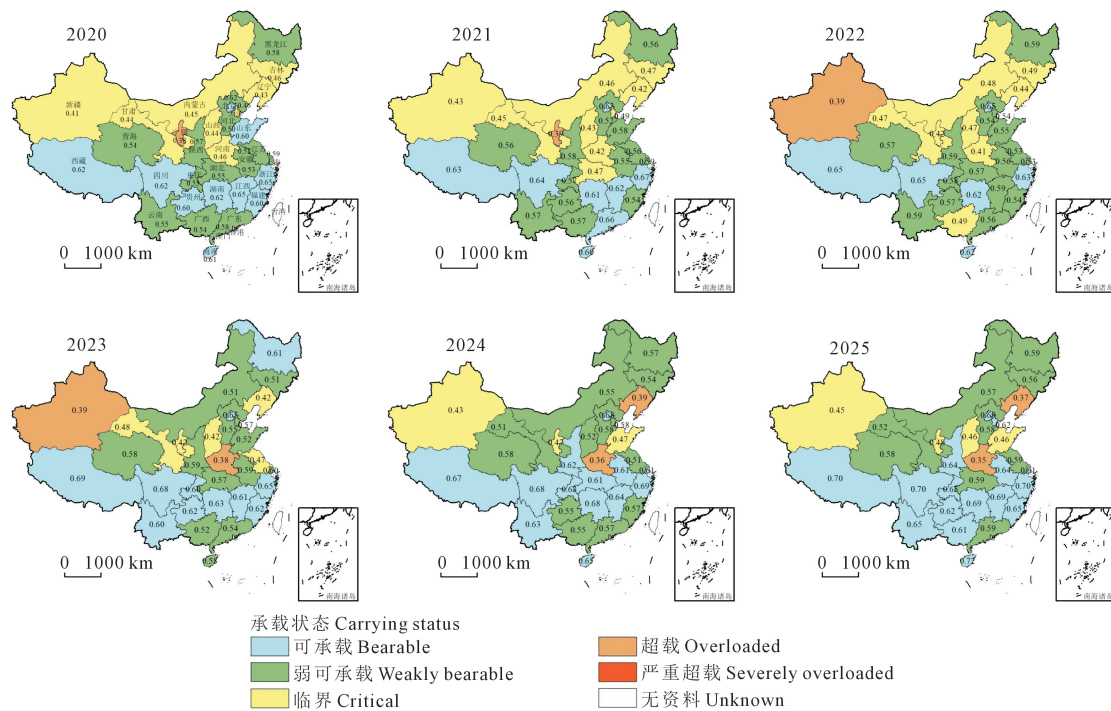


图 6 2020—2025 年中国水资源承载力空间分布

Fig.6 Spatial distribution of water resources carrying capacity in China from 2020 to 2025

挥其水资源承载力优势;东南沿海地区中虽有部分省市在过去 10 年呈恶化态势,但其水资源承载力在研究期末仍表现较好,对该地区加强管理,预计未来水资源承载力将持续改善;华北地区中京津冀未来承载力会持续改善,山西、内蒙古也将逐渐恢复其承载能力;西北地区现阶段水资源承载力水平较低,但呈好转趋势,承载潜力存在较大改善空间。

我国水资源分配不均,各地区发展极不平衡,故影响各省(市、自治区)水资源承载力的障碍因素存在差异,未来在水资源承载力调控中,应针对障碍因素因地制宜采取不同的措施;对于水资源短缺地区,应通过落实最严格水资源管理制度,把握好“三条红线”,加强节水宣传,发展节水技术,全面推

进新型节水型社会建设,同时在这些地区加大水利工程建设投资以解决其水资源时空分布不均和结构性缺水的问题;对于人口密集地区,应积极响应国家最新提出的优化生育政策以及城市落户政策等,促进人口长期均衡发展,推动人口结构更加科学合理;对于经济发展落后的地区,要注重调整产业结构,因地制宜,发挥自身优势,提升现代化水平,积极响应《国家节水行动方案》中强调的总量和强度双控即“量-效”约束,农业节水增效,工业节水减排,保证社会经济的可持续发展;对于生态环境脆弱的地区,应强化生态环境管控,实行退耕还林等工程,加强对森林生态系统的全面保护,同时在水污染较为严重的地区要加大废水治理投资、水

环境建设投资以控制生活污水和工业废水的排放。

4 结 论

1)时间变化上,中国 31 省(市、自治区)水资源承载力呈波动式提升趋势,整体处于临界承载状态。其中 2010—2016 年综合评价同水资源子系统变化趋势一致,2016 年后,随着社会、经济和生态环境等 3 个子系统评价值的显著提高,我国 31 省(市、自治区)水资源承载力逐步提升,综合系统与水资源子系统变化趋势表现出较大差异。

2)空间分布上,我国水资源承载力表现出较为显著的地区分异规律。西南、华南和东北地区承载力较好,水资源承载力最弱的区域集中在华北和西北地区,其中天津、甘肃、宁夏在研究期内整体处于超载状态。

3)时空变化上,水资源承载力在西北和东北地区表现为恶化,华南和华北部分地区也出现恶化状况,而华东、华中和西南大部分地区均有所改善,其中北京、上海、江苏、浙江水资源承载力在研究期内呈显著改善趋势。

4)产水模数、农用化肥使用量、人均水资源量、供水模数、人均综合用水量、废水排放总量、水资源开发利用是研究期内对我国水资源承载力影响最强的 7 个障碍因子,且影响强度依次递减,建议在今后的水资源发展规划中予以重视。

5)未来变化上,水资源承载力将在全国多数地区呈现持续改善趋势,持续改善区主要分布在长江中下游地区、东南沿海部分地区、西南地区以及京津冀等地,西北地区水资源承载力在未来改善潜力较大,而山东、河南、辽宁可能形成重度恶化区。

参 考 文 献:

[1] 左其亭,赵衡,马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792, 800.
ZUO Q T, ZHAO H, MA J X. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792, 800.

[2] 王建生,钟华平,耿雷华,等. 水资源可利用量计算[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 549-553.
WANG J S, ZHONG H P, GENG L H, et al. Available water resources in China[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 549-553.

[3] 刘昌明,王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 635-644.
LIU C M, WANG H R. An analysis of the relationship between water resources and population-economy-society-environment[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 635-644.

[4] WEI J, WEI Y P, WESTERN A. Evolution of the societal value of water resources for economic development versus environmental sustainability in Australia from 1843 to 2011 [J]. Global Environmental Change, 2017, 42: 82-92.

[5] PIRES A, MORATO J, PEIXOTO H, et al. Sustainability assessment of indicators for integrated water resources management[J]. Science of the Total Environment, 2017, 578: 139-147.

[6] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等. 百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395.
FENG Z M, YANG Y Z, YAN H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: from theory to practice[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 379-395.

[7] 王建华,姜大川,肖伟华,等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1399-1409.
WANG J H, JIANG D C, XIAO W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1399-1409.

[8] 周云哲,栗晓玲,周正弘. 基于“量-质-域-流”四维指标体系的水资源荷载状况评价——以黑河流域三河市为例[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 215-223, 231.
ZHOU Y Z, SU X L, ZHOU Z H. Evaluation of water resource load balance based on four dimensional index system (quantity-quality-watershed-flow) —— a case study in three cities of Hei River basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 215-223, 231.

[9] LI Y, YANG Y Z, YAN H M, et al. Research methods of water resources carrying capacity: progress and prospects[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(5): 455-460.

[10] 何伟,陈素雪,仇沪毅. 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的综合评价及时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1208-1219.
HE W, CHEN S X, QIU L Y. Comprehensive evaluation and spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in three gorges ecological and economy corridor of Yangtze river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(6): 1208-1219.

[11] 李征,金菊良,崔毅,等. 基于半偏联系数和动态减法集对势的区域水资源承载力评价方法[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1656-1669.
LI Z, JIN J L, CUI Y, et al. Evaluation method of regional water resources carrying capacity based on semipartial connection number and dynamic subtraction set pair potential[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1656-1669.

[12] 刘夏,张曼,徐建华,等. 基于系统动力学模型的塔里木河流域水资源承载力研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1407-1416.
LIU X, ZHANG M, XU J H, et al. Water resources carrying capacity of Tarim River Basin based on system dynamics model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1407-1416.

[13] 雷亚君,张永福,张敏惠,等. 新疆水资源生态足迹核算与预测[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 142-150.
LEI Y J, ZHANG Y F, ZHANG M H, et al. Calculation and prediction of water resource ecological footprint in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(5): 142-150.

[14] 陈丽,周宏. 基于模糊综合评价和主成分分析法的岩溶流域水资源承载力评价[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(6): 159-173.

- CHEN L, ZHOU H. Carrying capacity evaluation of water resources in karst basin based on fuzzy comprehensive evaluation and principal component analysis[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(6): 159-173.
- [15] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 20-25.
- LI S P, ZHAO H, WANG F Q, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20-25.
- [16] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7.
- ZUO Q T, ZHANG Z Z, WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7.
- [17] 田培, 王瑾钰, 花威, 等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1871-1884.
- TIAN P, WANG J Y, HUA W, et al. Temporal-spatial patterns and coupling coordination degree of water resources carrying capacity of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1871-1884.
- [18] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269.
- LIU J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269.
- [19] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34.
- HUI Y H, JIANG X H, HUANG Q, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 30-34.
- [20] 王建华, 翟正丽, 桑学锋, 等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1023-1029.
- WANG J H, ZHAI Z L, SANG X F, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1023-1029.
- [21] 张向宁, 王小军, 齐广平, 等. 基于 DPSIR-信息敏感性的水安全评价指标体系构建——以庆阳市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(9): 44-53.
- ZHANG X N, WANG X J, QI G P, et al. Construction of water security evaluating index system based on driving force-pressure-state-response model and information sensitivity [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(9): 44-53.
- [22] 闫岩, 雷国平, 谢英楠. 基于 AHP 和熵权法的土地利用生态效益研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 134-139.
- YAN Y, LEI G P, XIE Y N. Study on evaluation of land use ecological efficiency based on AHP and entropy weight method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 134-139.
- [23] 苏辉东, 贾仰文, 牛存稳, 等. 河流健康评价指标与权重分配的统计分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 138-144.
- SU H D, JIA Y W, NIU C W, et al. Statistical analysis of river health assessment indicators and weight distribution[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 138-144.
- [24] 姜秋香, 付强, 王子龙. 三江平原水资源承载力评价及区域差异[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 184-190.
- JIANG Q X, FU Q, WANG ZI L. Evaluation and regional differences of water resources carrying capacity in Sanjiang plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 184-190.
- [25] 何刚, 夏业领, 秦勇, 等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 287-292, 300.
- HE G, XIA Y L, QIN Y, et al. Evaluation and spatial-temporal dynamic change of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 287-292, 300.
- [26] 张樨樨, 曹正旭, 张仁杰, 等. 黄河三角洲生态经济区水资源承载力评价及趋势预测[J]. 世界地理研究, 2022, 31(3): 549-560.
- ZHANG X X, CAO Z X, ZHANG R J, et al. Evaluation and prediction of water resource carrying capacity in eco-economic zone of Yellow River Delta [J]. World Regional Studies, 2022, 31(3): 549-560.
- [27] 强安丰, 汪妮, 魏加华, 等. 近 50 年三江源地区云水资源分布及水效率研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 574-593.
- QIANG A F, WANG N, WEI J H, et al. Study on cloud water resources distribution and precipitation efficiency in the three river headwaters region during the past 50 years[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 574-593.
- [28] 曹若馨, 张可欣, 曾维华, 等. 基于 BP 神经网络的水环境承载力预警研究——以北运河为例[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 2005-2017.
- CAO R X, ZHANG K X, ZENG W H, et al. Research on the early-warning method of water environment carrying capacity based on BP neural network: a case study of Beiyunhe River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 2005-2017.
- [29] 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.
- LIU Y H, LI Y B, LIANG X Y, et al. Study on water resource carrying capacity evaluation and change in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1080-1091.