

中国七大流域水资源供需平衡及其可持续性

杨丹荔, 李益彬, 李雪梅, 胡艳, 舒树森

(内江师范学院 沱江流域高质量发展研究中心, 四川 内江 641100)

摘要: [目的] 探究中国七大流域水资源供需平衡及可持续现状, 为各流域未来制定水资源的综合管理和科学配置等方案提供参考。[方法] 基于水资源生态足迹法, 研究中国七大流域 2014—2022 年水资源生态足迹和水资源生态承载力, 并利用基于水资源生态足迹的可持续评价指标揭示七大流域水资源可持续现状。[结果] ① 中国七大流域人均水资源生态足迹总体呈下降趋势, 其中松花江、长江、珠江和海河分别在农业用水、工业用水、生活用水和生态用水中比例最高达 82.86%, 33.32%, 19.87% 和 12.38%。② 珠江人均水资源生态承载力最高达 19.89 $\text{hm}^2/\text{人}$, 而海河最低仅为 0.03 $\text{hm}^2/\text{人}$, 且受气候异常的影响, 2020—2022 年各流域水资源生态承载力波动较大。③ 研究时段内, 长江、珠江和松花江总体为水资源生态盈余且珠江 2016 年水资源生态盈余最大达 18.21 $\text{hm}^2/\text{人}$, 淮河和辽河从水资源生态赤字转为水资源生态盈余, 黄河和海河均为水资源生态赤字且黄河 2015 年水资源生态赤字最大达 -0.62 $\text{hm}^2/\text{人}$ 。④ 水资源可持续发展指标表明黄河和海河水资源生态压力较大, 常年处于水资源不可持续状态, 珠江水资源协调性较差且水资源整体利用效率不高。[结论] 目前长江、珠江、松花江、淮河和辽河水资源基本保持供需平衡关系, 黄河和海河常年处于需求大于供给的状态, 未来应建立国家层面和流域层面的水资源规划方案, 促进流域水资源的合理利用, 支撑流域沿岸经济社会的可持续发展。

关键词: 水资源生态足迹; 生态承载力; 可持续利用; 七大流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0269-09

中图分类号: TV213.4, TV211.1

文献参数: 杨丹荔, 李益彬, 李雪梅, 等. 中国七大流域水资源供需平衡及其可持续性[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 269-277. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.028; Yang Danli, Li Yibin, Li Xuemei, et al. Supply and demand balance of water resources and its sustainability in seven river basins of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 269-277.

Supply and Demand Balance of Water Resources and Its Sustainability in Seven River Basins of China

Yang Danli, Li Yibin, Li Xuemei, Hu Yan, Shu Shumiao

(Neijiang Normal University Tuojiang River Basin High-quality Development Research Center, Neijiang, Sichuan 641100, China)

Abstract: [Objective] The balance and sustainable status of water resources supply and demand in seven river basins in China were examined aiming to provide a reference for the future development of integrated management and scientific allocation of water resources. [Methods] Using the water resources ecological footprint method, this study examined the water resources ecological footprint and ecological carrying capacity of seven river basins in China between 2014 and 2022. The status of water resource sustainability was revealed by using the sustainability evaluation index based on water resources' ecological footprint. [Results] ① The per capita ecological footprint of water resources in China's seven major river basins showed a downward trend, among which Songhua River, Yangtze River, Pearl River, and Haihe River accounted for 82.86%, 33.32%, 19.87%, and 12.38% of agricultural water, industrial water, domestic water, and ecological water, respectively. ② The highest per capita carrying capacity was that of the Pearl River at 19.89 $\text{hm}^2/\text{person}$, whereas the lowest was only 0.03 $\text{hm}^2/\text{person}$ for the Haihe River. Affected by

收稿日期: 2024-05-27

修回日期: 2024-07-23

资助项目: 四川省哲学社会科学“十四五”规划项目“沱江流域水生态承载力的可持续发展研究”(SC22EZD057); 四川省社会科学重点研究基地项目(TJGZL2022-03)

第一作者: 杨丹荔(1992—), 女(汉族), 四川省成都市人, 博士, 讲师, 主要从事流域水资源管理方面的研究。Email: yangdanli5203@163.com。

通信作者: 李益彬(1967—), 女(汉族), 四川省简阳市人, 硕士, 教授, 主要从事流域水资源管理方面的研究。Email: 272191465@qq.com。

climate anomalies, the ecological carrying capacity of water resources in each basin oscillated considerably from 2020 to 2022. ③ During the study period, the Yangtze, Pearl, and Songhua rivers had a total water resources ecological surplus, with the Pearl River having the largest water resources ecological surplus of $18.21 \text{ hm}^2/\text{person}$ in 2016. The Huaihe and Liaohe rivers went from a water resources ecological deficit to a surplus. The Yellow and Haihe rivers had a water resources ecological deficit, with the Yellow River having the largest water resources ecological deficit of $-0.62 \text{ hm}^2/\text{person}$ in 2015. ④ The indicators of sustainable development of water resources implied that the Yellow and Haihe rivers were under greater ecological pressure from water resources and in a state of unsustainable water resources throughout the year, whereas the Pearl River had poor water resource coordination and overall low water use efficiency. [Conclusion] Currently, the balance between the supply and demand of water resources in the Yangtze, Pearl, Songhua, Huaihe, and Liaohe rivers is maintained, whereas the demand of the Yellow and Haihe rivers is always greater than the supply. In the future, water resources planning schemes at the national and basin levels should be established to promote rational utilization of water resources and support sustainable economic and social development in the basin.

Keywords: ecological footprint of water resources; ecological carrying capacity; sustainable use; seven river basins

水资源是国家经济和社会发展的基石,其可持续利用的程度决定了未来经济社会发展的潜力^[1]。流域是以水系为纽带将自然生态系统与经济社会系统相连接的特殊地理单元,具有极强的整体性^[2]。在流域经济社会发展中,人口增长、资源消耗、环境污染等问题使得水体资源发生改变,进而影响流域水资源承载力。因此,科学评估流域水资源的供需平衡关系,明晰经济社会发展对水资源产生的影响,是提高流域水资源承载力,实现流域经济社会高质量发展的关键所在。

由生态足迹衍生的水资源生态足迹^[3-4],常用来衡量区域对水资源的消耗情况^[5]。当前,对水资源生态足迹概念的界定尚处于完善阶段,但大多数学者认为,水资源生态足迹是指人类活动生产及自然环境维持自身发展和平衡所消耗的水资源量^[6-9]。而水资源生态承载力则多数被认为是区域内水资源最大供给量所能承载的最大人口数量和经济规模^[1,5-7]。因此,利用二者的差值能够衡量流域水资源的供需平衡。例如,夏军等^[1]运用水资源生态足迹法计算得到鄱阳湖流域各市水资源均处于生态盈余状态;赵博^[9]研究辽河流域水资源的供需关系时发现其水资源承载力呈生态赤字状态,且这种供需矛盾已长期存在;张羽等^[10]揭示了沁蟒河流域 5 个地级行政区均处于生态赤字状态且农业生态足迹的不均衡性较大;邵骏等^[11]利用水资源生态足迹法指出长江流域水资源生态足迹年际变化不大且水资源承载力总体呈盈余态势。以上学者均利用水资源生态盈亏来衡量流域水资源的供需平衡及可持续现状,但缺少在此基础上对流域水资源生态压力及协调性等综合性研究。

中国七大流域包括长江、黄河、珠江、淮河、海河、辽河以及松花江,以占中国 47.30% 的陆地国土面积,承载了中国 82.70% 的人口和 82.60% 的经济总量,是中国经济社会发展的重要空间载体^[12]。各流域自然禀赋条件和经济社会发展水平存在差异,因此要解决流域水资源与经济社会发展相适应的问题,需要从实际出发,因地制宜。在前期的研究中,不少学者对长江流域水资源的生态盈亏^[11,13],黄河流域水资源生态足迹的时空分异^[14]以及珠江流域水资源评价^[15]等进行了研究,但研究对象均以单一流域为主,未将中国七大流域水资源供需平衡状况进行横向比较。鉴于此,本文通过对 2014—2022 年中国七大流域水资源生态足迹和水资源生态承载力的研究,揭示七大流域水资源生态盈亏现状,并利用水资源生态压力、水资源生态协调性等指标揭示各流域水资源的可持续现状,以期各流域未来制定水资源的综合管理和科学配置等方案提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

中国七大流域包括长江、黄河、珠江、海河、淮河、辽河以及松花江^[16],由于其横跨空间大,自然条件和经济社会基础均存在明显差异,例如长江流域拥有水资源量最多且经济发展水平最高,黄河流域能源资源丰富且拥有城市群数量最多,珠江流域单位面积产水量最多且城镇化水平最高等(表 1)^[12]。七大流域主要流经中国东部地区,承载了中国 82.70% 的人口和 82.60% 的经济总量,对中国经济社会的发展有着重要影响^[12]。

表 1 中国七大流域基本情况
Table 1 General conditions of China's seven major river basins

流 域	长度/km	流域面积/ km ²	水资源总量 (2022 年)/10 ⁶ m ³	流经省(自治区、直辖市)
长 江	6 296	1 796 000	859 050	青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海
黄 河	5 687	813 122	70 070	青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东
珠 江	2 320	452 000	542 300	云南、贵州、广西、广东、湖南、江西
海 河	1 031	320 600	38 350	天津、北京、河北、山西、山东、河南、内蒙古、辽宁
淮 河	1 018	190 982	83 180	河南、湖北、安徽、江苏
辽 河	1 383	191 946	79 840	内蒙古、河北、吉林、辽宁
松花江	1 840	557 180	180 760	吉林、黑龙江

注:表中数据来源于 2023 年《中国水利统计年鉴》

1.2 数据来源

本文七大流域的流域面积、水资源总量、各生态足迹账户用水量以及人口等数据来源于 2015—2023 年《中国水利统计年鉴》以及 2014—2022 年各流域的水资源公报。

2 研究方法

2.1 水资源生态足迹

水资源生态足迹包括生产用水、生活用水以及生态用水^[6-9], 将其所消耗的水资源量转化为水资源用地面积^[17], 在对其进行均衡化后得到可用于不同地区间相互比较的均衡值^[6]。计算公式为:

$$EF=N\times ef=N\times \gamma\times (W/P)$$
 (1)

式中:EF 为水资源生态足迹; N 为人口; ef 为人均水资源生态足迹(hm²/人); γ 为水资源全球均衡因子, 从水资源生态足迹的角度, 地域差异性对水资源全球均衡因子的影响不显著, 因此本文采取 WWF 2000 年核算的水资源全球均衡因子为 5.19^[18-20]; W 为人均消耗水资源量(m³/人); P 为水资源全球平均生产能力, 据多项研究表明一般取值为 3 140 m³/hm²^[18-20]。

2.2 水资源生态承载力

水资源生态承载力是指区域内水资源最大供给量所能承载的最大人口数量和经济规模^[5-7]。在前期的研究中, 不少学者已对黄河^[7]、辽河^[9]、淮河^[20]、长

江^[13,21-22]以及珠江^[23]等流域水资源承载力进行了研究, 均表明在流域的发展中, 若对水资源的开发利用超过总量的 40%, 则会对生态环境带来潜在的影响。因此, 在计算水资源生态承载力时需至少扣除 60% 的水资源量用以维持区域的生态环境状况^[1,20]。计算公式为:

$$EC=N\times ec=N\times 0.4\times \varphi\times \gamma\times (Q/P)$$
 (2)

式中:EC 为水资源生态承载力; ec 为人均水资源生态承载力(hm²/人); φ 为水资源的产量因子; Q 为水资源总量(m³)。

产量因子可定义为区域内水资源平均生产能力与全球水资源平均生产能力之比^[2], 其值越大表明区域的水资源生产能力越高。为了保证研究结果更加客观准确, 本文依次计算各流域研究时段内历年水资源的产量因子, 其计算公式为:

$$\varphi=P_w/P$$
 (3)

式中:P_w 为流域单位面积产水量(m³/km²)。通过公式计算得到 2014—2022 年中国七大流域水资源产量因子(表 2)。

2.3 基于水资源生态足迹的可持续评价指标

本文基于水资源生态足迹, 采取水资源生态赤字/盈余、水资源生态压力指数、水资源生态协调指数以及水资源可持续指数等综合指标分析中国七大流域水资源的可持续现状。

表 2 七大流域 2014—2022 年水资源的产量因子
Table 2 Production factors of water resources in seven major river basins from 2014 to 2022

年份	水资源的产量因子						
	长江	黄河	珠江	海河	淮河	辽河	松花江
2014	1.79	0.28	3.36	0.26	0.88	0.33	0.92
2015	1.82	0.23	3.75	0.31	1.01	0.42	0.85
2016	2.10	0.25	4.16	0.47	1.19	0.68	0.85
2017	1.87	0.28	3.70	0.33	1.13	0.41	0.72
2018	1.65	0.37	3.35	0.41	1.22	0.54	0.97
2019	1.86	0.34	3.57	0.27	0.60	0.57	1.27
2020	2.27	0.37	3.28	0.34	1.54	0.79	1.29
2021	1.98	0.39	2.57	0.73	2.26	1.16	1.33
2022	1.52	0.27	3.82	0.38	1.39	1.32	1.03

2.3.1 水资源生态赤字/盈余 利用水资源生态足迹与水资源生态承载力的差值,可评估区域水资源的供需平衡状况,计算公式为:

$$es=ec-ef \tag{4}$$

式中:es 为水资源生态赤字/盈余,(hm²/人),若 es<0,说明地区供给的水资源量小于发展所消耗的水资源量,产生了水资源生态赤字,反之则说明水资源供给量大于消耗量,地区处于水资源生态盈余状态^[20]。

2.3.2 水资源生态压力指数 水资源生态压力指数可用于衡量区域所能承受的水资源压力程度,反映区域水资源的生态安全情况,计算公式为:

$$ef_p=ef/ec \tag{5}$$

式中:ef_p 为水资源生态压力指数,若 ef_p 的值越大,水资源生态压力则越大,反之则越小^[20]。

2.3.3 水资源生态协调指数 水资源生态协调指数用于衡量区域经济社会和水资源之间的协调程度,计算公式为:

$$ECI=(ef+ec)/\sqrt{ef^2+ec^2} \tag{6}$$

式中:ECI 为水资源生态协调指数,其取值范围为 1.000~1.414,若 ECI 取值越接近 1.414,则表示区域内经济社会与水资源的协调性较好^[20]。

2.3.4 水资源可持续指数 水资源可持续指数可用于衡量区域水资源的可持续现状^[24],计算公式为:

$$EPI=ec/(ef+ec) \tag{7}$$

式中:EPI 为水资源可持续指数,EPI 的取值范围为 0~1,可将 EPI 划分为 6 个等级,其中:EPI≥0.80 为强可持续,0.65≤EPI<0.80 为中可持续,0.50≤EPI<0.65 为弱可持续,0.35≤EPI<0.50 为弱不可持续,0.20≤EPI<0.35 为中不可持续,EPI<0.20 为强不可持续。

3 结果与分析

3.1 七大流域水资源生态足迹与生态承载力

3.1.1 七大流域水资源生态足迹 生产用水(农业和工业)、生活用水和生态用水是水资源生态足迹的三大类用水账户^[2]。由表 3 可知,生产用水在水资源生态足迹账户的占比最高,其中松花江农业生产用水显著高于其他流域,达 82.86%,这也导致其生产用水在七大流域中比例最高达 90.46%,长江工业用水比例明显高于其他流域达 33.32%。其次,七大流域的生活用水除松花江流域比例较低以外,其余流域的差异较小。此外,七大流域生态用水比例均较低,但海河生态用水比例明显高于其他流域,达 12.38%。

七大流域多年人均水资源生态足迹表现为:珠江(1.65 hm²/人)>松花江(1.54 hm²/人)>辽河(0.94

hm²/人)>长江(0.90 hm²/人)>淮河(0.72 hm²/人)>黄河(0.71 hm²/人)>海河(0.56 hm²/人),其中珠江、松花江和辽河人均水资源生态足迹呈下降趋势,长江和淮河呈增长趋势,而黄河和海河变化较为平稳(见图 1a)。

表 3 七大流域水资源生态足迹各类账户比例
Table 3 Proportion of water resources ecological footprint accounts in seven major river basins

流 域	生产用水/%			生活用水/%	生态用水/%
	农业	工业	合计		
长 江	49.23	33.32	82.55	15.64	1.81
黄 河	68.24	13.43	81.67	12.69	5.64
珠 江	59.25	19.38	78.63	19.87	1.50
海 河	57.58	12.31	69.89	17.73	12.38
淮 河	66.87	13.86	80.73	14.88	4.39
辽 河	67.37	12.54	79.91	15.51	4.58
松花江	82.86	7.60	90.46	6.04	3.50

3.1.2 七大流域水资源生态承载力 由图 1b 可以看出,七大流域多年人均水资源生态承载力表现为:珠江(14.31 hm²/人)>长江(3.52 hm²/人)>松花江(2.48 hm²/人)>辽河(0.74 hm²/人)>淮河(0.60 hm²/人)>黄河(0.17 hm²/人)>海河(0.09 hm²/人),其中珠江人均水资源生态承载力明显高于其他流域,最高可达 19.89 hm²/人,而海河最低仅为 0.03 hm²/人,二者相差约 663 倍。此外,珠江流域人均水资源生态承载力在 2017—2021 年间明显下降并在 2021 年达最低值仅为 7.54 hm²/人,而后在 2022 年明显上升;长江、黄河、松花江、辽河、海河以及淮河人均水资源生态承载力均在 2020—2022 年间达最大值。

3.2 七大流域水资源可持续现状

3.2.1 七大流域水资源生态盈亏 2014—2022 年中国七大流域水资源生态盈亏由表 4 可知,长江和珠江在研究时段内均表现为水资源生态盈余,且珠江 2016 年水资源生态盈余最大达 18.21 hm²/人;松花江流域除 2017 年为水资源生态赤字以外,其余年份均表现为水资源生态盈余;淮河和辽河在 2014—2019 年间均表现为水资源生态赤字,2021 年均转变为水资源生态盈余;黄河和海河均表现为水资源生态赤字,且黄河 2015 年水资源生态赤字最大达-0.62 hm²/人。

3.2.2 七大流域水资源生态压力 七大流域多年水资源生态压力指数为:海河(9.27)>黄河(4.70)>辽河(2.48)>淮河>(1.77)>松花江(0.74)>长江(0.27)>珠江(0.12)(图 2)。其中,海河水资源生态压力最大,2014 年其水资源生态压力指数高达 16.40;相比之下,珠江水资源生态压力较小,2016 年其水资源生态压力指数仅为 0.08,二者相差达 205 倍。从时

间尺度来看,各流域水资源生态压力指数波动较大且均表现出明显的峰值,黄河、海河、辽河、松花江的峰值出现在 2014—2017 年,长江、珠江和淮河的峰值出现在 2018—2022 年。

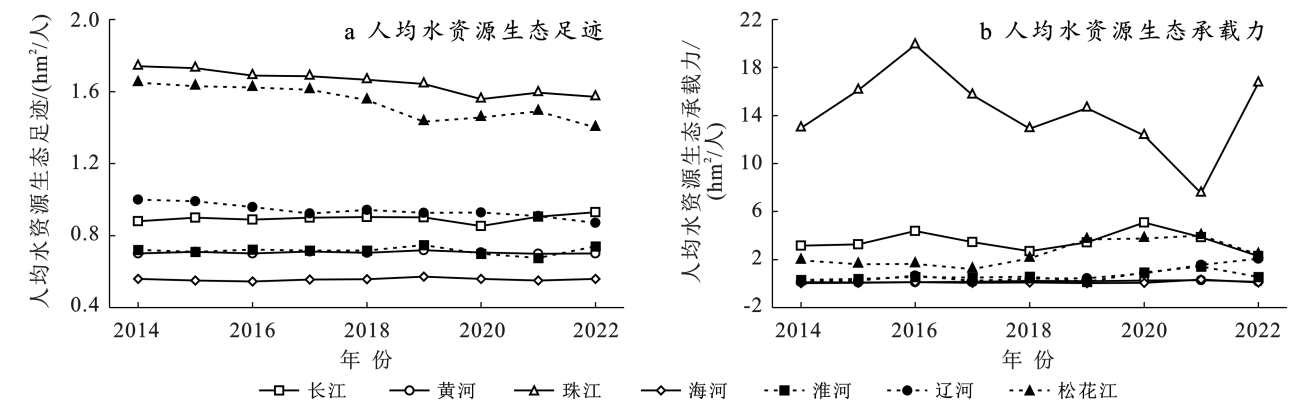


图 1 七大流域 2014—2022 年人均水资源生态足迹和生态承载力的动态变化
Fig.1 Dynamic changes of ecological footprint and carrying capacity of water resources per capita in seven major river basins during 2014—2022

表 4 七大流域 2014—2022 年人均水资源生态赤字/盈余							
Table 4 Ecological deficit/surplus of water resources per capita in seven major river basins from 2014 to 2022							
年份	长江	黄河	珠江	海河	淮河	辽河	松花江
2014	2.29	−0.57	11.23	−0.52	−0.41	−0.84	0.28
2015	2.38	−0.62	14.39	−0.50	−0.30	−0.74	0.00
2016	3.50	−0.59	18.21	−0.44	−0.16	−0.31	0.01
2017	2.56	−0.58	14.01	−0.50	−0.21	−0.69	−0.42
2018	1.80	−0.47	11.25	−0.47	−0.13	−0.54	0.56
2019	2.52	−0.53	12.96	−0.54	−0.61	−0.48	2.23
2020	4.23	−0.46	10.78	−0.50	0.24	−0.07	2.31
2021	2.97	−0.42	5.95	−0.23	0.75	0.66	2.51
2022	1.35	−0.57	15.14	−0.47	−0.21	1.19	1.02
平均	2.62	−0.53	12.66	−0.46	−0.12	−0.20	0.94

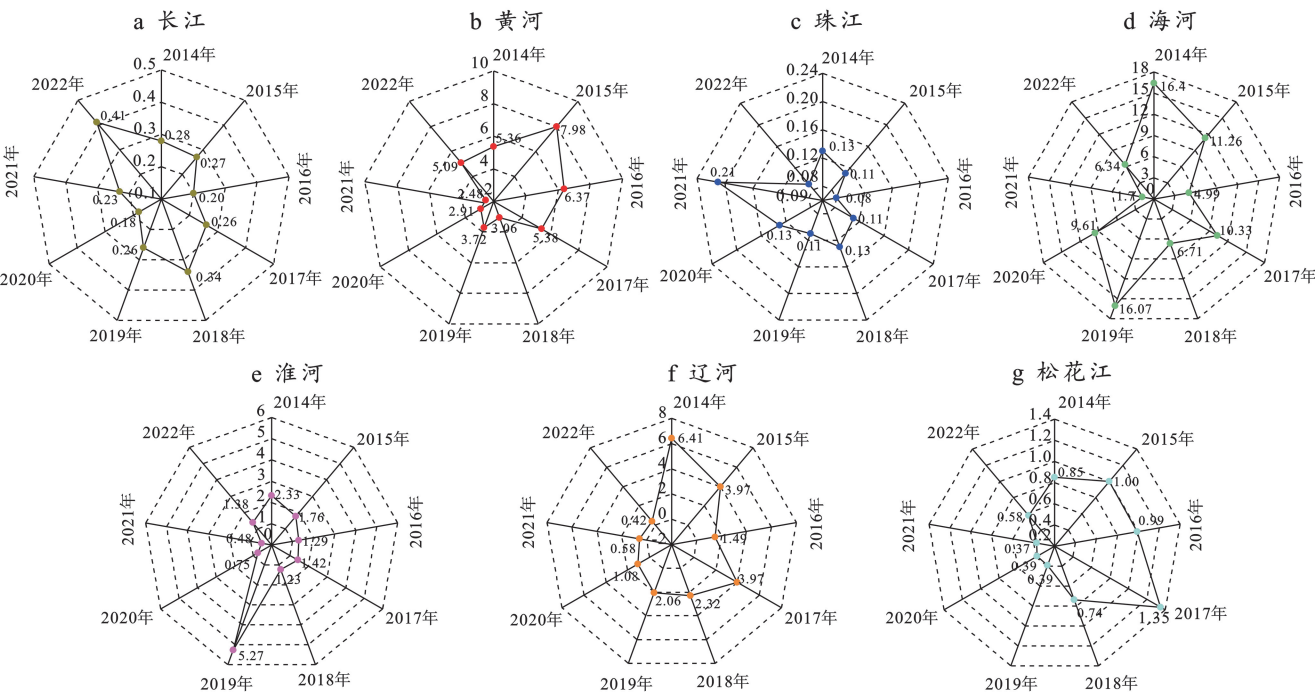


图 2 七大流域 2014—2022 年人均水资源生态压力指数
Fig.2 Ecological pressure index of water resources per capita in seven major river basins from 2014 to 2022

3.2.3 七大流域水资源生态协调性 七大流域多年水资源生态协调指数表现为:松花江(1.36) > 淮河(1.35) > 辽河(1.30) > 长江(1.22) > 黄河(1.20) > 海河(1.14) > 珠江(1.11)(图 3),其中松花江 2015—2016 年最高达 1.414,说明松花江水资源协调度和整体利用效率最高;珠江水资源生态协调指数总体最低,在 2016 年仅为 1.08,表明珠江水资源需求量与供给量的协调性较差且利用效率不高。

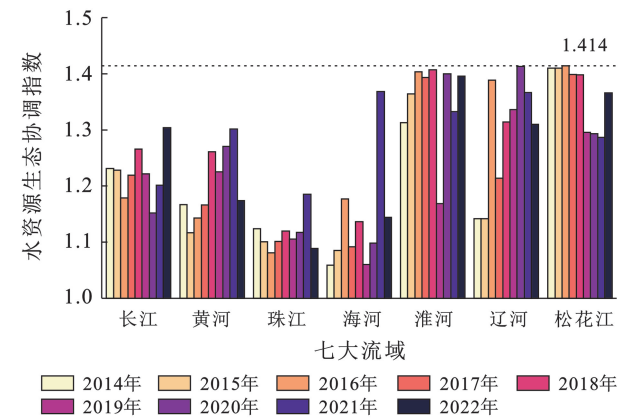


图 3 七大流域 2014—2022 年水资源生态协调指数
Fig.3 Ecological coordination index of water resources in seven major river basins from 2014 to 2022

3.2.4 七大流域水资源可持续性 由图 4 可知, 2014—2022 年长江和珠江的水资源可持续指数在 0.71~0.92 之间, 分别处于中可持续和强可持续; 黄河和海河水资源可持续指数在 0.06~0.37 之间, 其中海河在 2014 和 2019 年最低, 分别处于中不可持续和强不可持续; 淮河和辽河经历了从不可持续到可持续的转变, 其中淮河水资源可持续指数从 2014 年的 0.30 增长到 2021 年的 0.68, 辽河水资源可持续指数从 2014 年的 0.14 增长到 2022 年的 0.70; 松花江在 2017 年表现为弱不可持续, 其余年份均处于可持续状态。

4 讨论

4.1 七大流域水资源的供需平衡

水资源生态足迹反映了流域水资源的消耗情况。松花江流域内分布着松嫩平原、三江平原等中国重要的商品粮食基地^[25], 其丰富的水资源为沿岸农田提供了充足的灌溉水源, 也使其农业水资源消耗量远高于其他流域。其次, 长江流域是中国工业发展较早的地区之一, 其沿岸形成了四大工业基地和两大工业走廊, 是中国高度发达的综合性工业带^[26], 在工业的发展过程中势必会带来对水资源的巨大消耗。此外, 海河流域生态用水明显较高, 这主要是由于海河属于严

重的资源性缺水地区, 且对水资源的开发利用率已超过 100%, 导致大量生态环境用水被占用, 地下水战略储备也濒临枯竭^[27]。

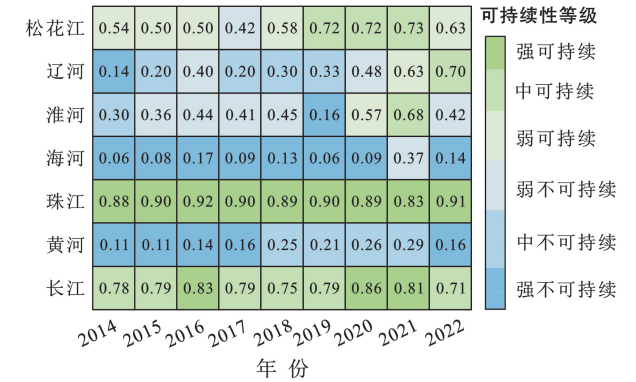


图 4 七大流域水资源可持续性指数及等级热点图
Fig.4 Heatmap of sustainable indices and levels of water resources in seven major river basins

水资源生态承载力反映了流域水资源的自然禀赋条件, 研究中珠江流域水资源承载力明显高于其他流域, 这主要是由于珠江位于中国季风区, 雨量充沛, 河流汛期长^[28], 其流域水资源产量因子平均高达 3.51。但在 2017—2021 年, 珠江水资源承载力明显下降, 且 2021 年达研究时段内最低。据珠江水资源公报, 2020 年和 2021 年秋季受“双拉尼娜”事件影响, 珠江降水量连年偏少, 特别是东江出现 60 a 来最严重旱情, 这也导致该年份珠江水资源承载力下降; 2022 年珠江受拉尼娜事件及亚欧中高纬环流、西太平洋副热带高压等异常影响, 强降雨中心在北江等区域高度重叠, 且在北江发生 1915 年以来最大洪水, 流域内降水量较 2021 年偏多 23.2%, 这也导致珠江在连续水资源承载力下降后又大幅上升。长江流域 2020 年水资源承载力明显高于其他年份, 主要由于 2020 年长江受强降雨的影响发生了自新中国成立以来仅次于 1954 年和 1998 年的流域性大洪水^[29]; 2022 年夏季长江又遭遇了自 1961 年以来最严重的气象干旱, 导致其水资源生态承载力达研究时段内最低。黄河、海河、淮河、辽河和松花江均在 2020—2022 年间达较高的水资源生态承载力, 这主要与该时段出现流域性洪水有关。由此可见, 2020—2022 年各流域受气候异常的影响出现明显的丰水年和枯水年, 进而影响流域水资源生态承载力在该时段波动较大。

水资源的供需平衡主要取决于水资源的消耗量和水资源的供给量^[11]。长江是中国第一长河也是水资源总量最大的河流, 珠江是中国单位面积产水量最高且水资源量位居第二的河流, 松花江是中国水资源

总量第三的河流^[30],优越的水资源禀赋条件使得长江、珠江和松花江在研究时段内总体处于生态盈余状态。黄河和海河在研究时段内均为水资源生态赤字,贺梦微等^[14]在研究2010—2019年黄河水资源承载力时指出黄河流域宁夏、内蒙古等9省区水资源承载力处于临界状态,青海、四川等6省区处于超载状态;受自然条件的限制,海河水资源总量在中国七大流域中最少,加之海河地处华北地区,经济社会的快速发展造成海河水资源严重短缺,常年处于水资源超载状态。淮河和辽河是七大流域中由水资源生态赤字转为生态盈余的流域,自2020年水利部淮河水利委员会批准的跨省江河流域水量分配方案实施以来,对沂河、沭河等6条跨省河流水资源统一调度,满足了流域合理的用水需求,提高了水资源生态承载力,2020年以后淮河水资源生态亏损明显好转;赵博^[9]指出2012—2017年辽河用水结构单一且单位水资源量产出效益低,但2021—2022年连续两年汛期降雨量较常年同期大幅增加,使得2021—2022年辽河为水资源生态盈余。

4.2 七大流域水资源可持续性分析

2014—2022年水资源生态压力指数和水资源可持续指数均表明黄河和海河水资源生态压力较大,常年处于水资源不可持续状态。流域水资源可持续的问题本质是经济发展与水资源承载力之间的矛盾。黄河拥有兰州—西宁城市群、宁夏沿黄城市群等7个城市群,是中国七大流域中拥有城市群数量最多的流域^[12],且黄河沿岸分布着中国重要的能源、化工和原材料等基础工业基地^[14]。海河人口密度高,2022年北京和天津的人口密度分别达1 331和1 143人/km²,是全国平均水平的7倍,且流域内京津冀地区是中国北方最大的综合性工业基地。可见,经济社会的发展对黄河和海河生产用水和生活用水的需求量较高。此外,受自然条件的影响,黄河和海河位于中国干旱与半干旱地区,年降水量总体偏少,加之气候变化、植被增加以及城市发展等导致水资源衰减的因素多难以逆转^[31],尤其是海河已成为中国十大一级流域中水资源衰减最严重的流域,其年均水资源总量为 $3.27 \times 10^{10} \text{ m}^3$,仅为长江的百分之三,对支撑流域沿岸经济社会发展严重不足。黄河和海河水资源多年连续的不可持续状态表明两河流域经济社会发展与水资源承载力之间的矛盾可能将持续存在,水资源安全形势依然严峻。

若要改善黄河和海河目前水资源不可持续状态,不仅要通过调水工程和供水工程缓解流域水资源短缺的压力,还应根据水资源承载力来确定水资源用水

量,加强水资源开发利用控制红线的管理^[14]。

珠江是中国单位面积产水量最高的河流,水资源产量因子和生态承载力明显高于其他流域。但2014—2022年珠江流域水资源生态协调指数在七大流域中最低,年均仅为1.11,说明珠江水资源协调性较差且水资源整体利用效率不高。珠江主要由西江、东江以及北江等水系组成,其中西江水资源总量是东江的近10倍,但其开发利用率只有1.20%,流域内水资源开发利用极不平衡。其次,珠江地下水可开采量为 $5.79 \times 10^{10} \text{ m}^3$,但开发利用率仅为10.01%^[15]。此外,珠江经济社会发展的重心主要集中在珠江三角洲,而构成珠江三角洲主要水系的西江其水资源开发利用率极低,经济社会发展重心与水资源重心的严重“错配”导致珠江水资源利用极不协调。

5 结论

(1) 2014—2022年,中国七大流域水资源生态足迹整体呈现下降趋势,反映出中国在实现经济社会高质量发展的同时,对水资源的消耗得到有效管理和控制,也初步验证了中国建设节水型社会的成效。但松花江、长江、珠江和海河的水资源生态足迹分别在农业用水、工业用水、生活用水和生态用水中比例较高,这与其产业结构的特点以及人口的密集程度有关。

(2) 七大流域中珠江水资源承载力最高可达 $19.89 \text{ hm}^2/\text{人}$,而海河最低仅为 $0.03 \text{ hm}^2/\text{人}$,反映出中国南北方流域水资源量存在巨大差异。此外,受气候异常的影响,各流域在2020—2022年出现明显的丰水年和枯水年从而导致水资源承载力在该时段波动较大。

(3) 长江、珠江和松花江在研究时段内总体表现为水资源生态盈余,淮河和辽河从水资源生态赤字转变为水资源生态盈余,说明这五大流域水资源的供给与需求保持在平衡状态,能够满足流域未来水资源的可持续发展。但黄河和海河均表现为水资源生态赤字,主要由于需水量的日益增加和水资源自然条件的限制。

(4) 水资源可持续发展指标表明黄河和海河水资源生态压力较大,常年处于水资源不可持续的状态,珠江水资源的协调性较差且水资源整体利用效率不高。可见,不同流域所面临的水资源问题各异。要解决不同流域的水资源问题,应强化水资源环境刚性约束制度,切实做到“以水定需,量水而行,因水而宜”,建立国家层面和流域层面的水资源规划方案,促进水资源的合理利用,支撑经济社会的可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] 夏军,刁艺璇,余敦先,等.鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J].水资源保护,2022,38(3):1-8,24.
Xia Jun, Diao Yixuan, She Dunxian, et al. Analysis on ecological security and ecological carrying capacity of water resources in the Poyang Lake basin [J]. Water Resources Protection, 2022,38(3):1-8,24.
- [2] 杨丹荔,胡艳,余佳,等.岷沱江流域水资源生态足迹与可持续性研究[J].人民长江,2023,54(10):67-75.
Yang Danli, Hu Yan, She Jia, et al. Ecological footprint and sustainability of water resources in Minjiang and Tuojiang River basin [J]. Yangtze River, 2023,54(10):67-75.
- [3] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, et al. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework [J]. Ecological Indicators, 2012,23:1-8.
- [4] Yu Yang, Hubacek K, Feng Kuishuang, et al. Assessing regional and global water footprints for the UK [J]. Ecological Economics, 2010,69(5):1140-1147.
- [5] 岳晨,钱永,崔向向,等.福建省 2010—2019 年水资源生态足迹与生态承载力[J].水土保持通报,2021,41(6):282-287.
Yue Chen, Qian Yong, Cui Xiangxiang, et al. Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Fujian Province during 2010—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):282-287.
- [6] 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.
Huang Linnan, Zhang Weixin, Jiang Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(3):1279-1286.
- [7] 路瑞,赵琰鑫.基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J].人民黄河,2020,42(11):48-52,134.
Lu Rui, Zhao Yanxin. Analysis of the water resources utilization in the Yellow River basin based on water resources ecological footprint model [J]. Yellow River, 2020,42(11):48-52,134.
- [8] 郝帅,孙才志,宋强敏.基于 ESTDA 模型的中国水生态足迹及水生态压力评价[J].生态学报,2021,41(12):4651-4662.
Hao Shuai, Sun Caizhi, Song Qiangmin. Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(12):4651-4662.
- [9] 赵博.辽河流域水资源生态足迹及生态承载力时空分析研究[J].水资源开发与管理,2021,7(9):32-37,43.
Zhao Bo. Spatial and temporal analysis of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Liaohe River basin [J]. Water Resources Development and Management, 2021,7(9):32-37,43.
- [10] 张羽,左其亭,曹宏斌,等.沁河流域水资源生态足迹时空变化特征及均衡性分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):50-57.
Zhang Yu, Zuo Qiting, Cao Hongbin, et al. Spatio-temporal variation characteristics and equilibrium analysis of water resources ecological footprint in the Qinmang River basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(3):50-57.
- [11] 邵骏,卢满生,杜涛,等.长江流域水资源生态足迹及其驱动因素[J].长江科学院院报,2021,38(12):19-24.
Shao Jun, Lu Mansheng, Du Tao, et al. Water resources ecological footprint in Yangtze River basin and its driving factors [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021,38(12):19-24.
- [12] 宋建军.我国七大流域经济、人口发展比较及展望[J].中国国土资源经济,2023,36(6):14-20.
Song Jianjun. Comparison and prospect of economic and population development in seven major river basins [J]. Natural Resource Economics of China, 2023,36(6):14-20.
- [13] 张婉玲,邹磊,夏军,等.长江中游城市群水资源生态足迹时空演变及其驱动因素分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(1):83-92.
Zhang Wanling, Zou Lei, Xia Jun, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors analysis of water resources ecological footprint of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(1):83-92.
- [14] 贺梦微,杨小林.2010—2019 年黄河流域水资源承载力时空动态研究[J].水利科学与寒区工程,2022,5(6):59-63.
He Mengwei, Yang Xiaolin. Spatial-temporal dynamics of water resources carrying capacity in the Yellow River basin from 2010 to 2019 [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2022,5(6):59-63.
- [15] 赵良杰,杨杨,曹建文,等.珠江流域地下水水资源评价及问题分析[J].中国地质,2021,48(4):1020-1031.
Zhao Liangjie, Yang Yang, Cao Jianwen, et al. Groundwater resources evaluation and problem analysis in Pearl River basin [J]. Geology in China, 2021,48(4):1020-1031.
- [16] 王雨珊.中国七大流域人为净磷输入及河流入海磷通量研究[D].北京:北京林业大学,2020.
Wang Yushan. Net anthropogenic phosphorus inputs in seven major river basins in China and corresponding phosphorus fluxes into the sea [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

- [17] 王秀颖,刘和平.基于水资源生态足迹的浑河流域水资源利用评价[J].水文,2016,36(3):50-55.
Wang Xiuying, Liu Heping. Assessing utilization of water resources in Hunhe River catchment based on ecological footprint [J]. Journal of China Hydrology, 2016,36(3):50-55.
- [18] 张智雄,孙才志.中国人均灰水生态足迹变化驱动效应测度及时空分异[J].生态学报,2018,38(13):4596-4608.
Zhang Zhixiong, Sun Caizhi. Driving effect measurements and spatial-temporal variation of the per capita gray water ecological footprint in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(13):4596-4608.
- [19] 郭慧,董士伟,吴迪,等.基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算[J].生态学报,2020,40(4):1405-1412.
Guo Hui, Dong Shiwei, Wu Di, et al. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(4):1405-1412.
- [20] 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 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(5):1076-1087.
- [21] 卢新海,柯善淦.基于生态足迹模型的区域水资源生态补偿量化模型构建:以长江流域为例[J].长江流域资源与环境,2016,25(2):334-341.
Lu Xinhai, Ke Shangan. Establishment of regional water resources ecological compensation model based on ecological footprint model: Take the Yangtze River for example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016,25(2):334-341.
- [22] 金昌盛,邓仁健,刘俞希,等.长江经济带水资源生态足迹时空分析及预测[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):59-66.
Jin Changsheng, Deng Renjian, Liu Yuxi, et al. Research for spatio-temporal analysis and prediction of water resource ecological footprint in Yangtze River economic belt [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018,29(4):59-66.
- [23] 牛亚朝,罗柱,王强,等.珠三角区域水资源生态足迹动态分析与预测[J].人民珠江,2024,45(5):34-45.
Niu Yachao, Luo Zhu, Wang Qiang, et al. Dynamic analysis and prediction of ecological footprint of water resources in the Pearl River delta region [J]. Pearl River, 2024,45(5):34-45.
- [24] 邓锦山,叶生进,徐志芬,等.川东南水资源生态足迹及生态承载力时空分析研究[J].中国农村水利水电,2023(4):125-133,144.
Deng Jinshan, Ye Shengjin, Xu Zhifen, et al. Spatial and temporal analysis of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Southeast Sichuan [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(4):125-133,144.
- [25] 何杰,张士锋,李九一.粮食增产背景下松花江区农业水资源承载力优化配置研究[J].资源科学,2014,36(9):1780-1788.
He Jie, Zhang Shifeng, Li Jiuyi. The optimal allocation of agricultural water resources carrying capacity under grain production increases in Songhuajiang [J]. Resources Science, 2014,36(9):1780-1788.
- [26] 杜宇,黄成,吴传清.长江经济带工业高质量发展指数的时空格局演变[J].经济地理,2020,40(8):96-103.
Du Yu, Huang Cheng, Wu Chuanqing. The temporal and spatial pattern evolution of industrial high-quality development index in the Yangtze River economic belt [J]. Economic Geography, 2020,40(8):96-103.
- [27] 徐凯,韩鹏,刘博静.海河流域水资源开发利用状况分析[J].海河水利,2023(10):1-7.
Xu Kai, Han Peng, Liu Bojing. Development and utilization of water resources in the Haihe River basin [J]. Haihe Water Resources, 2023(10):1-7.
- [28] 黄翀,张强,陈晓宏,等.珠江流域降水干湿时空特征及气候因子影响研究[J].水文,2017,37(5):12-20,59.
Huang Chong, Zhang Qiang, Chen Xiaohong, et al. Spatio-temporal variations of dryness/wetness and influence from climate factors in Pearl River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2017,37(5):12-20,59.
- [29] 陈敏.2020年长江暴雨洪水特点与启示[J].人民长江,2020,51(12):76-81.
Chen Min. Characteristics and enlightenment of rain-storm and flood in Yangtze River in 2020 [J]. Yangtze River, 2020,51(12):76-81.
- [30] 侯琳,王勇.松花江流域第三次水资源调查评价分析[J].东北水利水电,2022,40(12):14-17.
Hou Lin, Wang Yong. Analysis of the third water resources survey and evaluation in Songhuajiang River basin [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2022,40(12):14-17.
- [31] 王庆明,赵勇,王浩,等.海河流域地表水资源衰减归因与规律[J].中国科学:地球科学,2024,54(5):1573-1587.
Wang Qingming, Zhao Yong, Wang Hao, et al. Surface water resource attenuation attribution and patterns in Hai River basin [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2024,54(5):1573-1587.