

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.001

基于统计数据的我国水资源承载力研究

黄晓家^{1,2}, 单 聪¹, 卢金锁¹, 曹 薇², 袁辉武¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089)

摘 要: 通过食品消耗的水资源量以及工业和生活等用水量,论证了我国人均基础水资源量及缺水程度等级。目前,我国总体水资源开发强度低于30%的临界强度值,但“三北”地区的水资源开发强度远大于30%,属于严重缺水,局部地区极度缺水。经研究,提出了适合我国国情的水资源缺水程度分级和水资源承载力分级,研究分析了我国各省级行政区的人均统计水资源及用水量、水资源开发利用等数据,并与世界不同国家相比较,明确了水资源不足的原因。同时,论证了人均基础水资源量 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 的合理性,并据此进行了水资源承载力的计算。计算结果表明,按我国统计的水资源量计,水资源承载力可达16亿人,若按宜居条件的水资源密度等计算,则适宜人口数为10亿人。该结果为各省级行政区的水资源承载力研究提供了依据统计数据的新方向。

关键词: 承载力; 水资源; 统计数据; 粮食

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0001-08

Water Resources Carrying Capacity in China: A Statistical Analysis

HUANG Xiao-jia^{1,2}, SHAN Cong¹, LU Jin-suo¹, CAO Wei², YUAN Hui-wu¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. China IPPR International Engineering Co. Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: This study demonstrates the per capita basic water resources and the level of water shortage in China based on the consumption of water resources by food, industrial, and domestic sectors. While the overall development intensity of water resources in China is below the critical threshold of 30%, the development intensity of water resource in the “Northwest, North and Northeast China” regions exceeds 30%, leading to severe water shortage, and some areas are extreme water shortages. This paper proposes a classification of water shortage degree and water resources carrying capacity suitable to China's national conditions, and analyzes per capita statistics of water resources and water consumption, as well as development and utilization rates across China's provincial administrative regions, comparing these data with global figures to elucidate the causes of water resource shortages. It validates the rationality of per capita basic water resources threshold of $500\text{ m}^3/(\text{cap}\cdot\text{a})$ and calculates the corresponding water resources carrying capacity. Based on these statistics, China's water resources carrying capacity is estimated to support 1.6 billion people, with a suitable population of 1 billion based on livable water

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科技专项(ZDZX2022-4)

通信作者: 黄晓家 E-mail: 13501165425@163.com

resource density conditions. This research sets a direction for utilizing statistical data in studying of water resources carrying capacity of provincial administrative regions.

Key words: carrying capacity; water resources; statistical data; grain

1992年,瑞典水资源学者Falkenmark等根据干旱区中等发达国家的人均需水量确定了水资源压力的临界值:当人均水资源量低于 $1\,000\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 时将出现慢性水资源短缺;低于 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 时将出现严重水资源短缺。依据《中国统计年鉴》,2001年—2020年我国平均人均统计水资源量为 $2\,057.2\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$,而平均人均统计年用水量为 $437.6\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$,年用水量仅为水资源量的21.3%。从宏观上看,我国似乎并不存在水资源危机,然而,我国人均统计水资源量仅为世界平均水平的25%,2020年“三北”地区平均水资源开发利用已达40.04%,远超30%的水资源开发临界强度,华北地区水资源开发利用甚至超过60%,达到64.44%,水资源短缺,且非雨季节缺水严重。受地理位置影响,我国西北地区气候干旱,水资源危机凸显;南方因气候多变,呈现局部和季节性缺水。近年来,我国境内多次发生干旱灾害,其中特大干旱及其持续性不仅会导致粮食减产和农业歉收,影响居民用水和工业发展,而且还会引起河流断流、荒漠化加剧,造成水环境容量下降和水生生物衰减等方面的严重影响^[1]。总体来看,我国面临的缺水境况异常严峻,水资源危机的风险趋大。

承载力最初是工程地质领域的概念,1798年英国人口学家Malthus首次将这一概念引入环境领域。水资源承载力作为环境承载力的重要组成部分,目前已被广泛应用于城市规划、社会发展等方面,是可持续发展的重要因素^[2]。20世纪80年代,中国科学院院士、地理学家施雅风等提出有必要在我国开展水资源承载力评价,由此我国开启了对水资源承载力的相关研究^[3]。随着人类活动对自然生态系统干扰的不断增大,对水资源承载力的研究已成为水文科学领域关注的前沿和热点,也是面向我国水安全、粮食安全及能源安全等国家重大需求亟需解决的关键与难点^[4-5],更是区域可持续发展研究领域的重要主题^[6]。目前,对水资源承载力的研究方法主要包括层次分析法^[7]、主成分分析法^[8]、DPSIRM模型^[9]、熵权法^[10]等,相对完善的指标体系有助于从多

角度为相关政策的制定提供思路。

国内现有对水资源承载力的研究主要通过构建与生态及社会相关的指标体系,并确定权重的方法进行计算分析。该方法将各种指标的重要性等同化,可能会出现权重系数不合理现象^[11],这显然无法满足对水资源的利用、规划及调配的整体需求。统计数据客观性强,以此为基础进行水资源承载力的研究,为城市水资源配置规划和节水工作的有效开展提供了新的方向。

1 水资源禀赋与承载力评价

1.1 人均计算年用水量

各省级行政区人均食品消耗量与生产各种食品所需要的水资源,共同构成了人均食品消耗用水需求。根据《中国统计年鉴2021》,我国各省级行政区2020年人均食品消耗量如图1所示。

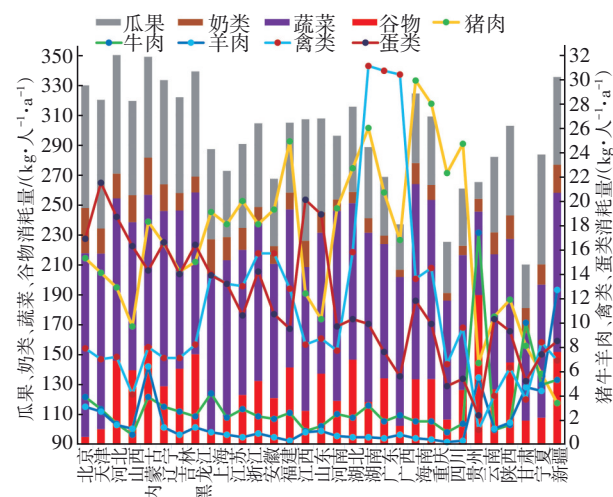


图1 2020年我国各省级行政区人均食品消耗量

Fig.1 Per capita food consumption of provincial administrative regions in China in 2020

由于气候条件、农作物种类及灌溉方式的不同,我国不同地区的食品耗水量也不同。根据相关资料^[12-13],统计了我国主要食品单位质量耗水量的平均值,具体如表1所示。

除食品在人们的日常生活中消耗大量水资源外,工业、生活及生态等对水资源的消耗量也很大,这些指标共同构成了我国的人均计算年用水量。

2020年我国人均计算年用水量及统计年用水量如表2所示。

表1 2020年我国主要食品单位质量耗水量

Tab.1 Water consumption per unit weight of main foods in China in 2020 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	谷物	羊肉	蛋类	猪肉	禽类	奶类	牛肉	蔬菜	瓜果
耗水量	700	2 400	450	1 500	1 200	250	3 600	100	150

表2 2020年我国人均计算年用水量及统计年用水量

Tab.2 Per capita calculated annual water consumption and statistical annual water consumption in China in 2020 $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$

省级行政区	食品消耗用水量	工业用水量	生活用水量	生态用水量	人均计算年用水量	人均统计年用水量
北京	169.60	13.70	78.57	78.57	340.45	185.4
天津	165.10	32.44	47.58	46.14	291.27	200.6
河北	189.99	24.38	36.17	40.06	290.60	245.2
山西	168.22	35.53	41.83	13.75	259.34	208.4
内蒙古	223.91	55.76	48.27	122.35	450.29	807.0
辽宁	184.88	39.72	59.69	17.39	301.68	303.1
吉林	183.30	41.68	55.44	47.52	327.94	485.7
黑龙江	195.50	58.34	46.99	7.25	308.08	977.6
上海	173.44	232.72	94.86	3.22	504.23	392.4
江苏	166.50	279.46	75.14	5.66	526.77	675.1
浙江	182.42	55.19	73.28	10.82	321.72	255.2
安徽	190.43	131.70	57.49	13.60	393.21	439.9
福建	177.04	98.77	79.31	22.35	377.47	441.1
江西	200.54	111.53	63.73	7.08	382.88	540.3
山东	160.00	31.38	36.89	18.79	247.06	219.5
河南	174.47	35.81	43.36	35.21	288.84	239.0
湖北	169.65	135.07	87.55	20.54	412.81	477.9
湖南	205.14	87.28	66.82	10.38	369.62	459.3
广东	209.28	63.69	85.47	4.75	363.19	322.6
广西	202.88	69.14	70.53	8.17	350.72	522.1
海南	172.38	14.82	79.05	10.87	277.12	438.5
重庆	204.83	53.29	69.80	5.30	333.21	219.2
四川	199.87	28.07	64.03	7.05	299.02	283.3
贵州	147.22	48.47	46.66	4.41	246.75	233.8
云南	175.24	34.94	53.16	9.32	272.66	330.6
西藏	249.63	32.79	90.16	8.20	380.77	885.8
陕西	154.38	27.56	47.79	13.15	242.88	229.4
甘肃	176.58	24.79	37.19	42.78	281.34	438.7
青海	165.31	40.47	50.59	18.55	274.92	410.8
宁夏	159.88	58.25	51.32	51.32	320.77	976.4
新疆	212.29	41.31	66.80	178.38	498.78	2215.6

尽管各省市食品消耗用水量的占比不尽相同,但从全国31个省市来看,食品所消耗的水资源占人均计算年用水量的比例平均为55.9%,占绝大多数,工业、生活及生态所消耗的水资源占比较低,与

我国每年农业用水量占全国统计年用水量的比例最高一致,也反映出农业用水量对全国统计年用水量的影响。

将《中国统计年鉴2021》中给出的人均统计年用水量与计算年用水量进行对比,两者的差异较大,这主要取决于粮食是仅供本土居民自产自销还是向外省市销售等。对于北京、天津、上海等省级行政区,本土粮食产量较低,由于从外省市甚至国外进口粮食,降低了其人均统计年用水量;对于黑龙江、内蒙古、新疆等省级行政区,其本土生产粮食除用于本土居民消耗外,还销往别的省市,过高的粮食产量增大了其人均统计年用水量,使其远大于人均计算年用水量,极大地降低了其本土的水资源承载力。

1.2 不同国家人均统计年用水量与水资源

表3列出了2000年—2019年不同国家人均统计水资源量及年用水量,其数据来自各国统计局、世界银行等。

表3 世界不同国家人均统计水资源量及年用水量

Tab.3 Per capita statistics of water resources and annual water consumption in different countries around the world $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$

项目	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年	2019年
中国	人均统计水资源量	2 193.9	2 151.8	2 310.4	2 026.5	1 957.7
	人均统计年用水量	435.4	432.1	450.2	442.3	428.8
美国	人均统计水资源量	8 801.0	9 446.2	9 110.1	8 786.0	8 622.0
	人均统计年用水量	2 003.3	1 916.9	1 585.7	1 387.1	1 267.9
日本	人均统计水资源量	3 338.8	3 314.5	3 306.8	3 330.9	3 339.6
	人均统计年用水量	685.7	652.3	636.3	628.3	631.2
德国	人均统计水资源量	2 511.8	2 065.0	2 462.8	1 505.8	1 396.8
	人均统计年用水量	448.1	392.1	404.0	296.8	284.8
以色列	人均统计水资源量	130	110	98	90	84
	人均统计年用水量	246.8	208.5	171.7	146.2	125.2
世界	人均统计水资源量	8 496.3	6 794.1	6 190.4	6 045.7	6 230.3
	人均统计年用水量	702.2	611.5	570.5	580.4	613.5

2000年—2019年,世界各国人均统计年用水量总体上呈逐年减少趋势,我国人均统计年用水量也始终维持在 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 以下,说明节水是世界的发展需求。对于德国、以色列,随着粮食产量的降低、喷灌及滴灌的大规模应用及“雨养农业”的普及,人均统计年用水量远低于我国。根据相关数据,2020年世界人均粮食产量为 $386\text{ kg}/(\text{人}\cdot\text{a})$,而美国则超过 $1\,600\text{ kg}/(\text{人}\cdot\text{a})$,过高的粮食产量在一定程度上推高了美国的人均统计年用水量。虽然不同国家人均统计年用水量各不相同,但是去除各种因素的影响,并未改变 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 的人均基础水资源量。以消耗量考虑,对于一个地区,若人均统计水资源量 $<500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$,水资源将难以满足每个人的基础用水需求,水资源弹性较差。事实上,这与瑞典水资源学者 Falkenmark 的研究和《城市节水规划标准》(T/CUWA 30052—2022)中的规定相吻合。因此,以 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 为基础进行缺水程度等级的论证及水资源承载力的计算具有科学性和可行性。

尽管我国节水取得了长足的进步,但与发达国家相比,仍有提升空间,我国应分类制定合理的用水和节水政策,推进城市节水、提升农业灌溉技术、提高工业用水重复利用率、采用少水甚至是无水工艺刻不容缓。

1.3 缺水程度与水资源承载力等级划分

在水文学中,对于河川径流,通常将其划分为丰水年、平水年及枯水年。通常水资源量按照多年统计水资源量的平均值确定,但平水年与枯水年水资源量的比值通常在 $1.2\sim 2.5$ 之间^[14]。按照平水年与枯水年水资源量的比值为2进行计算,当平水年水资源量超过 $1\,000\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 时,即使在枯水年,也不会缺水。因此, $1\,000\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 应为水资源紧张与缺水的分界线。

水资源开发利用率是统计年用水量与年可获得水资源量的比值。为了维系河流等水生态系统的结构和功能,河流的开发利用率不应超过河流的生态基流^[15]。我国目前将河流多年平均径流量的30%作为河流的生态基流^[16],以 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 进行计算,则水资源量应为 $1\,700\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 。若此为平水年水资源量,则枯水年水资源量需达到 $800\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$,不会出现水资源危机。另外,通常认为3倍的人均基础水资源量下不会出现缺水问题,因此将

$1\,700\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 作为水资源紧张与不缺水的分界线。

当平水年水资源量达到 $3\,000\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 时,去除流入海洋的水量之后,剩余水资源量约为 $2\,000\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$,为人均基础水资源量 $[500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})]$ 的4倍。由此计算出的枯水年水资源量仍可达到 $1\,700\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$,为不缺水。因此, $3\,000\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 是不缺水与丰水的分界线,此时水资源不会成为经济社会发展的掣肘因素。

对于部分省级行政区如北京、天津等,多年平均人均统计水资源量不足 $200\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$,《城市节水规划标准》(T/CUWA 30052—2022)创新性地将 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 作为这些地区丰水年的人均水资源量,其平水年的人均水资源量则为 $150\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 。事实上,由于人均水资源量较少,这些地区属于“极度缺水”地区。

根据上述论述及国情,对于水资源禀赋的分级,提出了新的缺水程度等级划分,具体见表4,并将其列入《城市节水规划标准》,以推动节水事业的发展。同时对于水资源承载力,也依据我国人均统计年用水量 $\leq 500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 的原则给出了分级,成果也纳入了《城市节水规划标准》,以促进各地水资源承载力的判定和节水事业的开展,具体见表5。

表4 缺水程度等级划分

Tab.4 Classification of water shortage degree

多年平均人均水资源量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	$\geq 3\,000$	$1\,700 \leq Q < 3\,000$	$1\,000 \leq Q < 1\,700$	$500 \leq Q < 1\,000$	$150 \leq Q < 500$	< 150
缺水程度	丰水	不缺水	水紧张	缺水	严重缺水	极度缺水

表5 水资源承载力等级划分

Tab.5 Classification of water resources carrying capacity

承载力等级	多年平均人均水资源量与 $500\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 之比 K_1	多年平均人均水资源量与规划年人均用水量之比 K_2
很弱	$K_1 \leq 1$	$K_2 \leq 1$
较弱		$K_2 > 1$
中等	$1 < K_1 \leq 2$	
较强	$2 < K_1 \leq 3$	
很强	$K_1 > 3$	

2 基于统计数据的水资源承载力计算

2.1 水资源及用水现状

图2列出了我国各省级行政区2011年—2020

年平均人均统计水资源及年用水量。

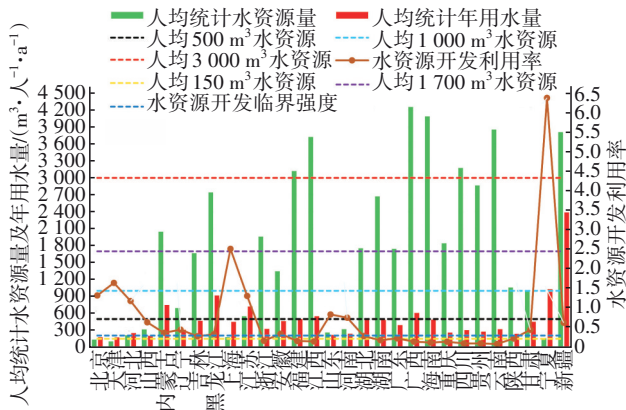


图2 2011年—2020年全国各省市平均人均统计水资源及年用水量与开发利用

Fig.2 Average per capita statistics of water resources, annual water consumption and development utilization rate in provincial administrative regions in China from 2011 to 2020

受多种因素影响,不同省级行政区的人均统计水资源量之间差距较大,其利用率也各不相同。目前,我国有8个省级行政区水资源严重短缺,且有进一步加剧的风险。对于宁夏、北京、上海等省级行政区,人均水资源短缺与人均统计年用水量高企之间矛盾尖锐,说明这些地区长期处于水资源紧缺状态。因此必须进行水资源承载力的计算,以确定全国各省级行政区的人口承载力,从而为城市管理者制定相关政策提供参考。

对于我国的西北及华北地区,由于地处秦岭—淮河一线以北,气候干旱,水资源承载力较弱,绝大多数省级行政区的水资源开发利用率超过其开发临界强度(0.3),其中宁夏、北京、天津、河北等地区甚至超过1。对于这些地区,既需要严格执行当地的节水政策,还需要采取多种引水措施,以缓解当地水资源承载力不足的现状。南方绝大多数省级行政区地处秦岭—淮河一线以南,除地处平原、经济发达、人口数量较多的江苏与上海外,其他地区水资源充足,水资源承载力较强,在无干旱等重大自然灾害下,其水资源危机出现的可能性较小。

2.2 水资源承载力计算

根据《水资源公报》,1956年—2020年我国平均统计水资源量为 $27\,577 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,若按水资源开发利用率为30%、人均计算年用水量为 $500 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ 进行计算,则我国的人口承载力峰值 $R_{\text{peak}} =$

$\frac{27\,577 \times 30\%}{500} = 16.55$ 亿人,即我国水资源足够16亿人生存。

考虑到水资源的不均匀性,《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015)提出了河网密度的概念,以衡量水资源的不均匀性或取水的便捷性对人口承载力的影响。研究认为河网密度不便于工程应用,为此提出了水资源密度的概念。为便于对比分析,水资源密度与人口密度计算公式一致,当然这里可能忽略了过境水资源的问题,这也是河流下游人口密度大的原因。

水资源密度计算公式如下:

$$\text{水资源密度} = \frac{\text{水资源量}}{\text{区域面积}} \quad (1)$$

由于各省级行政区粮食产量不同,因此其人均计算年用水量并不均为 $500 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ 。各省级行政区的实际人均计算年用水量($W_{\text{cal,real}}$)为:

$$W_{\text{cal,real}} = 500 - (W_{\text{cal}} - W_{\text{stat}}) \quad (2)$$

式中: W_{cal} 为人均计算年用水量, $\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$; W_{stat} 为人均统计年用水量, $\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ 。

1997年—2020年中平水年为2013年,统计水资源量为 $27\,957.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。以2013年为标准年,则各省级行政区人口承载力(R_{cal})计算公式为:

$$R_{\text{cal}} = \frac{W_{\text{swr}} \times 30\%}{W_{\text{cal,real}}} \quad (3)$$

式中: W_{swr} 为统计水资源量。

水资源系统为非闭合系统,在研究边界上存在水量交换,这部分水量即为过境水量^[17]。以山东省为例,其2020年统计年用水量已达统计水资源量的60%,水资源严重超采,但由于其地处黄河下游,入境水资源量达 $459.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,甚至超过其本土水资源量($375.3 \times 10^8 \text{ m}^3$),大量的过境水量提高了山东的水资源承载力,降低了水资源开发利用率。然而,过境水利用需修建水利工程,其投资大、成本高,且《水资源评价导则》(SL/T 238—1999)中对区域水资源量的评价不包括过境水资源量,因此在计算过程中未考虑过境水量,仅按统计水资源量进行计算。

对于现有人口多于人口承载力的省级行政区,如北京、天津等地区,其人口取值即为人口承载力。而对于人口承载力多于现有人口的省级行政区,其人口取值应根据耕地、气候、水资源等因素综合考

量。如对于西藏、青海等地区,气候恶劣、平均海拔在3 000 m以上、耕地较少,以现有人口数据计入其人口取值;而对于黑龙江等地区,耕地较多,同时为

河流湖网交错地区,以人口承载力数据计入其人口取值。平水年各省级行政区的水资源密度、人口密度及取值见表6。

表6 平水年各省级行政区的水资源密度、人口密度及取值

Tab.6 Water resource density, population density and their values in provincial administrative regions in normal water year

项目	统计水资源量/ 10^8 m^3	人均统计水资源量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	水资源密度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$	实际人均计算年用水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	预测人口密度/ $(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	现状人口密度/ $(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	人口承载力/ 万人	现有人口/ 万人	人口取值/ 万人
北京	24.8	117.3	0.15	344.95	131.63	1 333.94	216	2 189	216
天津	14.6	99.2	0.12	409.33	89.77	1 163.59	107	1 387	107
河北	175.9	239.9	0.09	454.60	61.76	397.02	1 161	7 464	1 161
山西	126.6	348.8	0.08	449.06	54.13	223.29	846	3 490	846
内蒙古	959.8	3 842.3	0.08	500	20.77	20.77	5 759	2 403	2 403
辽宁	463.2	1 055.1	0.31	500	187.77	287.50	2 779	4 255	2 779
吉林	607.4	2 207.9	0.32	500	128.01	128.01	3 644	2 399	2 399
黑龙江	1 419.6	3 701.7	0.30	500	180.08	67.04	8 518	3 171	8 518
上海	28.0	115.9	0.44	388.17	340.69	3 924.29	216	2 488	216
江苏	283.5	357.1	0.28	500	166.76	831.08	1 701	8 477	1 701
浙江	931.3	1 693.9	0.90	433.48	619.71	621.92	6 445	6 468	6 445
安徽	585.6	971.1	0.42	500	251.00	436.07	3 514	6 105	3 514
福建	1 151.9	3 052.2	0.93	500	335.56	335.56	6 911	4 161	4 161
江西	1 424	3 149.0	0.85	500	391.37	270.76	8 544	4 519	6 532
山东	291.7	299.7	0.19	472.44	118.11	648.28	1 852	10 165	1 852
河南	213.1	226.4	0.13	450.16	85.54	598.86	1 420	9 941	1 420
湖北	790.1	1 362.5	0.43	500	255.03	309.04	4 741	5 745	4 741
湖南	1 582	2 364.4	0.75	500	380.97	313.74	9 492	6 645	8 069
广东	2 263.2	2 126.3	1.27	459.41	710.81	710.81	14 779	12 624	12 624
广西	2 057.3	4 359.6	0.87	500	211.77	211.77	12 344	5 019	5 019
海南	502.1	5 610.1	1.46	500	293.33	293.33	3 013	1 012	1 012
重庆	474.3	1 597.0	0.58	385.99	389.44	389.44	3 686	3 209	3 209
四川	2 470.3	3 047.1	0.51	484.28	172.24	172.24	15 303	8 371	8 371
贵州	759.4	2 168.5	0.43	487.05	219.08	219.08	4 678	3 858	3 858
云南	1 706.7	3 641.3	0.44	500	122.97	122.97	10 240	4 722	4 722
西藏	4 415.7	141 528.8	0.37	500	3.04	3.04	26 494	366	366
陕西	353.8	940.0	0.17	486.52	106.03	192.18	2 182	3 955	2 182
甘肃	268.9	1 041.4	0.06	500	37.86	58.71	1 613	2 501	1 613
青海	645.6	11 169.6	0.09	500	8.30	8.30	3 874	593	593
宁夏	11.4	174.3	0.02	500	13.13	139.19	68	721	68
新疆	956.0	4 222.6	0.06	500	15.74	15.74	5 736	2 590	2 590
全国	27 957.9	2 054.6	0.29		108.74	148.64		141 212	103 307

对于内蒙古、青海、新疆等省级行政区,人均统计水资源量均超过 $3 000 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$,然而,其水资源密度均未超过 $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^2$,说明人少地多,也限制了人口的进一步扩张。以全国平均水资源密度($0.29 \text{ m}^3/\text{m}^2$)作为水资源密度的平均值,北京、天津、河北、山西、河南、山东、陕西等地人均水资源量在 $500 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ 左右,水资源密度小于平均值,水资源稀少,说明水资源承载力有限,现在人口已经远大于承载

力;对于广东、海南等省级行政区,水资源密度甚至超过 $1 \text{ m}^3/\text{m}^2$,反映了这些地区水资源丰富,水资源承载力高。另外,由于未考虑过境水量的有效应用,对于长江和珠江流域的下游地区,以水资源为承载力的计算结果可能偏低。

虽然我国的水资源量可承载16亿人,但会导致部分省级行政区水资源不足、水资源开发利用率高,对生态环境也将造成巨大伤害。事实上,根据

计算,我国适宜的水资源承载力应为10亿人,此时人口密度也将降至110人/km²以下,下降幅度达到26.85%,我国的水资源与统计年用水量之间的矛盾及水资源紧张也将得到有效缓解。

3 结论

为保障人民的用水需求,通过食品所消耗的水资源量以及工业和生活等用水情况论证了我国人均基础水资源量及缺水程度等级,通过分析研究我国各省市的人均统计水资源及年用水量和水资源开发利用率,并与世界不同国家比较,明确了水资源不足的原因,同时进行了水资源承载力的计算。

① 我国总体水资源开发强度低于30%的临界强度值,根据水资源开发强度和水资源密度,我国“三北”地区严重缺水。

② 从人类生存基础的食物出发,论证了人均基础水资源量为500 m³/(人·a)的合理性和科学性,并据此提出了缺水与严重缺水的分界线,同时提出了水资源缺水程度和水资源承载力等级的划分原则。

③ 提出了水资源密度的概念,水资源密度低的地区说明水资源匮乏,不宜居住,如西北干旱地区尽管人均水资源量较高,但水资源密度<0.10 m³/m²,而我国平均水资源密度为0.29 m³/m²,因此低于该值认为水资源承载力弱。

④ 受粮食生产的影响,各省级行政区的人均计算年用水量与统计年用水量之间存在明显差异。按水资源承载力计算,我国水资源承载力达到16亿人,而根据水资源密度适宜人口应为10亿人。各省级行政区的人口承载力及水资源密度差异明显,受水资源分布影响,人员分布与人口承载力也受到极大限制。

参考文献:

- [1] 夏军,刘春蓁,刘志雨,等.气候变化对中国东部季风区水循环及水资源影响与适应对策[J].自然杂志,2016,38(3):167-176.
XIA Jun, LIU Chunzhen, LIU Zhiyu, et al. Impact of climate change and adaptive strategy on terrestrial water cycle and water resources in East Monsoon Area of China [J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38 (3): 167-176 (in Chinese).
- [2] 张晨光,文章,龚健,等.可持续发展视角下基于水量

供需平衡的水资源承载力分析——以青海省大通县为例[J].安全与环境工程,2022,29(2):237-247.

ZHANG Chenguang, WEN Zhang, GONG Jian, et al. Carrying capacity of water resources based on water supply and demand balance from the perspective of sustainability—a case study of Datong County, Qinghai Province [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29 (2): 237-247 (in Chinese).

- [3] 封志明,李鹏.承载力概念的源起与发展:基于资源环境视角的讨论[J].自然资源学报,2018,33(9):1475-1489.

FENG Zhiming, LI Peng. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: a view of natural resources and environment [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33 (9): 1475-1489 (in Chinese).

- [4] 丁小平.基于层次分析法的甘肃省水环境承载力研究[D].兰州:兰州大学,2021.

DING Xiaoping. Study on Water Environmental Carrying Capacity in Gansu Province Based on Analytic Hierarchy Process Method [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021 (in Chinese).

- [5] 王晓玮,邵景力,崔亚莉,等.基于DPSIR和主成分分析的阜康市水资源承载力评价[J].南水北调与水利科技,2017,15(3):37-42,48.

WANG Xiaowei, SHAO Jingli, CUI Yali, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Fukang based on DPSIR and principal component analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15 (3): 37-42, 48 (in Chinese).

- [6] 张爱国,李鑫,张义明,等.城市水资源承载力评价指标体系构建——以天津市为例[J].安全与环境学报,2021,21(4):1839-1848.

ZHANG Aiguo, LI Xin, ZHANG Yiming, et al. Construction of the evaluation index system for the urban water resources carrying capacity—by taking Tianjin as a case study sample [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21 (4): 1839-1848 (in Chinese).

- [7] 夏军.气候变化对水资源影响的研究与展望[C]//中国自然资源学会.河流开发、保护与水资源可持续利用——第六届中国水论坛论文集.成都:中国自然资源学会,2008:197-203.

XIA Jun. Research and prospect of the impact of climate change on water resources [C]// China Society of Natural Resources. River Development, Protection and Sustainable Utilization of Water Resources—

- Proceedings of the 6th China Water Forum. Chengdu: China Society of Natural Resources, 2008: 197-203 (in Chinese).
- [8] 张翔, 夏军, 贾绍凤. 干旱期水安全及其风险评估研究[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1138-1142.
- ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shaofeng. Water security of drought period and its risk assessment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (9): 1138-1142 (in Chinese).
- [9] 李桂君, 黄道涵, 李玉龙. 水-能源-粮食关联关系: 区域可持续发展研究的新视角[J]. 中央财经大学学报, 2016, 36(12): 76-90.
- LI Guijun, HUANG Daohan, LI Yulong. Water-energy-food nexus (WEF-Nexus): new perspective on regional sustainable development [J]. Journal of Central University of Finance & Economics, 2016, 36 (12): 76-90 (in Chinese).
- [10] 王晓艳, 章四龙, 刘磊. 基于AHP-熵权法的水环境承载力模糊综合评价[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(9): 206-212.
- WANG Xiaoyan, ZHANG Silong, LIU Lei. Fuzzy comprehensive evaluation of water environmental carrying capacity based on AHP-Entropy method [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44 (9): 206-212 (in Chinese).
- [11] 李亮. 评价中权重系数理论与方法比较[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- LI Liang. Weights Theory and Weighting Methods Comparison in the Evaluation [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [12] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, *et al.* The Water Footprint Assessment Manual [M]. USA: Earthscan, 2011.
- [13] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1826-1835.
- CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, *et al.* Agriculture water utilization assessment based on water footprint of grain production evaluation in irrigated farmland of China [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29 (11): 1826-1835 (in Chinese).
- [14] 谢平, 陈广才, 夏军. 基于降雨径流关系分析的非一致性年径流序列频率计算方法[C]//中国水利学会. 中国水利学会2005学术年会论文集——节水型社会建设的理论与实践. 青岛: 中国水利学会, 2005: 406-412.
- XIE Ping, CHEN Guangcai, XIA Jun. Frequency calculation method of inconsistent annual runoff series based on the analysis of rainfall-runoff relationship [C]// Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the 2005 Academic Annual Meeting of the Chinese Hydraulic Engineering Society: Theory and Practice of Building a Water Saving Society. Qingdao: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2005: 406-412 (in Chinese).
- [15] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(6): 401-411.
- CHEN Ang, SUI Xin, LIAO Wengen, *et al.* Review study on instream ecological base flow in China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14 (6): 401-411 (in Chinese).
- [16] 贾绍凤, 柳文华. 水资源开发利用率40%阈值溯源与思考[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 87-89.
- JIA Shaofeng, LIU Wenhua. Tracing and thinking about 40% threshold value of water resources development and utilization ratio [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 87-89 (in Chinese).
- [17] 夏继勇. 过境水影响区域水资源承载力评价方法及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 40-43, 47.
- XIA Jiyong. Research on evaluation method of carrying capacity of water resources in transit water affected area [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (4): 40-43, 47 (in Chinese).

作者简介:黄晓家(1964—),男,山东莱西人,大学本科,教授级高级工程师,总工程师,全国工程勘察设计大师,主要研究方向为建筑与工业给水排水、城市节水、海绵城市、特殊消防设计、智慧消防、智慧机电、智慧医院等。

E-mail:13501165425@163.com

收稿日期:2023-08-17

修回日期:2023-10-15

(编辑:丁彩娟)