

中国水资源行为二氧化碳排放当量及空间非均衡性

蒋国栋¹, 左其亭^{1,2}, 赵晨光¹, 马军霞¹, 张志卓¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:采用二氧化碳排放当量分析(CEEA)方法计算了中国除港澳台外的31个省级行政区涉及水资源开发、配置、利用与保护4个维度的16种水资源行为二氧化碳排放当量(CEE),并基于Dagum基尼系数探究了中国水资源行为CEE的空间非均衡性及其来源。结果表明:2020年中国水资源行为CEE总量为13 819.84万t,开发、配置、利用与保护4个维度水资源行为CEE总量分别为21 297.68万、4 371.45万、-3 141.71万、-8 707.58万t;水资源行为CEE整体呈现出由东向西递减的空间分布规律,江苏和广东是水资源行为CEE最大的省份;多数水资源行为CEE具有较强的空间非均衡性,其中水力发电行为CEE的Dagum基尼系数为0.73,其CEE空间非均衡性最强,地区间净值差异是水资源行为CEE空间非均衡性的主要贡献因素。

关键词:水资源行为;碳中和;二氧化碳排放当量;Dagum基尼系数;空间非均衡性

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)02-0072-09

Carbon dioxide emission equivalent and spatial disequilibrium of water resource behaviors in China//JIANG Guodong¹, ZUO Qiting^{1,2}, ZHAO Chenguang¹, MA Junxia¹, ZHANG Zhizhuo¹ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The carbon dioxide emission equivalent analysis (CEEA) method was used to calculate the carbon dioxide emission equivalent (CEE) of water resource behaviors in China's 31 provincial administrative regions excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan, involving 16 kinds of water resource behaviors in four dimensions, including water resource development, allocation, utilization, and protection. The spatial disequilibrium of CEE of water resource behaviors in China and its sources were explored using the Dagum Gini coefficient. The results show that the total CEE of water resource behaviors in China was 138.1984 million t in 2020, and the total CEEs of water resource behaviors in the four dimensions of development, allocation, utilization, and protection were 212.9768 million, 43.7145 million, -31.4171 million, and -87.0758 million t, respectively. CEE of water resource behaviors generally showed a decreasing spatial distribution pattern from east to west, and Jiangsu and Guangdong had the highest CEE of water resource behaviors. CEE of most water resource behaviors showed strong spatial disequilibrium, and the Dagum Gini coefficient of CEE for hydropower behavior was 0.73, showing the strongest spatial disequilibrium of CEE. The inter-regional net value difference was the main contributing factor to the spatial disequilibrium of CEE of water resource behaviors.

Key words: water resource behavior; carbon neutrality; carbon dioxide emission equivalent; Dagum Gini coefficient; spatial disequilibrium

我国已将2060年实现“碳中和”作为应对气候变化的中长期国家战略目标^[1],水资源领域是助推“碳中和”战略目标实现的关键领域之一^[2]。一方面,生态系统的构成离不开水资源的深度参与,生态系统的碳汇能力依赖于水资源提供基础支撑;另一方面,水资源活动大多涉及能源消耗,具有显著的碳排放效应。系统测算中国水资源行为二氧化碳排放

当量(carbon dioxide emission equivalent, CEE)并开展空间非均衡性分析,对推动各地区尽快实现水资源领域的“碳中和”目标意义重大。

针对水资源行为产生的二氧化碳排放研究,国内外常用的量化方法有投入产出法^[3]、生命周期评价法^[4]、碳排放因子评估法^[5]、二氧化碳排放当量分析(carbon dioxide emission equivalent analysis,

基金项目:国家自然科学基金项目(52279027);国家重点研发计划项目(2021YFC3200201)
作者简介:蒋国栋(1999—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: jiangguodong1212@163.com
通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

CEEA)方法^[6]等。如Luo等^[7]基于多区域投入产出模型探讨了京津冀城市群的“水-碳”关系;Yue等^[8]基于生命周期评价法评估了深圳市生活用水系统的温室气体减排潜力;闫旭等^[9]基于污染物削减量的排放因子法分析了中国城镇污水处理厂温室气体排放的时空分布特征;左其亭等^[6]基于CEEA方法计算了河南省16种水资源行为CEE。针对二氧化碳排放的空间非均衡特征分析,大多数研究对二氧化碳排放的空间差异进行了描述性分析^[10],或引入变异系数等方法量化其空间差异程度^[11]。如刘华军等^[12]基于中国省级碳排放数据,采用变异系数方法对中国二氧化碳的空间差异进行分析。也有学者引入基尼系数分析二氧化碳排放的空间差异,并解析其差异来源^[13-14]。如戴小文等^[15]采用Dagum基尼系数分析了2000—2020年中国除港澳台外的31个省级行政区(以下简称“省区”)畜牧业碳排放区域间的差异程度,并解析了空间差异来源。

现有研究多是计算特定水资源行为CEE,但从不同维度系统全面计算中国水资源行为CEE的研究及探究不同水资源行为CEE空间非均衡特征的研究依然缺乏。鉴于CEEA方法提供了较为全面的水资源行为CEE计算函数表^[6],Dagum基尼系数可以明确空间非均衡性的来源,并能有效解决样本间存在的交叉重叠问题^[16],本文根据自然地理特征和经济发展水平将中国除港澳台外的31个省区划分为8个地区^[17],分别为北部沿海(北京、天津、河北、山东)、黄河中游(山西、内蒙古、河南、陕西)、东北地区(辽宁、吉林、黑龙江)、东部沿海(上海、江苏、浙江)、长江中游(安徽、江西、湖北、湖南)、南部沿海(福建、广东、海南)、西南地区(广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏)、西北地区(甘肃、青海、宁夏、新疆)。采用CEEA方法从水资源开发、配置、利用和保护4个维度分别计算了各省区和不同地区水资源行为CEE,并利用Dagum基尼系数探究了8个地区CEE的空间非均衡性及其来源,以期为中国不同省区的水资源管理部门制定水资源领域碳减排政策提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

中国幅员辽阔,拥有丰富的资源禀赋和复杂的气候条件。但中国水资源空间分布不均,整体上呈现东南多、西北少的空间格局,多年人均水资源量不足2100 m³,仅为全球平均水平的1/3^[18],水资源供需矛盾较为突出。2020年中国碳排放量约为99亿t,占全球碳排放总量的约31%,碳排放基数较

大且存在持续增长的态势^[19],在一定程度上影响了经济社会的可持续发展。水资源领域作为推动实现“碳中和”目标的重要领域^[20],探究中国不同水资源行为CEE并分析其空间非均衡性及来源对中国碳减排工作的开展具有重要意义。

1.2 数据来源

本文水资源行为涉及的指标包括地表水供水量、地下水供水量、水库蓄水量、生水处理量、自来水配水量、跨流域调水量、生活用水量、工业用水量、农业实际灌溉面积、4种人工生态用水的土地面积(城市园林、城市绿地、水域及湿地)、水力发电量、节约用水量、污水处理量以及再生水回用量等。上述指标数据来源包括《中国水资源公报》《中国水利统计年鉴》《中国海水利用报告》《中国水文年报》《中国城市建设统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》与2020年31个省区的《水资源公报》等资料。中国2020年度二氧化碳排放量数据来自2021年《bp世界能源统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 CEEA方法

水资源行为是与水资源开发、配置、利用、保护等相关的一系列活动的统称,水资源行为CEE为由水资源行为直接或间接导致的二氧化碳排放量^[6,21]。CEEA方法提供了一套相对完整的函数表,用于计算不同水资源行为CEE^[6,21]。本文基于CEEA方法从水资源开发、配置、利用和保护4个维度选择16种水资源行为,并计算其CEE。其中,水资源开发行为包括地表水提升行为(D1)、地下水抽取行为(D2)、水库蓄水行为(D3)、生水处理行为(D4)和海水淡化行为(D5);水资源配置行为包括城乡自来水分配行为(A1)和跨流域调水行为(A2);水资源利用行为包括生活用水行为(U1)、工业用水行为(U2)、农业用水行为(U3)、生态用水行为(U4)和水力发电行为(U5);水资源保护行为包括节约用水行为(P1)、污水收集行为(P2)、污水处理行为(P3)和再生水回用行为(P4)。

2.2 Dagum基尼系数

Dagum基尼系数将样本空间非均衡性分解为地区内差异和地区间差异,其中地区间差异包括地区间净值差异和受地区间交叉项影响的超变密度,它不仅明确总体差异的来源,还能够有效识别由不同地区间样本的交叉重叠现象引起的空间差异(地区间超变密度)^[16]。地区间样本的交叉重叠现象由样本组划分不均匀所导致,其表现为低值地区内存在部分高值样本,且低值地区内高值样本大于高值

地区内的部分低值样本^[22]。本文采用 Dagum 基尼系数探究中国水资源行为 CEE 空间非均衡特征,其计算公式为

$$G = \frac{1}{2n^2\bar{y}} \sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_m} |y_{ij} - y_{mr}| \tag{1}$$

式中: y_{ij} 、 y_{mr} 分别为地区*i*、*m*内第*j*、*r*省区水资源行为 CEE;*n* 为省区数量;*k* 为地区数量; n_i 、 n_m 分别为地区*i*和*m*内省区数量; $\bar{y}$ 为各省区水资源行为 CEE 的均值。

总体基尼系数 *G* 可以分解为 3 个分量:地区内差异(*G_w*)、地区间净值差异(*G_{nb}*)和超变密度(*G_t*),满足 *G*=*G_w*+*G_{nb}*+*G_t*,各分量计算公式为

$$G_w = \sum_{i=1}^k G_i p_i s_i \tag{2}$$

$$G_{nb} = \sum_{i=2}^k \sum_{m=1}^{i-1} G_{im} (p_i s_m + p_m s_i) D_{im} \tag{3}$$

$$G_t = \sum_{i=2}^k \sum_{m=1}^{i-1} G_{im} (p_i s_m + p_m s_i) (1 - D_{im}) \tag{4}$$

其中 $G_i = \frac{1}{n_i^2} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} |y_{ij} - y_{ir}| / 2\bar{y}_i$
 $p_i = n_i / n \quad s_i = n_i \bar{y}_i / (n \bar{y})$

式中:*G_{im}*为地区*i*与地区*m*间的基尼系数;*D_{im}*为地区*i*与地区*m*间水资源行为 CEE 的相对影响; $\bar{y}_i$ 为地区*i*内各省区水资源行为 CEE 的平均值。

3 结果与分析

3.1 水资源行为 CEE 分析

通过 CEEA 方法和相关数据,计算得到 2020 年 31 个省区 16 种水资源行为 CEE,进而求和得到中国 8 个地区水资源行为 CEE 总量,结果见表 1。2020 年中国水资源行为 CEE 总量为 13819.84 万 t,其中二氧化碳排放量为 93 762.11 万 t,吸收量为 79 942.27 万 t。中国水资源行为产生的二氧化碳排放量占中国二氧化碳排放总量的 9.47%。

3.1.1 水资源开发行为

2020 年全国水资源开发行为 CEE 总量为 21 297.68 万 t。其中,D3 的贡献最大,为 7 589.83 万 t,占比高达 35.63%;其次是 D1 为 6 352.42 万 t,占比 29.83%;D2 与 D4 的贡献分别为 3 108.29 万和 3 954.71 万 t;CEE 最小的是 D5,为 292.43 万 t,仅占水资源开发行为 CEE 总量的 1.4%。

长江中游与东部沿海 D1 产生的 CEE 分别为 1 262.68 万和 1 190.44 万 t,在全国 8 个地区中位居前两,而北部沿海 D1 产生的 CEE 最少,为 464.39 万 t。原因在于长江中游与东部沿海地表水资源丰富,地表水利用占比远高于北部沿海。北部

沿海 D2 产生的 CEE 最多,为 819.75 万 t,南部沿海与西南地区 D2 产生了较少的 CEE,均低于 50 万 t,东部沿海 D2 产生的 CEE 在全国 8 个地区中最少,仅 12.27 万 t,北部沿海较高的地下水开发利用程度是导致该现象的主要原因。D3 在西南地区产生的 CEE 最多,达 1 807.78 万 t,其次为长江中游,为 1 650.82 万 t,原因在于这两个地区的水能资源丰富,水库数量和整体容量远高于其他地区。D4 在东部沿海产生的 CEE 最多,为 1 061.67 万 t,西北地区最少,为 119.54 万 t。进一步分析认为,生水处理主要针对生活及工业用水,东部沿海工业规模庞大且人口众多,对生水处理的需求量较大,其 D4 产生了较多的 CEE;而西北地区地广人稀,工业发展水平相对落后,其 D4 产生的 CEE 较少。中国海水淡化主要集中在沿海 9 个省区^[23],因此 D5 产生的 CEE 仅存在于北部沿海、东部沿海、东北地区以及南部沿海 4 个地区,依次为 193.61 万、61.60 万、20.66 万、16.56 万 t。

从省区尺度来看,D1 在江苏产生的 CEE 位居全国之首,青海 D1 产生了最少的 CEE,这是由于青海人口密度不高,水资源利用总量相对较小、强度相对较低。D2 在新疆产生的 CEE 最多,黑龙江次之;2020 年新疆地下水供给量为 124.3 亿 m³,仅次于黑龙江(129.4 亿 m³),但新疆地下水埋深较大,地下水抽取行为会消耗更多能量,进而产生更多二氧化碳排放。湖北是 D3 产生 CEE 最多的省区,上海排名最后,D3 产生的 CEE 空间分布与各省区水库数量和库容大小有密切关系。D4 在江苏与广东两省产生的 CEE 远超其他省区,在青海、西藏、海南 3 省区产生的 CEE 均不足 20 万 t。受工业发展水平及人口规模驱动,江苏和广东两省工业及人口规模较大,对生水处理的需求量较大,因此两省 D4 产生的 CEE 较多。沿海 9 个省 D5 产生的 CEE 由大到小依次为山东、河北、浙江、天津、辽宁、广东、福建、海南和江苏。

3.1.2 水资源配置行为

2020 年全国水资源配置行为 CEE 总量为 4 371.45 万 t。其中,A1 产生的 CEE 为 2 636.02 万 t,是水资源配置行为 CEE 的主要来源,占比为 60.3%;A2 产生的 CEE 为 1 735.43 万 t,占比为 39.7%。

A1 在东部沿海产生的 CEE 最多,为 725.56 万 t,西北地区最少,为 80.88 万 t。城乡自来水主要配置为工业与生活用水,而西北地区以农业为主要产业^[24],自来水供应主要集中在农业和生活两个方面,因此其 A1 产生的 CEE 较低。A2 在北部沿海产生的 CEE 最多,为 1 062.86 万 t,其次是黄

表 1 31 个省区不同水资源行为 CEE																	单位: 万 t
Table 1 CEEs of different water resource behaviors in 31 provincial administrative regions																	unit: 10 ⁴ t
地区	省区	开发行为					配置行为		利用行为					保护行为			
		D1	D2	D3	D4	D5	A1	A2	U1	U2	U3	U4	U5	P1	P2	P3	P4
北部沿海	北京	25.04	49.25	60.37	51.92	0.00	36.98	44.60	798.56	125.20	-37.38	-83.17	-28.41	-4.34	1.99	-268.57	-31.17
	天津	33.53	17.29	31.79	30.05	57.55	20.61	140.78	328.32	197.79	-107.25	-84.04	-0.25	-0.03	1.23	-157.19	-12.82
	河北	155.15	427.63	265.11	128.18	62.19	83.25	327.30	1466.47	837.96	-1 592.67	-214.04	-37.61	-3.22	2.05	-248.28	-33.01
	山东	250.67	325.57	237.92	198.70	73.87	134.66	550.17	2 090.87	1 482.86	-1 862.93	-492.13	-21.47	-17.10	4.05	-484.72	-32.54
黄河中游	山西	69.50	151.10	87.45	73.64	0.00	48.21	6.24	785.71	549.08	-586.86	-84.16	-115.92	-7.64	1.11	-140.19	-18.06
	内蒙古	179.75	208.15	222.61	65.90	0.00	42.69	0.00	614.18	573.46	-1 047.33	-1 055.13	-142.17	-2.78	0.72	-94.04	-14.70
	河南	204.01	268.01	509.51	206.01	0.00	123.45	441.54	2 186.75	1 512.95	-1 830.65	-268.01	-347.58	-7.98	2.15	-284.39	-22.08
	陕西	96.87	171.97	124.18	80.33	0.00	54.26	0.01	928.27	477.06	-436.23	-107.22	-317.58	-5.77	1.44	-184.82	-12.42
东北地区	辽宁	121.85	89.15	435.23	109.59	20.66	72.04	0.00	1 241.12	710.83	-496.25	-286.50	-140.19	-4.18	3.35	-447.33	-9.72
	吉林	107.91	85.52	317.36	49.02	0.00	30.27	0.00	523.75	341.59	-556.08	-220.92	-232.63	-1.80	1.13	-189.19	-3.85
	黑龙江	298.42	453.93	230.71	84.47	0.00	54.98	0.00	782.73	759.60	-1 821.22	-1 122.30	-79.30	-6.54	1.26	-172.80	-4.34
东部沿海	上海	154.55	0.00	5.55	200.45	0.00	142.34	0.00	947.21	2 312.05	-61.60	-135.17	0.00	-25.92	2.21	-312.81	-0.16
	江苏	817.99	11.39	36.04	685.48	0.79	465.34	40.41	2 616.18	8 770.69	-1 504.81	-770.28	-79.75	-20.57	4.45	-684.85	-17.32
	浙江	217.89	0.88	426.92	175.74	60.81	117.88	34.30	1 665.98	1 225.76	-518.73	-283.14	-518.33	-10.67	2.95	-491.82	-5.47
	安徽	370.01	72.67	227.10	283.32	0.00	187.70	37.66	1 627.38	3 202.02	-1 465.90	-438.65	-164.13	-9.22	2.12	-301.18	-9.78
长江中游	江西	360.07	16.95	358.08	187.45	0.00	118.34	2.05	1 285.84	1 936.72	-683.39	-321.49	-359.18	-1.69	1.09	-161.65	-3.59
	湖北	203.54	3.76	644.23	147.38	0.00	102.22	0.82	923.90	1 451.71	-1 041.14	-495.03	-4 083.46	-5.49	1.36	-433.25	-0.30
	湖南	329.06	10.60	421.40	175.32	0.00	122.06	0.00	1 388.68	1 612.24	-974.98	-361.29	-1 422.10	-22.34	1.72	-359.74	-2.69
	福建	193.41	7.40	153.81	124.94	3.12	73.75	0.00	954.03	1 125.09	-340.01	-164.73	-723.30	-4.25	1.03	-219.52	-1.99
南部沿海	广东	498.07	29.03	406.34	372.36	11.92	250.18	90.46	3 791.43	2 581.28	-638.57	-619.58	-707.56	-28.30	6.73	-1 208.28	-4.73
	海南	55.06	2.91	103.15	19.03	1.52	12.93	0.00	299.21	48.79	-86.92	-73.69	-41.35	-0.58	0.31	-54.54	-0.40
	广西	240.86	14.92	481.91	104.77	0.00	70.00	0.00	1 043.87	841.96	-582.66	-225.27	-1 523.27	-0.81	0.95	-230.75	-2.17
西南地区	重庆	81.32	3.59	112.79	77.07	0.00	52.62	0.00	818.97	541.69	-168.26	-112.06	-696.60	0.00	1.16	-210.98	-5.95
	四川	131.71	6.85	250.94	69.10	0.00	45.56	0.00	930.58	341.93	-978.26	-562.65	-8 779.08	-3.03	0.95	-392.52	-0.65
	贵州	114.21	4.72	444.23	74.59	0.00	52.45	0.00	685.43	617.03	-378.98	-89.30	-2 060.45	-5.13	0.80	-139.71	-1.33
	云南	124.42	7.10	489.78	53.52	0.00	35.86	6.60	578.48	344.63	-653.31	-165.86	-7 337.82	-1.28	0.58	-164.86	-1.97
	西藏	27.93	7.06	28.13	6.84	0.00	4.51	0.00	46.63	29.59	-94.49	-2 130.87	-174.03	0.00	0.06	-14.70	-0.11
西北地区	甘肃	100.56	72.26	96.88	29.43	0.00	19.84	12.48	338.53	191.10	-469.77	-352.43	-1 256.38	-1.75	0.38	-70.81	-6.87
	青海	8.55	5.65	117.22	3.79	0.00	2.44	0.00	35.81	27.34	-73.70	-1 574.94	-1 484.92	-0.03	0.05	-27.60	-0.30
	宁夏	104.10	13.48	33.23	20.04	0.00	12.93	0.00	152.38	173.00	-208.94	-56.23	-55.78	-1.02	0.30	-40.40	-0.84
	新疆	676.40	569.49	229.84	66.28	0.00	45.66	0.00	811.18	411.22	-1 883.32	-1 456.06	-664.87	-1.82	0.63	-92.98	-6.81

河中游,为 447.79 万 t,南水北调工程、引滦工程等大型跨流域调水工程的建设是两个地区 A2 产生 CEE 较高的主要原因。

从省区尺度看,江苏是 A1 产生 CEE 最多的省份,青海排名最低。北部沿海 A2 产生的 CEE 主要集中在山东与河北两省,占比分别为 51.76% 和 30.76%,黄河中游 A2 产生的 CEE 主要来自河南,占比高达 98.6%。

3.1.3 水资源利用行为

2020 年全国水资源利用行为 CEE 总量为-3 141.71 万 t。其中,U2 是二氧化碳排放效应最强的水资源利用行为,产生的 CEE 为35 354.25 万 t,U1 次之,产生的 CEE 为32 688.42 万 t;U3 同时具有二氧化碳排放和吸收效应,但吸收效应大于排放效应,CEE 计算结果为-23 182.59 万 t;U4 也具有二氧化碳吸收效应,其产生的 CEE 为-14 406.34 万 t;U5 减少了火电对于化石燃料的消耗,间接具有二氧化碳吸收效应,共产生 CEE 为-33 595.46 万 t。

大部分地区 U1 都产生了较多的 CEE,其中东部沿海、长江中游、南部沿海均大于5 000 万 t,而西

北地区仅为1 337.9 万 t,远小于其他地区。不同地区人口密度的差异在 U1 产生的 CEE 空间分布特征上有所体现。U2 在东部沿海产生的 CEE 为 12 308.51 万 t,远超其他地区,原因是东部沿海工业规模远大于其他地区,工业用水强度较大;西北地区 U2 产生的 CEE 最少,仅802.65 万 t。长江中游省区农业灌溉面积较大,U3 吸收的二氧化碳在全国 8 个地区中最多,为4 165.40 万 t。西北地区 U4 的二氧化碳吸收量最大,为3 439.65 万 t,西南地区次之,为 3 286.00 万 t,主要原因在于这两个地区的湿地和水域面积远大于其他地区^[25]。西南地区 U5 的二氧化碳吸收量最大,为20 571.24 万 t,是处于第二位长江中游二氧化碳吸收量(6 028.88 万 t)的 3 倍多,北部沿海最少,仅为87.73 万 t。全国 8 个地区中,西南地区的水电资源最为丰富^[26-27],水力发电量大,因而其 U5 发挥了显著的二氧化碳吸收效应。

广东和江苏分别是 U1 和 U2 产生 CEE 最多的省区,两种水资源利用行为产生 CEE 最少的省区为青海。新疆 U3 二氧化碳吸收量最多,占西北地区的71.45%。西藏与青海位于青藏高原,拥有丰富的湿地资源和广阔的水域面积,两者 U4 二氧化碳吸

收量排名全国前二。四川 U5 二氧化碳吸收量排名全国第一,云南次之,两者是西南地区 U5 二氧化碳吸收量的主要贡献省份。

3.1.4 水资源保护行为

2020 年全国水资源保护行为 CEE 总量为-8707.58 万 t。其中,P1 间接减少了水资源开发与配置等行为的发生,具有二氧化碳吸收效应,产生的 CEE 为-205.27 万 t; P2 产生的 CEE 较少,仅为 50.31 万 t;P3 的二氧化碳吸收效应大于排放效应,产生的 CEE 为-8284.47 万 t;P4 减少了水资源的开发过程,同样具有二氧化碳吸收效应,产生的 CEE 为-268.15 万 t。

东部沿海 P1 的二氧化碳吸收量最大,为 57.17 万 t,西北地区最少,仅4.62 万 t。P2 产生的 CEE 较少,其中东部沿海、北部沿海、南部沿海排名靠前,分别为9.61 万、9.33 万、8.07 万 t,这是由于这3 个地区人口密度大且工业化程度高,污水排放量远高于其他地区。东部沿海和南部沿海 P3 的二氧化碳吸收量较大,分别为 1489.48 万、1482.34 万 t,西北地区最小,为 231.80 万 t,这一空间分布特征与闫旭等^[9]的研究结果相似。北部沿海 P4 的二氧化碳吸收量最多,为109.55 万 t,其次是黄河中游,为67.26 万 t,最少的是南部沿海,为 7.12 万 t。

省区方面,广东、上海、江苏 P1 的二氧化碳吸收量排名靠前,其节水发展水平相较于其他省区较高^[28];西藏、重庆、青海等省区排名靠后,节水减排能力仍有较大提升空间。广东污水排放量且处理能力较强,其 P2 的二氧化碳排放量和 P3 的二氧化碳吸收量都远超全国其他省区。北京、河北、山东、河南等省 P4 的二氧化碳吸收量排名靠前,再生水回用量远高于全国其他省区^[29],进而产生了更多的二氧化碳吸收效应。

3.2 水资源行为 CEE 的空间非均衡性分析

将 8 个地区作为 8 个子群,基于 Dagum 基尼系数法计算不同地区不同水资源行为 CEE 的基尼系

数。需要说明的是,由于部分省区 D5 和 A2 产生的 CEE 为 0,因此,上述两种行为不纳入 CEE 空间非均衡性分析。不同水资源行为 CEE 的总体基尼系数及其来源分解结果见图 1,地区内及地区间基尼系数计算结果分别见表 2 和表 3。

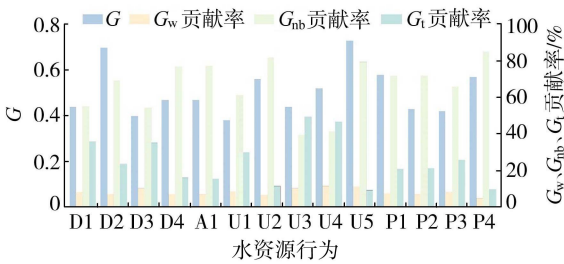


图 1 不同水资源行为 CEE 的总体基尼系数及其分解
Fig.1 General Gini coefficients of CEE of different water resource behaviors and their decomposition

3.2.1 水资源开发行为

地表水提升、地下水抽取、水库蓄水和生水处理 4 种水资源开发行为 CEE 的总体基尼系数分别为 0.44、0.70、0.40、0.47。由空间非均衡性的分解结果可知,4 种水资源开发行为 CEE 的空间非均衡性主要来源于地区间净值差异,其贡献率依次为 55%、69%、55%、77%。

从地区内基尼系数(表 2)来看,西北地区 D1 产生的 CEE 地区内差异最大,地区内差异最小的是长江中游。D2 产生的 CEE 地区内差异最大的同样是西北地区,差异最小的是黄河中游。分析认为,主要原因是新疆的地表水与地下水供给量均远高于西北地区的其他省区,导致西北地区两种水资源行为产生的 CEE 具有显著的空间非均衡性。东部沿海 D3 产生的 CEE 地区内差异最大,这是由于浙江 D3 产生的 CEE 远高于另外两省,而东北地区 D3 产生的 CEE 地区内差异最小。长江中游 D4 产生的 CEE 地区内差异最小,而南部沿海 3 省由于人口及工业规模的巨大差异,其 D4 产生的 CEE 地区内差异最大。

从地区间基尼系数(表 3)来看,D1 产生的 CEE 在北部沿海-西北地区间的差异最大,地区间基尼系

表 2 不同水资源行为 CEE 的地区内基尼系数

Table 2 Intra-regional Gini coefficients of CEE of different water resource behaviors														
地区	D1	D2	D3	D4	A1	U1	U2	U3	U4	U5	P1	P2	P3	P4
北部沿海	0.43	0.46	0.37	0.36	0.35	0.32	0.45	0.48	0.39	0.34	0.53	0.21	0.22	0.14
黄河中游	0.22	0.12	0.36	0.25	0.23	0.27	0.25	0.3	0.51	0.24	0.18	0.23	0.22	0.12
东北地区	0.24	0.39	0.14	0.17	0.18	0.19	0.15	0.31	0.37	0.23	0.25	0.14	0.23	0.22
东部沿海	0.37	0.62	0.60	0.32	0.32	0.21	0.41	0.46	0.36	0.58	0.18	0.34	0.17	0.50
长江中游	0.11	0.51	0.20	0.13	0.12	0.11	0.17	0.14	0.09	0.53	0.42	0.26	0.17	0.45
南部沿海	0.40	0.44	0.30	0.46	0.47	0.46	0.45	0.35	0.42	0.31	0.56	0.25	0.32	0.41
西南地区	0.28	0.24	0.33	0.24	0.25	0.25	0.31	0.35	0.60	0.51	0.57	0.53	0.52	0.47
西北地区	0.56	0.66	0.32	0.41	0.42	0.47	0.36	0.54	0.41	0.35	0.33	0.16	0.24	0.43

表 3 不同水资源行为 CEE 的地区间基尼系数

Table 3 Inter-regional Gini coefficients of CEE of different water resource behaviors

地区间	D1	D2	D3	D4	A1	U1	U2	U3	U4	U5	P1	P2	P3	P4
北部沿海-黄河中游	0.38	0.42	0.43	0.34	0.33	0.32	0.41	0.46	0.53	0.83	0.46	0.31	0.30	0.29
北部沿海-东北地区	0.41	0.48	0.39	0.34	0.34	0.32	0.39	0.47	0.53	0.75	0.50	0.19	0.25	0.64
北部沿海-东部沿海	0.59	0.96	0.59	0.56	0.57	0.32	0.73	0.52	0.46	0.87	0.55	0.60	0.30	0.58
北部沿海-长江中游	0.48	0.82	0.48	0.36	0.35	0.25	0.51	0.43	0.37	0.97	0.53	0.29	0.22	0.74
北部沿海-南部沿海	0.52	0.89	0.42	0.50	0.51	0.48	0.55	0.66	0.45	0.91	0.63	0.33	0.53	0.84
北部沿海-西南地区	0.40	0.93	0.48	0.40	0.39	0.39	0.47	0.60	0.61	0.99	0.70	0.57	0.31	0.86
北部沿海-西北地区	0.62	0.63	0.40	0.60	0.59	0.60	0.62	0.56	0.69	0.95	0.76	0.41	0.67	0.76
黄河中游-东北地区	0.29	0.39	0.32	0.26	0.25	0.27	0.27	0.32	0.48	0.31	0.28	0.25	0.29	0.48
黄河中游-东部沿海	0.51	0.96	0.56	0.55	0.57	0.32	0.69	0.42	0.48	0.52	0.52	0.75	0.48	0.43
黄河中游-长江中游	0.39	0.77	0.37	0.35	0.34	0.25	0.45	0.26	0.45	0.76	0.41	0.29	0.32	0.61
黄河中游-南部沿海	0.43	0.88	0.36	0.49	0.50	0.47	0.50	0.50	0.52	0.54	0.59	0.51	0.61	0.75
黄河中游-西南地区	0.28	0.93	0.39	0.31	0.29	0.32	0.35	0.42	0.60	0.88	0.59	0.51	0.29	0.78
黄河中游-西北地区	0.54	0.60	0.43	0.56	0.54	0.56	0.59	0.47	0.59	0.66	0.68	0.25	0.50	0.64
东北地区-东部沿海	0.47	0.96	0.49	0.63	0.64	0.56	0.74	0.43	0.42	0.56	0.64	0.65	0.33	0.48
东北地区-长江中游	0.32	0.78	0.20	0.42	0.43	0.37	0.54	0.30	0.36	0.83	0.50	0.25	0.24	0.38
东北地区-南部沿海	0.42	0.88	0.30	0.52	0.52	0.24	0.55	0.50	0.51	0.64	0.64	0.36	0.55	0.46
东北地区-西南地区	0.31	0.93	0.27	0.23	0.23	0.50	0.27	0.43	0.54	0.92	0.52	0.54	0.31	0.54
东北地区-西北地区	0.51	0.60	0.47	0.49	0.48	0.24	0.52	0.47	0.49	0.75	0.57	0.34	0.65	0.42
东部沿海-长江中游	0.36	0.77	0.53	0.34	0.35	0.22	0.45	0.38	0.31	0.82	0.40	0.70	0.26	0.59
东部沿海-南部沿海	0.46	0.69	0.54	0.50	0.52	0.42	0.60	0.54	0.44	0.59	0.47	0.47	0.48	0.67
东部沿海-西南地区	0.56	0.55	0.54	0.69	0.70	0.44	0.80	0.49	0.55	0.90	0.84	0.80	0.45	0.72
东部沿海-西北地区	0.55	0.96	0.61	0.84	0.85	0.68	0.91	0.54	0.56	0.70	0.89	0.81	0.79	0.60
长江中游-南部沿海	0.33	0.58	0.36	0.38	0.40	0.43	0.38	0.49	0.38	0.66	0.55	0.44	0.53	0.51
长江中游-西南地区	0.46	0.62	0.30	0.51	0.51	0.32	0.64	0.39	0.51	0.63	0.73	0.53	0.32	0.56
长江中游-西北地区	0.51	0.82	0.55	0.74	0.74	0.59	0.82	0.47	0.52	0.55	0.79	0.32	0.69	0.51
南部沿海-西南地区	0.49	0.47	0.38	0.59	0.58	0.55	0.63	0.38	0.59	0.78	0.81	0.66	0.61	0.47
南部沿海-西北地区	0.54	0.89	0.41	0.75	0.74	0.71	0.80	0.56	0.64	0.45	0.85	0.62	0.81	0.53
西南地区-西北地区	0.56	0.92	0.53	0.46	0.46	0.47	0.49	0.53	0.59	0.68	0.55	0.49	0.59	0.56

数为 0.62。D2 产生的 CEE 在东北地区-东部沿海、北部沿海-东部沿海、黄河中游-东部沿海、西北地区-东部沿海、东北地区-西南地区、北部沿海-西南地区、黄河中游-西南地区和西北地区-西南地区间的差异比较显著,地区间基尼系数均超过 0.9,主要原因在于上述地区间的水资源禀赋存在明显差距^[30],与东部沿海和西南地区相比,东北地区、北部沿海、黄河中游以及西北地区的地表水资源相对紧缺,对地下水供给的依赖程度较高。D3 和 D4 产生的 CEE 在东部沿海-西北地区间的差异最为明显,地区间基尼系数分别为 0.61 和 0.84。

3.2.2 水资源配置行为

城乡自来水分配行为产生的 CEE 总体基尼系数为 0.47,地区内差异、地区间净值差异和地区间超变密度的贡献率分别为 7%、78%、16%,可见地区间净值差异是其空间非均衡性的主要原因。

南部沿海 A1 产生的 CEE 地区内差异最大,地区内差异最小的是长江中游(表 2)。值得注意的是,长江中游多种水资源行为 CEE 地区内差异均较

低,这可能与长江中游各省区的水资源禀赋较为接近有关,并且长江中游近年来更加注重省域间的优势互补和协同发展,地区内发展差距逐渐缩小^[31]。

基于地区间基尼系数计算结果(表 3),A1 产生的 CEE 在东部沿海-西北地区、长江中游-西北地区和南部沿海-西北地区间的差异较大,地区间基尼系数均超过 0.7,这与地区间经济发展水平差异存在一定关系。与西北地区相比,东部沿海、长江中游和南部沿海工业发达且人口众多^[32],对自来水供给的需求量更大。

3.2.3 水资源利用行为

生活用水、工业用水、农业用水、生态用水和水力发电 5 种水资源利用行为 CEE 的总体基尼系数分别为 0.38、0.56、0.44、0.52、0.73。由空间非均衡性的分解结果可知,U1、U2 和 U5 产生的 CEE 空间非均衡性主要来源于地区间净值差异,其贡献率分别为 61%、82% 和 80%。U3 和 U4 产生的 CEE 空间非均衡性主要来源为地区间超变密度,贡献率分别为 50% 和 47%。这说明对于 U3 和 U4,并非所

有 CEE 值较高或较低的省区都处于同一地区。

从地区内基尼系数来看(表 2),U1 产生的 CEE 在西北地区差异最大,差异最小的是长江中游。北部沿海与南部沿海 U2 产生的 CEE 地区内基尼系数并列第一,地区内差异均较为显著。分析认为,北部沿海与南部沿海地区内各省区工业规模存在差距,山东与河北较北部沿海其他省区相对领先,广东较南部沿海其他省区相对领先。西北地区 4 个省区间的农业灌溉面积差距较大,因此其 U3 产生的 CEE 地区内差异最大。西南地区 U4 产生的 CEE 地区内差异最大,这是由于西藏的湿地及水域面积远高于西南地区其他省区。U5 产生的 CEE 地区内差异最大的是东部沿海,差异最小的是东北地区。

从地区间基尼系数(表 3)来看,U1 产生的 CEE 在南部沿海-西北地区间差异较为显著,基尼系数为 0.71;其余多数地区间基尼系数约为 0.3,差异较小。U2 产生的 CEE 在东部沿海-西北地区、南部沿海-西北地区、东部沿海-西南地区和长江中游-西北地区区间的差异较大,地区间基尼系数均超过 0.8,这与中国沿海地区与内陆地区工业发展水平的差距相一致^[32]。U3 产生的 CEE 在北部沿海-南部沿海间的差异最大,在黄河中游-长江中游间的差异最小。U4 产生的 CEE 在北部沿海-西北地区间的差异最大,在东部沿海-长江中游间的差异最小。作为空间非均衡性最强的水资源行为,U5 产生的 CEE 在西南地区-北部沿海、长江中游-北部沿海、西北地区-北部沿海、西南地区-东北地区、南部沿海-北部沿海、西南地区-东部沿海间均表现出较强的空间非均衡性,这种空间差异格局与中国水电资源的空间分布不均有关^[25]。

3.2.4 水资源保护行为

节约用水、污水收集、污水处理和再生水回用 4 种水资源保护行为 CEE 的总体基尼系数分别为 0.58、0.43、0.42、0.57。地区间净值差异为 4 种水资源保护行为空间非均衡性的主要来源,其贡献率分别为 72%、72%、67%、85%。

P1 吸收的二氧化碳在南部沿海存在较大的地区内差异,广东拥有较高的节水水平,P1 吸收的二氧化碳量远高于其他两省。P2 产生的 CEE 在西南地区的地区内差异最为明显,地区内差异最小的是东北地区。西南地区 P3 吸收的二氧化碳量地区内差异最大,长江中游地区内差异最小。分析可知,西南地区整体污水排放与处理量虽然不高,但其各省区间却存在较大差距,尤其是西藏远低于其他省区。东部沿海 P4 产生的 CEE 地区内差异最大,黄河中游地区内差异最小。

P1 产生的 CEE 在东部沿海-西北地区、南部沿海-西北地区、东部沿海-西南地区、南部沿海-西南地区间的差异较大,地区间基尼系数均超过 0.8。不同地区节水水平的差异是 P1 产生的 CEE 在地区间差异较大的主要原因,与东部沿海和南部沿海相比,西北与西南地区节水水平较低。P2 产生的 CEE 在东部沿海-西北地区间的差异较大,地区间基尼系数为 0.81。P3 产生的 CEE 在南部沿海-西北地区间的差异最大,地区间基尼系数为 0.81。西北地区人口密度小且工业发展水平低,其污水排放量较少,从而使其 P2 和 P3 产生的 CEE 与东部沿海和南部沿海存在较大差异。P4 产生的 CEE 在北部沿海-西南地区、北部沿海-南部沿海间差异较大,地区间基尼系数均超过 0.8,这与不同地区间的水资源禀赋差异有关,与北部沿海相比,西南地区和南部沿海水资源丰富,再生水回用需求量低。

4 结 论

a. 2020 年中国水资源行为 CEE 总量为 13819.84 万 t,其中二氧化碳排放量为 93762.11 万 t,二氧化碳吸收量为 79942.27 万 t,水资源行为导致的二氧化碳排放占全国二氧化碳排放总量的 9.47%。水资源开发、配置、利用、保护 4 个维度水资源行为 CEE 总量分别为 21297.68 万、4371.45 万、-3141.71 万、-8707.58 万 t。

b. 水资源行为 CEE 整体上呈现出由东向西递减的空间分布规律。其中,东部沿海水资源行为 CEE 值最大,为 17167.36 万 t;其次为南部沿海,为 7774.24 万 t;西南与西北地区 CEE 均为负值,CEE 值分别为-16696.60 万、-5189.12 万 t。从省区尺度看,CEE 值最大的两个省分别为江苏和广东,分别为 10371.17 万、4830.80 万 t;最小的两个省为四川和云南,CEE 值分别为-8938.56 万、-6684.13 万 t。

c. 14 种水资源行为 CEE 均具有显著的空间非均衡性,其中 U5 产生的 CEE 空间非均衡性最强,D2 次之。地区间净值差异是水资源行为 CEE 空间非均衡性的最主要贡献因素,其次是地区间超变密度,地区内差异的贡献率最小。

参考文献:

[1] 贡力,董洲全,贾治元,等.水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9. (GONG Li,DONG Zhouquan,JIA Zhiyuan,et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):1-9.

- (in Chinese))
- [2] 左其亭,吴青松,马军霞,等.“双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J].水资源保护,2023,39(1):8-14. (ZUO Qiting, WU Qingsong, MA Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):8-14. (in Chinese))
- [3] 王永琴,周叶,张荣.碳排放影响因子与碳足迹文献综述:基于研究方法视角[J].环境工程,2017,35(1):155-159. (WANG Yongqin, ZHOU Ye, ZHANG Rong. A review of the research methods on influencing factors of carbon emissions and carbon footprint[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(1):155-159. (in Chinese))
- [4] ZAWARTKA P, BURCHART-KOROL D, BLAUT A. Model of carbon footprint assessment for the life cycle of the system of wastewater collection, transport and treatment [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):5799.
- [5] 周兴,郑有飞,吴荣军,等.2003—2009年中国污水处理部门温室气体排放研究[J].气候变化研究进展,2012,8(2):131-136. (ZHOU Xing, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment in China during 2003-2009[J]. Climate Change Research, 2012, 8(2):131-136. (in Chinese))
- [6] 左其亭,赵晨光,马军霞,等.水资源行为的二氧化碳排放当量分析方法及应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):1-12. (ZUO Qiting, ZHAO Chenguang, MA Junxia, et al. Carbon dioxide emission equivalent analysis method of water resource behaviors and its application [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1):1-12. (in Chinese))
- [7] LUO Zhiwei, JI Ling, XIE Yulei, et al. Water-carbon nexus relationship and interaction mechanism analysis within Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321:115823.
- [8] YUE Wencong, WANG Senchao, XU Meng, et al. The potential of mitigating greenhouse gas emissions from urban domestic water systems in highly urbanized areas [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 382:135206.
- [9] 闫旭,邱德志,郭东丽,等.中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征[J].环境科学,2018,39(3):1256-1263. (YAN Xu, QIU Dezhi, GUO Dongli, et al. Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China [J]. Environmental Science, 2018, 39(3):1256-1263. (in Chinese))
- [10] 谭丹,黄贤金.我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J].中国人口·资源与环境,2008,18(3):54-57. (TAN Dan, HUANG Xianjin. Correlation analysis and comparison of the economic development and carbon emissions in the eastern, central and western part of China [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(3):54-57. (in Chinese))
- [11] 李国志,李宗植.中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2010,20(5):22-27. (LI Guozhi, LI Zongzhi. Regional difference and influence factors of China's carbon dioxide emissions [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(5):22-27. (in Chinese))
- [12] 刘华军,田震,石印.中国二氧化碳排放的空间差异及其双维内在结构解析:2000—2019年[J].地理研究,2023,42(3):857-877. (LIU Huajun, TIAN Zhen, SHI Yin. Spatial difference of carbon dioxide emissions and its bi-dimensional internal structural decomposition and analysis from 2000 to 2019 in China [J]. Geographical Research, 2023, 42(3):857-877. (in Chinese))
- [13] MA Tian, LIU Yisheng, YANG Meng. Spatial-temporal heterogeneity for commercial building carbon emissions in China: based the Dagum Gini coefficient [J]. Sustainability, 2022, 14(9):5243.
- [14] 徐英启,程钰,王晶晶.中国资源型城市碳排放效率时空演变与绿色技术创新影响[J].地理研究,2023,42(3):878-894. (XU Yingqi, CHENG Yu, WANG Jingjing. The impact of green technological innovation on the spatiotemporal evolution of carbon emission efficiency of resource-based cities in China [J]. Geographical Research, 2023, 42(3):878-894. (in Chinese))
- [15] 戴小文,李金花,何艳秋,等.2000—2020年中国畜牧业区域碳排放公平性与排放效率[J].资源科学,2023,45(1):62-76. (DAI Xiaowen, LI Jinhua, HE Yanqiu, et al. Regional equity and efficiency of carbon emissions of China's livestock industry in 2000-2020 [J]. Resources Science, 2023, 45(1):62-76. (in Chinese))
- [16] DAGUM C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio [J]. Empirical Economics, 1997, 22(4):515-531.
- [17] LI Donglin, ZUO Qiting, ZHANG Zhizhou. A new assessment method of sustainable water resources utilization considering fairness-efficiency-security: a case study of 31 provinces and cities in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 81:103839.
- [18] 李原园,李云玲,何君.新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J].水利学报,2021,52(11):1340-1346. (LI Yuanyuan, LI Yunling, HE Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11):1340-1346. (in Chinese))
- [19] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898. (WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon

- piking and carbon neutrality goals [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884-1898. (in Chinese))
- [20] 汤勇生, 张智通, 汪永禄. 碳中和目标下零碳水利风景区建设与发展路径[J]. 水利经济, 2022, 40(2): 74-78. (TANG Yongsheng, ZHANG Zhitong, WANG Yonglu. Construction and development path of zero-carbon national water parks under carbon neutrality target [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(2): 74-78. (in Chinese))
- [21] ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, MA Junxia, et al. Carbon dioxide emission equivalent analysis of water resource behaviors; determination and application of CEEA function table [J]. Water, 2023, 15(3): 431.
- [22] 孙克, 张信为, 聂坚, 等. 中国省域水资源利用绩效评价及空间分异和驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 102-110. (SUN Ke, ZHANG Xinwei, NIE Jian, et al. Evaluation of provincial water resources utilization performance in China and its spatial differentiation and driving factor analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 102-110. (in Chinese))
- [23] 闫佳伟, 王红瑞, 朱中凡, 等. 我国海水淡化若干问题及对策[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 199-210. (YAN Jiawei, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Relevant issues and countermeasures of seawater desalination in China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 199-210. (in Chinese))
- [24] 李治兵, 沈涛, 肖怡然, 等. 西北地区农业生态和经济系统协调发展研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(12): 237-244. (LI Zhibing, SHEN Tao, XIAO Yiran, et al. Study on the coordinated development of agricultural ecology and economic in northwest China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(12): 237-244. (in Chinese))
- [25] YANG Qing, LIU Gengyuan, CASAZZA M, et al. Emergy-based accounting method for aquatic ecosystem services valuation; a case of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 55-68.
- [26] 沈心怡, 马骏, 卢玉钦. 碳中和目标下我国绿色水电碳减排效率评价[J]. 水利经济, 2022, 40(4): 23-27. (SHEN Xinyi, MA Jun, LU Yuqin. Evaluation of carbon emission reduction efficiency of China's green hydropower under the goal of carbon neutralization [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(4): 23-27. (in Chinese))
- [27] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1855. (WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1855. (in Chinese))
- [28] 刘波, 汪紫薇, 王文鹏, 等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 534-541. (LIU Bo, WANG Ziwei, WANG Wenpeng, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over China's mainland [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 534-541. (in Chinese))
- [29] YI Lili, JIAO Wentao, CHEN Xiaoning, et al. An overview of reclaimed water reuse in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(10): 1585-1593.
- [30] 夏帆, 陈莹, 窦明, 等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 52-57. (XIA Fan, CHEN Ying, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 52-57. (in Chinese))
- [31] 何伟军, 孟旭, 孔阳, 等. 时空异质性视角下长江经济带水环境承载力评估及其驱动因子探究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 215-223. (HE Weijun, MENG Xu, KONG Yang, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of Yangtze River Economic Belt and its driving factors exploration from perspective of spatial-temporal heterogeneity [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 215-223. (in Chinese))
- [32] 王利军, 陈梦冬. 中国经济高质量发展水平测度[J]. 统计与决策, 2023, 39(6): 87-91. (WANG Lijun, CHEN Mengdong. Measurement on high-quality economic development level in China [J]. Statistics & Decision, 2023, 39(6): 87-91. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-06-20 编辑: 施业)

