

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkk.2022.0042

何凡, 顾冰, 何国华, 等. 中国用水量变化的驱动效应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(3): 417-428. HE F, GU B, HE G H, et al. Driving effect evolution and spatial differentiation of water use change in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 417-428. (in Chinese)

# 中国用水量变化的驱动效应

何凡, 顾冰, 何国华, 路培艺, 尹婧, 赵勇, 李海红

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:**为识别和量化导致用水量变化的主要影响因素及其驱动作用, 准确把握用水变化趋势, 将全国总用水量分为生活、工业和农业用水量, 通过构建多层次对数均值迪氏指数(logarithmic mean Divisia index, LMDI)分解模型, 在生活、工业及农业用水量变化的驱动因素分解的基础上, 对全国总用水量驱动效应进行测度, 并进一步量化研究用水驱动效应在时间和空间尺度上的分异特征。结果表明:2020 年用水总量几乎与 20 年前持平, 但各驱动要素的相对作用发生了显著变化, 与此同时, 用水量变化驱动效应存在较强的空间分异性, 并且在“十三五”时期表现出了新的变化态势。结果可为我国水资源的高效利用和水资源管理政策的科学制定提供技术支撑与决策依据。

**关键词:**用水量; 驱动效应; 空间分异; 指数分解; LMDI

中图分类号:TV213.9 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



准确研判国家和区域用水变化趋势是合理布局重大水利工程、科学制定水资源管理政策的前提<sup>[1]</sup>。识别和量化导致用水量变化的主要影响因素及其驱动作用是准确把握用水变化趋势的重要基础<sup>[2-4]</sup>。在水资源供需矛盾突出和经济社会发展全面转型的现阶段, 深入研究影响用水量的主要因素、时空变化及其内在作用机制无疑具有重要的现实意义, 也受到学界广泛关注<sup>[5-10]</sup>。

目前定量测算用水量变化驱动效应的方法主要有结构分解法(structural decomposition analysis, SDA)和指数分解法(index decomposition analysis, IDA)。其中, 结构分解法通过投入产出模型中关键参数变动的比较来分析用水量变动原因。杨中文等<sup>[11-12]</sup>、Wang 等<sup>[13]</sup>分别运用 SDA 模型分析了中国用水量和美国工业用水量的驱动因素。指数分解法<sup>[14-15]</sup>是利用指数体系分析各影响因素变动对总指数的影响方向和程度。张礼兵等<sup>[16]</sup>、张陈俊等<sup>[17]</sup>、

陈美林等<sup>[18]</sup>、刘翀等<sup>[19]</sup>、白夏等<sup>[20]</sup>分别利用该方法从人口、经济、产业、技术等方面选取相关驱动因素并定量测算贡献程度, 取得了系列成果。

但无论是结构分解法还是指数分解法, 现有成果普遍是将用水总量作为一个整体开展研究或仅针对特定地区特定行业用水量进行分析。将用水总量作为一个整体开展研究, 在一定程度上忽略了生活、工业和农业不同行业用水驱动力的差异, 而针对特定地区特定行业用水量的研究难以全面反映我国用水过程的演变趋势。考虑到指数分解法中的对数均值迪氏指数(logarithmic mean Divisia index, LMDI)分解法能有效解决指数分解中存在的残差项和零值的问题<sup>[21]</sup>, 且不受投入产出表发布周期过长的影响, 于是本研究通过 Kaya 恒等式优化构建了多层次 LMDI 方法, 在对全国用水量驱动效应整体分析的基础上, 进一步对各行业用水量驱动效应进行了解析研究, 并对驱动效应空间分异性及“十三五”

收稿日期:2021-09-09 修回日期:2021-12-13 网络出版时间:2021-12-16

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211215.1329.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200204); 国家杰出青年科学基金项目(52025093); 国家自然科学基金项目(52061125101; 52109042)

作者简介:何凡(1980—), 男, 陕西汉中, 正高级工程师, 主要从事水资源管理、规划与战略研究。E-mail:hefan@iwhr.com

通信作者:顾冰(1996—), 女, 河南濮阳人, 主要从事水文学水资源研究。E-mail:gb201504126@163.com

时期的最新变化开展了深入剖析,为准确把握现阶段我国用水发展趋势提供科学认知。

## 1 改进的因素分解模型

### 1.1 模型构建思路

全国用水总量主要由生活、工业、农业和生态用水 4 部分组成。考虑到自 2003 年生态用水被纳入用水统计范畴后,其名称和统计口径存在数次较大变动,引江济太、浙江平原水网环境配水等现状用水是否纳入统计还存在较大争议和不确定性,以及 2003 年以来生态用水仅占用水总量的 2.3% 左右等因素,本研究主要以 2000—2020 年生活、工业、农业用水为分析对象,文中用水总量为 3 部分之和。按照我国不同行业用水构成,结合 LMDI 模型分析计算原理,本研究将生活用水分解为城镇和农村用水,其驱动因素为人口、生活用水定额和城镇化率;将工业用水分解为近 20 年来在工业用水总量中占比达 30% 左右的火核电用水和一般工业用水,其驱动因素为工业产值、工业用水定额和工业结构;将农业用水分解为农田和林果牧用水,其驱动因素为灌溉面积、农业用水定额和种植结构。模型中  $r=0$  为研究期初始年, $r=t$  为研究期末年,则用水总量

$$W_r = W_{r,生活} + W_{r,工业} + W_{r,农业} \quad (1)$$

### 1.2 生活用水模型

将生活用水分为城镇生活用水和农村生活用水,并利用 Kaya 恒等式量化计算人口、生活用水定额和城镇化率变化对生活用水变化的贡献,计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta W_{生活} &= \Delta W_{农村生活} + \Delta W_{城镇生活} = \\ \Delta P \frac{\Delta W_{农村生活}}{\Delta P_{农村人口}} \times \frac{\Delta P_{农村人口}}{\Delta P} &+ \Delta P \frac{\Delta W_{城镇生活}}{\Delta P_{城镇人口}} \times \frac{\Delta P_{城镇人口}}{\Delta P} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\Delta W_{农村生活}$ 、 $\Delta W_{城镇生活}$  分别为农村、城镇生活用水量变化量,  $m^3$ ;  $\Delta P$  为总人口变化量,万人;  $\Delta P_{农村人口}$ 、 $\Delta P_{城镇人口}$  分别为农村、城镇人口变化量,万人。

进一步可将生活用水变化分解为人口、生活用水定额和城镇化率 3 个驱动要素,计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta W_{生活} &= \Delta W_{农村生活} + \Delta W_{城镇生活} = \\ (\Delta W_{P,农村生活} + \Delta W_{S,农村生活} + \Delta W_{L,农村生活}) &+ \\ (\Delta W_{P,城镇生活} + \Delta W_{S,城镇生活} + \Delta W_{L,城镇生活}) & \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\Delta W_{P,农村生活}$ 、 $\Delta W_{P,城镇生活}$  分别为总人口变化引起的农村、城镇用水量变化量,  $m^3$ ,两者合并即为人口效应,  $m^3$ ;  $\Delta W_{S,农村生活}$ 、 $\Delta W_{S,城镇生活}$  分别为农村、城镇生活用水定额变化引起的农村、城镇用水量变化量,  $m^3$ ,两者合并即为生活用水定额效应,  $m^3$ ;  $\Delta W_{L,农村生活}$ 、

$\Delta W_{L,城镇生活}$  分别为农村、城镇人口占总人口比重变化引起的农村、城镇用水量变化量,  $m^3$ ,两者合并即为城镇化效应,  $m^3$ 。根据式(3)计算生活用水定额效应时将农村和城镇生活用水定额效应分别进行测算,再进行求和得到,排除了由于城镇化发展、城镇人口增多对生活用水定额带来的影响,而单纯反映了农村和城镇居民各自用水量水平提高带来的生活用水定额效应。

根据 LMDI 模型,生活用水的人口效应、生活用水定额效应和城镇化效应可以由下式计算

$$\Delta W_P = \frac{W_t - W_0}{\ln W_t - \ln W_0} \ln \frac{P_t}{P_0} \quad (4)$$

$$\Delta W_S = \frac{W_t - W_0}{\ln W_t - \ln W_0} \ln \frac{S_t}{S_0} \quad (5)$$

$$\Delta W_L = \frac{W_t - W_0}{\ln W_t - \ln W_0} \ln \frac{L_t}{L_0} \quad (6)$$

式中: $W_0$  和  $W_t$  为初始年和第  $t$  年农村或城镇生活用水量,  $m^3$ ;  $P_0$  和  $P_t$  为初始年和第  $t$  年总人口,万人;  $S_0$  和  $S_t$  为初始年和第  $t$  年农村或城镇用水定额,  $m^3$ /万人;  $L_0$  和  $L_t$  为初始年和第  $t$  年城镇化率, %。

### 1.3 工业用水模型

将工业用水分为一般工业用水和火核电用水,并利用 Kaya 恒等式量化计算产值、工业用水定额和工业结构变化对工业用水变化的贡献,计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta W_{工业} &= \Delta W_{一般工业} + \Delta W_{火核电} = \\ \Delta Y \frac{\Delta W_{一般工业}}{\Delta Y_{一般工业产值}} \times \frac{\Delta Y_{一般工业产值}}{\Delta Y} &+ \Delta Y \frac{\Delta W_{火核电}}{\Delta Y_{火核电产值}} \times \frac{\Delta Y_{火核电产值}}{\Delta Y} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\Delta W_{一般工业}$ 、 $\Delta W_{火核电}$  分别为一般工业、火核电用水量变化量,  $m^3$ ;  $\Delta Y$  为总产值变化量,亿元;  $\Delta Y_{一般工业产值}$ 、 $\Delta Y_{火核电产值}$  分别为一般工业产值、火核电产值变化量,亿元。

进一步可将工业用水变化分解为产值、工业用水定额和工业结构 3 个驱动要素,计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta W_{工业} &= \Delta W_{一般工业} + \Delta W_{火核电} = \\ (\Delta W_{Y,一般工业} + \Delta W_{K,一般工业} + \Delta W_{N,一般工业}) &+ \\ (\Delta W_{Y,火核电} + \Delta W_{K,火核电} + \Delta W_{N,火核电}) & \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\Delta W_{Y,一般工业}$ 、 $\Delta W_{Y,火核电}$  分别为总产值变化引起的一般工业、火核电用水量变化量,  $m^3$ ,两者合并即为产值效应,  $m^3$ ;  $\Delta W_{K,一般工业}$ 、 $\Delta W_{K,火核电}$  分别为一般工业、火核电工业用水定额变化引起的一般工业、火核电用水量变化量,  $m^3$ ,两者合并即为工业用水定额效应,  $m^3$ ;  $\Delta W_{N,一般工业}$ 、 $\Delta W_{N,火核电}$  分别为一般工业、火核电产值占总产值比重变化引起的一般工业、火核电用水量变化量,  $m^3$ ,两者合并即为工业结构效应,  $m^3$ 。

工业用水的产值效应、工业用水定额效应和工

业结构效应计算方法参考生活用水 LMDI 模型,见式(4)至式(6)。

#### 1.4 农业用水模型

将农业用水分为农田灌溉用水和林果牧用水,并利用 Kaya 恒等式量化计算灌溉面积、农业用水定额和种植结构对农业用水变化的贡献,计算公式为

$$\Delta W_{\text{农业}} = \Delta W_{\text{农田}} + \Delta W_{\text{林果牧}} = \Delta H \frac{\Delta W_{\text{农田}}}{\Delta H_{\text{农田}}} \times \frac{\Delta H_{\text{农田}}}{\Delta H} + \Delta H \frac{\Delta W_{\text{林果牧}}}{\Delta H_{\text{林果牧}}} \times \frac{\Delta H_{\text{林果牧}}}{\Delta H} \quad (9)$$

式中: $\Delta W_{\text{农田}}$ 、 $\Delta W_{\text{林果牧}}$  分别为农田灌溉、林果牧用水量变化量,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta H$  为灌溉面积变化量,  $\text{hm}^2$ ;  $\Delta H_{\text{农田}}$ 、 $\Delta H_{\text{林果牧}}$  分别为农田、林果牧灌溉面积变化量,  $\text{hm}^2$ 。

进一步可将农业用水变化可以分解为灌溉面积、农业用水定额和种植结构 3 个驱动要素,计算公式为

$$\Delta W_{\text{农业}} = \Delta W_{\text{农田}} + \Delta W_{\text{林果牧}} = (\Delta W_{\text{Q,农田}} + \Delta W_{\text{J,农田}} + \Delta W_{\text{T,农田}}) +$$

$$(\Delta W_{\text{Q,林果牧}} + \Delta W_{\text{J,林果牧}} + \Delta W_{\text{T,林果牧}}) \quad (10)$$

式中: $\Delta W_{\text{Q,农田}}$ 、 $\Delta W_{\text{Q,林果牧}}$  分别为总灌溉面积变化引起的农田、林果牧用水量变化量,  $\text{m}^3$ ,两者合并即为灌溉面积效应,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta W_{\text{J,农田}}$ 、 $\Delta W_{\text{J,林果牧}}$  分别为农田、林果牧用水定额变化引起的农田、林果牧用水量变化量,  $\text{m}^3$ ,两者合并即为农业用水定额效应,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta W_{\text{T,农田}}$ 、 $\Delta W_{\text{T,林果牧}}$  分别为农田、林果牧灌溉面积占总灌溉面积比重变化引起的农田、林果牧用水量变化量,  $\text{m}^3$ ,两者合并即为种植结构效应,  $\text{m}^3$ 。

农业用水的灌溉面积效应、农业用水定额效应和种植结构效应计算方法参考生活用水 LMDI 模型,见式(4)至式(6)。

## 2 用水量变化驱动效应测度与演变

### 2.1 用水量变化驱动效应测度

根据因素分解模型,对 2000—2020 年全国用水量总量及行业用水量变化驱动效应进行分解测算,结果见表 1。

表 1 2000—2020 年中国用水量变化的驱动效应

Tab. 1 Driving effects of water consumption change in China from 2000 to 2020

单位:亿  $\text{m}^3$

年份	生活用水				工业用水				农业用水				用水总量变化
	用水量变化	人口效应	定额效应	城镇化效应	用水量变化	产值效应	定额效应	结构效应	用水量变化	灌溉面积效应	定额效应	种植结构效应	
2000—2001	24.97	2.72	17.55	4.70	2.68	140.56	-133.11	-4.77	42.19	18.00	24.21	-0.02	69.84
2001—2002	18.84	3.55	10.60	4.69	0.55	122.18	-124.22	2.59	-89.55	20.43	-109.97	-0.01	-70.16
2002—2003	12.17	4.26	3.17	4.74	34.88	196.40	-160.30	-1.22	-303.34	22.52	-325.84	-0.02	-256.29
2003—2004	20.28	4.15	11.88	4.26	51.63	222.27	-162.33	-8.31	152.84	30.03	122.77	0.04	224.75
2004—2005	23.92	4.05	12.58	7.29	56.33	215.94	-149.49	-10.13	-5.68	36.05	-41.72	-0.01	74.57
2005—2006	18.65	4.87	9.21	4.57	58.56	226.15	-158.34	-9.25	84.45	47.16	37.29	0	161.66
2006—2007	16.63	4.70	7.87	4.06	60.28	275.74	-208.11	-7.34	-65.90	49.67	-115.59	0.02	11.01
2007—2008	18.87	5.72	8.75	4.40	-6.96	242.84	-254.86	5.06	64.91	123.37	-61.42	2.96	76.82
2008—2009	18.93	5.65	9.58	3.70	-6.18	94.39	-127.11	26.54	59.65	100.24	-131.08	90.48	72.40
2009—2010	17.62	4.77	7.72	5.13	56.40	258.54	-203.78	1.64	-34.01	23.47	-49.62	-7.86	40.01
2010—2011	23.90	4.43	13.06	6.41	14.50	244.76	-232.76	2.50	54.40	120.67	-73.97	7.71	92.80
2011—2012	-50.00	4.23	-61.50	7.27	-81.10	112.86	-204.96	11.00	159.00	2.25	174.29	-17.54	27.90
2012—2013	10.40	4.01	-0.60	70.00	25.70	97.18	-89.58	18.10	19.00	96.83	-96.81	18.99	55.10
2013—2014	16.50	4.07	5.36	7.06	-50.30	85.81	-149.62	13.52	-52.60	65.06	-117.74	0.08	-86.40
2014—2015	26.90	4.81	8.89	13.21	-21.30	30.83	-67.93	15.80	-16.60	76.24	-91.65	-1.19	-11.00
2015—2016	28.10	5.26	13.46	9.38	-26.80	52.74	-88.43	8.88	-84.30	58.56	-136.64	-6.22	-83.00
2016—2017	16.60	5.10	3.44	8.07	-31.00	108.65	-150.67	11.02	-1.60	39.39	-41.74	0.75	-16.00
2017—2018	21.70	4.99	9.62	7.08	-15.40	95.03	-127.34	16.91	-73.30	29.92	-105.28	2.06	-67.00
2018—2019	11.80	4.50	-1.14	8.44	-44.00	59.06	-113.10	10.04	-10.80	24.28	-36.03	0.95	-43.00
2019—2020	-8.60	4.01	-20.81	8.20	-187.20	95.44	-308.20	25.56	-69.90	27.65	-98.78	1.23	-265.70
2000—2020	288.18	139.85	68.69	79.64	-108.73	2 394.81	-2 555.94	52.40	-171.14	1 151.01	-1 325.89	3.74	8.31

从表 1 可以看出,2000—2020 年我国用水总量在波动中经过了从增长到减少的过程后,2020 年用水总量几乎与 20 年前持平,但用水结构发生了一定变化。具体来看:生活用水量较 2000 年增加了 288.18 亿  $\text{m}^3$ ,其中人口增长、生活用水定额上升和城镇化率提高分别产生了 139.85 亿  $\text{m}^3$ 、68.69 亿  $\text{m}^3$  和 79.64 亿  $\text{m}^3$  的增长效应;工业用水量减少了 108 亿  $\text{m}^3$ ,其中工业产值增长产生了 2 394.81 亿  $\text{m}^3$  的增长效应,工业用水定额降低产生了 2 555.94 亿  $\text{m}^3$  的减少效应,工业结构变化产生了 52.4 亿  $\text{m}^3$  的

增长效应;农业用水量减少了 171.14 亿  $\text{m}^3$ ,其中,灌溉面积扩大产生了 1 151.01 亿  $\text{m}^3$  的增长效应,农业用水定额降低产生了 1 325.89 亿  $\text{m}^3$  的减少效应,种植结构调整产生了 3.74 亿  $\text{m}^3$  的减少效应。

## 2.2 用水量变化驱动效应贡献率及演变

为对比分析各因素驱动效应对用水量变化产生的作用大小,对 2000—2020 年各因素驱动效应贡献率进行了测算,见图 1。

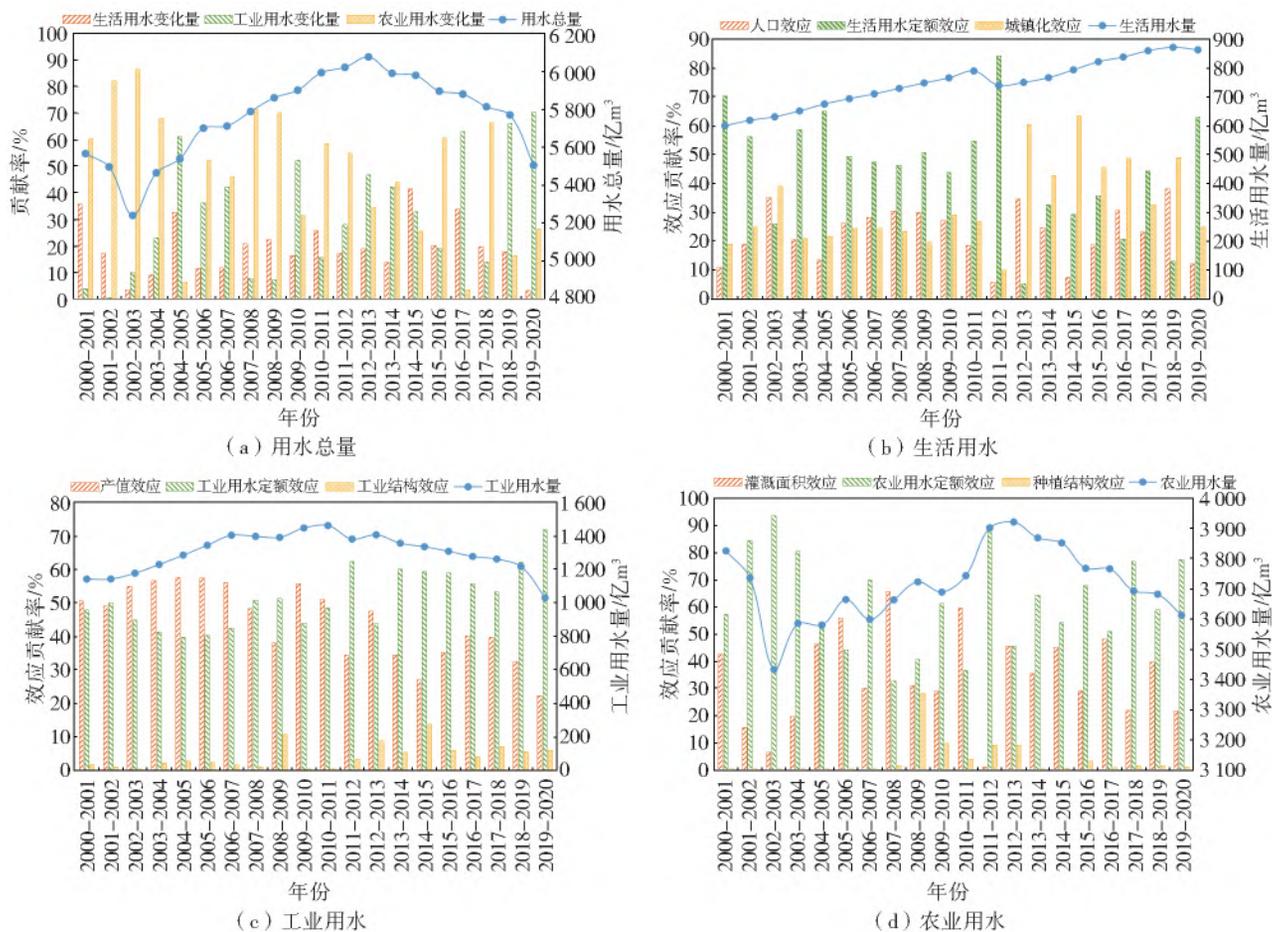


图 1 行业用水量变化及各因素驱动效应贡献率

Fig. 1 Change of industrial water consumption and contribution rate of driving effect of various factors

从图 1(a)可以看出:2000—2013 年经济社会用水总量总体呈波动增长态势;2013—2020 年则呈稳步下降态势;以 2013 年为分界点,2013 年前农业用水量变化量主导了用水总量变化趋势,贡献率平均达到 57.42%,其次为工业用水变化量、生活用水变化量,贡献率分别是 24.33%和 18.25%;2013 年后则是工业用水变化量的带动作用逐渐增强,并占据了相对主导地位,贡献率平均达到 44.3%,其次为农业用水量变化量、生活用水变化量,贡献率分别是

34.61%和 21.09%。

从图 1(b)可以看出,生活用水量从 2000 年以来始终保持着增长态势,但主要驱动因素逐步发生了变化:2000—2012 年,主要是生活用水定额提高带来了生活用水量的增长,其驱动效应贡献率达到 44.8%;从 2012 年以后则主要是城镇化率提高带来了生活用水量的增长。这表明:2012 年之前导致生活用水量增长的主要原因是居民生活水平提升带来的生活用水定额提高;2012 年之后则主要是在城镇

化进程中大量农村人口成为城镇人口,带来生活用水量的增长。

从图 1(c)可以看出,工业用水量则以 2011 年为分界点,呈现先增后减的趋势。其中:2011 年以前工业规模扩大带来的产值增加是最主要的驱动因素,带来工业用水量的增长;2011 年以后,工业用水效率提高带来的工业用水定额下降则成为最主要的驱动因素,使得工业用水量稳中有降。尤其需要关注的是,工业用水定额下降始终在抑制工业用水需求方面发挥着重要作用,而且近年来工业用水定额下降带来的驱动效应始终保持在百亿  $m^3$  规模,在各驱动因素中发挥着最为主导的作用。

从图 1(d)可以看出:与工业和生活用水量相对均一的发展态势不同,农业用水量呈现出一定波动性,但总体上也是以 2013 年为分界点,呈现先增后减的态势;从贡献率来看,农业用水量很大程度上受到灌溉面积持续扩大的影响,但更主要还是受农业用水定额的影响。这很大程度上也是因为农业用水定额会受到当年降雨条件的影响,本身会呈现较大的波动性,从而对农业用水量变化表现出更大的作用。尤其是 2013 年之后,农业用水定额效应对农业用水变化量的贡献率达到 61.98%,正是在农业用水定额不断降低的影响下,农业用水量呈现稳步减少的态势,这也体现出近年来我国农业节水上取得的显著成效。

### 3 用水量变化驱动效应的空间分异

#### 3.1 区域用水量变化驱动效应空间分析

在全国用水量变化的总体趋势下,各区域由于经济社会发展进程和水资源禀赋条件的巨大差异,用水量变化及其驱动效应也存在不同特征。根据因素分解模型式(1)至式(10),以省级行政区为单元,对 2000—2010 年与 2010—2020 年两个区间各行业用水量进行了测算,结果见图 2 至图 7。

从图 2(a)可以看到,2010 年之前生活用水量增长最大的地区主要集中在华东的山东、江苏、江西、浙江,华中的湖南,华南的广东、广西以及西南的四川,而主要驱动因素是生活用水定额提高(图 2(c)),其驱动效应贡献率平均达到 58%。从图 3(a)可以看出,2010 年之后,生活用水量增长较大的依然是这些地区,但主要驱动因素变成了人口增长和城镇化率提高(图 3(b)),人口效应和城镇化效应贡献率分别达到 32%、43%。值得注意的是,与前 10 年相比,各省生活用水变化量的差异明显加大。尤其是我国东北三省、内蒙古、青海、甘肃以及湖南、广西等省区,在我国生活用水量总体增长的情况下,近 10 年来生活用水量呈下降态势,主要是由于生活用水定额下降所致(图 3(c)),其驱动效应贡献率为 40.3%。此外东北三省人口减少也是生活用水量下降的重要原因。

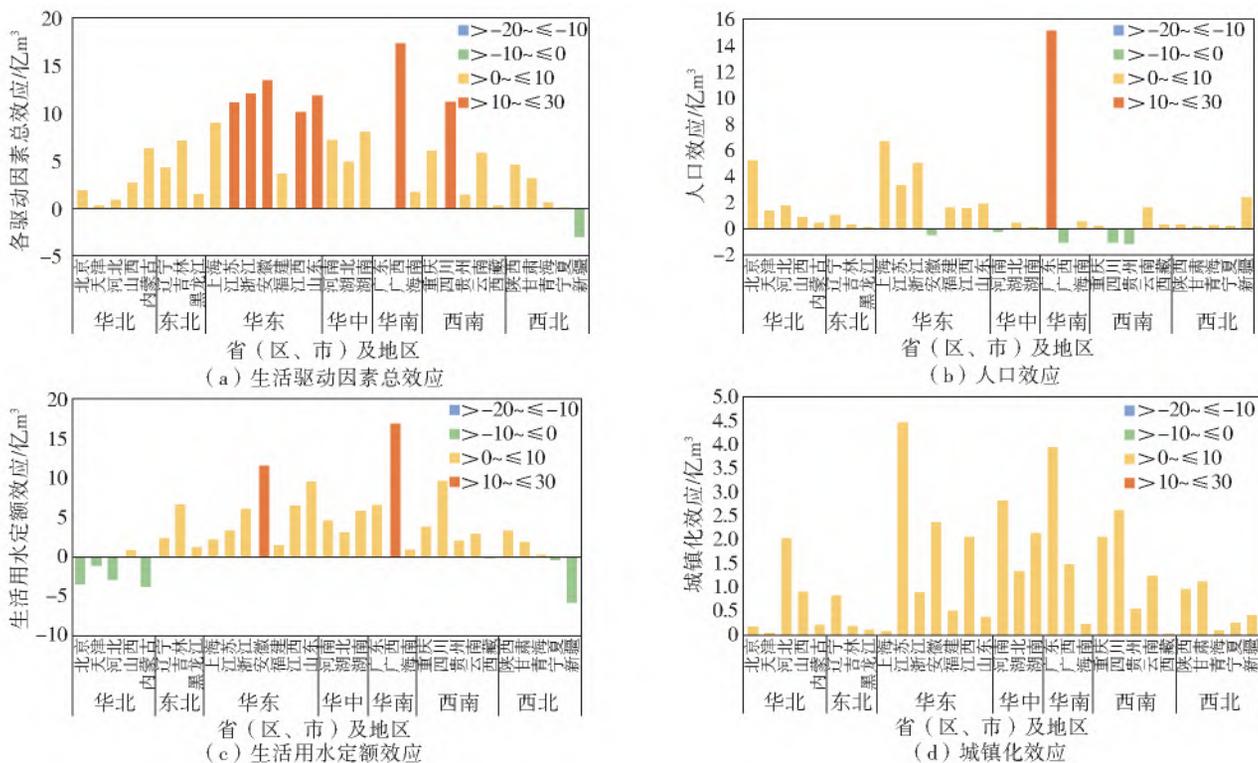


图 2 2000—2010 年生活用水量变化量驱动效应空间分异

Fig. 2 Spatial differentiation driven by changes in domestic water consumption from 2000 to 2010

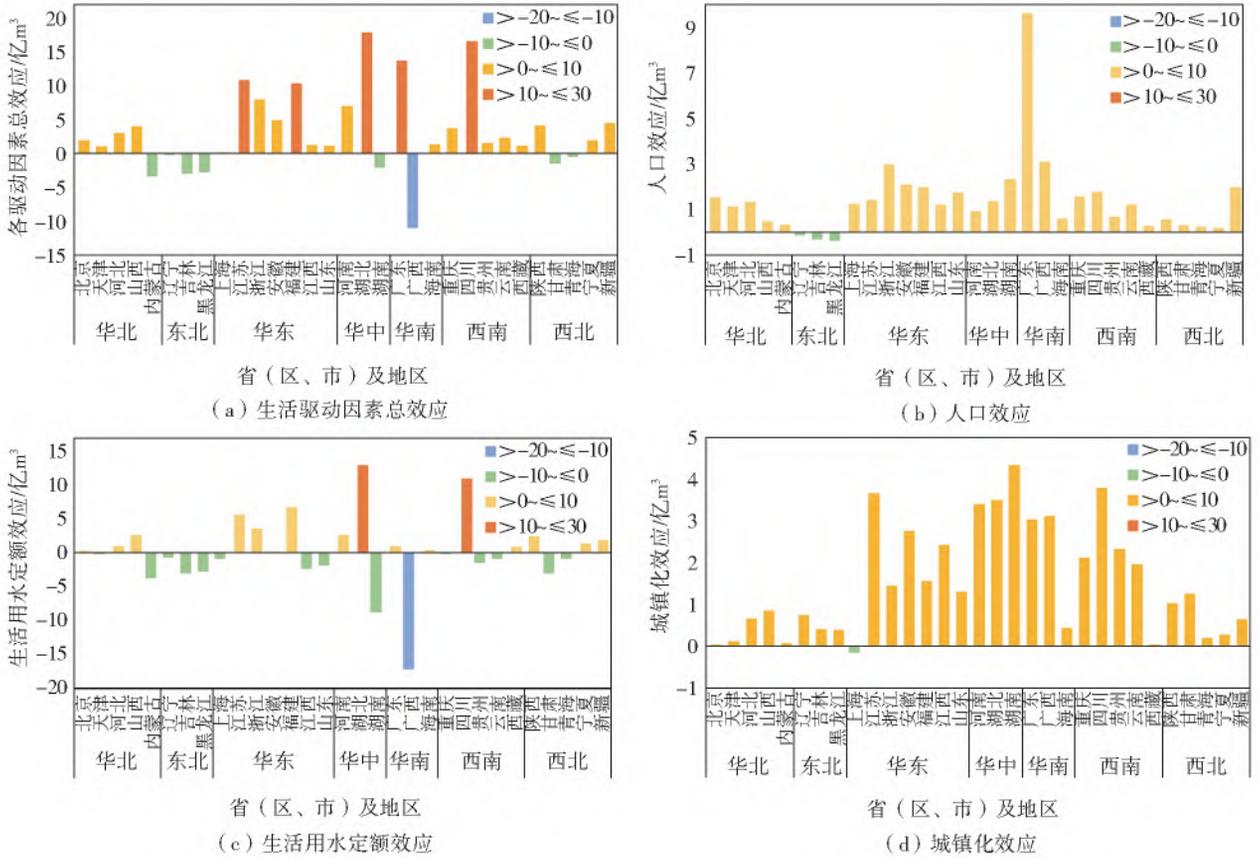


图 3 2010—2020 年生活用水变化量驱动效应空间分异

Fig. 3 Spatial differentiation driven by changes in domestic water consumption from 2010 to 2020

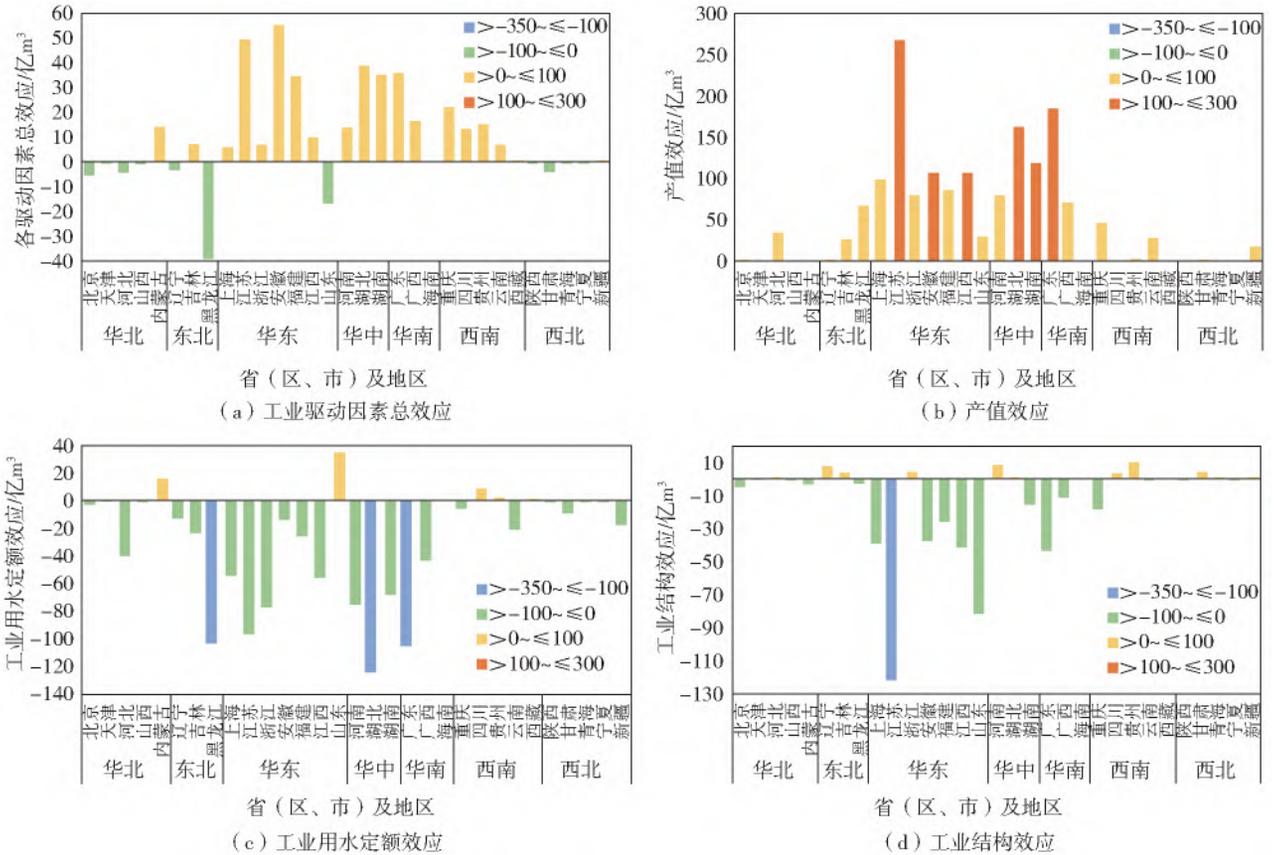


图 4 2000—2010 年工业用水变化量驱动效应分布

Fig. 4 Distribution map of driving effects of industrial water changes from 2000 to 2010

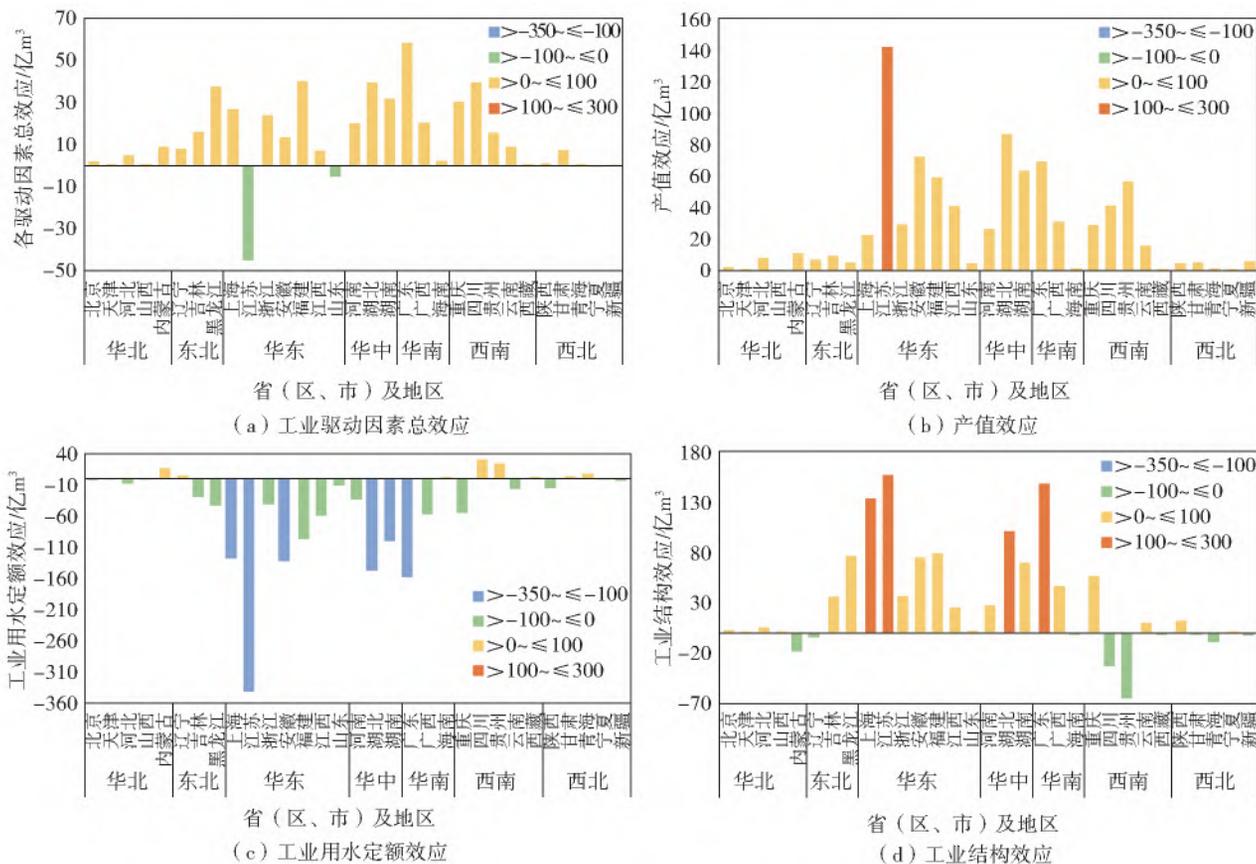


图5 2010—2020年工业用水变化量驱动效应分布

Fig. 5 Distribution map of driving effects of industrial water changes from 2010 to 2020

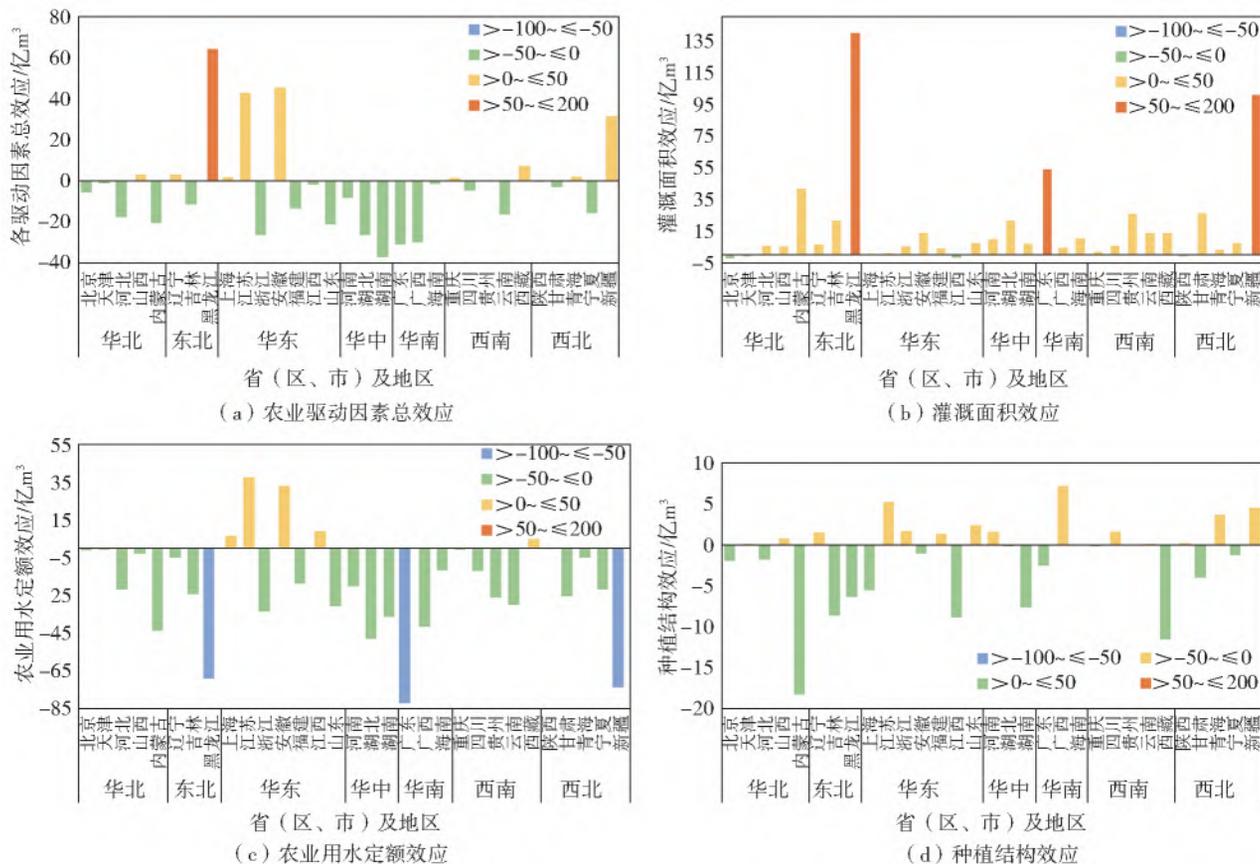


图6 2000—2010年农业用水变化量驱动效应分布

Fig. 6 Distribution of driving effects of changes in agricultural water use from 2000 to 2010

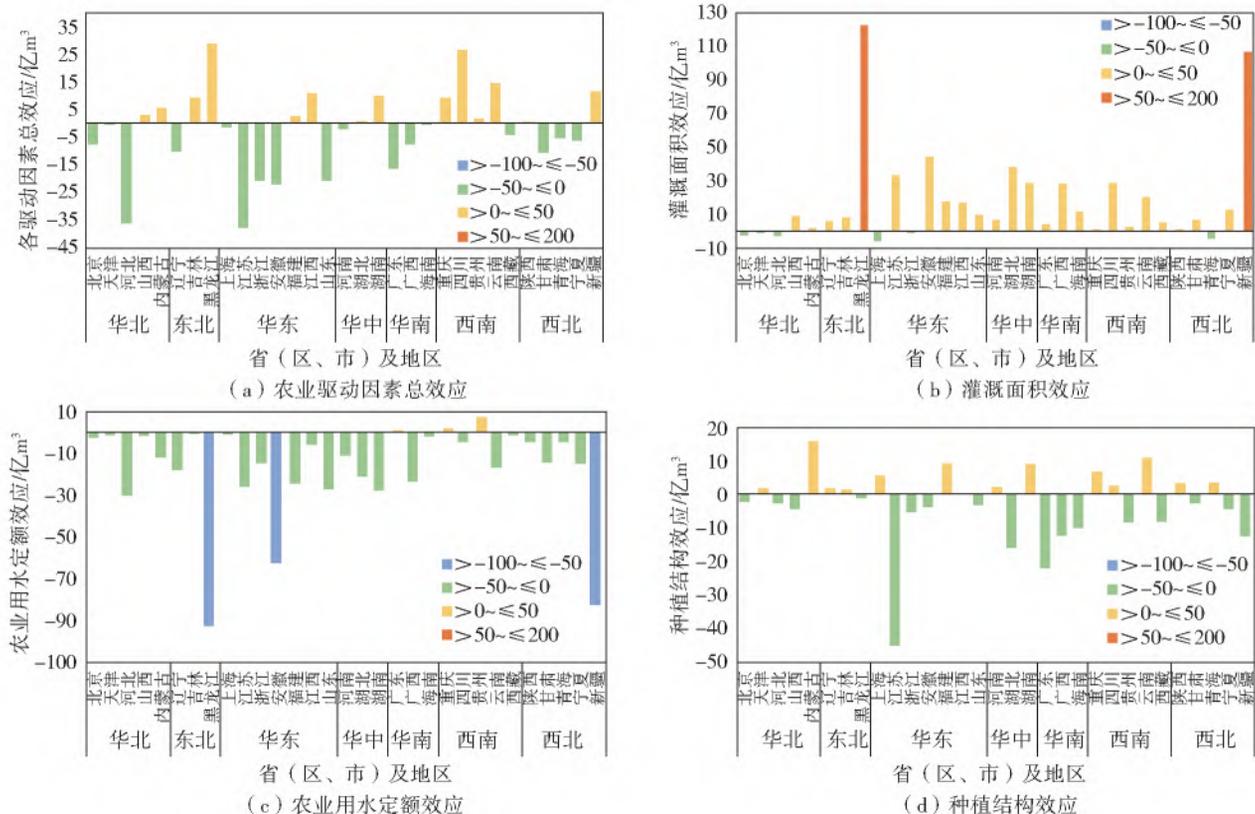


图 7 2010—2020 年农业用水变化量驱动效应分布

Fig. 7 Distribution of driving effects of changes in agricultural water use from 2010 to 2020

从图 4(a)可以看出,在 2010 年之前,大部分省(区、市)工业用水量是增加的,尤其以华东的江苏、江西、福建,华中的湖南、湖北以及华南的广东工业用水量增速最快,其主要驱动因素是产值规模扩大(图 4(b)),其驱动效应贡献率占到 56.6%,减少的省(区、市)基本呈集中连片分布,主要集中在黄河和海河流域,工业用水量呈缓慢下降态势。从图 5(a)可以看出,2010 年之后,除江苏、宁夏外,所有省(区、市)工业用水量均呈下降态势,尤其是华东、华中、华南各省在工业产值保持快速增长的同时(图 5(b)),工业用水定额下降发挥了巨大作用(图 5(c)),使得工业用水量明显降低。

农业用水变化量的空间分异尤为突出。从图 6(a)可以看出:2010 年之前,农业用水量增长最大的是黑龙江,其次是新疆和江苏、安徽 3 个省(区)。其中:黑龙江、新疆农业用水量增长的主要驱动因素是灌溉面积扩大(图 6(b)),灌溉面积效应贡献率达到 45.98%;而江苏、安徽则是由于灌溉面积扩大和农业用水定额提高两项因素叠加所致(图 6(b)、6(c))。从图 7(a)可以看出,2010 年之后,大部分省(区、市)农业用水量均微弱降低或升高。尤其是除福建外,我国东部沿海所有省(区、市)农业用水量全部降低,这主要是农业用水定额降低所致(图 7(c)、7(d)),农业用水定额效应贡献率为 53.85%。农业用水量增长

较大的是黑龙江和四川,主要是灌溉面积扩大所致(图 7(b)),灌溉面积效应贡献率为 55.2%。

### 3.2 “十三五”时期驱动效应变化新态势

水资源开发利用规模和方式与经济社会发展进程密切相关,尤其是在新时期治水思路以及新的人口产业政策和国土空间管控制度驱动下,人口、产业、城镇化等影响用水的各类驱动因素正在发生深刻变化,用水演变趋势也呈现新的特征。为了准确把握新的趋势,对“十三五”时期我国的其中 31 个省(区、市)用水量变化及驱动用水量变化的主导因素做了进一步分析,见图 8、表 2。

从图 8 可以看出,在“十三五”时期,全国仅有西南的云南、西藏,西北的宁夏用水总量增加,其余省(区、市)均呈减少态势。从表 2 可以看出,“十三五”时期,全国各省(区、市)促进用水量增长的主导因素普遍是工业产值增长、灌溉面积扩大和生活用水定额提高。其中大部分地区促进用水量增长的最主要因素是工业产值增长,东北的黑龙江、吉林,西北的新疆和西南的贵州、云南的最主要因素则是灌溉面积扩大,天津、山西和湖北则是生活用水定额提高和农业种植结构变化。“十三五”时期,全国各省(区、市)抑制用水量增长的主导因素普遍是工业用水定额和农业用水定额下降,其中大部分地区抑制用水量增长

的最主要因素是工业用水定额下降,东北的黑龙江、吉林、辽宁,华北的河北、山西,华中的河南,西北的

新疆和西南的云南则是农业用水定额下降。天津、四川分别是由于种植结构和工业结构发生变化。

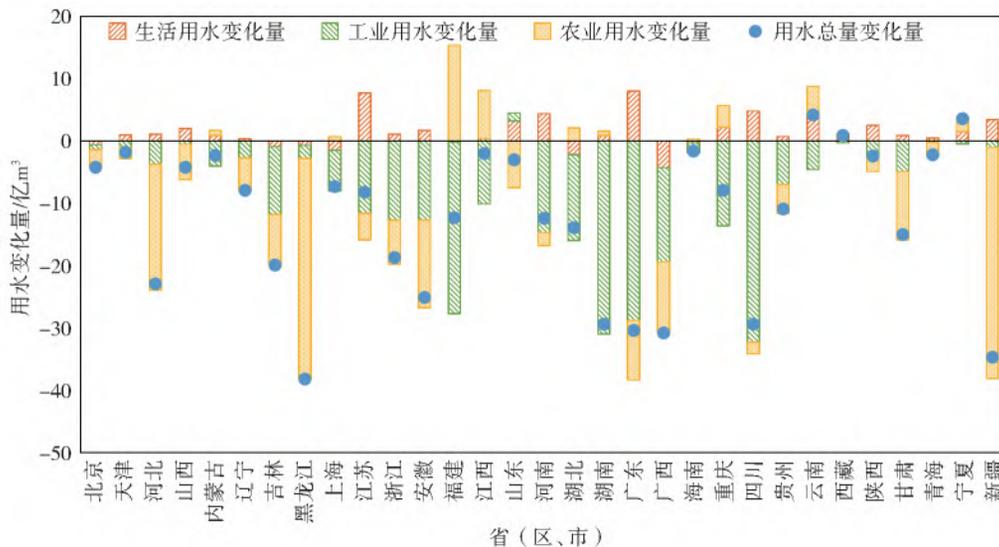


图8 “十三五”时期各省(区、市)用水量变化

Fig. 8 Changes in water consumption in various provinces during the "13th Five-Year Plan" period

表2 “十三五”时期各省(区、市)用水量变化的主导因素及其驱动效应贡献率

Tab. 2 Leading factors and contribution rates of water consumption changes in various provinces during the "13th Five-Year Plan" period

地区	省(区、市)	促进用水量增长的主导因素及其驱动效应贡献率	抑制用水量增长的主导因素及其驱动效应贡献率
华北	北京	工业产值 18%, 生活用水定额 11%	农业用水定额 27.1%, 工业用水定额 11.5%
	天津	生活用水定额 26%, 工业结构 6.9%	工业用水定额 9.9%, 种植结构 5.1%
	河北	工业产值 7.9%, 生活用水定额 7.1%	农业用水定额 55.4%, 工业用水定额 16%
	山西	生活用水定额 12.7%, 灌溉面积 12.6%	农业用水定额 54%, 工业用水定额 5.2%
	内蒙古	工业产值 40%, 灌溉面积 6.2%	工业用水定额 30%, 工业结构 2%
东北	辽宁	工业产值 21%, 灌溉面积 15%	农业用水定额 28%, 工业用水定额 14.5%
	吉林	灌溉面积 21.5%, 生活用水定额 15.6%	农业用水定额 38%, 工业用水定额 33.6%
	黑龙江	灌溉面积 14.9%, 工业产值 3%	农业用水定额 58%, 工业用水定额 2.8%
华东	上海	工业产值 24%, 种植结构 0.6%	工业用水定额 39.8%, 灌溉面积 1%
	江苏	工业产值 25.3%, 灌溉面积 9.5%	工业用水定额 37.7%, 农业用水定额 10%
	浙江	工业产值 18%, 生活用水定额 7.9%	工业用水定额 43%, 农业用水定额 4%
	安徽	工业产值 22%, 灌溉面积 6.8%	工业用水定额 36.9%, 农业用水定额 22%
	福建	农业用水定额 18%, 工业产值 16%	工业用水定额 49.8%, 种植结构 19%
	江西	工业产值 33.8%, 农业用水定额 9.3%	工业用水定额 35.4%, 工业结构 9%
	山东	工业产值 35%, 灌溉面积 7.5%	工业用水定额 31%, 农业用水定额 14%
华中	河南	种植结构 24.4%, 生活用水定额 9.5%	工业用水定额 30%, 农业用水定额 20%
	湖北	工业产值 20.4%, 生活用水定额 9.2%	工业用水定额 41.1%, 农业用水定额 4%
	湖南	工业产值 11%, 工业结构 7.8%	工业用水定额 35.2%, 农业用水定额 3%
华南	广东	工业产值 14%, 工业结构 6.5%	工业用水定额 48.7%, 农业用水定额 2%
	广西	灌溉面积 14.9%, 工业产值 7.4%	工业用水定额 29.1%, 农业用水定额 25%
	海南	工业产值 45.3%, 灌溉面积 2.3%	工业用水定额 36.4%, 工业结构 1%
西南	重庆	生活用水定额 14.5%, 农业用水定额 12.5%	工业用水定额 47.6%, 工业结构 13%
	四川	灌溉面积 17.1%, 生活用水定额 14.2%	工业用水定额 15%, 农业用水定额 9.4%
	贵州	灌溉面积 12.3%, 生活用水定额 12.2%	农业用水定额 25%, 工业用水定额 24.7%
	云南	灌溉面积 25.4%, 工业产值 15.4%	工业用水定额 21.9%, 农业用水定额 16%
	西藏	灌溉面积 17.8%, 生活用水定额 16.3%	工业用水定额 17.9%, 种植结构 2%
西北	陕西	工业产值 24.1%, 灌溉面积 12%	工业用水定额 30.7%, 农业用水定额 17%
	甘肃	工业产值 29.9%, 灌溉面积 4.1%	工业用水定额 28.1%, 农业用水定额 20%
	青海	工业产值 34.6%, 灌溉面积 8.2%	工业用水定额 32.9%, 农业用水定额 12%
	宁夏	工业产值 34%, 工业结构 8.7%	工业用水定额 43.1%, 种植结构 2.7%
	新疆	灌溉面积 10.4%, 工业产值 8.6%	农业用水定额 44%, 种植结构 7.6%

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

由于统计口径变化较大、占比较低等原因,本研究未对生态用水进行系统分析。可以看出,近 20 年来全国生态用水量持续快速增加,从 2003 年的 79.5 亿  $\text{m}^3$  增长到 2020 年的 307 亿  $\text{m}^3$ ,其增长驱动力主要来源于改善城乡生态环境、维持河湖湿地健康等方面<sup>[22-24]</sup>。随着我国生态文明建设的加快推进,生态用水还将保持增长态势,需要在未来需水预测及相关水利工程规划中高度重视。

不同区域不同时期各类因素的驱动作用在不断演变,而这些变化的合力将会决定未来用水变化趋势。但要准确识别和预测这些因素演变规律,既需要有对中国经济社会发展进程的宏观审视,也需要对区域特征有深入的微观研究。本研究为在特定地区应该重点分析哪些因素提供了靶向参考,下一步可结合人口流动趋势和产业结构变化等对典型地区展开深入研究。

统计监测体系的完善是用水变化规律及相关研究的重要基础。2012 年以来我国实施了最严格水资源管理制度,用水总量考核可能会导致统计量一定程度的变形,影响研究的准确性。当然,驱动效应演变的趋势性规律通过本研究依然可见端倪。再如工业用水方面,未来如能开展工业各细分门类的用水统计监测,在此基础上加以分析,无疑可以获得更为精细和完整的研究成果。

### 4.2 结论

2000—2020 年,我国用水总量在波动中经过了从增长到减少的过程,2020 年用水总量几乎与 20 年前持平,但用水结构发生了一定调整,生活用水量占比有所提高,工业和农业用水量占比略有下降。从经济社会用水总量整体来看,以 2013 年为分界点:2013 年前,农业用水变化量主导了用水总量变化趋势,贡献率平均达到 57.42%;2013 年以后,则是工业用水变化量带动作用逐渐增强,并占据了相对主导地位,贡献率平均达到 44.3%,其次是农业用水变化量、生活用水变化量。

生活用水量从 2000 年以来始终保持着增长态势,但起主导作用的驱动因素逐步发生了变化,2012 年以前主要是由于用水定额提高带来了生活用水量的增长,2012 年以后则主要是城镇化率提高带来了生活用水量的增长。工业用水量始终受到工业规模扩大、工业用水定额下降两种不同方向驱动力的强

烈影响,2011 年前工业规模扩大带来的产值增加占优,2011 年以后工业用水效率提高带来的工业用水定额下降影响更大。农业用水呈现出一定波动性,但总体上也是以 2012 年为分界点,呈现先增后减的态势。农业用水也始终受到灌溉面积和农业用水定额的主导,相对而言,农业用水定额降低的效应略大,但灌溉面积扩大始终是不容忽视的重要因素。

由于经济社会发展进程和水资源禀赋条件的差异,各区域在不同时期所表现出的用水量变化特征及其背后的驱动因素呈现出较大的空间分异性。“十三五”时期,各省(区、市)促进用水量增长的主导因素普遍是工业产值增长或农业灌溉面积扩大,而抑制用水量增长的主导因素普遍是工业用水定额下降或农业用水定额下降。总体来看,我国在保持经济发展的同时,各行业节水对抑制用水增长发挥了巨大作用,而区域间人口流动、城镇化进程等因素带来的驱动作用也在逐渐增大。

### 参考文献(References):

- [1] 赵勇,李海红,刘寒青,等.增长的规律:中国用水极值预测[J].水利学报,2021,52(2):129-141. (ZHAO Y, LI H H, LIU H Q, et al. The law of growth: Prediction of peak water consumption in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 129-141. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200457.
- [2] 陈磊,乔昌凯,夏琳琳,等.广东省新型城镇化时期生活用水量变化及驱动机制[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):273-280. (CHEN L, QIAO C K, XIA L L, et al. Changes of domestic water consumption and its driving mechanism in the period of new urbanization of Guangdong[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 273-280. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2021.0029.
- [3] 管驰明,张洋洋,石常峰.农业虚拟水消耗影响因素分解及时空差异:以西北 5 省(自治区)为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):193-201. (GUAN C M, ZHANG Y Y, SHI C F. Decomposition of influencing factors of agricultural virtual water consumption and its spatial and temporal differences: A case study of five provinces (autonomous regions) in northwest China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 193-201. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0109.
- [4] 秦长海,赵勇,李海红,等.区域节水潜力评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):36-42. (QIN C H, ZHAO Y, LI H H, et al. Assessment of regional water saving potential [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 36-42. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-

- dqk. 2021. 0003.
- [5] 严婷婷,刘定湘,颜霜,等.黄河流域“以水而定,量水而行”的思考与建议:基于用水变化及驱动因素分析[J].水利发展研究,2020,20(10):54-58.(YAN T T,LIU D X,YAN S,et al.Ponderation and suggestion on "depending on water and running on water" in the Yellow River basin:An analysis based on water use change and driving factors[J].Water Resources Development Research,2020,20(10):54-58.(in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrdr.2020.10.012.
- [6] 孙思奥,汤秋鸿.黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素[J].资源科学,2020,42(12):2261-2273.(SUN S A,TANG Q H.Spatiotemporal patterns and driving factors of water resources use in the Yellow River basin[J].Resources Science,2020,42(12):2261-2273.(in Chinese)) DOI:10.18402/resci.2020.12.01.
- [7] 袁宝招,陆桂华,李原园,等.水资源需求驱动因素分析[J].水科学进展,2007,18(3):404-409.(YUAN B Z,LU G H,LI Y Y,et al.Analysis of driving factors for water demand[J].Advances in Water Science,2007,18(3):404-409.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2007.03.016.
- [8] 杨朝晖,王婷,游进军,等.我国用水演变趋势及驱动效应分析[J].中国水利,2020(21):26-28,31.(YANG Z H,WANG T,YOU J J,et al.Evolution of water consumptions and analysis of driving effect in China[J].China Water Resources,2020(21):26-28,31.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2020.21.014.
- [9] 张之颖,张辉,章静,等.1965—2013年中国用水量的时空演变[J].水利水运工程学报,2021,9(6):1-11.(ZHANG Z Y,ZHANG H,ZHANG J,et al.Spatio-temporal variations of water use in China from 1965 to 2013[J].Hydro-Science and Engineering,2021,9(6):1-11.(in Chinese)) DOI:10.12170/20210428002.
- [10] 何国华,姜珊,赵勇,等.我国现状能源与水纽带关系定量识别[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):54-70.(HE G H,JIANG S,ZHAO Y,et al.Quantitative identification of the link between energy and water in China[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(4):54-70.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0072.
- [11] 杨中文,许新宜,王红瑞,等.用水变化动态结构分解分析模型研究 I:建模[J].水利学报,2015,46(6):658-667.(YANG Z W,XU X Y,WANG H R,et al.Dynamic structural decomposition analysis model of water use evolution I:Modeling[J].Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(6):658-667.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20140553.
- [12] 杨中文,许新宜,陈午,等.用水变化动态结构分解分析模型研究 II:应用[J].水利学报,2015,46(7):802-810.(YANG Z W,XU X Y,CHEN W,et al.Dynamic structural decomposition analysis model of water use Evolution II:Application[J].Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(7):802-810.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20140554.
- [13] WANG B H, SMALL M J, DZOMBAK D A. Improved efficiency reduces U. S. industrial water withdrawals, 2005-2010[J]. Environmental Science & Technology, 2015,2(4):79-83. DOI:10.1021/acs.estlett.5b00023.
- [14] ANG B W. Decomposition analysis for policy making in energy: Which is the preferred method? [J]. Energy Policy, 2004, 32(9): 1131-1139. DOI: 10.1016/S0301-4215(03)00076-4.
- [15] ANG B W, ZHANG F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies [J]. Energy, 2000, 25(12): 1149-1176. DOI: 10.1016/S0360-5442(00)00039-6.
- [16] 张礼兵,徐勇俊,金菊良,等.安徽省工业用水量变化影响因素分析[J].水利学报,2014,45(7):837-843.(ZHANG L B,XU Y J,JIN J L,et al.Analysis of influence factors of regional industry water use in Anhui province[J].Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(7):837-843.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2014.07.010.
- [17] 张陈俊,章恒全,陈其勇,等.中国用水量变化的影响因素分析:基于 LMDI 方法[J].资源科学,2016,38(7):1308-1322.(ZHANG C J,ZHANG H Q,CHEN Q Y,et al.Factors influencing water use changes based on LMDI Methods [J].Resources Science,2016,38(7):1308-1322.(in Chinese)) DOI:10.18402/resci.2016.07.12.
- [18] 陈美琳,陈磊,夏琳琳,等.广东省生产用水结构时空变化及影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):92-102.(CHEN M L,CHEN L,XIA L L,et al.Spatiotemporal variations and influencing factors of productive water consumption structure in Guangdong Province[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(1):92-102.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0009.
- [19] 刘翀,柏明国.安徽省工业行业用水消耗变化分析:基于 LMDI 分解法[J].资源科学,2012,34(12):2299-2305.(LIU C,BAI M G.Change in industrial water use in Anhui Province based on LMDI[J].Resources Science,2012,34(12):2299-2305.(in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:ZRZY.0.2012-12-013.
- [20] 白夏,戚晓明,潘争伟,等.区域产业用水需求变化驱动效应测度及空间分异分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(4):89-96.(BAI X,QI X M,PAN Z W,et al.Measurement of driving effects and spatial variation analysis for change of regional industrial water utilization[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science),2018,39(4):89-96.(in Chinese))

- DOI:10.3969/j.issn.1002-5634.2018.04.015.
- [21] 周志刚,郑明亮.基于对数均值迪氏指数法的中国粮食产量影响因素分解[J].农业工程学报,2015,31(2):1-6.(ZHOU Z G,ZHENG M L.Influential factors decomposition for China's grain yield based on logarithmic mean Divisia index method[J].Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(2):1-6.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.02.001.
- [22] 陈晓清,侯保灯,周毓彦,等.中国地理分区用水结构时空演变对比分析[J].中国农村水利水电,2021(6):78-85,90.(CHEN X Q,HOU B D,ZHOU Y Y,et al.A comparative analysis of the spatial and temporal evolution of water use structure in geographical regions of China[J].China Rural Water and Hydropower,2021(6):78-85,90.(in Chinese)) DOI:ISSN:1007-2284CN:42-1419.
- [23] 白鹏,刘昌明.北京市用水结构演变及归因分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):1-6,34.(BAI P,LIU C M.Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(4):1-6,34.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0090.
- [24] 安婷莉,韩昕雪琦,高学睿,等.虚拟水理论发展及应用前景综述[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):44-61.(AN T L,HAN X X Q,GAO X R,et al.A review of the development and application prospect of virtual water theory[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(2):44-61(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0026.

### Driving effect evolution and spatial differentiation of water use change in China

HE Fan, GU Bing, HE Guohua, LU Peiyi, YIN Jing, ZHAO Yong, LI Haihong

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Accurately studying and judging changes in national and regional water consumption is prerequisite for rational layout of major water conservancy projects and scientific formulation of water resources management policies. The identification and quantification of the main influencing factors and their driving effects that lead to changes in water consumption is an important basis for accurately grasping the trend of changes in water consumption. At the current stage when the contradiction between water supply and demand is prominent and the economic and social development is undergoing a comprehensive transformation, in-depth research on the main factors affecting water consumption, temporal and spatial changes, and their internal mechanism is undoubtedly of important practical significance and has also received extensive attention from academic circles.

The current methods for quantitatively measuring the driving effect of water consumption changes mainly include structural decomposition analysis (SDA) and index decomposition analysis (IDA). However, whether it is the structural decomposition method or the index decomposition method, the existing results are generally based on the total water consumption as a whole to conduct research or only analyze the water consumption of specific industries in specific regions. The study of total water consumption as a whole ignores the differences in the driving forces of water consumption in different industries of life, industry, and agriculture to a certain extent. Research on water consumption of specific industries in specific regions can not fully reflect the evolution of country's water use process. Considering that the logarithmic mean Divisia index (LMDI) in the index decomposition method effectively solves the problem of residual items and zero values in the index decomposition, it is not affected by the input-output table. For the impact of a long release cycle, this study uses the Kaya identity optimization to construct a multi-level LMDI method. Based on the overall analysis of the national water consumption driving effect, it further analyzes the water consumption driving effect of each industry from 2000 to 2010 and 2010 to 2020. Decomposition research is carried out, and an in-depth analysis of the spatial differentiation of driving effects and the latest changes during the 13th Five-Year Plan is carried out.

From 2000 to 2020, there is an increase to decrease fluctuation in country's total water consumption. The total water consumption in 2020 is almost the same as 20 years ago, but the water use structure has undergone certain adjustments, taking 2013 as the boundary point, the change in agricultural water use before 2013 dominated the change in total water use, with an average contribution rate of 57.42%. After 2013, the change in industrial water consumption has taken up a relatively dominant position, with an average contribution rate of 44.3%. Domestic water consumption before 2012 was mainly due to the increase in water quota, and after 2012, the increase in domestic water consumption was mainly due to the increase in the urbanization rate. Industrial water consumption has always been strongly affected by the two driving forces of industrial-scale expansion and decline in industrial water quotas. Before 2011, the increase in industrial output value was dominant, and after 2011, the decline in industrial water quotas was even greater. Agricultural water use has always been dominated by irrigation area and agricultural water quotas. The effect of reducing agricultural water quota is slightly greater, but the expansion of irrigation area is always an important factor that can not be ignored. During the Thirteenth Five-Year Plan, the leading factor in the provinces to promote the water consumption growth was generally the increase in industrial output value or the expansion of agricultural irrigation area, while the leading factor in restraining the water consumption growth was the decline in the industrial water quota or the decline in the agricultural water quota.

**Key words:** water consumption; driving effect; spatial differentiation; index decomposition; LMDI