

长江经济带沿线城市水资源绿色效率及节水减排潜力时空演变¹

安 慧¹ 汪永豪¹ 安 敏^{2*} 王丽杰¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002)

【摘 要】: 准确测算长江经济带沿线城市水资源绿色效率, 对长江经济带沿线城市的水资源合理利用和绿色发展建设具有重要意义。运用 SE-SBM 模型(Super-Efficiency Slacks-Based Model) 测度 2010 ~ 2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率, 结合泰尔指数分解探究其水资源绿色效率地区差异的形成根源, 并采用 ML 指数方法(Malmquist-Luenberger) 挖掘水资源绿色效率变化的内在原因; 进而, 利用水资源投入和水污染物产出的实际值与最优值的差异测算长江经济带沿线 45 个城市的节水减排潜力。结果显示: (1) 研究期内长江经济带沿线 45 个城市有 77. 8% 的城市水资源绿色效率处于无效率, 水资源绿色效率空间分布呈现为长江经济带下游 > 上游 > 中游; (2) 2010 ~ 2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率整体处于上升阶段, 但有昭通、丽江、攀枝花、贵阳、铜陵、湖州、绍兴、舟山和鄂州等 9 个沿线城市水资源绿色效率处于下降阶段, 受到不同程度的纯技术效率、规模效率和技术进步变化的影响; (3) 将节水潜力、污水减排潜力和工业废水减排潜力值分别划分为“低、中和高”3 个区间段, 并将沿线 45 个城市分为“三高、二高、一高、中等和三低”5 种类型, 其中岳阳、马鞍山、黄石和荆州等 4 个城市属于“三高”类型; 在空间格局上, 节水减排潜力“三低”类型的城市呈现出“大连片, 小散落”的集聚形势。基于以上研究结果, 本研究可为促进长江经济带沿线城市水资源合理开发利用, 实现区域高质量绿色发展提供对策。

【关键词】: 水资源绿色效率; SE-SBM 模型; 泰尔指数; ML 指数

【中图分类号】: TV213. 4 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2023) 04-0692-14

【DOI】: 10. 11870 /cjlyzyyhj202304002

2020 年 11 月习近平总书记在全面推动长江经济带发展座谈会上强调, 在严格保护生态环境的前提下, 全面提高资源利用效率, 努力建设绿色发展示范带。水资源作为长江经济带生态文明建设和绿色发展的核心要素之一, 如何有效利用水资源促进长江经济带经济效益和社会效益的同时, 减少对环境的污染损害, 这对于经济带绿色发展的建设尤为关键。长江经济带沿线城市

¹ **【收稿日期】**: 2022-05-23; **【修回日期】**: 2022-08-11

【基金项目】: 国家自然科学基金青年项目(72004116) ; 2021 年湖北省教育厅科学研究计划资助项目中青年人才项目(Q20211211) ; 湖北省人文社会科学重点研究基地项目(2021-SDSG-05) ; 宜昌市社会科学研究项目(ysk22kt091)

【作者简介】: 安 慧(1977 ~), 女, 副教授, 主要研究方向为水资源管理与水利水电项目管理. E-mail: anhui@ctgu. edu. cn

【* 通讯作者 E-mail】: anmin@ctgu. edu. cn

依江而立，这些地区水资源相对丰富，但存在水资源丰裕度与城市经济发展程度不匹配的问题，具体而言水资源丰富的西部城市由于节水环保技术和产业结构较为落后，使其水资源浪费和利用效率低的问题较为严重^[1]，而水资源相对缺乏的东部城市因为城镇建设和经济的高速发展引发水资源供需矛盾愈加突出^[2]，破解这种问题的关键在于逐步提高水资源利用效率^[3]。因此，科学测量长江经济带沿线城市水资源利用效率，并挖掘城市水资源利用效率变化的内在原因，对于探寻长江经济带高质量可持续发展和绿色发展的建设路径具有重要的理论价值和实际意义。

国内外对水资源利用效率的研究视角主要包括单要素水资源效率和全要素水资源效率，其中单要素水资源效率指的是单位水资源要素投入所获得最大效益的能力，通常采用单位工业增加值用水量、单位 GDP 用水量和单位居民生活用水量等量化指标测度，但该视角未考虑水资源投入之外的其他生产要素^[4]。全要素水资源效率是全面考虑资本、劳动力等投入和各种产出时的水资源利用效率，在一定的投入要素条件下，能够取得最优的目标投入产出组合，相比单要素水资源效率更贴近现实生产过程，逐步成为水资源利用效率评价的主流切入点^[5]。在全要素水资源效率的研究视角下，现有研究在构建投入产出指标体系上存在共性。大多数研究采用水资源、资本和劳动力等作为投入指标^[6,7,8]，以 GDP 为期望产出和废水、污水排放量为非期望产出^[9,10,11,12]，将水污染等环境因素加入水资源效率测度评价指标内，充分体现了学术界对水生态环境发展方面的关注，但在当前推行绿色发展理念实行经济、社会和环境共赢发展的目标下^[13,14]，仅考虑经济与环境因素会对水资源利用效率的综合评估产生一定的差异。2017 年，孙才志^[15]率先界定了水资源绿色效率，将社会维度列入指标体系内，使水资源效率的测度中融入永续发展、人与自然和谐共处的绿色发展理念。自此，水资源绿色效率被认为是现阶段对于水资源利用更为全面和客观的表现形式，逐渐成为学界水资源效率的研究热点。ZHANG 等^[16]、杨高升等^[17]、孙才志等^[18]分别对中国 31 个省份、长江经济带 11 个省市和中国东、中、西部三大地区的水资源绿色效率进行了测度，并表明加入社会维度效应对水资源整体利用效率的改进具有积极作用。

然而上述研究也存在以下不足，其一，现有的水资源绿色效率主要集中在省域层面展开，而水资源被用于生产和生活活动的空间更多还是集聚于城市，将研究尺度下沉到市域，研究结论的精确性和建议的有效性会得到显著的提升。其二，水资源利用效率的测度旨在正确指导节水型社会的建设，增强政府节水减排工作管理的能力和手段。然而，现有的研究主要强调了实际生产过程中水资源与劳动力、资本等相关要素的投入产出效率，但在现实中城市的节水减排工作很难依托这种“效率”进行具体的指标和任务分配，更多需要以水资源实际可节约量和水污染物可改进的排放量作为节水减排工作的依据。因此，本文在构建全要素水资源效率的框架下，利用效率损失分解得到水资源实际生产过程中所损耗的量和污染物可改进的排放量，从而更清楚和客观的反映城市的节水减排空间。

综上，本研究采用 SE-SBM 模型对 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市的水资源绿色效率展开测度，结合泰尔指数分解探究其水资源绿色效率地区差异的形成根源，并运用 ML 指数方法挖掘水资源绿色效率变化的内在原因；进而，利用水资源投入和水污染物产出的实际值与最优值的差异测算长江经济带沿线 45 个城市的节水减排潜力。其主要的边际贡献在于以下两点，第(1)研究尺度的下沉，以城市作为水资源效率测度的基本单元，并构建“经济-社会-环境”3 个维度展开测度，丰富了现有水资源效率的研究；第(2)研究内容的扩展，以往的研究主要聚焦于水资源效率的评价，对具体节水减排工作的指标和任务分配的操作依据较为模糊，本文通过进一步确定水资源实际生产过程中所损耗的量和污染物可改进的排放量作为依据，从而弥补上述不足。

1 研究方法

1.1 研究区域

本研究依据各地区与长江黄金水道的紧密影响程度，选取了 45 个主要长江经济带沿线城市，并根据长江水利委员会有关长江流域上、中、下游划分方案，将长江干流中的湖北省宜昌市以上为长江经济带上游，湖北省宜昌市至江西省九江市湖口县为长江经济带中游，江西省九江市湖口县以下为长江经济带下游，如图 1 所示。2019 年沿线 45 个城市 GDP 和常住人口约占长江经济带比重的 65.4%和 46.6%，占据了长江经济带社会经济发展的重要地位。然而长江经济带沿线 45 个城市水资源禀赋与经济发展差距较大，导致长江经济带中上游沿线城市用水浪费现象严重，长江经济带下游沿线城市水资源供应乏力。因此，有效提高

长江经济带沿线城市水资源利用效率有助于落实其水资源管理制度。具有市级边界数据的长江经济带沿线 45 个城市矢量地图来源于《全国 1：400 万基础地理信息数据》)。

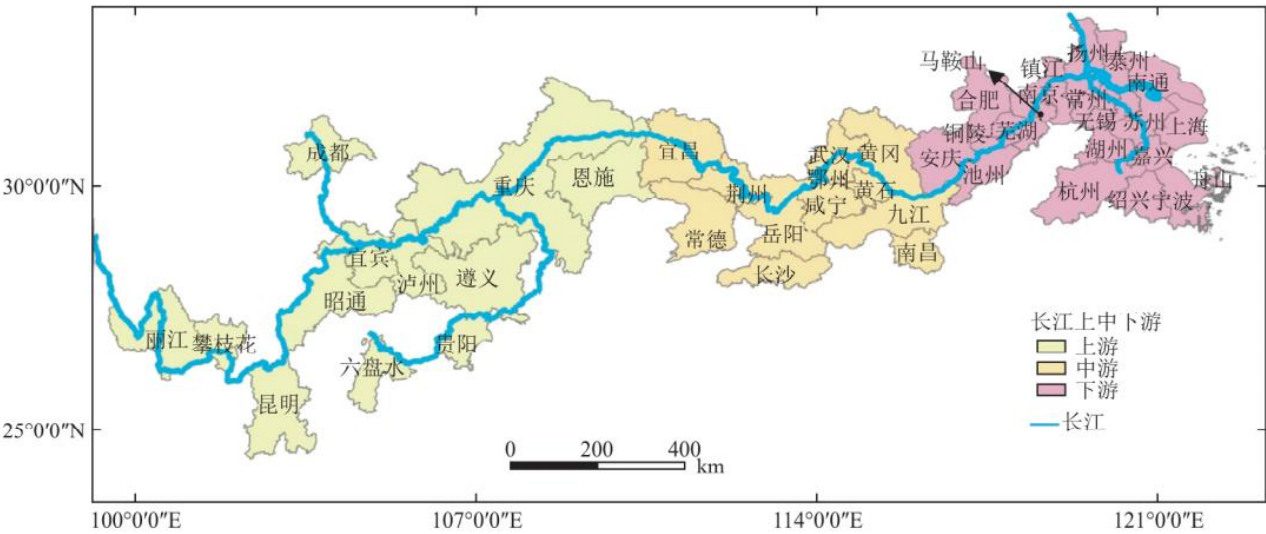


图 1 长江经济带沿线 45 个城市地图
Fig. 1 Map of 45 cities along Yangtze River Economic Belt

1.2 数据来源和指标选取

数据来源于 2011~2020 年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》、各省市统计年鉴及 2010~2019 年各省市水资源公报。研究含有两类指标分别为投入和产出型，其中投入型指标有水资源、劳动、资本 3 个方面，分别为城市用水总量、从业人员数及全社会固定资产投资总额；产出型指标包含经济、社会、环境产出，分别为 GDP、社会发展指数、污水排放量及工业废水排放量。

(1)城市用水总量。

以 45 个城市用水总量(亿 m3)表示实际消耗的水资源量。

(2)从业人员。

以 45 个城市全社会从业人员数(万人)表示生产过程中投入的劳动力数量。

(3)资本投入。

以 45 个城市全社会固定资产投资总额(亿元)作为构建 DEA 模型所需的资本投入指标，并采用 2010 年不变价格计算。

(4)GDP。

以 45 个城市的地区生产总值(亿元)作为期望产出指标之一，并采用 2010 年不变价格计算。

(5)污水及工业废水排放量。

以 45 个城市污水排放量及工业废水排放量(万 t)来衡量水资源使用过程中对环境产生的负面影响。

(6)社会发展指数。

借鉴代金辉等^[19]、朱庆芳^[20]对社会发展质量评价的研究，建立相关指标体系，如表 1 所示，计算公式如下：

高优指标归一化方法：

$$x_{ij} = (x_{ij}^* - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

低优指标归一化方法：

$$x_{ij} = (x_{j\max} - x_{ij}^*) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

表 1 社会维度的指标体系

一级指标	二级指标	指标意义	指标类型
社会发展指数	65 岁以上人口比重 x1	人口控制	低优
	非农业人口比例 x2	城市化水平	高优
	每万人口医生数 x3	医疗资源占有情况	高优
	科教事业费占财政支出比例 x4	政府对科教的重视程度	高优

社会发展指数 H：

$$H = \frac{1}{n} \sum x_{ij} \quad (3)$$

式中：设样本为 $\{x_{ij}^* \mid i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n\}$ ，其中 m 为样本个数； n 为指标数量； x_{ij}^* 为第 i 个样本第 j 个指标值； $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为第 j 个指标值的上限和下限； x_{ij} 为指标归一化后的数值； H 为某年区域系统社会发展指数。 H 值越大，社会发展能力越强，反之越弱。

1.3 模型构建

1.3.1 SE-SBM 模型

全要素水资源效率的评价方法主要有 3 种，随机前沿分析(SFA)法[21]、指标体系评价法[22]和数据包络分析(DEA)法^[23]。其中 DEA 利用非参数方法即求解线性规划来确定有效生产前沿面，是客观评价多投入多产出决策单元效率的有效方法，也是目前应用最为广泛地评价相对效率的技术工具之一。SE-SBM 模型(Super-Efficiency Slacks-Based Model)的优点在于不仅克服了径向 DEA 模型要素松弛的问题，还可以弥补对有效决策单元之间比较分析的不足，从而在评价城市水资源效率中更加准确^[24]。在 SE-SBM 模型中，假设有 n 个决策单元，每个决策单元有 m 种投入(x)、 q_1 种期望产出(y)、 q_2 种非期望产出(b)，定义矩阵 X 、 Y 、 B 为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ ， $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ ， $B=[b_1, b_2, \dots, b_n]$ ，令 $X>0, Y>0, B>0$ ，则生产集合表示为： $P=\{(x, y, b) \mid x \geq X\lambda, y \leq Y\lambda, b \leq B\lambda\}$ ，其中 λ 为权重向量。以长江经济带沿线 45 个城市作为 45 个决策单元(DMU)，以城市用水总量、从业人员和资本投入为投入要素，GDP 和社会发展指数为期望产出，污水及工业废水排放量为非期望产出。具体模型如下：

$$\begin{aligned}
 \min \rho = & \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik}}{1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^{b-} / b_{tk} \right)} \\
 \text{s. t. } & \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\
 & \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \geq y_{rk} \\
 & \sum_{j=1, j \neq k}^n b_{tj} \lambda_j - s_t^{b-} \leq b_{tk} \\
 & 1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^{b-} / b_{tk} \right) > 0 \\
 & \lambda, s^-, s^+, s^{b-} \geq 0 \\
 & i=1, 2, \dots, m; r=1, 2, \dots, q_1; \\
 & t=1, 2, \dots, q_2; j=1, 2, \dots, n (j \neq k)
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中：n 为城市数量；k 为被评价对象；m、q1、q2 分别为投入、期望产出、非期望产出对应的指标数量； x_{ij} 为第 j 个 DMU 的 i 项投入； y_{rj} 和 b_{tj} 为第 j 个 DMU 的 r 项和 t 项产出； ρ 表示城市水资源利用的相对效率，当 $\rho < 1$ ，说明该 DMU 处于无效率状态，当 $\rho \geq 1$ ，说明该 DMU 为有效； λ 为权重向量； s_i^- 、 s_r^+ 、 s_t^- 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量。

1.3.2 泰尔指数

泰尔指数的提出是在熵值概念的基础上为了更好地量化地区收入差距，其优点在于清晰地分析差距来源和衡量它们在总体差距中的重要性贡献率^[25, 26]。本文借鉴汪克亮等^[27]对于泰尔指数及其结构分解的方法，得到的泰尔指数表达式为：

$$Theil = Theil_w + Theil_b \quad (5)$$

$$Theil_p = \frac{1}{n_p} \sum_{p=1}^{n_p} \frac{e_{pi}}{\bar{e}_p} \ln \frac{e_{pi}}{\bar{e}_p} \quad (6)$$

$$Theil_w = \sum_{p=1}^3 \left(\frac{n_p}{45} \times \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) Theil_p \quad (7)$$

$$Theil_b = \sum_{p=1}^3 \frac{n_p}{45} \left(\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \ln \left(\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \quad (8)$$

式中： n_p ($p=1, 2, 3$) 表示长江经济带三大地区的城市数量； $\bar{e}$ 为经济带水资源绿色效率的均值； e_{pi} ($p=1, 2, 3$) 表示经济带上中下游各城市水资源绿色效率值； $\bar{e}_p$ ($p=1, 2, 3$) 表示上中下游地区水资源绿色效率的均值； $Theil$ 为经济带水资源绿色效率总体差距； $Theil_p$ 为上中下游各城市水资源绿色效率地区差距； $Theil_b$ 和 $Theil_w$ 分别表示经济带水资源绿色效率的地区间差距与地区内部差距。

1.3.3 ML 指数

Malmquist-Luenberger 指数 (ML 指数法) 可以弥补 SE-SBM 模型只能对各决策单元进行静态效率分析的不足，有利于观察水资源在长期和连续的时间过程中的利用状态，并挖掘导致效率变动的内在原因^[28]。

假设 t 时期第 k 个决策单元的投入产出为 (x_{tkkt} , y_{tkkt} , b_{tkkt} ; g_{tkkt})，基于 ML 指数的线性规划方程为：

$$\begin{aligned}
& \vec{D}_t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; g_k^t) = \max \beta \\
& \text{s. t. } \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t \geq (1 + \beta) y_{km}^t \\
& (m = 1, 2, \dots, M) \\
& \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t = (1 - \beta) b_{ki}^t \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (9) \\
& \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t \leq x_{kn}^t \quad (n = 1, 2, \dots, N) \\
& z_k^t \geq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K)
\end{aligned}$$

式中：g 为方向向量，定义为 $g=(gy, -gb)$ ； β 为距离函数值； z_k 表示生产规模报酬； $\sum_{k=1}^K z_k = 1$ 表示规模报酬可变。ML 指数通常用 TFP 值表示，以第 k 个决策单元为例，具体公式如下：

$$\begin{aligned}
TFP_t^{t+1} &= \left[\frac{1 + \vec{D}_k^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; g_k^t)}{1 + \vec{D}_k^t(x_k^{t+1}, y_k^{t+1}, b_k^{t+1}; g_k^{t+1})} \cdot \frac{1 + \vec{D}_k^{t+1}(x_k^t, y_k^t, b_k^t; g_k^t)}{1 + \vec{D}_k^{t+1}(x_k^{t+1}, y_k^{t+1}, b_k^{t+1}; g_k^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= \frac{1 + \vec{D}_k^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; g_k^t)}{1 + \vec{D}_k^t(x_k^{t+1}, y_k^{t+1}, b_k^{t+1}; g_k^{t+1})} \cdot
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{1 + \overrightarrow{D}_k^{t+1}(x_k^t, y_k^t, b_k^t; g_k^t)}{1 + \overrightarrow{D}_k^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; g_k^t)} \cdot \right. \\
& \left. \frac{1 + \overrightarrow{D}_k^{t+1}(x_k^{t+1}, y_k^{t+1}, b_k^{t+1}; g_k^{t+1})}{1 + \overrightarrow{D}_k^t(x_k^{t+1}, y_k^{t+1}, b_k^{t+1}; g_k^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \\
& = CH_{Eff} \times CH_{Tech} \\
& = CH_{Pe} \times CH_{Se} \times CH_{Tech} \quad (10)
\end{aligned}$$

当 $TFP_t^{t+1} > 1$, 表示 t+1 期的效率相比 t 期上升, 当 $TFP_t^{t+1} < 1$, 表明 t+1 期的效率相比 t 期下降。t+1 期相对于 t 期效率变动的原因由 CHEff (技术效率变化指数) 和 CHTech (技术进步变化指数) 构成, 表示为 $TFP = CHEff \times CHTech$, 而 CHEff (技术效率变化指数) 又可以分解为 CHPe (纯技术效率变化) 和 CHSe (规模效率变化), 所以 $TFP = CHPe \times CHSe \times CHTech$ 。其中, CHEff (技术效率变化指数) 反映生产过程中技术优化的有效性; CHTech (技术进步变化指数) 反映了技术的进步和创新水平; CHPe (纯技术效率变化) 反映了管理水平变化对效率产生的影响; CHSe (规模效率变化) 反映了资源投入规模对效率的影响。

1.3.4 节水减排潜力

通过求解公式 (4), 可以分解得到第 k 个城市在 t 时期的水资源投入的松弛量即为水资源投入过程中所损耗的量和第 k 个城市在 t 时期的最优目标污水和工业废水排放量。借鉴范丹等^[29]定义节能减排潜力的方式, 将城市节水潜力、污水减排潜力和工业废水减排潜力的计算公式表示如下:

(1) 节水潜力:

$$S_{k,t} = \frac{L_{k,t}}{W_{k,t}} \quad (11)$$

(2) 污水减排潜力:

$$P_{k,t}^a = \frac{A_{k,t}^a - T_{k,t}^a}{A_{k,t}^a} \quad (12)$$

(3)工业废水减排潜力:

$$P_{k,t}^b = \frac{A_{k,t}^b - T_{k,t}^b}{A_{k,t}^b} \quad (13)$$

式中: $S_{k,t}$ 表示第 k 个城市在 t 时期的节水潜力; $L_{k,t}$ 表示第 k 个城市在 t 时期超出最优目标点的水资源投入, 作为水资源投入的松弛; $W_{k,t}$ 表示第 k 个城市在 t 时期的实际水资源投入; $P_{k,t}^a$ 和 $P_{k,t}^b$ 分别表示第 k 个城市在 t 时期的污水和工业废水减排潜力; $A_{k,t}^a$ 和 $A_{k,t}^b$ 分别表示第 k 个城市在 t 时期的实际污水和工业废水排放量; $T_{k,t}^a$ 和 $T_{k,t}^b$ 分别表示第 k 个城市在 t 时期的最优目标污水和工业废水排放量。

2 结果分析

2.1 城市水资源绿色效率及松弛变量测算

选用 SE-SBM 非导向的固定规模报酬模型, 利用 MatlabR2020a 软件对 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率和松弛变量进行测算, 具体结果见表 2。

在 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市中, 水资源绿色效率平均值大于或者等于 1 的城市为舟山、丽江、攀枝花、长沙、上海、泰州、遵义、昭通、苏州和无锡, 数量占比为 22.2%; 其余数量占比为 77.8% 的城市均未达到有效生产前沿面。进一步通过投入产出松弛变量探寻城市水资源效率无效的原因, 研究发现水资源效率无效的城市广泛存在各种资源投入冗余、社会发展指数产出不足和污水、工业废水产出过多的状况, 表明经济带沿线城市在资源投入和社会、环境效益产出上均未达到有效。但在 GDP 期望产出松弛变量中, 只有池州、鄂州和铜陵有较小的产出不足, 其余城市的 GDP 产出均达到最优, 表明经济带沿线城市水资源的经济效益总体上实现了有效产出。由于不同城市的投入产出指标改善程度差异明显, 各城市可以根据松弛变量结果对水资源利用过程中的投入产出做出相应调整。

从地区的角度看, 三大地区城市水资源绿色效率空间分布呈现为长江经济带下游>上游>中游, 且效率值均未达到有效值。其中, 长江经济带下游地区的各种资源投入冗余量总体最低, 这主要是由于下游地区依托区位和经济基础的双重优势, 优先通过高水平的技术创新实现了较高水平的资源利用效率; 而长江经济带中游地区的城市用水总量和资本投入冗余量过多的同时, 工业废水过度排放量较高, 其主要原因是中游地区整体上长期依赖于传统制造业进行发展, 缺乏高新技术导致水资源利用效率最低; 长江经济带上游地区虽然技术水平较低, 但由于工业化规模和基础较为薄弱, 使该地区工业废水过度排放量远低于中游和下游地区, 因此相对中游地区水资源利用效率较高。

表 2 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率平均值及其投入产出松弛变量平均值

城市	效率	投入松弛变量			期望产出松弛变量		非期望产出松弛变量	
		s-1	s-2	s-3	s+1	s+2	sb-11b-	sb-22b-
舟山	1.172	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

丽江	1.141	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
攀枝花	1.129	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
长沙	1.115	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
上海	1.112	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
泰州	1.099	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
遵义	1.069	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
昭通	1.060	0.000	18.856	9.277	0.000	0.000	106.887	184.947
苏州	1.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
无锡	1.007	0.654	0.000	63.769	0.000	0.015	999.356	0.000
六盘水	0.970	0.178	15.797	39.152	0.000	0.000	36.422	608.448
黄冈	0.961	1.044	52.457	122.383	0.000	0.019	48.616	0.000
常德	0.927	2.844	48.548	1.306	0.000	0.000	519.986	1 395.447
池州	0.886	0.630	19.237	22.812	5.970	0.000	201.707	248.009
鄂州	0.884	1.565	6.310	8.469	14.539	0.000	368.980	189.739
恩施	0.881	0.342	67.774	9.745	0.000	0.000	128.589	29.032
镇江	0.880	2.246	1.948	41.130	0.000	0.176	791.421	3 093.656
湖州	0.866	1.015	20.031	10.721	0.000	0.024	456.876	3 060.101

宜昌	0.846	1.718	0.728	104.278	0.000	0.113	1 162.276	3 916.389
咸宁	0.843	0.372	32.568	257.830	0.000	0.002	60.100	136.004
铜陵	0.820	3.227	25.055	76.786	6.399	0.000	1 401.765	1 279.839
嘉兴	0.808	2.964	29.002	62.917	0.000	0.100	583.226	8 419.942
宁波	0.779	1.343	18.703	0.000	0.000	0.612	5 438.411	861.962
宜宾	0.767	1.934	117.310	66.638	0.000	0.000	908.829	5 708.412
扬州	0.749	6.772	9.257	27.565	0.000	0.462	2 169.039	657.067
绍兴	0.706	6.067	77.085	150.783	0.000	0.065	9 857.619	9 606.553
武汉	0.689	13.229	0.000	663.375	0.000	0.763	18 961.628	27.379
常州	0.686	4.262	1.126	155.199	0.000	0.762	4 067.352	6 819.936
南京	0.677	15.792	0.000	156.432	0.000	0.961	33 028.039	1 579.527
南通	0.666	6.931	23.452	22.464	0.000	0.912	3 417.734	2 724.308
成都	0.649	8.409	107.415	50.890	0.000	1.400	13 085.339	0.000
杭州	0.578	9.147	90.329	0.000	0.000	1.319	14 458.719	9 190.164
芜湖	0.568	9.737	37.488	496.962	0.000	0.281	5 930.519	589.404
泸州	0.543	4.459	133.220	206.597	0.000	0.002	3 016.567	1 220.242
贵阳	0.530	5.656	72.676	844.967	0.000	0.261	12 534.289	252.123

岳阳	0.517	13.228	130.009	73.052	0.000	0.281	6 160.630	4 045.622
合肥	0.516	6.593	137.582	768.535	0.000	0.935	13 263.601	0.000
九江	0.493	7.341	147.062	423.528	0.000	0.254	1 371.023	6 061.154
昆明	0.493	9.466	184.494	321.214	0.000	0.592	28 253.209	0.000
黄石	0.452	10.102	45.742	1 070.274	0.000	0.095	4 172.496	2 868.279
安庆	0.450	14.111	252.092	540.765	0.000	0.043	2 693.897	1 167.635
马鞍山	0.436	16.809	41.155	589.187	0.000	0.069	6 823.511	4 780.159
荆州	0.424	17.014	259.792	426.551	0.000	0.000	3 152.279	4 809.889
南昌	0.364	16.902	69.828	427.587	0.000	1.402	16 474.260	2 458.618
重庆	0.142	26.240	559.906	283.919	0.000	3.258	34 447.116	3 818.434
上游地区	0.772	4.724	106.454	152.700	0.000	0.460	7 709.771	985.137
中游地区	0.710	7.113	66.087	298.219	1.212	0.244	4 371.023	2 159.043
下游地区	0.786	5.157	37.312	151.716	0.589	0.321	5 027.752	2 575.155

注： s_1^- 、 s_2^- 、 s_3^- 分别为城市用水总量、从业人员、资本投入指标的投入松弛变量，表示资源应减少的投入量； s_1^+ 、 s_2^+ 分别为 GDP 和社会发展指数的期望产出松弛变量，表示期望产出应增加的量； s_1^{b-} 、 s_2^{b-} 分别为污水排放量和工业废水排放量的非期望产出松弛变量，表示非期望产出应减少的量。

2.2 区域分布差异

利用泰尔(Theil)指数揭示长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率地区差距的分布特征，测算结果如表 3 所示。

表 3 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率地区差异

年份	总体差距	地区之间差距		地区内部差距		上游地区	中游地区	下游地区
	Theil	Theil	贡献率 (%)	Theil	贡献率 (%)	Theil	Theil	Theil
2010	0.111 0	0.002 7	2.42	0.108 4	97.58	0.171 0	0.099 6	0.078 6
2011	0.088 2	0.002 5	2.85	0.085 7	97.15	0.135 8	0.094 7	0.056 0
2012	0.088 4	0.010 9	12.25	0.077 6	87.75	0.104 8	0.081 9	0.056 9
2013	0.093 5	0.001 8	1.92	0.091 7	98.08	0.110 4	0.105 5	0.074 2
2014	0.064 7	0.001 3	2.00	0.063 4	97.96	0.094 2	0.073 0	0.041 3
2015	0.072 9	0.000 4	0.61	0.072 5	99.39	0.106 5	0.083 3	0.048 1
2016	0.085 4	0.000 4	0.45	0.085 0	99.55	0.128 8	0.095 9	0.053 1
2017	0.062 9	0.000 8	1.26	0.062 1	98.74	0.106 0	0.053 1	0.043 5
2018	0.059 3	0.001 3	2.18	0.058 0	97.82	0.086 7	0.052 8	0.043 5
2019	0.050 0	0.000 1	0.26	0.049 9	99.74	0.075 0	0.048 1	0.036 8
平均	0.077 7	0.002 2	2.62	0.075 4	97.38	0.111 9	0.078 8	0.053 2

在 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率的泰尔指数总体是下降的, 从 2010 年的 0.111 0 降至 2019 年的 0.050 0, 表明城市之间的水资源绿色效率总体差异正在缩小。根据泰尔指数的分解结果, 地区之间差距泰尔指数以 2012 年为分界点呈现“先升后降”的阶段性发展态势, 2010~2012 年泰尔指数从 0.002 7 上升至 0.010 9, 然后逐渐波动下降至 2019 年的 0.000 1, 表明长江经济带上、中和下游之间的地区水资源绿色效率差距在 2012 年开始不断缩小。结合三大地区水资源绿色效率的测度结果, 可发现这种变化趋势反映出当前经济带在推进绿色发展建设和节水型社会的背景下, 各地区水资源绿色效率表现出稳定上涨趋势的同时, 地区之间效率的差异性被进一步缩小。

地区内部差距泰尔指数则呈现“震荡下降”的变化趋势, 2010~2019 年地区内部差距泰尔指数从 0.108 4 下降至 0.049 9。具体分地区来看, 下游地区泰尔指数始终低于中游和上游地区, 表明下游地区各城市间的水资源绿色效率差异要小于中游和上游地区, 其主要原因是长江经济带下游沿线 21 个城市均位于长三角地区, 区域一体化发展相对紧密, 同时也进一步揭示了下游地区各城市存在“效率高、差异小”的双重发展态势; 上游地区泰尔指数始终高于中游和下游地区, 表明上游地区各城市相比中游和下游地区, 城市间水资源绿色效率差异最大, 上游地区各城市间效率较为不均衡, 其主要原因是昆明和重庆相对偏低的效率值拉大了上游地区的内部差距。

综上, 地区之间差距的平均贡献率仅为 2.62%, 而地区内部差距的平均贡献率高达 97.38%, 说明地区内部各城市间差异是造成长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率差异分化的主要原因, 长江经济带上、中和下游地区内部各城市效率不均衡是制约经济带沿线城市水资源绿色效率提升的重要短板。

2.3 城市水资源绿色效率 ML 指数

利用 ML 指数法测算得到 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率 ML 指数(TFP)及其分解结果, 进而分析经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率在研究期内的动态变化特征及其原因, 如表 4、图 2 所示。

对于长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率 ML 指数及其分解指数的变动趋势, 如图 2 所示。从时间上看, 在 2010~2019 年, 长江经济带沿线 45 个城市除了 2014~2015 年的 ML 指数(0.970)小于 1 外, 其余年份的 ML 指数均大于 1, 表明其水资源绿色

效率在 2014~2015 年处于下降阶段, 其余年份水资源绿色效率相对原有水平处于上升阶段, 其主要原因是 2014~2015 年经济带沿线 45 个城市的技术效率变化(CHEff)和技术进步变化(CTech)均小于 1(分别为 0.977、0.994), 表明技术效率和技术进步提升程度的不足导致其水资源利用效率下降。除此之外, ML 指数与技术进步变化(CTech)的变动趋势基本相一致, 说明水资源绿色效率 ML 指数的变化主要依赖于技术进步变化(CTech)的影响。水资源绿色效率 ML 指数及其分解指数在趋势变化上分为两个阶段, 第一阶段为 2015 年以前, 各指数协同变化较低, ML 指数受到技术进步变化(CTech)和技术效率变化(CHEff)的交互影响; 第二阶段为 2015 年后, 各指数变化趋势均保持一致, 呈现“先升后降”的阶段性发展态势, 并均在 2016~2017 年达到峰值。

表 4 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率动态变化指数

长江经济带上游地区						长江经济带下游地区					
城市	CHEff	CTech	CHPe	CHSe	TFP	城市	CHEff	CTech	CHPe	CHSe	TFP
昆明	1.121	1.034	1.139	1.023	1.134	合肥	1.036	1.095	1.061	0.981	1.098
昭通	0.950	0.926	1.015	0.966	0.918	马鞍山	1.054	1.009	1.083	1.006	1.059
丽江	0.973	0.973	0.824	1.256	0.991						
攀枝花	1.018	0.957	1.078	1.004	0.982	安庆	1.114	1.011	1.080	1.020	1.075
						铜陵	0.960	0.987	0.948	1.006	0.941
泸州	1.130	0.996	1.137	1.001	1.151	池州	1.076	0.972	1.011	1.056	1.038
宜宾	1.196	0.965	1.229	1.014	1.163	芜湖	1.049	1.058	1.098	1.069	1.081
成都	1.298	1.060	1.013	1.244	1.323	南京	1.178	1.247	1.095	1.070	1.359
贵阳	1.083	1.035	1.057	1.073	0.989	扬州	1.035	1.059	0.989	1.053	1.071
遵义	1.003	1.028	1.006	1.000	1.044	镇江	1.060	1.075	1.020	1.051	1.115
六盘水	1.036	1.029	1.020	1.008	1.098	苏州	0.998	1.046	0.997	1.001	1.044
恩施	1.126	0.947	1.070	1.045	1.078	无锡	1.037	1.075	1.004	1.032	1.119
重庆	1.074	0.964	1.186	1.044	1.016	常州	1.075	1.089	1.048	1.029	1.158
长江经济带中游地区						南通	1.072	1.066	1.002	1.069	1.123
城市	CHEff	CTech	CHPe	CHSe	TFP	泰州	1.006	1.033	0.997	1.010	1.039
长沙	1.001	1.065	0.997	1.004	1.071	杭州	1.033	1.076	0.999	1.035	1.076
常德	1.118	0.968	1.050	1.072	1.043	嘉兴	1.060	1.018	1.009	1.064	1.022
岳阳	1.051	0.973	1.032	1.015	1.001	湖州	1.042	0.980	1.014	1.031	0.971
南昌	1.149	0.963	1.159	1.036	1.129	宁波	0.964	1.144	0.983	0.978	1.061
九江	1.149	0.994	1.128	1.011	1.128	绍兴	0.935	1.027	1.014	0.953	0.961

黄石	1.063	1.006	1.065	0.996	1.053	舟山	0.988	1.005	0.991	0.998	0.988
鄂州	1.009	0.978	1.006	1.004	0.950	上海	1.002	1.131	0.993	1.009	1.133
荆州	1.029	0.984	1.021	1.009	1.006	上游地区	1.085	0.993	1.149	1.073	1.074
宜昌	1.042	1.129	1.029	1.011	1.177	中游地区	1.070	1.051	1.050	1.023	1.112
黄冈	1.126	1.100	1.104	1.021	1.224	下游地区	1.037	1.057	1.021	1.025	1.073
咸宁	0.986	1.091	0.975	1.012	1.064	整体	1.059	1.038	1.063	1.037	1.084
武汉	1.114	1.356	1.036	1.085	1.495						

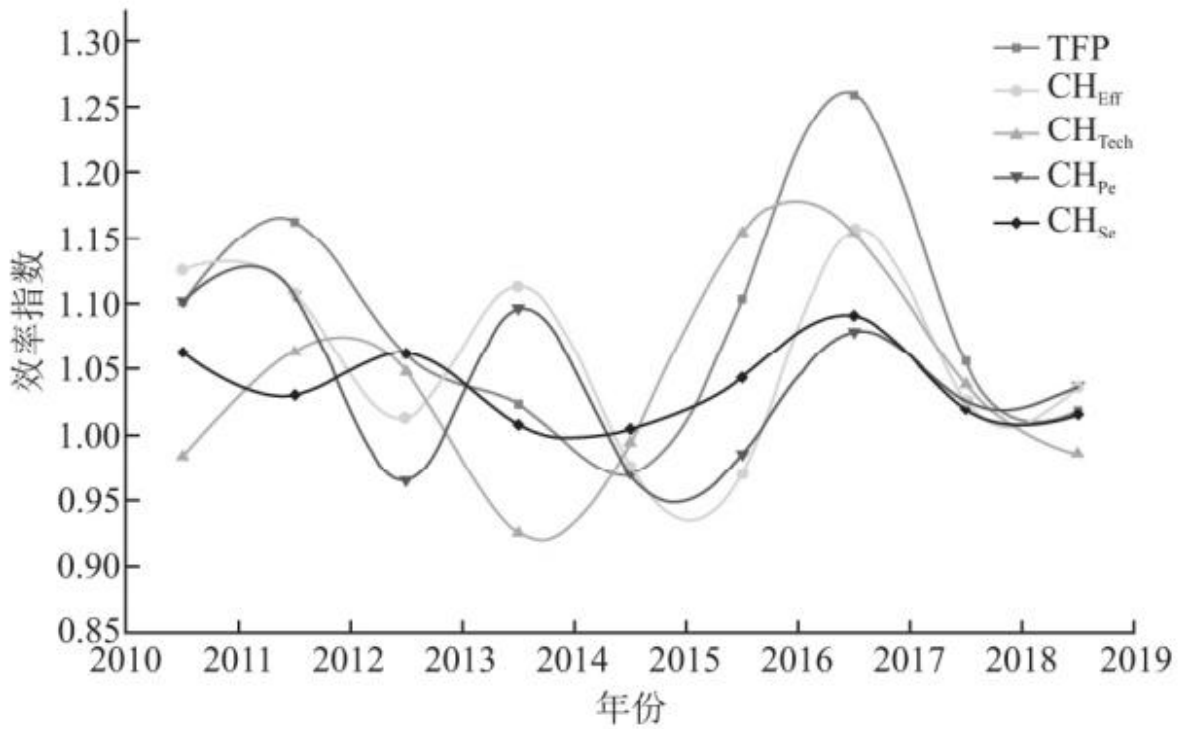


图 2 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市水资源
绿色效率 ML 指数及其分解指数趋势图

Fig. 2 ML index and its decomposition index trend chart of
water resources green efficiency in 45 cities along
Yangtze River Economic Belt from 2010 to 2019

对于长江经济带上、中、下游地区和沿线 45 个城市水资源绿色效率 ML 指数及其分解指数, 如表 4 所示。从地区角度看, 长江经济带上、中、下游地区的 ML 指数平均值分别为 1.074、1.112、1.073 (大于 1), 表明三大地区的水资源绿色效率在研究期内处于上升阶段。将 ML 指数分解发现, 长江经济带中、下游地区的技术效率变化 (CHEff) 分别为 1.070、1.037, 技术进步变化 (CHTech) 分别为 1.051、1.057, 两指数均大于 1, 表明其水资源绿色效率上升是技术效率的优化和技术创新共同驱动的结果。而上游地区的技术效率变化 (CHEff) 为 1.085 (大于 1), 技术进步变化 (CHTech) 为 0.993 (小于 1), 说明技术效率的优化是驱动上游地区水资源绿色效率提升的主要原因。

细分来看, ML 指数小于 1 的城市包括昭通、丽江、攀枝花、贵阳、铜陵、湖州、绍兴、舟山和鄂州等 9 个城市, 数量占比 20%, 表明城市水资源绿色效率在研究期内处于下降的状态。同时, 昭通、丽江、铜陵、绍兴和舟山的技术效率变化 (CHEff) 均小于 1, 进一步将技术效率变化 (CHEff) 分解为纯技术效率变化 (CHPe) 和规模效率变化 (CHSe), 其中丽江、铜陵和舟山的纯技术效率变化 (CHPe) 小于 1, 表明丽江、铜陵和舟山水资源管理不善的问题导致效率的降低, 而昭通、绍兴和舟山的规模效率变化 (CHSe) 小于 1, 表明昭通、绍兴和舟山投入规模的效益不足导致效率的降低; 昭通、丽江、攀枝花、鄂州、铜陵和湖州的技术进步变化 (CHTech) 均小于 1, 表明其城市技术进步和创新程度较低导致效率的降低。

2.4 城市节水减排潜力分析

利用节水减排潜力模型测算得到 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市节水潜力、污水减排潜力和工业废水减排潜力, 以此反映长江经济带沿线 45 个城市的节水减排空间。并根据 ArcGIS 的自然断裂法将节水减排潜力划分为 3 个区间段, 分别为低区间段 (I)、中区间段 (II)、和高区间段 (III)。同时, 为进一步加强以城市为决策单元的节水减排工作, 以节水减排潜力值为依据将长江经济带沿线 45 个城市划分为 5 种类型, 分别为“三高”、“二高”、“一高”、“中等”、“三低”, 并从静态和动态角度分别探寻节水减排城市类型的共性和时空分布特征, 如表 5、图 3 所示。

从静态城市节水减排潜力上看, “三高”类型的城市有岳阳、马鞍山、黄石和荆州, 这类城市均属于长江沿岸工业城市, 2019 年平均第二产业占 GDP 的比重为 44.35%, 主要集中于石油化工、钢铁、有色金属等产业, 是未来需要重点节水减排的城市, 平均每年城市有 14.29 亿 m³ 的水资源被过度浪费、5 077.23 万 t 的污水和 7 667.15 万 t 的工业废水被过度排放。“二高”类型城市有 8 个, 其中昆明、泸州、贵阳、安庆、芜湖、南昌和南京等 7 个城市的节水潜力和污水减排潜力处于高区间, 表明其城市应重点在节水和污水减排开展相关工作, 平均每年城市有 10.87 亿 m³ 的水资源被过度浪费和 14 561.54 万 t 的污水被过度排放; 而九江的节水潜力和工业废水减排潜力处于高区间, 表明九江是这类城市中未来需要重点节水和工业废水减排的城市, 平均每年城市有 7.34 亿 m³ 的水资源被过度浪费和 10 091.30 万 t 的工业废水被过度排放。“一高”类型城市有 4 个, 其中宜宾和嘉兴的工业废水减排潜力处于高区间, 平均每年有 15 310.06 万 t 的工业废水被过度排放; 重庆的污水减排潜力处于高区间, 平均每年城市有 34 447.12 万 t 的污水被过度排放; 武汉的节水潜力处于高区间, 平均每年城市有 13.23 亿 m³ 的水资源被过度浪费。“中等”类型的城市有 11 个, 该类型节水减排潜力相对较低, 但仍有一定的节水减排空间。

对于动态城市节水减排潜力分析, 选取 2010、2012、2015 和 2019 年 4 个观测时间点, 将长江经济带沿线 45 个城市的节水减排潜力类型进行空间可视化制图, 直观展现经济带沿线 45 个城市节水减排潜力的时空分布特征, 如图 3 所示。从时间上看, 2010 年长江经济带沿线 45 个城市节水减排潜力均值为 24.86%, 其中有 11 个城市属于“三高”类型, 有 18 个城市属于“三低”类型。2012 年, 节水减排潜力均值降至 17.25%, “三高”类型的城市数量降到 2 个, “三低”类型的城市数量上升到 20 个; 这主要是由于 2012 年 1 月国务院发布《关于实行最严格水资源管理制度的意见》提出实行最严格水资源管理制度以来, 沿线城市水资源管理焕发出较为明显的效果。2015 年, 节水减排潜力均值降至 17.21%, “三低”类型城市上升到 21 个。2019 年, 节水减排潜力均值降至 16.77%, “三高”类型的城市数量为 3 个, “三低”类型的城市数量上升到 22 个。不难发现, “三低”类型的城市数量在研究期内一直呈现增长的趋势, 而“三高”类型的城市数量以 2012 年为分界点, 2012 年以前大幅度下降, 2012 年以后相对较为平缓, 整体上沿线 45 个城市节水减排潜力均值在研究期内一直处于持续下降的态势。

从空间上看，四个时间截面的节水减排潜力表现出“两头低，中间高”的空间分异特征，节水减排潜力“三低”类型的城市呈现出“大连片，小散落”的集聚形势。具体来看，节水减排潜力处于“三低”类型的城市相邻，如下游地区的上海、苏州、无锡、南通和常州等，上游地区的丽江、攀枝花和昭通，这在一定程度上验证了节水减排潜力低的城市空间存在正向溢出效应，可以辐射带动周边城市降低节水减排潜力。相比之下，“三高”类型的城市主要集中在中游地区，如岳阳、荆州和黄石，这些城市在控制水污染物排放和节水技术方面都存在一定的短板，致使其节水减排潜力长期处于较高区间。

表 5 长江经济带沿线 45 个城市分类、节水潜力、污水和工业废水减排潜力、自然断裂分区及最优值

城市	城市分类	节水潜力			污水减排潜力			工业废水减排潜力		
	类型	潜力	分区	最优值	潜力	分区	最优值	潜力	分区	最优值
昆明	二高	45.29%	III	11.4	61.18%	III	18 339.7	0.00%	I	4 327.4
昭通	三低	0.00%	I	7.8	3.60%	I	1 940.5	6.07%	I	1 354.3
丽江	三低	0.00%	I	6.1	0.00%	I	1 616.5	0.00%	I	802.0
攀枝花	三低	0.00%	I	7.4	0.00%	I	9 796.7	0.00%	I	3 449.1
泸州	二高	46.73%	III	5.1	41.45%	III	4 311.8	29.28%	II	2 629.5
宜宾	一高	17.13%	II	9.4	16.15%	II	3 736.3	41.93%	III	4 531.5
成都	中等	15.40%	II	46.2	17.49%	II	67 622.7	0.00%	I	10 406.6
贵阳	二高	52.81%	III	5.1	49.00%	III	11 876.2	4.88%	I	3 163.3
遵义	三低	0.00%	I	21.7	0.00%	I	5 674.3	0.00%	I	2 076.7
六盘水	三低	2.20%	I	7.9	1.52%	I	2 212.0	11.80%	I	4 135.6
重庆	一高	33.99%	II	51.0	36.51%	III	61 595.0	9.59%	I	26 398.8
恩施	三低	6.56%	I	4.9	5.55%	I	2 477.0	2.38%	I	945.1
宜昌	中等	10.66%	I	14.4	11.07%	I	8 720.6	25.61%	II	9 803.5
黄石	三高	60.14%	III	6.7	48.02%	III	4 474.2	54.59%	III	2 250.5
鄂州	中等	13.91%	II	9.7	10.19%	I	3 074.8	9.88%	I	1 756.9
荆州	三高	46.84%	III	19.3	45.60%	III	3 729.4	57.27%	III	3 129.3
黄冈	三低	3.63%	I	27.7	1.47%	I	2 803.4	0.00%	I	2 613.6
咸宁	三低	2.55%	I	14.2	1.75%	I	2 556.1	7.79%	I	1 822.4
武汉	一高	35.24%	III	24.3	25.35%	II	65 926.4	0.12%	I	16 224.5
长沙	三低	0.00%	I	37.3	0.00%	I	52 061.5	0.00%	I	4 145.3

常德	三低	7.52%	I	35.0	7.73%	I	6 421.6	12.63%	I	6 390.5
岳阳	三高	38.97%	III	20.7	47.53%	III	6 604.5	41.39%	III	6 006.2
南昌	二高	54.05%	III	14.4	52.81%	III	15 154.6	23.84%	II	5 736.9
九江	二高	28.94%	III	18.0	20.30%	II	5 108.8	58.16%	III	4 030.1
合肥	中等	24.65%	II	20.2	32.02%	II	29 427.8	0.00%	I	5 299.8
马鞍山	三高	60.78%	III	10.8	57.33%	III	4854.2	61.90%	III	2 778.6
安庆	二高	49.91%	III	14.2	40.17%	III	3 997.2	28.67%	II	2 899.1
铜陵	中等	25.16%	II	9.6	21.93%	II	3 834.2	33.97%	II	3 115.2
池州	三低	6.42%	I	9.2	7.52%	I	2 268.5	13.76%	I	1 076.7
芜湖	二高	47.35%	III	10.8	42.15%	III	7 855.6	12.40%	I	3 469.7
杭州	中等	20.35%	II	35.8	24.14%	II	42 785.9	17.34%	II	28 450.9
嘉兴	一高	15.49%	II	16.2	6.74%	I	8 189.8	39.99%	III	11 960.3
湖州	中等	6.26%	I	15.2	6.45%	I	7 162.7	31.47%	II	6 582.4
宁波	三低	6.28%	I	20.0	9.98%	I	39 053.7	4.49%	I	16 347.7
绍兴	中等	30.59%	II	13.8	30.19%	II	15 302.7	37.35%	II	17 841.1
舟山	三低	0.00%	I	1.5	0.00%	I	3 870.3	0.00%	I	1 727.7
上海	三低	0.00%	I	103.0	0.00%	I	231 448.9	0.00%	I	39 672.8
南京	二高	38.28%	III	25.5	36.56%	III	60 883.8	4.68%	I	20 243.7
扬州	中等	17.95%	II	31.0	14.96%	II	12 127.9	7.35%	I	7 788.2
镇江	三低	8.01%	I	25.8	6.17%	I	12 420.8	13.89%	I	7 489.5
苏州	三低	0.00%	I	63.9	0.00%	I	58 723.8	0.00%	I	56 210.9
无锡	三低	1.82%	I	35.3	2.58%	I	35 857.5	0.00%	I	23 462.2
常州	中等	16.46%	II	21.6	16.49%	II	20 262.2	22.92%	II	11 485.9
南通	中等	16.79%	II	34.4	16.30%	II	17 593.3	16.82%	II	12 886.0
泰州	三低	0.00%	I	33.3	0.00%	I	7 067.4	0.00%	I	7 744.8

注：城市分类的依据，“三高”：节水减排潜力三个均处于高区间段；“二高”：节水减排潜力有两个处于高区间段；“一高”：节水减排潜力只有一个处于高区间段；“中等”：节水减排潜力只有中区间段作为最高区间段；“三低”：节水减排潜力三个均处于低区间段。节水减排潜力分区的依据，节水潜力的临界值为 10.66%、33.99%，污水减排潜力的临界值为 11.07%、32.02%，工业废水减排潜力的临界值为 13.89%、37.35%；最优值为城市用水总量投入最优目标值(亿 m³)、污水及废水排放最优目标值(万 t)。

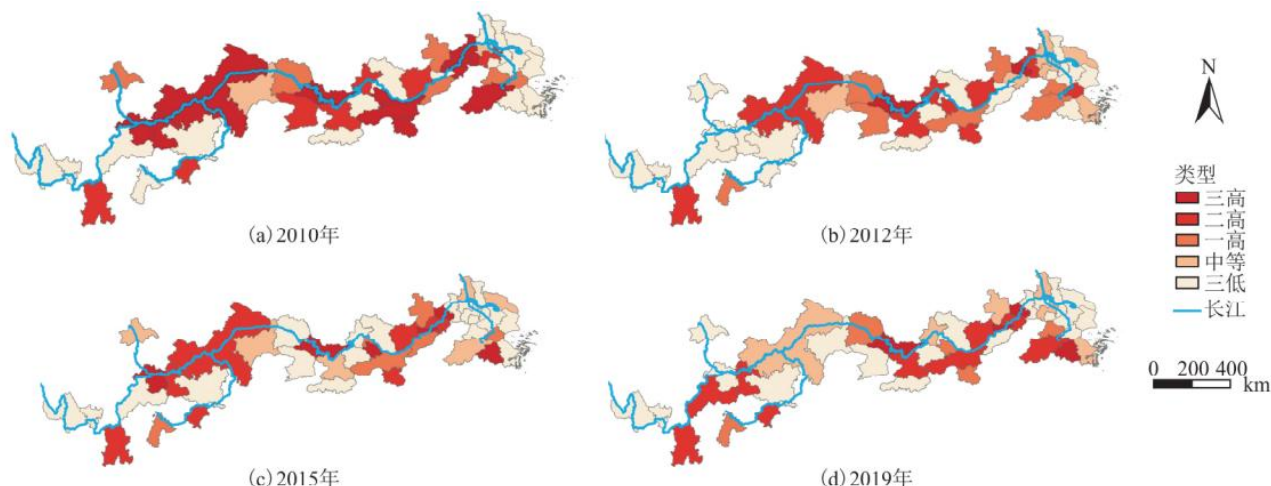


图3 2010~2019年长江经济带沿线45个城市节水减排潜力城市类型时空差异图

Fig. 3 Temporal and spatial differences of urban types with water saving and emission reduction potential in 45 cities along Yangtze River Economic Belt from 2010 to 2019

3 结论与政策建议

本文利用 SE-SBM 模型对 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市的水资源绿色效率展开测度, 同时通过泰尔指数和 ML 指数分析水资源绿色效率地区差距的形成根源和内在驱动因素, 并在 SE-SBM 模型求解的基础上测算出城市节水减排潜力。结果显示:

(1) 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市, 有 77.8% 的城市水资源绿色效率处于生产前沿面之下。从地区的角度看, 三大地区水资源绿色效率空间分布呈现为长江经济带下游>上游>中游, 效率值均未达到有效值, 且都存在很大的优化空间。长江经济带沿线城市水资源绿色效率区域性差异明显, 主要由上、中和下游地区内部各城市效率差距所造成。

(2) 2010~2019 年昭通、丽江、攀枝花、贵阳、铜陵、湖州、绍兴、舟山和鄂州等 9 个城市水资源绿色效率处于下降阶段, 受到不同程度的纯技术效率、规模效率和技术进步变化的影响。长江经济带中、下游地区的水资源绿色效率上升是技术效率的优化和技术创新共同驱动的结果; 而上游地区的水资源绿色效率上升的主要因素是技术效率的优化。此外, 长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率在 2014~2015 年处于下降阶段, 其余年份水资源绿色效率相对原有水平处于上升阶段。

(3) 在 2010~2019 年长江经济带沿线 45 个城市节水减排潜力中, 岳阳、马鞍山、黄石和荆州等 4 个城市属于“三高”类型; 在空间格局上, 节水减排潜力“三低”类型的城市呈现出“大连片, 小散落”的集聚形势, 地理距离临近城市的节水减排潜力受到彼此互相影响, 一定程度上存在空间溢出效应。

综上所述, 为进一步提高长江经济带沿线 45 个城市水资源绿色效率, 提出以下两点政策建议:

(1) 对于水资源绿色效率达到有效的 10 个城市, 舟山、丽江、攀枝花、长沙、上海、泰州、遵义、昭通、苏州和无锡, 可以加大对水资源相关技术研发的资金投入进行自主创新, 并积极借鉴和引进国外先进技术进行改造, 形成适合长江经济带绿色发展需要的新技术, 从而突破现有的节水和污水、废水处理瓶颈, 引领长江经济带沿线城市水资源管理向更高阶段的发展。同时, 昭通、丽江、攀枝花和舟山等 4 个城市水资源绿色效率在研究期内处于下降阶段。其中, 昭通应有效提高水资源相关要素的规模投入, 丽江、攀枝花应增强技术的创新和改进, 舟山应更加注重改善水资源管理和提高规模效率。

(2)对于水资源绿色效率处于无效的 35 个城市,应依据城市的节水减排空间,采取差异化的政策措施,进行重点突破。“三高”类型的城市,岳阳、马鞍山、黄石和荆州节水减排工作的重点应放在工业节水和污水、废水减排上,一方面应加大推动石油化工、有色金属、钢铁等产业淘汰落后产能和转型升级,重点发展污水和废水排放低的高新技术产业;另一方面在工业用水上积极推广绿色节水技术,制定更加有效的工业用水管理制度。“二高”类型的城市,昆明、泸州、贵阳、安庆、芜湖、南昌和南京等 7 个城市在节水高潜力和污水减排高潜力的处理上,要着重加强城市污水循环利用技术,提高污水再生利用的程度,这不仅有效降低污水的高排放,同时也是提高城市节水效率的重要措施,会对该类型城市的节水减排工作带来双倍的效益;九江在节水高潜力和工业废水高潜力的处理上,可以改进现有的生产工艺和加强清洁生产等措施从源头上减少工业废水的产生,并根据城市工业废水排放特点制定出针对性的废水处理系统,确定最佳的处理和运作模式。“一高”类型的城市,宜宾和嘉兴应重点改善城市工业废水减排;重庆应重点改善城市污水减排;武汉应重点提高城市节水效率。除此之外,水资源绿色效率处于无效率的 35 个城市需要加强地级市之间水资源相关技术和管理经验的交流,发现自身的不足并根据城市特点完善城市水资源管理体系。

参考文献

- [1] 卢曦,许长新.基于三阶段 DEA 与 Malmquist 指数分解的长江经济带水资源利用效率研究 [J].长江流域资源与环境, 2017, 26(1):7-14. LU X, XU C X. Study the utilization efficiency of water resources in Yangtze River economic belt based on three-stage dea and malmquist index decomposition [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(1):7-14.
- [2] 许晶荣,黄德春,方隽敏.中国区域全要素水资源利用效率及其影响 [J].河海大学学报(哲学社会科学版), 2021, 23(6):77-84, 111. XU J R, HUANG D C, FANG J M. Regional total factor water resources utilization efficiency and its influencing factors in China [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2021, 23(6):77-84, 111.
- [3] 张凯,陆海曙,陆玉梅.三重属性约束的承载力视角下中国省际水资源利用效率测度 [J].资源科学, 2021, 43(9):1778-1793. ZHANG K, LU H S, LU Y M. Measurement of inter-provincial water resource use efficiency in China from the perspective of carrying capacity with triple attribute constraints [J]. Resources Science, 2021, 43(9):1778-1793.
- [4] 孙才志,马奇飞.中国省际水资源绿色效率空间关联网研究 [J].地理研究, 2020, 39(1):53-63. SUN C Z, MA Q F. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China [J]. Geographical Research, 2020, 39(1):53-63.
- [5] 王兵,祝葶,杜敏哲.治理模式差异视角下的城市水资源系统全要素生产率 [J].资源科学, 2021, 43(4):813-822. WANG B, ZHU T, DU M Z. Total factor productivity of urban water resources system from the perspective of governance mode differences [J]. Resources Science, 2021, 43(4):813-822.
- [6] 丁绪辉,贺菊花,王柳元.考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究——基于 SE-SBM 与 Tobit 模型的考察 [J].中国人口·资源与环境, 2018, 28(1):157-164. DING X H, HE J H, WANG L Y. Inter-provincial water resources utilization efficiency and its driving factors considering undesirable outputs:Based on SE-SBM and Tobit model [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(1):157-164.
- [7] 陈述,吕文芳,王建平.长江流域水资源利用效率时空演变特征分析 [J].水资源保护, 2022, 38(4):80-86, 94. CHEN

S, LYU W F, WANG J P. Analysis of spatio-temporal evolution characteristics of water resources utilization efficiency in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4):80-86, 94.

[8] WANG K L, WANG J, WANG J, et al. Investigating the spatiotemporal differences and influencing factors of green water use efficiency of Yangtze River Economic Belt in China [J]. PLoS One, 2020, 15(4):e0230963.

[9] 高新才, 殷颂葵. 西北地区城市水资源利用效率时空演变及俱乐部趋同分析 [J]. 经济经纬, 2021, 38(2):5-13. GAO X C, YIN S K. Analysis of spatial-temporal evolution of urban water resources utilization efficiency and its club convergence in northwest China [J]. Economic Survey, 2021, 38(2):5-13.

[10] 林江彪, 王亚娟, 张小红, 等. 黄河流域城市资源环境效率时空特征及影响因素 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(1):208-222. LIN J B, WANG Y J, ZHANG X H, et al. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of urban resources and environmental efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1):208-222.

[11] HUANG C, YIN K, LIU Z, et al. Spatial and temporal differences in the green efficiency of water resources in the Yangtze River economic belt and their influencing factors [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(6):3101.

[12] 巩灿娟, 徐成龙, 张晓青. 黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素 [J]. 地理科学, 2020, 40(11):1930-1939. GONG C J, XU C L, ZHANG X Q. Spatio-temporal evolution and influencing factors of water resources utilization efficiency of cities along the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(11):1930-1939.

[13] 胡鞍钢, 周绍杰. 绿色发展: 功能界定、机制分析与发展战略 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1):14-20. HU A G, ZHOU S J. Green development: Functional definition, mechanism analysis and development strategy [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1):14-20.

[14] YAO X, FENG W, ZHANG X, et al. Measurement and decomposition of industrial green total factor water efficiency in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198:1144-1156.

[15] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(12):1999-2011. SUN C Z, JIANG K, ZHAO L S. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(12):1999-2011.

[16] ZHANG H, CHEN H, WU M, et al. Dynamic evaluation and internal driving factors of water resources green efficiency in China [J]. Water, 2020, 12(9):2360.

[17] 杨高升, 谢秋皓. 长江经济带绿色水资源效率时空分异研究——基于 SE-SBM 与 ML 指数法 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2):349-358. YANG G S, XIE Q H. Study on spatial and temporal differentiation of green water resources efficiency in the Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2):349-358.

[18] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析 [J]. 地理科学进展,

2018, 37(7):901-911. SUN C Z, MA Q F, ZHAO L S. Temporal and spatial evolution of green efficiency of water resources in China and its convergence analysis [J]. Progress in Geography, 2018, 37(7):901-911.

[19] 代金辉, 马树才, 刘宏岩. 社会发展水平统计指标体系的构建与评价 [J]. 统计与决策, 2018, 34(1):30-33. DAI J H, MA S C, LIU H Y. Construction and evaluation of statistical index system for social development level [J]. Statistics & Decision, 2018, 34(1):30-33.

[20] 朱庆芳. 衡量城市经济社会发展的新指标体系 [J]. 中国经贸导刊, 2001(13):10. ZHU Q F. A new index system for measuring urban economic and social development [J]. China Economic and Trade Herald, 2001(13):10.

[21] 张峰, 薛惠锋, 万里洋, 等. 制造业全要素水资源效率及驱动因素研究 [J]. 统计与决策, 2017(14):135-138. ZHANG F, XUE H F, WAN L Y, et al. Study on total factor water resources efficiency and driving factors in manufacturing industry [J]. Statistics & Decision, 2017(14):135-138.

[22] 雷梦婷. SFLA-PP 模型在区域水资源利用效率综合评价中的应用 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(11):27-32. LEI M T. Application of SFLA-PP model to comprehensive evaluation of utilization efficiency of regional water resources [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(11):27-32.

[23] 左其亭, 张志卓, 马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10):29-38. ZUO Q T, ZHANG Z Z, MA J X. Relationship between water resource utilization level and socio-economic development in the Yellow River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(10):29-38.

[24] 丁绪辉, 贺菊花, 王柳元. 考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究——基于 SE-SBM 与 Tobit 模型的考察 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1):157-164. DING X H, HE J H, WANG L Y. Inter-provincial water resources utilization efficiency and its driving factors considering undesirable outputs: Based on SE-SBM and Tobit model [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(1):157-164.

[25] 韩晶, 陈曦. 长江经济带沿线城市绿色发展水平时空演变特征 [J]. 华东经济管理, 2021, 35(1):24-34. HAN J, CHEN X. Spatial-temporal evolution of urban green development level along the Yangtze River economic belt [J]. East China Economic Management, 2021, 35(1):24-34.

[26] 何伟, 王语苓. 黄河流域城市水资源利用效率测算及影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(11):4760-4770. HE W, WANG Y L. Calculation of urban water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin and analysis of its influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11):4760-4770. basin and analysis of its influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11):4760-4770.

[27] 汪克亮, 刘悦, 史利娟, 等. 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素——基于 EBM-Tobit 模型的两阶段分析 [J]. 资源科学, 2017, 39(8):1522-1534. WANG K L, LIU Y, SHI L J, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit Model [J]. Resources Science, 2017, 39(8):1522-1534.

[28] 张静静, 汪文生, 李杨. 区域水-能源-粮食绿色效率、地区差异及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(1):483-496. ZHANG J J, WANG W S, LI Y. Regional water-energy-food green efficiency and heterogeneity and their

influencing factors [J].China Environmental Science, 2022, 42 (1):483-496.

[29] 范丹, 王维国. 中国区域全要素能源效率及节能减排潜力分析——基于非期望产出的 SBM 模型 [J]. 数学的实践与认识, 2013, 43 (7):12-21. FAN D, WANG W G. Analysis of Total Factor Energy Efficiency and Potential of The Energy-Saving and Emission-abating in Regional of China:Based on SBM model of undesired output [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43 (7):12-21.

注释

①根据《中国城市统计年鉴》数据收集, 2019 年长江经济带沿线 45 个城市生产总值和常住人口约为 299 603 亿和 29 657 万人, 约占长江经济带比重的 65.4%和 46.6%.