

DOI: 10.5846/stxb201911272579

任玉芬, 苏小婉, 贺玉晓, 王效科, 欧阳志云. 中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素. 生态学报, 2020, 40(18): 6459-6471.

Ren Y F, Su X W, He Y X, Wang X K, Ouyang Z Y. Urban water resource utilization efficiency and its influencing factors in eco-geographic regions of China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6459-6471.

中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素

任玉芬¹, 苏小婉^{1,2}, 贺玉晓^{2,*}, 王效科¹, 欧阳志云¹

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京城市生态系统研究站, 北京 100085

2 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000

摘要: 水资源利用效率是落实最严水资源管理制度和水生态文明建设的重要内容, 是中国国民经济社会发展的重要战略问题。通过分类数据包络分析模型对 2007—2016 年中国生态地理区城市水资源利用效率进行测算, 分析全国和生态地理区城市水资源利用效率特征, 采用 Tobit 回归模型探讨中国和生态地理区城市用水效率的影响因素。研究表明: 我国城市水资源利用效率普遍较低, 全国水资源效率均值呈现先下降后上升波动式发展, 全国城市间用水效率差距在缩小。生态地理区水资源利用效率差异显著, 温带干旱区、温带半干旱区、温带半湿润区、温带湿润区和亚热带湿润区用水效率依次递减, 区域间水资源效率差异在逐渐减小。城市人口、土地利用结构、经济发展水平、产业结构与全国城市水资源利用效率呈显著正相关, 而城市供水、用水结构、水资源管理政策则表现为显著负相关性。

关键词: 水资源利用效率; 生态地理区域; 分类数据包络分析; 影响因素

Urban water resource utilization efficiency and its influencing factors in eco-geographic regions of China

REN Yufen¹, SU Xiaowan^{1,2}, HE Yuxiao^{2,*}, WANG Xiaoke¹, OUYANG Zhiyun¹

1 Beijing Urban Ecosystem Research Station, State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract: Water resource utilization efficiency is important for implementing the strictest water resource management system, constructing water ecological civilization, and promoting urban economic and social development in China. Through the categorical data enveloping analysis model and variation coefficient method, urban water use efficiency was measured in ecological geographic areas of China from 2007 to 2016. Additionally, influencing factors of water utilization efficiency was analyzed by Tobit model. It was found that the utilization efficiency of urban water resources was generally low in China, showing a fluctuation pattern of first declining and then rising, and the gap of water use efficiency among cities was narrowing. For the ecological geographic regions, efficiency of water resource utilization was significantly discrepant among different regions, decreasing successively from the temperate arid region, the temperate semi-arid region, the temperate sub-humid region, and the temperate humid region to the subtropical humid region. However, the difference in water resource efficiency of ecological geographic regions was shrinking gradually. In terms of influencing factors, the conclusion showed that the municipal population, land use structure, economic development level and industrial structure were positively correlated with water resource use efficiency, while urban water supply, water consumption structure and water management policy had negative effects.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71533005, 31600333); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503004, 2017YFF0207303)

收稿日期: 2019-11-27; **网络出版日期:** 2020-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: heyuxiao@hpu.edu.cn

Key Words: water use efficiency; eco-geographic regions; categorical data envelopment analysis; influence factors

水是事关国计民生的基础性自然资源和战略性经济资源,是生态环境的控制性要素。我国人多水少,水资源时空分布不均,供需矛盾突出,全社会节水意识不强、用水粗放,水资源利用效率与先进国家存在较大差距,水资源短缺成为生态文明建设和经济社会可持续发展的制约因素。基于此,我国颁布和制定了一系列加强水资源利用管理和生态文明建设的制度和政策。2012 年国务院颁布实施《关于实行最严格水资源管理制度的意见》,意见明确严格控制用水总量,全面提高用水效率,加快节水型社会建设,促进水资源可持续利用和经济发展方式转变,推动经济社会发展与水资源水环境承载能力相协调,保障经济社会长期平稳较快发展。2013 年水利部《关于加快推进生态文明建设的意见》指出,把生态文明理念融入到水资源开发、利用、治理、配置、节约、保护的各方面,坚持节约优先、保护优先和自然恢复为主的方针,以落实最严格水资源管理制度为核心,通过优化水资源配置、加强水资源节约保护、实施水生态综合治理、加强制度建设等措施,大力推进水生态文明建设,实现水资源可持续利用。2015 年国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》要求,加强用水需求管理,以水定需、量水而行,抑制不合理用水需求,促进人口、经济等与水资源相均衡,建设节水型社会,推广高效节水技术和产品,发展节水农业,加强城市节水,推进企业节水改造。2017 年《国务院关于全民所有自然资源资产有偿使用制度改革的指导意见》和 2019 年国务院办公厅印发《关于统筹推进自然资源资产产权制度改革的指导意见》指出,建立健全包括水资源在内的各领域自然资源资产有偿使用制度和自然资源资产产权制度分别是加强生态保护、促进生态文明建设的核心制度和重要基础性制度。这一系列制度和政策将水资源管理和水生态文明建设提升至国家发展的战略地位,提高水资源利用效率作为缓解水资源供需矛盾的有力措施,是水资源管理的核心环节,也是建设节水型社会的重要途径,更是促进最严格水资源管理制度实施和水生态文明建设的关键手段。

水资源利用问题的核心是效率问题,国外研究主要集中在农业用水效率和供水效率等方面,如 See^[1]采用数据包络分析模型,对 2003 年东南亚地区七个国家 40 家公共水务公司的技术效率及其影响因素进行评估分析,结果表明人口密度、国企规模与技术效率显著相关,人口密度高的地区运行水务设施更有效率,国有水务企业绩效略低于其他形式的公共水务企业。Lee 和 Jung 等^[2]对威海盆地不同作物类型和灌溉方式下农业用水效率进行估计,发现作物类型和灌溉方式的选择可以提高水资源利用水量效益和经济效益。Lombardi 等^[3]采用数据包络分析对意大利水行业不同性质企业、不同地区企业、不同规模企业效率进行比较并分析其影响因素,为建立高效可持续水部门提供纠正政策和措施参考。国内专家在水资源利用效率方面的研究一方面是从不同行业^[4-7]或生态系统^[8-9]角度的各用水部门利用效率,另一方面是从地域角度的整体水资源利用效率^[10-15],本文所关注的城市水资源利用效率就属于后者,即城市各类用水部门的综合用水效率。汪克亮等^[16]构建 EBM-Tobit 两阶段效率模型,分析 2005—2014 年长江经济带 11 个省市工业绿色水资源效率特征,结果表明研究期内长江经济带工业绿色水资源效率较低,地区差异特征明显,经济发展水平、工业化程度、工业用水强度、科技进步、政府环境规划力度、地区差异对长江经济带工业绿色水资源效率的影响方向、力度和显著性均存在差异。海霞等^[17]基于超效率数据包络模型,测算了京津冀城市群工业、农业和生活以及综合用水效率,并从人口、经济、社会与土地等不同城市化角度,全面分析城市发展水平与用水效率之间的相互关系。丁绪辉等^[18]利用非期望产出 SE-SBM 模型和 Tobit 模型,探讨 2003—2015 年中国各省市水资源利用效率及其影响因素,研究发现水资源效率总体上呈现先下降后增加的 U 型发展趋势,东、中、西部水资源利用效率呈梯度发展态势,区域经济发展水平、水资源丰富程度、工农业结构、政府干预与水资源利用效率呈现负相关,进出口需求影响不显著。

由于区域自然环境条件、社会经济条件、产业结构、水资源禀赋、水资源利用方式等诸多因素的影响,中国水资源利用效率表现出明显的区域差异特征。因此研究探讨水资源利用效率区域差异是解决中国水资源供需矛盾一个重要的可能途径,是建立节水型社会、统筹区域发展、落实科学发展观的基本要求^[19],也是实行最

严水资源管理制度、促进生态文明建设的必然需求。生态地理区作为综合反映温度、水分、生物、土壤等自然要素的空间格局及资源环境匹配的区域系统,是认识区域生态环境特征、制定环境治理措施的基础,是生态恢复保护、因地制宜地利用自然资源和区域可持续发展重要依据^[20]。本文根据杨勤业等^[21]对中国地理生态区域系统的研究结果,同时考虑城市地理分布状况及研究尺度等因素,选取全国 284 个地级及以上城市按照其所处生态地理区进行分类,由图 1 可知,全国地级及以上城市主要分布在亚热带湿润区、温带半湿润区、温带湿润区、温带半干旱区、温带干旱区五个生态地理区,其城市分布数量分别为 150、75、28、18、13,占比为 52.82%、26.41%、9.86%、6.34%和 4.58%。基于此,采用分类数据包络分析模型对 2007—2016 年全国地级及以上城市水资源利用效率进行分类测算,分析全国和生态地理区水资源利用效率特征和区域差异,构建 Tobit 回归模型探究全国和生态地理区城市水资源效率的影响因素,提出改进水资源利用效率的对策和建议,为生态地理区因地制宜地利用水资源、加强水资源管理、实现水资源的可持续利用、促进区域可持续发展等方面提供新的角度和切入点。

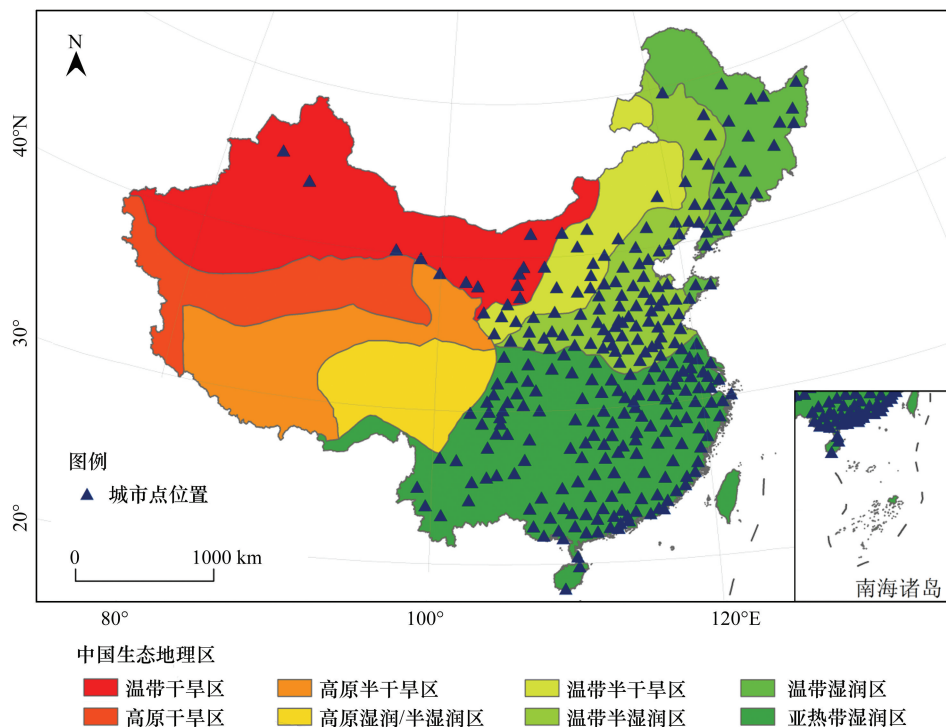


图 1 中国生态地理区城市空间分布

Fig.1 Spatial distribution of eco-geographic regions and cities in China

1 研究方法和数据来源

1.1 分类数据包络分析

水资源利用效率评测主要有三类,第一类是比值法,即采用水资源消耗系数对用水效率进行表征,如单位 GDP 用水量、单位用水产出等^[22-24],评价过于单一且多用于宏观层面;第二类是综合指标体系法,即基于水资源的经济、社会、自然、生态、环境等属性,构建综合指标体系和目标函数来评价水资源在多维度的产出效率^[25-29],目前未形成普遍认可的评价指标体系;第三类是基于全要素效率的测度方法,全要素水资源利用效率测度的是水资源配置效率,即水资源要素与其他投入要素一起参与生产的有效程度,目前最常用测算方法为数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)^[30-34]。DEA 通过保持决策单元(Decision Making Unit, DMU)输入或输出不变,借助数学规划和统计数据将 DMUs 投影到生产前沿面上,通过比较与前沿面的偏离

程度来确定 DMUs 的相对有效性。相较于其他两种方法,DEA 具有不受投入产出指标数据量纲影响、无需考虑投入产出指标间函数关系等优势,被广泛应用于资源、环境等诸多领域。

传统 DEA 没能考虑到不同 DMUs 所处经营或竞争环境差异,将全部 DMUs 投影到同一前沿面进行评估,将造成测算结果偏差,因为期待处于“较差”处境的 DMUs 完全效仿“较好”处境 DMUs 是不合理的^[35]。根据分类数据包络分析(Categorical Data Envelopment Analysis, Categorical DEA)思想,先对 DMUs 按照一定属性分类,然后从处境“最差”的一类 DMUs 开始,仅类别内 DMUs 作为参考集测算绩效值;之后以一类为单位逐一扩大 DMUs 参考集,测算增加分类 DMUs 绩效值,直到将处境最“好”的一类 DMUs 绩效值测算完毕。这样分类嵌套运算过程确保只有具有相同或更差环境 DMUs 可以成为参考单元,能够有效避免因采用统一生产前沿面约束所有 DMUs 带来的不合理。

中国生态地理系统按照温度、水分等指标划分,水分指标在一定程度上体现了地区的水资源条件,即城市所处地区越是干旱,水量越是匮乏,水资源越是不易获取,开发成本也越高,水资源利用处境也越困难。因此,采用分类 DEA 将从水资源条件境况“最差”的温带干旱区的 DMUs 开始,之后以生态地理区为单位,依次逐一增加温带半干旱区、温带半湿润区、温带湿润区、亚热带湿润区扩大 DMUs 的参考集,测算得出全国生态地理区 DMUs 的绩效值。本文选用基于投入角度的规模报酬不变假设下的 CCR 模型,通过分类 DEA 嵌套运算得出全部城市水资源利用的综合效率,用来衡量整体投入产出效率,是对决策单元资源配置能力、资源使用效率等多方面能力的综合衡量与评价。需要注意的是各类别 DMUs 的效率值为该类别第一次进行测算时出现的效率值。

CCR 模型中,假设有 n 个决策单元,每个决策单元 DMU_j 有 m 项投入 $X_j(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}, x_{ij} > 0)$, s 项产出 $Y_j(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj}, y_{ij} > 0)$, λ_j 为决策单元投入和产出的权向量,每个决策单元 DMU_j 的效率值 θ , 满足:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \min \theta \\ s.t. \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq \theta x_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j \geq y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (1)$$

其中,效率值 θ 处于 0—1 之间,当 $\theta=1$ 时,决策单元为 DEA 有效,当 $\theta<1$ 时,则为 DEA 无效,此时 θ 值越大表示该决策单元效率越高。以 2007—2016 年我国 284 个地级及以上城市市辖区全社会固定资产投资额 (10^4 元)、市辖区年供水总量 (10^4 t)、市辖区年末总人口 (10^4 人) 分别作为资本、资源和人口投入要素,以市辖区地区生产总值 (10^4 元) 作为经济产出要素。数据主要源于 2007—2016 年《中国城市统计年鉴》,个别城市缺失数据取其前后两年均值,其中,全社会固定资产投资额和地区生产总值均按照 2007 年不变价格计算。

1.2 变异系数分析法

变异系数分析法是空间差异性研究最常用的方法之一,本文采用变异系数来测度中国生态地理区城市水资源利用效率差异和动态变化。计算公式如下:

$$C = \frac{1}{\bar{E}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n-1}} \quad (2)$$

其中, C 为变异系数, $\bar{E}$ 为全国城市或生态地理区水资源利用效率的平均值, n 为城市或生态地理区个数, E_i 为城市或生态地理区水资源利用效率。

1.3 Tobit 回归模型

由于通过分类 DEA 模型测算出的效率值是 0—1 之间的截尾数据,使用普通最小二乘法 (Ordinary Least

Squares, OLS) 进行回归估计,会导致不一致性的估计结果,故关于水资源利用效率及其影响因素的研究多采用 DEA-Tobit 两阶段模型,使用最大似然估计法(Maximum Likelihood Estimation, MLE) 对构建的 Tobit 模型进行效率值影响因素的回归分析。水资源利用效率受多方面因素影响,综合现有相关研究,同时考虑样本可获得性、可观察性以及代表性,选择与城市息息相关的市辖区人口、土地城市化、土地利用结构、经济发展水平、产业结构、城市供水、用水结构和水资源管理政策等 8 个指标,构建 Tobit 回归模型来考察全国和生态地理区城市水资源利用效率的影响因素。影响因素指标变量定义详见表 1,基于以上影响指标构建 Tobit 模型如下:

$$E = \beta_0 + \beta_i X_i + \mu_i$$

(3)

其中, E 为城市水资源利用效率, β_0 为常数项, β_i 为回归系数; X_i 为解释变量; μ_i 为扰动项, $i = 1, 2, \cdots, n$ 。

表 1 影响因素指标定义和说明
Table 1 Definition and description of influential factors

影响因素 Influential factors	指标定义 Definition	单位 Unit	数据来源 Data source
市辖区人口(X_1) Municipal population	Ln(市辖区人口密度)	人/km ²	2007—2016 年 《中国城市统计年鉴》
土地城市化(X_2) Land urbanization	建设用地占市区面积比重		
土地利用结构(X_3) Land use structure	居住用地占建设用地比重		
经济发展水平(X_4) Economic development level	Ln(市辖区人均 GDP)	元/人	
产业结构(X_5) Industrial structure	市辖区第二产业产值占比		
城市供水(X_6) Urban water supply	Ln(市辖区人均供水量)	t/人	
用水结构(X_7) Water consumption structure	居民用水占供水总量比重		
水资源管理政策(X_8) Water management policy	虚拟变量,变量为 1 时表示实施《关于实行最严格水资源管理制度的意见》政策,反之则变量为 0		

2 结果与分析

2.1 全国城市水资源利用效率总体特点

2007—2016 年我国城市水资源利用效率均值为 0.536,全国水资源效率总体水平较低。全国城市水资源利用效率随时间变化具有年代际差异,2007—2012 年间综合效率呈波动下降趋势,2012—2016 年波动上升,整体变化幅度较小,年均增长率为-0.321%(图 2)。全国城市水资源利用效率值存在显著差异,效率最大值可达 1,最小值为 0.204,极差为 0.796,标准差为 0.184。全国城市间水资源利用效率变异系数随时间在 0.363 上下波动,具有明显的波动点,2007—2008 年间猛增至最大值,区域间用水效率差距增大;随后呈波动下降趋势,2011—2012 年下降势态最显著,城市水资源利用效率间差距逐渐缩小(图 2)。

近十年我国城市水资源利用效率年均值空间分布如图 3 所示,其中水资源利用有效(=1.0)城市有 9 个,占全国地级及以上城市总数比重为 3.17%;高效率(0.9—1.0)城市数量为 8 个,占比为 2.82%;中等效率(0.7—0.9)城市 40 个,占比 14.08%;低效率(0.5—0.7)城市数量 78,占比为 27.46%;无效率(<0.5)城市 149 个,占比 52.46%。由此可见,我国城市水资源利用效率普遍偏低,79.93%的城市用水效率低于 0.7,导致全国整体用水水平较低,城市间水资源利用效率值差异显著且空间分布不平衡。

2.2 生态地理区城市水资源利用效率特征

中国各生态地理区城市水资源效率随时间呈现不同的发展势态,相对干旱的温带干旱区、温带半干旱区

水资源利用效率随时间呈“M”型变化趋势,且整体呈下降趋势;相对湿润的温带半湿润区、温带湿润区与全国城市水资源利用效率的变化趋势基本一致;亚热带湿润区总体上呈“W”型势态波动上升(图4)。生态地理区间水资源利用效率变异系数随时间在0.193上下显著波动,且存在明确的变化分界点,2007—2008年间猛增至最大值,城市间用水效率差距增大;随后呈波动下降趋势,2011—2012年间出现明显下降,生态地理区间水资源利用效率间差距逐渐缩小(图4)。

温带干旱区、温带半干旱区、温带半湿润区、温带湿润区和亚热带湿润区五大生态地理区水资源利用效率平均值分别为:0.813、0.704、0.596、0.588、0.452,呈现温带干旱区>温带半干旱区>温带半湿润区>温带湿润区>亚热带湿润区的格局,即用水效率整体上由西北向东南依次递减(图5)。对生态地理区城市进行详细分析可知:温带干旱区中,84.62%的城市效率值大于0.7,这部

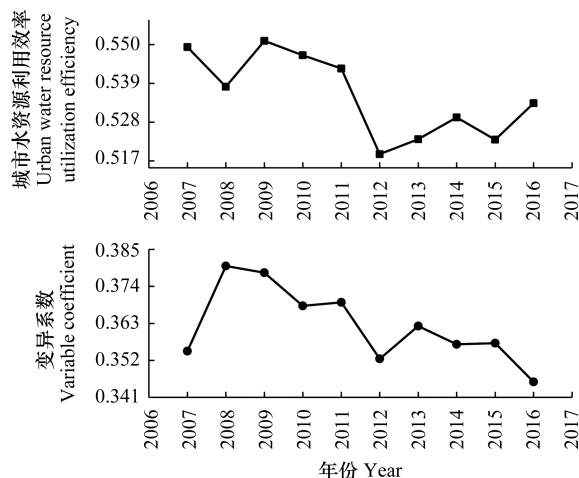


图2 全国城市水资源利用效率和变异系数变化趋势

Fig.2 Interannual changes of urban water resource utilization efficiency and variable coefficient in China

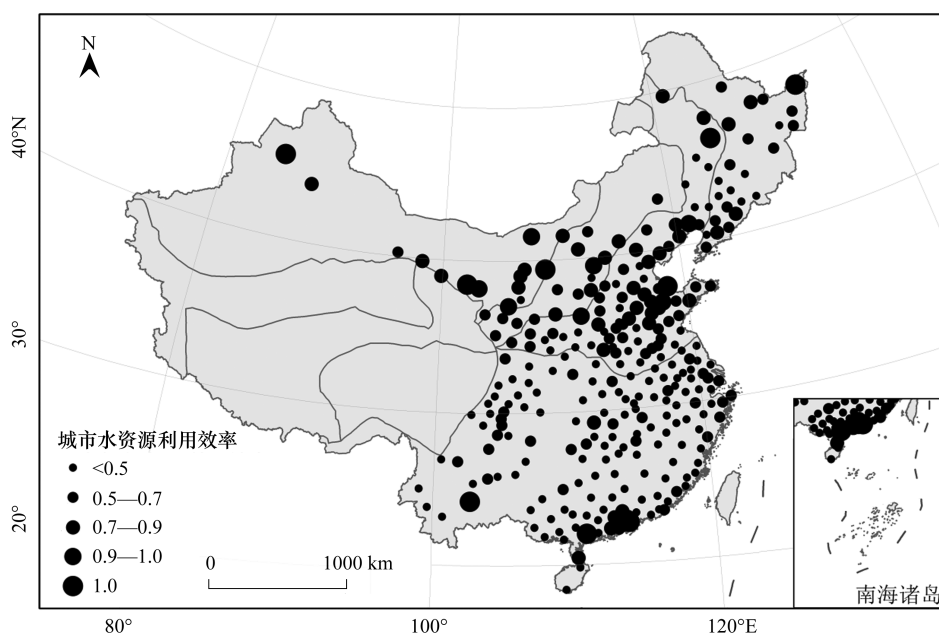


图3 全国城市水资源利用效率年均值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of urban water use efficiency in China

分中近一半城市水资源利用效率大于0.9;温带半干旱区中,效率值大于0.7的城市占比为44.44%,效率值高于0.9的城市有11.11%;温带半湿润区中,29.33%的城市效率高于0.7,其中只有不到五分之一的城市用水效率超过0.9;温带湿润区,除了佳木斯市效率达到1以外,用水效率均不超过0.9,且效率值高于0.7的城市仅有21.43%;亚热带湿润区,仅有6.67%的城市效率值超过0.7,而73.33%的城市效率值低于0.5(图3)。综上所述,生态地理区城市水资源利用效率值和空间分布差异明显,相对干旱生态地理区城市水资源效率普遍高于相对湿润区域,且具有显著的空间分布规律。

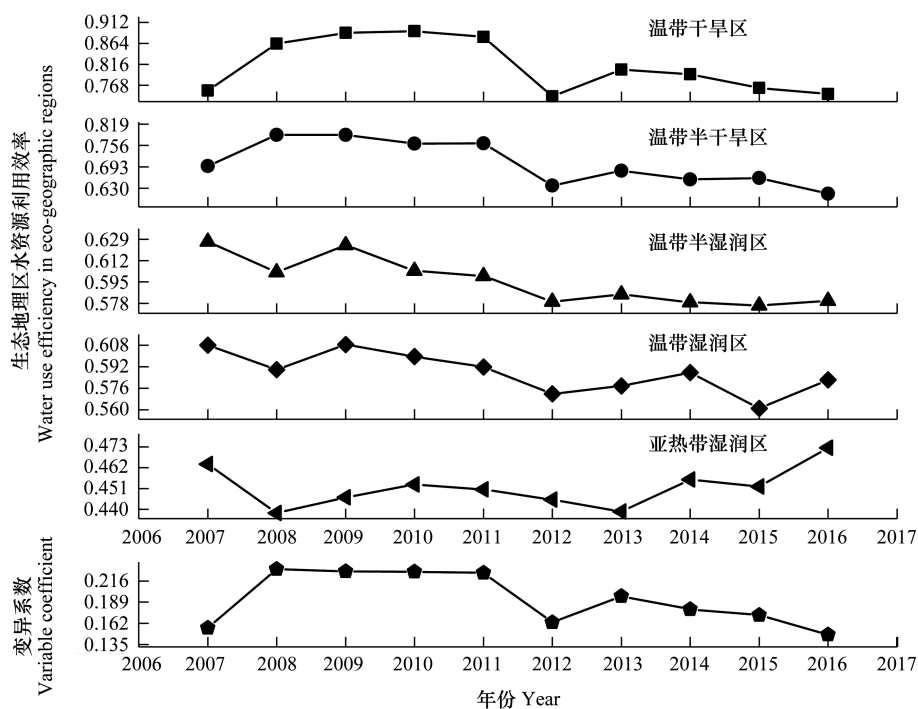


图 4 生态地理区水资源利用效率和变异系数变化趋势

Fig.4 Interannual changes of water use efficiency and variable coefficient in eco-geographic regions

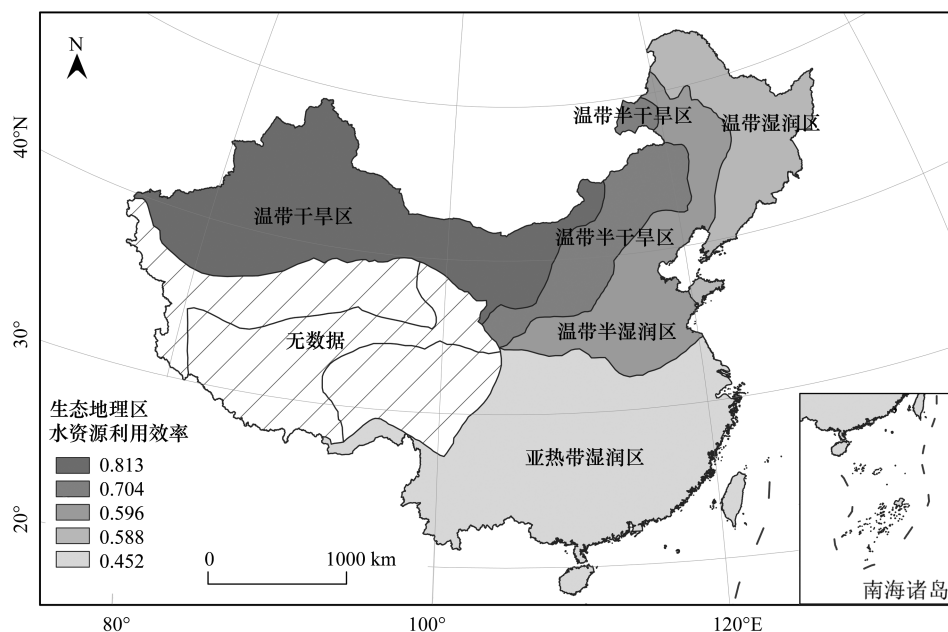


图 5 生态地理区城市水资源利用效率年均值空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of water use efficiency in eco-geographic regions of China

2.3 全国和生态地理区城市水资源利用效率影响因素

对 2007—2016 年全国城市和各生态地理区城市水资源利用效率及其影响因素面板数据进行回归分析, Tobit 回归模型的估计结果见表 2。

(1)市辖区人口与城市水资源利用效率呈显著正向相关,回归系数为 0.0077 且在 10%水平上显著(表 2),在其他条件不变的情况下,市辖区人口密度每上升 1%,城市水资源利用效率将提高 0.77%。市辖区人口密度增加意味着市区人口增多和集聚,越来越多的人口从以农业生产为生逐步向以非农业生产生活方式转变,有利于提高人力资本,推动生产率提升和城市生态文明建设,从而降低水资源消耗强度。这与吕素冰等^[36]和郭蕾^[37]的研究不谋而合,他们认为城镇人口比重增加对用水效益、用水效率具有很强的正向性影响。从五大生态地理区来看,城市市辖区人口对各区域城市水资源效率的影响存在差异,对亚热带湿润区具有显著的正向影响,对其余四区影响没能通过显著性检验,甚至产生负向作用(表 2)。这可能是因为温带干旱区、温带半干旱区、温带半湿润区和温带湿润区城市人口城市化水平和质量相对较低,农村转移到市区人口大多进入劳动密集型行业 and 传统服务业等用水低效行业,同时由于人力资本水平不高以及转移人口带来的就业、基建、资金等压力,导致城市招商引资和出口时难以吸收外资和出口技术溢出效应,不利于技术水平发展和用水效率提升^[38]。

表 2 Tobit 模型回归结果

Table 2 Regression results of Tobit model

影响因素 Influential factors	全国城市 The national city	温带干旱区城市 The temperate arid region	温带半干旱区城市 The temperate semi-arid region	温带半湿润区城市 The temperate sub-humid region	温带湿润区城市 The temperate humid region	亚热带湿润区城市 The pattern of subtropical humid region
市辖区人口(X_1)	0.0077 *	-0.0706	0.0355	-0.0106	-0.0028	0.0198 ***
Municipal population	(0.096)	(0.330)	(0.148)	(0.113)	(0.888)	(0.000)
土地城市化(X_2)	0.0235	-0.9987	-0.0280	0.0528 *	0.1051	0.0395 *
Land urbanization	(0.282)	(0.523)	(0.877)	(0.050)	(0.523)	(0.098)
土地利用结构(X_3)	0.0272 *	-0.0518	0.0958	0.0183	-0.0058	0.0614 ***
Land use structure	(0.075)	(0.680)	(0.400)	(0.492)	(0.898)	(0.000)
经济发展水平(X_4)	0.0800 ***	0.3365 ***	0.2293 ***	0.0416 ***	0.0283 *	0.0811 ***
Economic development level	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.079)	(0.000)
产业结构(X_5)	0.0815 ***	0.3129 ***	0.2443 ***	0.0601 **	0.0823 *	-0.0399
Industrial structure	(0.000)	(0.005)	(0.002)	(0.025)	(0.071)	(0.108)
城市供水(X_6)	-0.1085 ***	-0.2758 ***	-0.2176 ***	-0.1029 ***	-0.1278 ***	-0.0789 ***
Urban water supply	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
用水结构(X_7)	-0.0403 ***	-0.2620 **	-0.0520	-0.0256	-0.1656 ***	0.0022
Water consumption structure	(0.001)	(0.010)	(0.382)	(0.171)	(0.000)	(0.870)
水资源管理政策(X_8)	-0.0423 ***	-0.2656 ***	-0.1717 ***	-0.0426 ***	-0.0266 ***	-0.0202 ***
Water management policy	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.001)	(0.000)
常数	0.0944	-1.1319 *	-1.0503 ***	0.6498 ***	0.8892 ***	-0.1833 ***
Constant	(0.126)	(0.053)	(0.001)	(0.000)	(0.000)	(0.003)

括号内数字为概率 P 值, *、**、*** 分别表示在 $P<0.1$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平下显著

(2)土地城市化水平与城市水资源利用效率相关性不显著,但表现出正向性影响(表 2)。建设用地面积比重增加时,生产要素自由流通更容易,解放和发展生产力所需的条件相对也更成熟。同时城市建设用地扩张促使农业用地等非建设用地逐渐向工业用地、商业服务设施用地等建设用地转化,非农产值占比增多,城市产业结构得到优化^[39],经济产出增加降低了万元 GDP 水资源消耗,水资源利用效率相应提升。从五大生态地理区来看,土地城市化对温带半湿润区、温带湿润区和亚热带湿润区城市用水效率影响为正,其中温带湿润区没有通过显著性检验(表 2)。温带干旱区、温带半干旱区城市发展水平处于较低层次,通常通过牺牲资源和环境效益来发展经济,粗放式地继续扩大建设用地面积,不利于提高单位土地资源经济产出,对水资源利用产生较大的负面影响。

(3)土地利用结构与城市水资源利用效率在 10%水平下显著正相关(表 2),即增加居住用地占建设用地面积比重,有利于提高城市水资源利用效率。增加居住用地供给,能够带动城市建筑行业及相关产业的发展,

增加劳动就业机会,同时能够满足城市居民居住需要,承载更多的劳动人口,有利于城市经济产出提升^[40],使得水资源利用得到更有效地利用。从五大生态地理区来看,土地利用结构对各区域的影响作用有所不同,与亚热带湿润区城市水资源效率呈现显著正相关性,其余四区显著性不明显,其中温带半干旱区、温带半湿润区表现为正向影响,而对温带干旱区、温带湿润区的影响为负向(表2)。居住用地面积占比在一定程度上反映了居住用地开发强度,居住用地开发不仅影响城市土地投入和产出效益,且与城市居民生活水平、城市环境质量有着千丝万缕的关系^[41]。居住用地过度的、无序的扩张,不合理的土地利用结构,与我国资源利用集约化宗旨不符,不利于土地资源经济产出、人民生活水平和城市环境质量的提升,对水资源不利影响加重。温带干旱区、温带半干旱区、温带半湿润区、温带湿润区和亚热带湿润区居住用地占建设用地比重的多年平均值分别为33.19%、31.87%、31.88%、35.69%和31.80%,温带干旱区和温带湿润区明显高于其他三个地区,这与土地利用结构对不同区域用水效率影响方向的差异相符合。

(4) 经济发展水平与城市水资源利用效率之间相关关系显著,呈现出正向性影响(表2),即人均GDP增加会促进城市水资源利用效率提高,这与马海良等^[42]和任俊霖等^[43]的研究结论一致。经济发展水平越高,产业聚集程度、生产管理和技术水平也越高,促使用水效率提升。另外,经济水平越高意味着投资能力较强,能将更多资源用于科技发展、供水治污设施和水环境保护等方面,进而形成良性循环,从而进一步提升用水效率。从五大生态地理区来看,经济发展水平对生态地理区均具有显著的正向作用,但对各区域的影响程度有所差异(表2)。区域经济发展水平与水资源利用效率一般呈现倒“U”型关系,整体上我国目前还未达到拐点处^[18],经济发展水平处于拐点左侧时,经济发展水平处于不同发展阶段时,对水资源利用效率的提升作用也有所不同。

(5) 产业结构与城市水资源利用效率呈现显著正向相关关系(表2),即随着第二产业经济占比提高,水资源利用效率随之增加。这一结论得到钱文婧和贺灿飞^[44]、买亚宗等^[45]研究的支持,产业结构作为影响资源利用的重要因素,产业结构调整,特别是降低产业结构中高物耗行业比重是构建节能产业重要途径,第二产业作为中国经济快速增长的主要动力,随着第二产业比重的增加,城市产业结构得到优化,促使更多的水资源从高水耗低效率的农业分配到经济效益更高的产业,提高了单位耗水量的经济产出和用水效益。从五大生态地理区来看,产业结构对温带干旱区、温带半干旱区、温带半湿润区和温带湿润区城市水资源利用效率具有显著正向影响,与亚热带湿润区呈负相关(表2)。产生这种现象可能的解释是亚热带湿润地区水资源相对丰富,企业节水意识和节水措施较差,用水效率偏低,第二产业增加意味着水资源投入冗余增多,工业污水排放量增加,不利于水资源利用效率的提升。

(6) 城市供水对城市水资源利用效率具有显著负影响(表2),随着市辖区人均供水量增多,城市水资源利用效率将出现下降势态。原因可能是我国城市水资源利用方式、用水结构等不合理,节水意识较差,水资源浪费现象严重,资源规模报酬递减,从而导致水资源利用效率下降。从五大生态地理区来看,城市供水对各生态地理区城市水资源利用效率的影响显著,且均呈现明显负影响,但在不同区域产生不同程度的影响效果(表2)。相对干旱的温带干旱区和温带半干旱区,城市经济发展水平较低,科技水平不高,城市基础设施建设相对落后,不利于城市供水能力和净水能力的提升,城市供水过程中水资源损失量增多,水资源的无形浪费也更严峻。

(7) 用水结构与城市水资源利用效率负相关,在1%水平上显著(表2),居民用水量比重增加,将会导致水资源利用效率下降。俞雅乖和刘玲燕^[46]的研究表明无论是生活、生态用水还是农业、工业等生产用水都会对环境造成了一定负影响,且对水资源利用效率负向影响显著,其中生活用水的影响程度最大。可见,居民生活用水量占比越高,对城市水生态造成的损害以及用水效率的负作用也越大,这与水资源绿色、循环、高效利用宗旨不符,不利于用水效率改善。从五大生态地理区来看,用水结构对五大生态地理区城市水资源利用效率的影响迥异,其中对温带干旱区和温带湿润区城市水资源利用效率影响显著,对其余三区影响较小,且除亚热带湿润区表现为正向影响外,其余四区的影响均为负向(表2)。由于生态地理区环境气候、人口分布和居

民生活习惯等方面的差异,亚热带湿润地区城市居民用水量,占城市供水比重年均值高达 44.06%,远远高于其他四个生态地理区,因此其居民污水排放量、污水处理设备和维护成本投入也相应提升,城市居民面对日益增加的水资源需求和昂贵的污水处理费,其用水方式和观念随之改变,有利于减轻居民用水对水环境和用水效率的不利影响。

(8)水资源管理政策对全国和生态地理区城市水资源利用效率均产生显著负向作用(表 2),即执行最严水资源利用管理办法后,水资源利用效率较之前有所下降。执行最严水资源利用管理办法后,促使城市水资源配置发生适应性调整,扭曲了当下市场机制对水资源的“有效”配置,故导致水资源利用效率出现下降。生态地理区在经济发展水平、资源市场发育程度以及市场机制灵敏度等方面存在差别,在政府政策干预下,市场这个看不见的手做出及时反应,对减轻水资源配置扭曲的程度也有所不同,因此相对发达的湿润地区,水资源管理政策对城市水资源利用效率的负向影响更小。需要注意的是,2012 年实施最严水资源利用管理办法后,全国水资源利用效率水平开始逐渐提高,城市间用水效率差距减小(图 2)。可见,政府加大水资源管理力度,加快节水型社会建设,促进水资源可持续利用和经济发展方式转变,用水效率虽出现暂时性跌落,但总的来说,积极落实最严水资源利用管理办法显然有利于全面提升水资源利用效率。

3 讨论

3.1 全国和生态地理区城市水资源利用效率变动趋势

在全国城市层面,2007 年全球经济危机压力下,中央和地方政府把大量的救市资金投向了基础设施建设和重化工业,导致资源配置扭曲^[30],2008 年城市间用水效率差距增大,水资源效率平均水平出现明显下降。2012 年城市用水效率间差异缩小,全国用水效率降至最低水平,可能是由于《关于实行最严格水资源管理制度的意见》的实施,促使要素市场出现暂时性、调整型要素配置扭曲。2012 年后最严水资源管理制度得到有效落实,要素市场得以调控,城市用水效率间差异逐步减小,整体用水效率开始升高。可见,在城市经济社会快速发展和水资源保护的双重压力下,城市水资源利用效率呈现不同的发展势态,我国城市水资源利用效率问题虽出现回暖迹象,但整体水资源利用未达到理想状态,仍存在较大的进步空间。

在生态地理区层面,2007 年全球经济危机压力下,我国生态地理水资源利用呈现不同的发展势态,相对干旱地区水资源利用效率增大,其他三区效率值降低,致使 2007 年相比 2008 年生态地理区间用水效率值差距变大。2012 年区域间水资源利用效率变异系数骤减,则可能是区域对水资源开发利用和管理措施进行了响应性调整,导致现有资源配置“失衡”,区域水资源利用效率出现不同程度的下降,区域间用水效率差异减小。然而由于区域资源市场发育程度和调控能力存在差异,2012 年后各生态地理区水资源利用效率变化趋势出现差异,相对高效的地区效率值下降,相对低效地区效率值升高,导致生态地理区间水资源利用效率差距逐渐缩小。这表明面对社会经济发展与水资源协调发展挑战时,我国生态地理区做出各自的响应性调控,导致了区域间水资源利用效率差异变动,各生态地理区应加强区域间合作学习,发挥区域自身优势改善用水效率,水资源低效率区域追赶高效率区域。

3.2 生态地理区城市水资源利用效率区域差异

中国生态地理区水资源利用效率空间分布与其生态地理状况相符合,这与胡鞍钢等^[47]和李志敏和廖虎昌^[48]的研究结论异曲同工,一方面我国水资源东多西少、南多北少,另一方面我国西北部地理环境条件较东南地区更为严峻,相对干旱的西北地区水资源不易获取,可用水量相对匮乏,节约意识和观念较强、节水措施和管理较完善,城市水资源利用效率也相对较高。城市水资源利用效率与城市发展息息相关,受城市各方面因素影响,如城市人口、土地城市化、土地利用结构、经济发展水平、产业结构、城市供水、用水结构、政策影响等。需要注意的是,各生态地理区城市水资源利用效率受各因素的影响具有显著差异,对比发现:温带干旱区城市水资源利用效率影响程度最大的三个变量依次为:经济发展水平、产业结构、城市供水;温带半干旱区为:产业结构、经济发展水平、城市供水,温带半湿润区为:城市供水、产业结构、土地城市化水平,温带湿润区为:

用水结构、城市供水、产业结构,亚热带湿润区为:经济发展水平、城市供水、土地利用结构。即对于相对干旱的温带干旱区和温带半干旱区,有利于水资源效率改善的影响因素作用程度相对更高,而在相对湿润的温带半湿润、温带湿润区和亚热带湿润区,对城市用水效率影响较大的多为具有负向作用的因素。因此,中国生态地理区生态地理特征、城市经济社会发展各方面的差异可能就是造成不同生态地理区水资源利用效率迥异,且其变动趋势日益复杂的原因。

上述结论蕴含重要的政策意义:

(1)城市水资源需求涉及社会、经济、生活、生态环境等方方面面,水资源利用与管理是一项系统工程,既要重视水资源本身的管理,更要积极引导整个经济社会的共同参与。区域和城市制定国民经济和社会发展规划需将水资源高效、可持续利用作为重要因素考虑,重视水资源利用与城市国民经济和社会发展的关系,以节水减排高效为目的积极引导城市人口政策、经济发展方式、产业结构、空间布局、城市用水,以促进水资源的合理配置和节约利用,保障水生态环境良性循环,提高水资源利用效率,加强资源环境与城市的协调发展。

(2)我国区域生态地理特征、城市经济社会发展等方面存在较大差异,不同生态地理区城市水资源利用效率差距较大,城市发展要素对水资源利用的影响也有所差别,故在落实最严格水资源管理制度、推进生态文明建设时,要根据各地水资源效率和城市发展实际状况,因地制宜,切忌“一刀切”。

温带干旱地区,大力推动城市经济发展,发展第三产业、控制第一和第二产业,积极进行产业结构转变和升级,做好产业转移和承接,发挥地域广阔、资源丰富等的区域优势,拓展节能环保型新型产业,为水资源效率提升经济基础;严格水资源费征收、使用和管理,倡导用水主体节水减排,同时发挥要素市场的积极影响,提升单位水耗产出效益。

温带半干旱区,积极引导企业技术革新和技术进步,加大科技投入、技术人才培养和水资源管理力度,加快第一、二产业向第三产业的转变,促进产业结构优化改革和经济快速发展;同时加强环境监测、政府监管力度,提升工业企业水资源节水技术、污水处理技术,为水资源高效利用提供技术支撑,推动用水效率的提高。

温带半湿润区,坚持绿色发展理念,政府应加大环保宣传,挖掘节水潜力,提升重复用水能力和污水处理能力,提高工业用水效率、农业灌溉系数和群众节水意识,推进节水型社会建设;推动经济发展水平和城市化水平提升,促进产业结构的优化和升级,调整城市建设用地优化布局,同时应防止人口过于富集,给城市带来过大的用水压力。

温带湿润区,重视水资源配置对水资源利用效率的影响,加强水资源管控的同时充分发挥资源市场调控作用,推动城市用水方式和用水结构的优化;积极实现第二产业向第三产业的转型,引导高水耗低效率产业向低水耗高效率产业发展,水资源利用效率应成为水资源配置和调控的重要影响因素。

亚热带湿润区,在加快经济发展水平进程中,发挥区域优势做好产业承接,充分利用自然水循环的更新和自净能力,以提高水质和恢复水生态系统为目标,严控高污染产业、发展水处理技术,利用先进的技术和管理方式促使水资源可持续利用;须认识到城市人口、城市化进程、土地利用方式和空间布局等对水资源利用效率的影响,城市人口、产业布局要以水资源可持续利用为目标,优化城市空间格局,促进人水和谐。

4 结论

利用分类 DEA 和 Tobit 回归模型,评估分析 2007—2016 年我国生态地理区城市水资源利用效率及其影响因素,研究结果表明:

(1)全国城市层面,我国城市间水资源利用效率值差异显著,全国城市水资源利用效率总体水平较低,效率均值整体随时间呈先降后升的波动变化趋势。

(2)生态地理区层面,生态地理区水资源利用效率存在明显差异,效率值呈现温带干旱区>温带半干旱区>温带半湿润区>温带湿润区>亚热带湿润区的分布格局。

(3)全国城市间、生态地理区间水资源利用效率差距虽整体上在缩小,但在 2007 年和 2012 年出现明显分

界点,即在经济发展和政策等因素影响下,城市或区域呈现出不同的发展势态,导致了用水效率及其差异的变动。

(4)就全国而言,城市人口、土地利用结构、经济发展水平、产业结构与城市水资源利用效率呈显著正相关,是提高水资源利用效率的关键途径;土地城市化显著性不明显,但表现出正向性;城市供水、用水结构、政策影响对水资源效率具有显著负向影响,水资源利用效率进一步改善需注意这些指标的控制。此外,各影响因素对五大生态地理区城市水资源利用效率的影响不同,且差异显著。

参考文献 (References):

- [1] See K F. Exploring and analysing sources of technical efficiency in water supply services: Some evidence from Southeast Asian public water utilities. *Water Resources and Economics*, 2015, 9: 23-44.
- [2] Lee S O, Jung Y. Efficiency of water use and its implications for a water-food nexus in the Aral Sea Basin. *Agricultural Water Management*, 2018, 207: 80-90.
- [3] Lombardi G V, Stefani G, Paci A, Becagli C, Miliacca M, Gastaldi M, Giannetti B F, Almeida C M V B. The sustainability of the Italian water sector: An empirical analysis by DEA. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 1035-1043.
- [4] 刘渝, 杜江, 张俊飏. 湖北省农业水资源利用效率评价. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(6): 60-65.
- [5] 王录仓, 陈菲. 石羊河流域综合治理灌区水效率变化研究. *生态学报*, 2018, 38(10): 3692-3704.
- [6] 胡彪, 侯绍波. 京津冀地区城市工业用水效率的时空差异性研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(7): 1-7.
- [7] 雷玉桃, 黄丽萍, 张恒. 中国工业用水效率的动态演进及驱动因素研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2): 159-170.
- [8] 官菲, 杜灵通, 孟晨, 丹杨, 王乐, 郑琪琪, 马龙龙. 宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子. *生态学报*, 2019, 39(24): 9068-9078.
- [9] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 金昌杰, 吴家兵, 李峥, 井艳丽. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素. *生态学报*, 2015, 35(2): 478-488.
- [10] 赵晨, 王远, 谷学明, 赵卉卉, 吴尧萍, 朱晓东, 陆根法. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率. *生态学报*, 2013, 33(5): 1636-1644.
- [11] 鲍超. 中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系. *地理学报*, 2014, 69(12): 1799-1809.
- [12] 周玲玲, 王琳, 余静. 基于水足迹理论的水资源可持续利用评价体系——以即墨市为例. *资源科学*, 2014, 36(5): 913-921.
- [13] Shi T G, Zhang X L, Du H R, Shi H. Urban water resource utilization efficiency in China. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(6): 684-697.
- [14] Song M L, Wang R, Zeng X Q. Water resources utilization efficiency and influence factors under environmental restrictions. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 611-621.
- [15] 韩文艳, 陈兴鹏, 张子龙, 王宁飞, 于原浩. 中国地级及以上城市水资源利用效率的时空格局分析. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 354-360.
- [16] 汪克亮, 刘悦, 史利娟, 刘蕾, 孟祥瑞, 杨宝臣. 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. *资源科学*, 2017, 39(8): 1522-1534.
- [17] 海霞, 李伟峰, 王朝, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果. 京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系. *生态学报*, 2018, 38(12): 4245-4256.
- [18] 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. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(1): 157-164.
- [19] 李世祥, 成金华, 吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 215-220.
- [20] 吴绍洪, 杨勤业, 郑度. 生态地理区域系统的比较研究. *地理学报*, 2003, 58(5): 686-694.
- [21] 杨勤业, 郑度, 吴绍洪. 中国的生态地域系统研究. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 287-291.
- [22] 马海良, 徐佳, 王普查. 中国城镇化进程中的水资源利用研究. *资源科学*, 2014, 36(2): 334-341.
- [23] 周迪, 周丰年. 中国水资源利用效率俱乐部趋同的检验、测度及解释: 2003—2015 年. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1103-1115.
- [24] 吴芳, 张新锋, 崔雪锋. 中国水资源利用特征及未来趋势分析. *长江科学院院报*, 2017, 34(1): 30-39.
- [25] 杨丽英, 许新宜, 贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(5/6): 642-646.
- [26] 管新建, 秦海东, 孟钰. 基于 CRITIC-TOPSIS-灰色关联度的淮河流域水资源利用效率评估. *节水灌溉*, 2018, (11): 73-76, 80-80.
- [27] 高媛媛, 许新宜, 王红瑞, 高雄, 殷小琳. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(3): 776-784.
- [28] 胡林凯. 基于 WCA-MEPP 模型的云南省水资源利用效率动态评价. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(4): 75-81, 87-87.
- [29] 崔东文. 文山州近 10 年水资源利用效率评价 SLC-PP 模型及应用. *河海大学学报: 自然科学版*, 2017, 45(2): 129-136.

- [30] 马海良, 黄德春, 张继国, 田泽. 中国近年来水资源利用效率的省际差异: 技术进步还是技术效率. 资源科学, 2012, 34(5): 794-801.
- [31] 张振龙, 孙慧, 苏洋, 何昭丽. 中国西北干旱地区水资源利用效率及其影响因素. 生态与农村环境学报, 2017, 33(11): 961-967.
- [32] 张兆方, 沈菊琴, 何伟军, 安敏. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价——基于超效率 DEA-Malmquist-Tobit 方法. 河海大学学报: 哲学社会科学版, 2018, 20(4): 60-66.
- [33] 廖虎昌, 董毅明. 基于 DEA 和 Malmquist 指数的西部 12 省水资源利用效率研究. 资源科学, 2011, 33(2): 273-279.
- [34] Sun C Z, Zhao L S, Zou W, Zheng D F. Water resource utilization efficiency and spatial spillover effects in China. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 771-788.
- [35] Harrison J, Rouse P, Armstrong J. Categorical and continuous non-discretionary variables in data envelopment analysis: a comparison of two single-stage models. Journal of Productivity Analysis, 2012, 37(3): 261-276.
- [36] 吕素冰, 马钰其, 冶金祥, 李庆云. 中原城市群城市化与水资源利用量化关系研究. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 7-12.
- [37] 郭蕾. 中国城镇化进程中的水资源利用. 中国资源综合利用, 2017, 35(7): 47-49.
- [38] 阚大学, 李连菊. 中国城镇化对水资源利用的影响. 城市问题, 2018, (7): 4-12.
- [39] 赵伟, 罗亚兰, 王丽强. 中国建设用地利用效率的影响因素. 城市问题, 2016, (2): 4-13.
- [40] 聂雷, 郭忠兴, 刘秀丽. 土地利用结构和价格对城市土地利用效率的影响. 城市问题, 2019, (7): 30-36.
- [41] 杨崑, 曾坚, 郭风平. 可持续的城市居住用地开发强度. 天津大学学报: 社会科学版, 2009, 11(3): 247-252.
- [42] 马海良, 黄德春, 张继国. 考虑非合意产出的水资源利用效率及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(10): 35-42.
- [43] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 李雪松. 长江经济带省会城市用水效率分析. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 101-107.
- [44] 钱文婧, 贺灿飞. 中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(2): 54-60.
- [45] 买亚宗, 孙福丽, 黄泉泉, 石磊, 马中. 中国水资源利用效率评估及区域差异研究. 环境保护科学, 2014, 40(5): 1-7.
- [46] 俞雅乖, 刘玲燕. 中国水资源效率的区域差异及影响因素分析. 经济地理, 2017, 37(7): 12-19.
- [47] 胡鞍钢, 王亚华, 过勇. 新的流域治理观: 从“控制”到“良治”. 经济研究参考, 2002, (20): 34-44.
- [48] 李志敏, 廖虎昌. 中国 31 省市 2010 年水资源投入产出分析. 资源科学, 2012, 34(12): 2274-2281.