

DOI: 10.5846/stxb201909252010

贺玉晓, 苏小婉, 任玉芬, 王效科, 欧阳志云. 中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征. 生态学报, 2020, 40(20): 7464-7478.

He Y X, Su X W, Ren Y F, Wang X K, Ouyang Z Y. Spatiotemporal differentiation of urban water resource utilization efficiency of eco-geographic regions in China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7464-7478.

# 中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征

贺玉晓<sup>1</sup>, 苏小婉<sup>1,2</sup>, 任玉芬<sup>2,\*</sup>, 王效科<sup>2</sup>, 欧阳志云<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000

<sup>2</sup> 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

**摘要:**我国水资源面临的形势十分严峻, 水资源短缺、水污染严重、水生态环境恶化等问题突出, 已成为制约社会经济可持续发展的主要瓶颈。基于分类数据包络分析(Categorical DEA)对 2007—2016 年中国生态地理区城市水资源利用效率进行测算, 对其时间变化、空间分布以及空间收敛性进行分析。结果表明: 1) 2007—2016 年期间全国城市水资源利用效率总体处于低效率状态, 随时间高低交错波动式发展, 整体呈先降后升势态; 2) 生态地理区城市水资源利用综合效率由高到低依次为温带干旱区、温带半干旱区、温带半湿润区、温带湿润区、亚热带湿润区, 呈西北向东南逐渐递减的空间分布格局, 生态地理区纯技术效率区间差异较大, 但空间分布规律不显著, 区域规模效率间差距小, 且无明显空间分布规律; 3) 纯技术效率低效是制约全国水资源利用综合效率提升的主要因素, 生态地理区纯技术效率巨大差距导致全国纯技术效率整体低效, 也是全国水资源利用综合效率低效的根本原因; 4) 生态地理区水资源利用综合效率区域差距逐渐缩小, 主要是因为高效率区域效率值向低效率区域靠拢, 区域间低效向高效的“追赶效应”不明显。

**关键词:** 水资源利用效率; 生态地理区域; 分类数据包络分析(分类 DEA); 收敛性分析

## Spatiotemporal differentiation of urban water resource utilization efficiency of eco-geographic regions in China

HE Yuxiao<sup>1</sup>, SU Xiaowan<sup>1,2</sup>, REN Yufen<sup>2,\*</sup>, WANG Xiaoke<sup>2</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

<sup>2</sup> 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

**Abstract:** China is facing a serious situation with regard to water resources, which have become a major bottleneck restricting the sustainable development of the economy and society. Based on the categorical data envelopment analysis, we calculated the urban water resource utilization efficiency of eco-geographic regions in China and analyzed the changes in efficiency, spatial distribution, and spatial convergence. The results revealed the following: 1) The utilization efficiency of water resources in China was low, first falling and then rising in a staggered and fluctuating manner from 2007 to 2016. 2) The water use comprehensive efficiency of eco-geographic regions decreased in the following order: temperate arid region > temperate semi-arid region > temperate sub-humid region > temperate humid region > pattern of subtropical humid region. The technical efficiency decreased in the following order: temperate arid region > temperate semi-arid region > temperate humid region > temperate sub-humid region > pattern of subtropical humid region. The scale efficiency decreased as follows: temperate sub-humid region > temperate humid region > temperate arid region > pattern of subtropical humid region > temperate semi-arid region. 3) The considerable gap in technical efficiency among eco-geographic regions led to the low

**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:** 2019-09-25; **网络出版日期:** 2020-08-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yfren@rcees.ac.cn

technical efficiency at the aggregate (national) level, which was the main factor restricting the improvement of comprehensive efficiency in China. 4) Although the regional gap in water resource utilization comprehensive efficiency was narrowing in this time period, there was no clearly evident “catch-up effect” in the low-efficiency regions.

**Key Words:** water resources utilization efficiency; eco-geographic regions; categorical data envelopment analysis (Categorical-DEA); convergence analysis

水是生命之源、生产之要、生态之基。人多水少、水资源时空分布不均是我国的基本国情和水情。当前我国水资源面临形势十分严峻,水资源短缺、水污染严重、水生态环境恶化等问题日益突出,已成为制约区域和城市经济社会可持续发展的主要瓶颈。我国城市水资源需求涉及国民社会、经济、生活、生态环境等方方面面,根据中国产业信息网关于 2016 年我国城市水资源现状分析,当前我国城市水资源极其匮乏,随着我国社会经济快速发展和城市用水需求持续增长,大多数城市水资源开发利用已接近或达到极限,部分城市地下水超采现象严重,全国城市每年缺水 60 亿  $\text{m}^3$ ,每年因缺水造成的经济损失多达 2000 亿元。城市规模逐步扩张,城市污水排放量随之增加,城市水资源质量发生恶化。根据《2017 中国生态环境状况公报》<sup>[1]</sup>,2017 年全国地表水 1940 个水质断面(点位)中,Ⅰ—Ⅲ类水质断面(点位)占比为 67.9%,Ⅳ、Ⅴ类占 23.8%,劣Ⅴ类占 8.3%,黄河、松花江、淮河和辽河流域存在轻度污染,海河流域为中度污染;2017 年全国 2145 个测站地下水质量综合评价结果中,水质优良测站比例为 0.9%,良好测站比例为 23.5%,无较好测站,较差和极差测站比例分别为 60.9%和 14.6%，“三氮”污染情况较重,部分地区存在一定程度的重金属和有毒有机物污染。水环境恶化严重影响供水质量,加剧水资源短缺,城市供水不足问题非常突出,我国水资源高效可持续利用、城镇现代化建设、GDP 增长和居民生活水平提高等均受到限制。

解决水资源供需不协调的重点是提高水资源利用效率,水资源利用效率研究对水资源利用效率提高和水资源可持续利用具有十分重要的意义,已经引起国内外专家学者的高度重视。国外相关研究主要集中在单个产业用水效率或水务供水效率方面,如 Veetil 等<sup>[2]</sup>分析印度克里希纳河流域农业生产系统灌溉用水效率以及水价对用水效率和用水行为的影响,结果表明水价上涨不会造成很大的利润损失,但会导致用水需求减少;Higuerey 等<sup>[3]</sup>利用面向输入的距离函数,量化委内瑞拉饮用水供应和废水收集服务的技术效率,发现分散经营的公司比集中经营的公司效率高得多,且权力下放对技术效率能够产生积极影响;Lombardi 等<sup>[4]</sup>采用数据包络分析方法,通过计算意大利自来水公司效率来评估国家水行业系统的技术和环境效率,对不同性质企业、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,为决策者建立更加可持续和有效的水部门提供纠正政策和措施参考。国内学者在水资源利用效率方面研究更多地从评估方法、不同行业、不同地域空间尺度以及影响因素等角度开展理论与实践探索,官菲等<sup>[5]</sup>基于中分辨率成像光谱数据以及生态系统类型数据,分析 2000—2017 年宁夏陆地生态系统水分利用效率时空特征,探讨了净初级生产力和蒸散两种因子对生态系统水分利用效率的影响;刘渝等<sup>[6]</sup>选取与农业用水经济、生态效益等相关的指标,利用数据包络分析方法测度湖北省 17 个市、州的农业水资源利用效率,并分析效率水平低下的原因;雷玉桃等<sup>[7]</sup>运用随机前沿生产函数模型评估 1999—2014 年我国各省区历年工业用水效率值,通过聚类分析方法将各省区分为高、中、低效率组进行工业用水效率差异分析,构建 Tobit 回归模型对各组工业用水效率的影响因素进行实证分析;张振龙等<sup>[8]</sup>采用带有非期望产出的数据包络分析方法对 2004—2015 年我国西北干旱区 5 省区的水资源利用效率进行测度,利用  $\alpha$  收敛性分析方法和 Tobit 模型分析西北地区各省区水资源利用效率的区间差异和水资源利用效率的影响因素。

在不同空间尺度水资源利用效率研究方面,国外研究尺度多为地区<sup>[9-10]</sup>、不同级别行政区<sup>[11-14]</sup>、流域<sup>[15]</sup>等,国内则主要集中在全国<sup>[16-18]</sup>、流域<sup>[19-21]</sup>、城市群<sup>[22-24]</sup>、区域<sup>[25-26]</sup>以及省、市等行政区域<sup>[27-31]</sup>等空间尺度,针对生态地理区层面的水资源利用研究鲜少报道。生态地理区域系统是通过代表自然界宏观生态系统的

生物和非生物要素地理相关性的比较研究和综合分析,按照自然界的地理地带分异规律,划分或合并而成不同等级的区域系统,能够综合反映温度、水分、生物、土壤等自然要素的空间格局及其与资源环境的匹配;生态地理区域系统是认识区域生态环境特征的宏观框架,也是制定环境治理措施的基础,对植被恢复和保护、因地制宜利用自然资源和区域可持续发展有重要指导意义<sup>[32]</sup>。以中国地级及以上城市为研究对象,根据生态地理区域系统对全国城市进行分类,采用分类数据包络分析法对 2007—2016 年我国城市水资源利用效率进行测度,分析全国和生态地理区城市水资源利用效率特征,并在此基础上探讨水资源利用效率的时空差异和空间收敛,以期在生态地理区域层面为改善全国和区域水资源利用效率提供理论支持。

## 1 研究对象和区域划分

我国幅员辽阔、横跨多个温度带、地理地貌多样且复杂,杨勤业等<sup>[33]</sup>严格按照温度、水分、地貌特征等因素划分中国生态地理区域系统,将全国依次划分为 11 个温度带,21 个干湿区,49 个自然区。本文根据中国生态地域划分结果<sup>[33]</sup>,同时考虑到城市地理分布和生态地理区域尺度问题,将中国生态地理区域系统整合为 8 个生态地理区,分别为:亚热带湿润区、温带湿润区、温带半湿润区、温带半干旱区、高原湿润/半湿润区、高原半干旱区、高原干旱区、温带干旱区,如图 1 所示。由生态地理区空间分布可知,我国西北部地区生态环境相对干旱,东南沿海则较为湿润,即生态地理区由西北向东南方向,水分指标逐渐升高(图 1)。水分指标在一定程度上体现了地区的水资源条件,我国水资源条件分布不平衡,呈现西北地区向东南地区水资源条件逐渐改善的分布格局。

选取全国 284 个地级及以上城市作为研究对象,三沙市、儋州市、毕节市、铜仁市、拉萨市、日喀则市、山南市、昌都市、林芝市、海东市、西宁市、吐鲁番市、哈密市等 13 个城市由于统计数据不全,不包含在研究对象内,研究对象数量占全国地级及以上城市数量的 95% 以上,可以表征全国城市水资源利用效率特征和变化。按照城市市辖区所处生态地理区将全国 284 个地级及以上城市进行分类,生态地理区城市分布情况详见图 1。由分类结果可知城市主要分布于亚热带湿润区、温带半湿润区、温带湿润区、温带半干旱区、温带干旱区等 5 个生态地理区,高原湿润/半湿润区、高原半干旱区和高原干旱区三个区域无分布(图 1),其城市分布数量依次为 150、75、28、18、13,分别占各生态地理区地级及以上城市总数量的 97.40%、100%、100%、78.26%、86.67%,所选研究城市能够反映各生态地理区水资源利用情况。

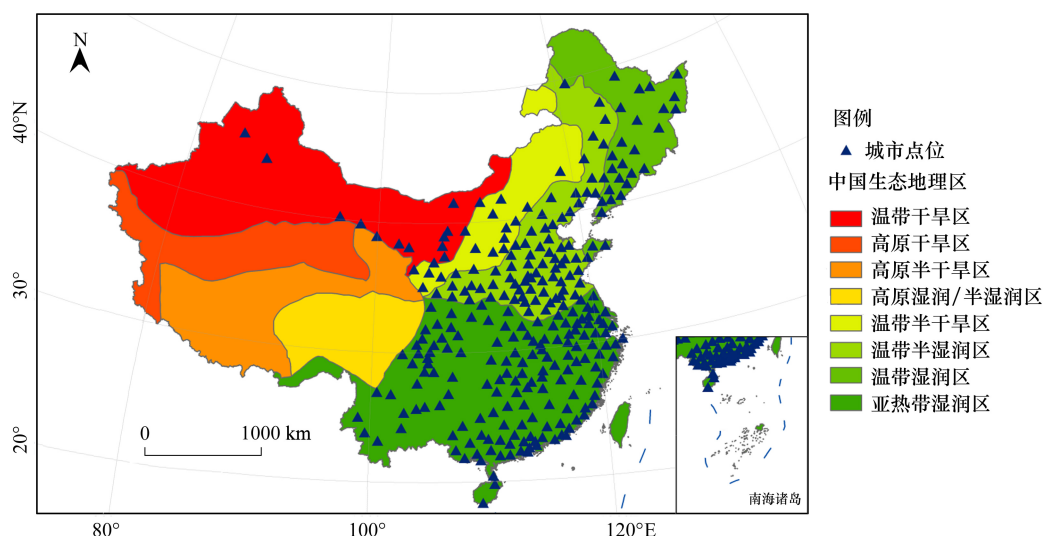


图 1 中国生态地理区和城市空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of eco-geographic regions and urban locations

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 水资源利用效率测算模型

分类数据包络分析(Categorical Data Envelopment Analysis, Categorical DEA)最初是1986年Banker和Morey<sup>[34-35]</sup>为研究爱荷华州69个不同规模社区内药店经营效率提出,他们认为社区居民作为药店潜在消费者,社区人口规模能够反映药店所处经营市场状况,处于人口较多社区药店拥有更有利的经营条件,反之则经营条件较差,据此将药店按照社区人口规模划分为9类处于不同经营环境的决策单元(Decision Making Unit, DMU),采用分类DEA对各类药店的经营效率分别进行测算。分类DEA从处在最困难经营环境下的一组DMUs开始,以较优经营条件组类为单位逐步扩大DMUs的参考集,直至参考集扩增到最优经营条件DMUs,这样将不同类别DMUs放在与其具有相同或较差经营环境DMUs的参考集中进行评估,能够有效避免因较差和较好经营条件的DMUs与相同投影前沿面进行比较而产生的不合理,这也是使用分类DEA模型的目的。

根据分类数据包络分析原理,结合城市所处生态地理区域,将全国284个地级及以上城市分为温带干旱区城市(I)、温带半干旱区城市(II)、温带半湿润区城市(III)、温带湿润区城市(IV)和亚热带湿润区城市(V)共5类,其分类DEA测算过程如下:

- (1)第I类仅在第I类的内部进行DMUs的效率测算;
- (2)第II类需要在第I和II类的DMUs内进行效率测算;
- (3)第III类需要在第I、II类和III类的DMUs内进行效率测算;
- (4)第IV类需要在第I、II、III类和IV类的DMUs内进行效率测算;
- (5)第V类则需要在全部的DMUs内进行效率测算。

需要注意的是各类别DMUs效率值为该类别第一次进行测算时得出的效率值。

DEA应用最为广泛的模型是CCR和BCC,二者的区别在于前者假定当决策单元的规模增大或减小时其规模报酬不会发生变化,而后者则假定规模报酬会发生变化。CCR模型计算出的效率为综合效率,是对整体投入产出效率的综合衡量;BCC模型在CCR模型基础上增加了凸性假设 $\sum \lambda_j = 1$ ,将综合效率分解为纯技术效率和规模效率两部分,其中纯技术效率是指在当下资源配置和技术条件下,剔除规模因素后的产出效率;规模效率则是由于投入产出规模因素影响的生产效率,能够反映实际投入产出规模与最优规模结构组合差距。

为了更全面地了解全国和各生态地理区城市水资源效率特征,在投入主导的BCC模型基础上进行分类DEA分析,测算城市水资源利用的综合效率、纯技术效率和规模效率。设有 $n$ 个决策单元,每个决策单元有 $m$ 项投入( $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}, x_{ij} > 0$ )和 $s$ 项产出( $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj}, y_{ij} > 0$ ), $\lambda_j$ 为各市投入和产出的权向量。对于基于投入主导型的BCC模型,每个决策单元都有相应的效率值 $\theta$ ,满足:

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

公式(1)去掉凸性假设 $\sum \lambda_j = 1$ 时,求解的是水资源利用综合效率,公式(1)计算出的是水资源利用纯技术效率,可以将综合效率值进一步分解为纯技术效率和规模效率两部分乘积。其中,当 $\theta = 1$ 时,表明该决策单元为DEA有效,城市的水资源利用效率同时为纯技术有效和规模有效;当 $\theta < 1$ 时,为DEA无效,可能表



现为纯技术效率无效或规模效率无效,此时  $\theta$  值越大表示该决策单元效率越高。参照已有研究<sup>[30]</sup>,对 2007—2016 年全国和各生态地理区水资源利用综合效率、纯技术效率和规模效率进行等级划分(表 1)。

表 1 水资源利用效率值的等级划分  
Table 1 Classification of water resource utilization efficiency

| 类别名称 Category          | 分类条件 Classification conditions      |
|------------------------|-------------------------------------|
| DEA 有效 DEA efficiency  | 综合/纯技术/规模效率 = 1                     |
| 高效率 High efficiency    | $0.9 \leq \text{综合/纯技术/规模效率} < 1$   |
| 中等效率 Medium efficiency | $0.7 \leq \text{综合/纯技术/规模效率} < 0.9$ |
| 低效率 Low efficiency     | $0.5 \leq \text{综合/纯技术/规模效率} < 0.7$ |
| 无效率 No efficiency      | 综合/纯技术/规模效率 $< 0.5$                 |

## 2.2 空间收敛性分析方法

目前研究空间收敛性问题的模型主要分为绝对收敛和局部收敛,其中绝对收敛有  $\alpha$  收敛和绝对  $\beta$  收敛,而局部收敛为条件  $\beta$  收敛。参考已有研究<sup>[36-37]</sup>,建立中国生态地理区城市水资源利用效率空间收敛模型,其含义及模型如下:

### 2.2.1 $\alpha$ 收敛分析

$\alpha$  收敛主要用来测度区域间某一变量值差异程度随时间变化状况,如果  $\alpha$  值随着时间推移不断下降,即区域间变量值离散程度逐渐减小,称为发生  $\alpha$  收敛。本文采用变异系数来衡量  $\alpha$  收敛, $\alpha$  变异系数模型可表示为:

$$\alpha_t = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_{i,t} - \bar{E}_t)^2}}{\bar{E}_t} \quad (2)$$

其中, $E_{i,t}$  为第  $i$  个区域在  $t$  时的水资源利用效率值, $i=1,2,\dots,n$ ;  $\bar{E}_t$  为  $t$  时  $n$  个区域水资源利用效率的均值。若  $\alpha_t > \alpha_{t+1}$ ,则存在  $\alpha$  收敛,即生态地理区城市水资源利用效率之间差异随时间逐步缩小。

### 2.2.2 绝对 $\beta$ 收敛

绝对  $\beta$  收敛主要测度变量与变量初始水平之间负相关关系,目的在于判断是否存在“追赶效应”。其模型如下:

$$\frac{[\ln(E_{i,t}) - \ln(E_{i,0})]}{T} = a + \beta \ln(E_{i,0}) + \varepsilon \quad (3)$$

其中, $E_{i,0}$  为某时段初期第  $i$  个区域的水资源利用效率值, $E_{i,t}$  为某时段末期第  $i$  个区域的水资源利用效率值, $a$  为常数项, $\beta$  为估计系数, $\varepsilon$  为随机误差项。若  $\beta < 0$ ,且通过显著性检验,表明存在绝对  $\beta$  收敛,说明水资源利用效率低效区域有向效率值较高区域追赶的趋势。

### 2.2.3 条件 $\beta$ 收敛

条件  $\beta$  收敛的目的在于判断测度变量是否收敛于自身稳定状态。其模型如下:

$$\ln(E_{i,t}) - \ln(E_{i,t-1}) = a + \beta \ln(E_{i,t-1}) + \varepsilon \quad (4)$$

其中, $E_{i,t-1}$  和  $E_{i,t}$  分别为第  $i$  个区域或城市在  $t-1$  时和  $t$  时的水资源利用效率值, $a$  为常数项, $\beta$  为收敛系数, $\varepsilon$  为随机误差项。若  $\beta < 0$  且通过显著性检验时,表明存在条件  $\beta$  收敛,即全国或生态地理区城市水资源利用效率收敛于自身的稳定状态。

## 2.3 指标选择和数据来源及处理

DEA 的显著特点是不需要考虑投入产出指标之间的函数关系,无须对指标数据进行无量纲处理。本文在选取投入产出指标时,参考相关文献中水资源效率测算指标同时,考虑指标选取代表性和数据可获得性,以 2007—2016 年全国 284 个地级及以上城市市辖区全社会固定资产投资额(万元)、市辖区年供水总量(万 t)、

市辖区年末总人口(万人)分别作为城市水资源利用效率测算的资本、资源和劳动力投入指标,市辖区地区生产总值(万元)为期望产生指标。

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,采用 2007 年不变价格计算。一般数据处理均采用 Excel 2007 软件进行,采用 DEA-solver pro5.0 软件测算全国各城市水资源利用效率值,利用 Origin 2017 软件分析综合效率与纯技术效率和规模效率之间的相关关系,通过 Stata15.1 软件对生态地理区水资源利用效率空间收敛性进行测度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 全国整体水资源利用效率

根据生态地理区城市分类结果,基于全国 284 个地级及以上城市 2007—2016 年 3 个投入指标、1 个产出指标以及分类指标数据,利用 DEA-solver pro5.0 软件 Categorical Variable 模型,对全国各城市水资源利用效率值进行测度,进一步得出全国和各生态地理区城市水资源利用效率均值。

由计算结果可知,2007—2016 年期间中国城市水资源利用效率整体处于综合效率低效、纯技术效率低效、规模效率中等水平,用水效率值随时间高低交错波动发展,但整体变化幅度很小。2007—2016 年全国城市水资源利用综合效率均值为 0.536,随时间变化具有年代际差异,即 2007—2012 年综合效率呈波动下降趋势,2012—2016 年波动上升(图 2,表 2)。纯技术效率方面,效率平均值为 0.625,其随时间变化趋势与综合效率基本一致(图 2,表 3);规模效率方面,效率均值为 0.856,效率值随时间波动明显,与综合效率波动规律吻合(图 2,表 4)。以上结果表明:近十年来中国城市水资源利用整体投入产出效果不理想(0.536),水资源配置调控方面产出效率(0.625)显著低于水资源实际投入规模结构方面的效率(0.856)。由此可见,我国在水资源高效利用和节约用水技术等方面整体上较为薄弱,水资源利用的资源投入规模组合发挥出较好的规模效应,水资源利用仍有较大提升空间。

#### 3.2 生态地理区水资源利用效率

2007—2016 年我国五大生态地理区城市水资源利用效率均值和时间演变及其年均变化幅度均存在不同,对比生态地理区水资源利用效率可知:

从水资源利用效率值角度,相对干旱的温带干旱区和温带半干旱区水资源利用综合效率均值在 0.7 以上,属于中等效率阶段(表 2);纯技术效率和规模效率均值分别为 0.948 和 0.859,0.860 和 0.823,均在 0.8 以上,纯技术效率大于规模效率(表 3,表 4)。相对湿润的温带半湿润区、温带湿润区和亚热带湿润区综合效率均值不超过 0.6,处于低效率甚至无效率水平(表 2);纯技术效率和规模效率分别为:0.655 和 0.915,0.665 和 0.893,0.547 和 0.837,纯技术效率均不超过 0.7,而规模效率值均高于 0.8(表 3,表 4)。以上结果说明:生态地理区水资源利用效率值具有明显区域差异,相对干旱地区水资源利用综合效率高于相对湿润地区,且主要表现为规模效率无效,相对湿润区域则为显著的纯技术效率无效。生态地理区水资源利用效率特征与其生态地理状况基本符合,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取水用水困难,节约意识强,通过改进科学用水技术、严格管理水资源等来达到水

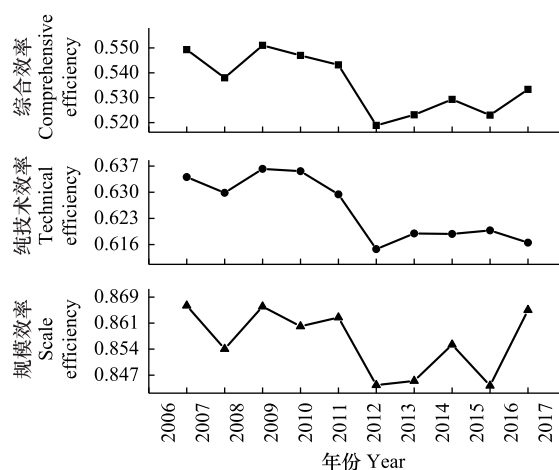


图 2 全国城市水资源利用效率变化趋势图

Fig.2 Trend chart of national urban water resource utilization efficiency change

资源的高效利用,而东南部湿润地区水资源丰富且易于取水,水资源利用更多地是依仗丰富的资源发挥其规模效应。

表 2 全国和生态地理区城市水资源利用综合效率值

Table 2 Water resource utilization comprehensive efficiency of eco-geographic regions in China

| 年份<br>Year                          | 全国整体水平<br>The nationwide | 温带干旱区<br>The temperate arid region | 温带半干旱区<br>The temperate semi-arid region | 温带半湿润区<br>The temperate sub-humid region | 温带湿润区<br>The temperate humid region | 亚热带湿润区<br>The pattern of subtropical humid region |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 2007                                | 0.549                    | 0.756                              | 0.695                                    | 0.627                                    | 0.608                               | 0.464                                             |
| 2008                                | 0.538                    | 0.864                              | 0.787                                    | 0.603                                    | 0.59                                | 0.438                                             |
| 2009                                | 0.551                    | 0.888                              | 0.787                                    | 0.624                                    | 0.608                               | 0.446                                             |
| 2010                                | 0.547                    | 0.892                              | 0.761                                    | 0.604                                    | 0.600                               | 0.453                                             |
| 2011                                | 0.543                    | 0.879                              | 0.762                                    | 0.600                                    | 0.592                               | 0.450                                             |
| 2012                                | 0.519                    | 0.743                              | 0.638                                    | 0.579                                    | 0.572                               | 0.445                                             |
| 2013                                | 0.523                    | 0.804                              | 0.682                                    | 0.585                                    | 0.578                               | 0.439                                             |
| 2014                                | 0.529                    | 0.794                              | 0.656                                    | 0.579                                    | 0.588                               | 0.456                                             |
| 2015                                | 0.523                    | 0.762                              | 0.660                                    | 0.576                                    | 0.561                               | 0.452                                             |
| 2016                                | 0.533                    | 0.748                              | 0.614                                    | 0.580                                    | 0.582                               | 0.473                                             |
| 均值 Mean                             | 0.536                    | 0.813                              | 0.704                                    | 0.596                                    | 0.588                               | 0.452                                             |
| 年均变化率<br>Average annual change rate | -0.327%                  | -0.120%                            | -1.380%                                  | -0.863%                                  | -0.482%                             | 0.206%                                            |

表 3 全国和生态地理区城市水资源利用纯技术效率值

Table 3 Water resource utilization technical efficiency of eco-geographic regions in China

| 年份<br>Year                          | 全国整体水平<br>The nationwide | 温带干旱区<br>The temperate arid region | 温带半干旱区<br>The temperate semi-arid region | 温带半湿润区<br>The temperate sub-humid region | 温带湿润区<br>The temperate humid region | 亚热带湿润区<br>The pattern of subtropical humid region |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 2007                                | 0.634                    | 0.910                              | 0.841                                    | 0.683                                    | 0.671                               | 0.554                                             |
| 2008                                | 0.630                    | 0.951                              | 0.884                                    | 0.673                                    | 0.667                               | 0.543                                             |
| 2009                                | 0.636                    | 0.977                              | 0.886                                    | 0.687                                    | 0.675                               | 0.544                                             |
| 2010                                | 0.636                    | 0.980                              | 0.890                                    | 0.671                                    | 0.675                               | 0.550                                             |
| 2011                                | 0.629                    | 0.974                              | 0.887                                    | 0.660                                    | 0.664                               | 0.547                                             |
| 2012                                | 0.615                    | 0.923                              | 0.839                                    | 0.638                                    | 0.645                               | 0.544                                             |
| 2013                                | 0.619                    | 0.946                              | 0.862                                    | 0.648                                    | 0.660                               | 0.539                                             |
| 2014                                | 0.619                    | 0.951                              | 0.833                                    | 0.630                                    | 0.657                               | 0.552                                             |
| 2015                                | 0.620                    | 0.948                              | 0.849                                    | 0.636                                    | 0.668                               | 0.547                                             |
| 2016                                | 0.617                    | 0.923                              | 0.825                                    | 0.623                                    | 0.665                               | 0.553                                             |
| 均值 Mean                             | 0.625                    | 0.948                              | 0.860                                    | 0.655                                    | 0.665                               | 0.547                                             |
| 年均变化率<br>Average annual change rate | -0.311%                  | 0.165%                             | -0.204%                                  | -1.017%                                  | -0.099%                             | -0.028%                                           |

从效率值随时间变化角度,2007—2016 年五大生态地理区综合效率中,温带干旱区、温带半干旱区、温带半湿润区和温带半湿润区均呈逐年衰退趋势,亚热带湿润区随时间发展逐渐增长,其中变化幅度最大为温带半干旱区(-1.380%),最小为温带干旱区(-0.120%),两者相差近 11 倍(表 2)。纯技术效率方面,温带干旱区纯技术效率随时间呈逐年增长趋势,其余四个区域纯技术效率随时间逐渐下降,其中最大变化幅度为温带半湿润区的-1.017%,最小为亚热带湿润区的-0.028%,前者约为后者的 36 倍(表 3);规模效率方面,温带半湿润区、亚热带湿润区的规模效率呈增长趋势,其余三区随时间逐年衰退,其中变化幅度最大的温带半干旱区(-1.132%)约是最小的温带半湿润区(0.183%)的 6 倍(表 4)。综上可知,生态地理区水资源利用综合效率、

纯技术效率和规模效率时间演变区域间差异明显,但效率值总体变动幅度均较小。

表 4 全国和生态地理区城市水资源利用规模效率值

Table 4 Water resource utilization scale efficiency of eco-geographic regions in China

| 年份<br>Year                          | 全国整体水平<br>The nationwide | 温带干旱区<br>The temperate<br>arid region | 温带半干旱区<br>The temperate<br>semi-arid region | 温带半湿润区<br>The temperate<br>sub-humid region | 温带湿润区<br>The temperate<br>humid region | 亚热带湿润区<br>The pattern of<br>subtropical humid<br>region |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 2007                                | 0.866                    | 0.837                                 | 0.834                                       | 0.921                                       | 0.910                                  | 0.850                                                   |
| 2008                                | 0.854                    | 0.911                                 | 0.893                                       | 0.901                                       | 0.889                                  | 0.818                                                   |
| 2009                                | 0.866                    | 0.910                                 | 0.891                                       | 0.913                                       | 0.905                                  | 0.833                                                   |
| 2010                                | 0.861                    | 0.910                                 | 0.859                                       | 0.906                                       | 0.894                                  | 0.835                                                   |
| 2011                                | 0.863                    | 0.903                                 | 0.863                                       | 0.914                                       | 0.898                                  | 0.835                                                   |
| 2012                                | 0.844                    | 0.810                                 | 0.769                                       | 0.916                                       | 0.897                                  | 0.832                                                   |
| 2013                                | 0.845                    | 0.852                                 | 0.795                                       | 0.909                                       | 0.885                                  | 0.828                                                   |
| 2014                                | 0.855                    | 0.836                                 | 0.793                                       | 0.926                                       | 0.900                                  | 0.839                                                   |
| 2015                                | 0.844                    | 0.805                                 | 0.781                                       | 0.914                                       | 0.863                                  | 0.840                                                   |
| 2016                                | 0.865                    | 0.816                                 | 0.753                                       | 0.936                                       | 0.888                                  | 0.865                                                   |
| 均值 Mean                             | 0.856                    | 0.859                                 | 0.823                                       | 0.915                                       | 0.893                                  | 0.837                                                   |
| 年均变化率<br>Average annual change rate | -0.016%                  | -0.289%                               | -1.132%                                     | 0.183%                                      | -0.269%                                | 0.203%                                                  |

### 3.3 纯技术效率和规模效率对综合效率的影响

采用 Origin 2017 软件对全国城市、全国生态地理区以及各生态地理区城市水资源利用综合效率、纯技术效率和规模效率数据进行正态分布检验,结果显示,在 0.05 水平下,各组数据不显著地来自正态分布总体。排除数据正态性后对各组效率值数据进行斯皮尔曼 (Spearman) 相关性分析,由结果可知:在全国层面,综合效率与纯技术效率 ( $P=0.000$ )、规模效率 ( $P<0.001$ ) 均显著相关,与纯技术效率的相关程度 (0.813) 大于规模效率 (0.455) (表 5)。在生态地理区层面,全国生态地理区水资源利用综合效率与纯技术效率显著相关 ( $P<0.001$ ),与规模效率相关性较弱 ( $P=0.668>0.1$ ) (表 5);不同生态地理区纯技术效率和规模效率与综合效率相关性存在差异,在相对干旱的温带干旱区和温带半干旱区,规模效率与综合效率的相关关系大于纯技术效率,对于相对湿润的温带半湿润区、温带湿润区和亚热带湿润区,综合效率与纯技术效率相关性较为显著 (表 5)。

结合全国和生态地理区水资源利用效率特征,对比分析用水效率间相关性发现:纯技术效率低效是影响全国水资源利用效率提高的主导因素,纯技术效率逐年减小是导致综合效率下降的主要原因 (表 5);全国生态地理区间综合效率差距主要是由于区域纯技术效率差异的存在 (表 5),区域纯技术效率的巨大差距导致全国纯技术效率整体水平低效,也是全国综合效率低效的根本原因。对于相对干旱生态地理区,规模效率对综合效率具有决定性影响作用,相对低效的规模效率制约着其综合效率值的提高;相对湿润的其余三个生态地理区,影响其综合效率的主导因素为纯技术效率,综合效率低效主要是由低效率的纯技术效率造成;另外,温带半湿润区水资源利用综合效率下降的主要原因是其纯技术效率的下降,而其余四区综合效率值的变化则受规模效率变化影响较明显 (表 5)。

综上所述,突破全国水资源利用效率低下的关键是着力提高纯技术效率,有效措施则是缩小生态地理区间纯技术效率的巨大差异,因此提升全国整体水资源利用产出效率主要应从提高资源配置调控能力、科学用水技术和水资源管理水平等方面出发。改善生态地理区水资源利用效率应考虑各区域之间的差异,根据各生态地理区自身特点,分别从资源配置控制或规模结构方面因地制宜地为区域水资源利用效率提高和可持续发展提供合理化建议,而不是简单“一刀切”。如温带干旱区和温带半干旱区需要调整其投入资源规模结构保障用水效率的稳步上升;温带半湿润地区可以通过引进技术、节约用水、加强管理等途径来达到水资源的高效



利用的目的;温带湿润区和亚热带湿润区在重视资源科学调配和严格管理等问题同时还应注意其资源规模结构合理性的提升。

表 5 水资源利用综合效率与纯技术效率和规模效率相关性  
Table 5 The correlation among comprehensive efficiency, scale efficiency and technical efficiency

| 区域<br>Regions                                        | 综合效率和<br>纯技术效率<br>Comprehensive efficiency &<br>Technical efficiency | 综合效率和规模效率<br>Comprehensive<br>efficiency & Scale<br>efficiency | 决定性影响因素<br>Determining factors | 时间变化<br>主要影响因素<br>Main factor influencing<br>the change of efficiency<br>value over time |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 全国整体水平<br>The nationwide                             | 0.813 ***<br>(0.000)                                                 | 0.455 ***<br>(<0.001)                                          | 纯技术效率                          | 纯技术效率                                                                                    |
| 全国生态地理区域<br>The eco-geographic regions               | 0.976 ***<br>(<0.001)                                                | 0.062<br>(0.668)                                               | 纯技术效率                          | —                                                                                        |
| 温带干旱区<br>The temperate arid region                   | 0.547 ***<br>(<0.001)                                                | 0.919 ***<br>(<0.001)                                          | 规模效率                           | 规模效率                                                                                     |
| 温带半干旱区<br>The temperate semi-arid region             | 0.620 ***<br>(<0.001)                                                | 0.658 ***<br>(<0.001)                                          | 规模效率                           | 规模效率                                                                                     |
| 温带半湿润区<br>The temperate sub-humid region             | 0.882 ***<br>(<0.001)                                                | 0.274 ***<br>(<0.001)                                          | 纯技术效率                          | 纯技术效率                                                                                    |
| 温带湿润区<br>The temperate humid region                  | 0.887 ***<br>(<0.001)                                                | 0.352 ***<br>(<0.001)                                          | 纯技术效率                          | 规模效率                                                                                     |
| 亚热带湿润区<br>The pattern of subtropical<br>humid region | 0.664 ***<br>(<0.001)                                                | 0.524 ***<br>(<0.001)                                          | 纯技术效率                          | 规模效率                                                                                     |

\*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 10%、5%、1%水平下显著;括号内数字为概率 P 值

3.4 生态地理区水资源利用效率空间分布

将计算得出的生态地理区水资源利用效率值与 ArcGIS 结合,绘制 2007—2016 年全国生态地理区水资源利用综合效率、纯技术效率和规模效率空间分布图。综合效率呈现温带干旱区>温带半干旱区>温带半湿润区>温带湿润区>亚热带湿润区的空间格局(图 3),纯技术效率呈现温带干旱区>温带半干旱区>温带湿润区>温带半湿润区>亚热带湿润区的空间分布(图 4),规模效率呈现温带半湿润区>温带湿润区>温带干旱区>亚

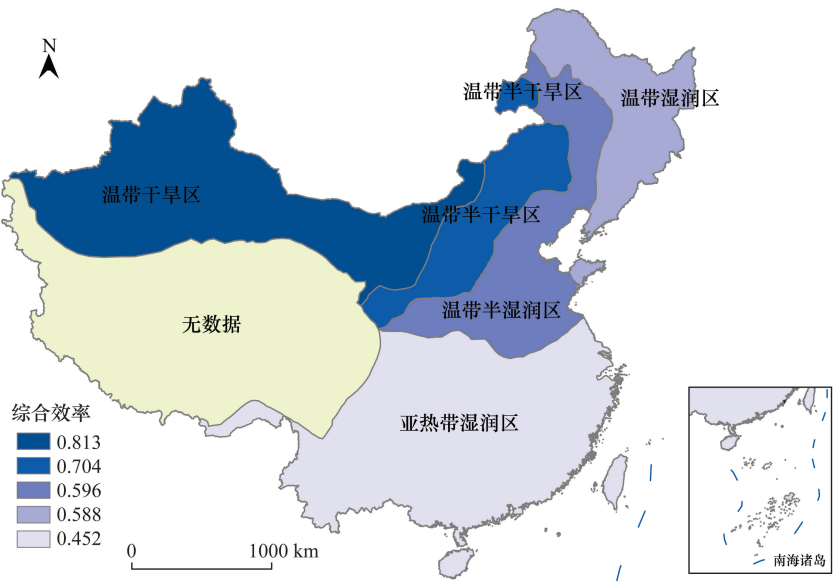


图 3 全国生态地理区水资源利用综合效率空间分布  
Fig.3 The spatial distribution of comprehensive efficiency in eco-geographic regions of China

热带湿润区>温带半干旱区的分布格局(图5)。由空间分布特征可知,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水资源利用综合效率平均值分别为:0.813、0.704、0.596、0.588、0.452,效率值生态地理区间差异较大,且具有显著的空间分布规律,即表现为由西北向东南方向逐渐递减的分布特征;生态地理区水资源利用纯技术效率平均值分别为:0.948、0.850、0.655、0.665、0.547,区域纯技术效率差距明显,但空间分布规律不显著;规模效率平均值分别为:0.859、0.823、0.915、0.893、0.837,规模效率区域间差距很小,且无明显空间分布规律。

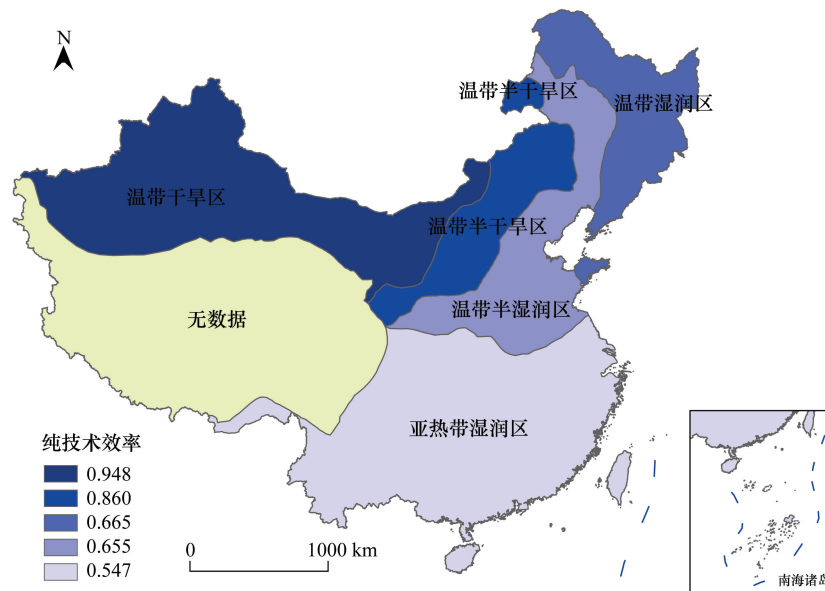


图4 全国生态地理区水资源利用纯技术效率空间分布

Fig.4 The spatial distribution of technical efficiency in eco-geographic regions of China



图5 全国生态地理区水资源利用规模效率空间分布

Fig.5 The spatial distribution of scale efficiency in eco-geographic regions of China

### 3.5 空间收敛性分析

由公式(2)计算得出全国生态地理区水资源利用效率 $\alpha$ 变异系数,根据公式(3)利用 Stata15.1 软件对全国生态地理区水资源利用效率数据进行线性回归,得到绝对 $\beta$ 收敛系数。2007—2016 年我国生态地理区水资源利用综合效率 $\alpha$ 变异系数总体上呈现减小趋势(图 6),即存在 $\alpha$ 收敛,说明我国不同生态地理区间水资源利用综合效率差距整体上在逐步缩小;纯技术效率和规模效率的 $\alpha$ 值呈波动增大趋势(图 6),即 $\alpha$ 不收敛,故不作分析。2007—2016 年我国生态地理区水资源利用综合效率绝对 $\beta$ 收敛系数为负值( $-0.015$ ), $P$ 值为 $0.382(>0.1)$ ,不存在显著绝对 $\beta$ 收敛(表 6),即生态地理区水资源利用综合效率无显著低效区域向高效区域的“赶超效应”;纯技术效率和规模效率的 $\beta$ 系数值均大于 0,不具有绝对 $\beta$ 收敛性(表 6),故不作分析。

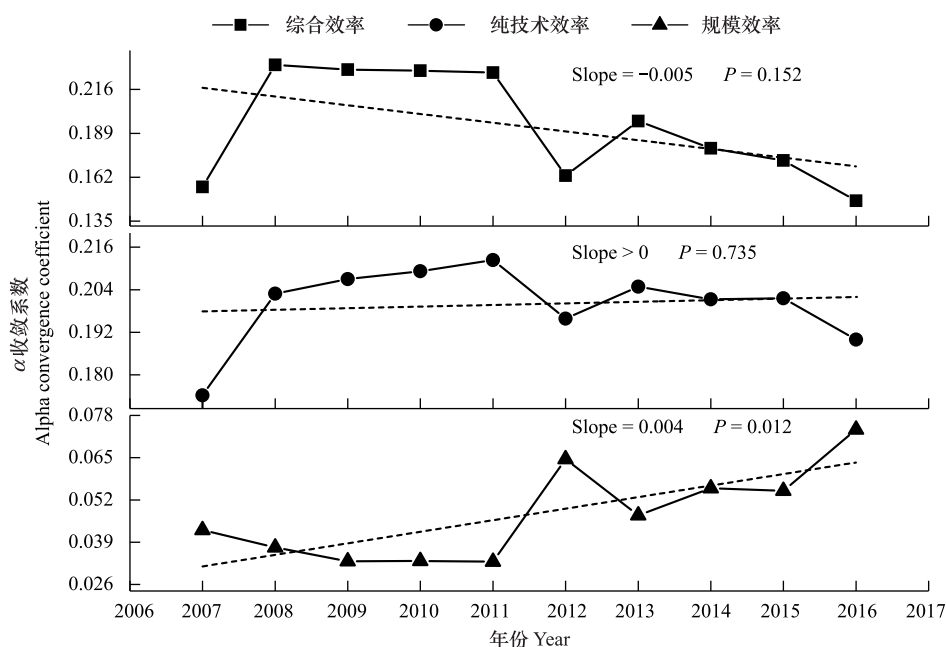


图 6 全国生态地理区水资源利用效率 $\alpha$ 收敛系数

Fig.6 Alpha convergence coefficient of water resource efficiency in eco-geographic regions of China

表 6 全国生态地理区水资源利用效率的绝对 $\beta$ 收敛

Table 6 Absolute beta convergence of water use efficiency in eco-geographic regions of China

| 水资源利用效率<br>Water resource utilization efficiency | 估计系数( $\beta$ )<br>Coefficient | 标准误差( $\alpha$ )<br>Standard error | $T$ 检验值<br>$t$ | $P$ 检验值<br>$P> t $ | 是否存在 $\beta$<br>绝对收敛<br>Absolute beta<br>convergence |
|--------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------------|------------------------------------------------------|
| 综合效率<br>Comprehensive efficiency                 | -0.015                         | 0.015                              | -1.02          | 0.382              | 否                                                    |
| 纯技术效率<br>Technical efficiency                    | 0.004                          | 0.012                              | 0.37           | 0.734              | 否                                                    |
| 规模效率<br>Scale efficiency                         | 0.052                          | 0.051                              | 1.01           | 0.388              | 否                                                    |

综合 $\alpha$ 收敛和绝对 $\beta$ 收敛结果可知,我国生态地理区水资源利用综合效率差距虽在逐渐缩减,但低效率区域向高效率区域的追赶趋势并不显著,说明生态地理区水资源利用效率区域差异的减小并不是因为低效率区域效率值向高效区域的追赶。亚热带湿润区综合效率最低(0.452)随时间逐年上升(0.206%),相对高效的其余四个生态地理区效率呈下降趋势(表 2)。可见,生态地理区水资源利用综合效率区域差距逐渐缩小主要原因可能是高效率区域效率值向低效率区域靠拢,各生态地理区水资源利用效率仍存在很大提升潜力。

根据公式(4)对全国生态地理区和各生态地理区进行条件 $\beta$ 收敛检验,需对2007—2016年生态地理区水资源利用效率面板数据进行回归估计。为了选择更合适的回归模型,利用Stata15.1软件对其面板数据分别采用固定效应模型和随机效应模型进行线性回归评估条件 $\beta$ 收敛系数,并对两模型结果进行豪斯曼(Hausman)检验,其检验结果 $P$ 值均小于0.01,表明全国生态地理区及各生态地理区的综合效率、纯技术效率和规模效率条件 $\beta$ 收敛检验均应拒绝原假设,即拒绝随机效应模型,接受固定效应模型。由条件 $\beta$ 收敛结果可知:全国生态地理区和各生态地理区水资源利用效率条件 $\beta$ 系数均为负值,且通过了不同水平下显著性检验(表7),即均存在显著的条件 $\beta$ 收敛。这一结果表明全国生态地理区及各生态地理区水资源利用综合效率、纯技术效率和规模效率一直朝着自身稳定均衡水平收敛。

综合效率、纯技术效率和规模效率收敛速度不同(表7),全国及生态地理区的综合效率将沿着现有的趋势持续发展,即全国水资源综合利用效率持续下降,区域间的差距继续缩减。然而由于各生态地理区水资源利用效率值、收敛速度等因素差异,综合效率的区域差距无法完全消除,同样区域纯技术效率和规模效率之间差距变化也不是无限的,所以水资源利用效率生态地理区间差距才持续存在。

表7 全国及各地理区水资源利用效率的条件 $\beta$ 收敛

Table 7 Conditional beta convergence of water use efficiency in eco-geographic regions of China

| 水资源利用效率<br>Water resource<br>utilization efficiency | 全国生态<br>地理区域<br>The eco-<br>geographic regions | 温带干旱区<br>The temperate<br>arid region | 温带半干旱区<br>The temperate<br>semi-arid region | 温带半湿润区<br>The temperate<br>sub-humid<br>region | 温带湿润区<br>The temperate<br>humid region | 亚热带湿润区<br>The pattern of<br>subtropical humid<br>region |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 综合效率<br>Comprehensive efficiency                    | -0.482 ***<br>(0.003)                          | -0.601 ***<br>(0.000)                 | -0.440 ***<br>(0.000)                       | -0.636 ***<br>(0.000)                          | -0.802 ***<br>(0.000)                  | -0.644 ***<br>(0.000)                                   |
| 纯技术效率<br>Technical efficiency                       | -0.508 ***<br>(0.001)                          | -0.696 ***<br>(0.000)                 | -0.702 ***<br>(0.000)                       | -0.503 ***<br>(0.000)                          | -0.753 ***<br>(0.000)                  | -0.577 ***<br>(0.000)                                   |
| 规模效率<br>Scale efficiency                            | -0.402 **<br>(0.010)                           | -0.541 ***<br>(0.000)                 | -0.319 ***<br>(0.000)                       | -0.934 ***<br>(0.000)                          | -0.984 ***<br>(0.000)                  | -0.590 ***<br>(0.000)                                   |

\*、\*\*、\*\*\* 分别表示在10%、5%、1%水平下显著;括号内数字为概率 $P$ 值

## 4 讨论

### 4.1 水资源利用效率时间变化规律

本文研究表明,我国2007—2016年期间全国水资源利用综合效率处于低效率状态,随时间高低交错波动式发展,总体上呈先下降后上升的变化趋势,水资源利用存在巨大的进步空间。我国水资源利用效率整体处于低效状态已成为很多专家学者共识,然而可能由于水资源利用效率测算方法和指标、研究尺度等因素的差异,水资源利用效率随时间变化趋势也有所不同<sup>[38-41]</sup>。近年来我国水资源利用效率动态变化存在明显的分界点,根据马海良等<sup>[42]</sup>和钱文婧等<sup>[43]</sup>的研究结果,2007年以前水资源利用效率有所提高,2008年水资源效率平均水平相比2007年出现明显下降,这是在发展压力下水资源利用效率出现的一个拐点,也是在全球金融危机背景下由于要素市场动荡出现的暂时性、调整型要素配置扭曲。2007年全球发生经济危机,为了刺激经济复苏,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型化工业,这导致资源配置的扭曲,从而使水资源利用效率下降<sup>[42]</sup>,本文结果同样符合这一结论。由此可见,2012年的经济危机,相当数量投机和投资资金进入商业房产,致使资源配置扭曲,可能是导致水资源利用效率大幅度下降的一个重要原因。2012年1月份国务院颁布《关于实行最严格水资源管理制度的意见》,促进了城市对水资源开发利用、用水效率以及节水型社会建设的重视。2013年经济工作坚持扩大内需战略,以提高经济增长质量和效益为中心,科学创新宏观调控方式,国民经济呈现稳中有进。经济危机后,要素市场得到调控,最严水资源管理制度得到有效实施,水资源利用效率稳步提升,2012年成为全国水资源利用效率变化的另一分界点。

### 4.2 水资源利用效率空间分布特征

中国水资源利用效率存在显著的区域差异,目前关于我国城市水资源利用效率空间分布特征的研究主要



集中在传统的东、中、西三大经济地带,由于三大经济地带所处经济发展阶段存在明显差距,水资源利用效率呈现明显的空间地带性,不同的研究结果虽存在差异,但总体上呈现西低东高的分布特征<sup>[40-42]</sup>。国家或地区用水效率与其经济发展阶段直接相关,通常而言,经济发展初期的用水较为粗放,经济发展到一定水平后,用水效率会逐步提升,然而需要注意的是不同国家或地区间用水效率高低与其经济发展水平不直接相关,而是与其水资源禀赋密切相关,且水资源利用效率与水资源禀赋呈负相关关系<sup>[39, 44]</sup>。东、中、西三大经济地带划分主要是基于其经济基础和发展水平等因素,不同区域水资源利用效率与其经济发展水平并无直接关系,这可能就是基于传统经济带进行区域差异研究结果存在差异的原因。全国生态地理区水资源利用效率同样具有显著的空间异质性,生态地理区水资源利用综合效率呈现温带干旱区>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,即效率值呈现由西北向东南方向逐渐递减的空间分布特征。这一研究结果表明相对干旱的生态地理区城市水资源利用效率值更高,这与胡鞍钢等<sup>[45]</sup>和李志敏等<sup>[46]</sup>的研究结论不谋而合,即城市所处地区生态环境越是干旱,水资源越是不易获取,可用水量越是匮乏,节水措施越完善,水资源管理和资源配置能力越强,城市水资源利用效率也就越高。

#### 4.3 水资源利用效率影响因素

纯技术效率和规模效率影响着城市水资源利用综合效率,纯技术效率是影响综合效率的决定性因素,且发挥着越来越重要的作用,规模效率的影响则相对较小<sup>[29]</sup>。韩文艳等<sup>[41]</sup>认为中国城市水资源利用效率低主要是由纯技术效率低导致,提高城市水资源利用效率应在技术进步方面努力,加大科技投入促进技术水平的提高,提高水资源重复利用率促进水资源的循环利用,此外,还应该注意改善部分城市水资源利用的规模无效状态。本文研究结果进一步证明,纯技术效率低制约着全国城市水资源利用效率整体水平的提高,纯技术效率逐年减小是导致综合效率下降的主要原因;生态地理区间纯技术效率的巨大差距决定区域间综合效率差距,也是导致全国水资源利用效率整体水平低效的根本原因;不同生态地理区水资源利用综合效率值高低和变化受纯技术效率和规模效率的影响也有所不同。城市水资源利用受很多现实因素的影响,如经济发展水平<sup>[47]</sup>、城市人口与产业结构<sup>[48]</sup>、城镇化水平<sup>[49]</sup>、水资源禀赋<sup>[39]</sup>及土地利用<sup>[50]</sup>等。已有研究表明我国水资源利用效率具有明显区域差异,造成差异的因素包括经济发展水平、产业结构、水资源禀赋、科技水平、政府影响力等<sup>[51-52]</sup>,影响因素对不同地区水资源利用效率的作用也存在差异性<sup>[53]</sup>。

## 5 结论

本文基于分类 DEA 模型,测算了中国生态地理区城市水资源利用效率,并进一步分析了水资源利用效率时空分异特征。主要结论如下:

(1) 2007—2016 年中国水资源利用效率整体处于综合低效、纯技术低效、规模中等效率状态,效率值随时间变化具有年代际差异,2007—2012 年波动下降,2012—2016 年波动上升,但总体变动幅度小。纯技术效率是制约和影响全国整体水资源利用综合效率提高和变化的决定性因素。

(2) 2007—2016 年生态地理区水资源利用效率具有区域差异性。相对干旱的温带干旱区和温带半干旱区综合效率较高,表现为规模效率无效,规模效率是影响综合效率的主导因素;相对湿润的温带半湿润区、温带湿润区和亚热带湿润区综合效率偏低,主要为纯技术效率无效,纯技术效率对综合效率的影响具有决定性。全国生态地理区水资源利用综合效率区域差距主要是由区域纯技术效率差异导致。

(3) 2007—2016 年生态地理区水资源利用效率存在空间异质性。综合效率呈现温带干旱区>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,即效率表现为由西北向东南递减的空间分布;纯技术效率由高到低依次为温带干旱区、温带半干旱区、温带湿润区、温带半湿润区、亚热带湿润区,效率值差异大但空间分布规律不显著;规模效率由高到低依次为温带半湿润区、温带湿润区、温带干旱区、亚热带湿润区、温带半干旱区,效率值差异小且无明显空间分布规律。

(4) 2007—2016 年生态地理区水资源利用综合效率存在  $\alpha$  收敛,不具有显著绝对  $\beta$  收敛性,综合效率区

域差距逐渐缩小主要是因为高效率区域效率值向低效率区域的靠拢。全国生态地理区和各生态地理区均显著地条件 $\beta$ 收敛,其水资源利用综合效率、纯技术效率和规模效率具有收敛于自身均衡状态趋势。

#### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报. 北京: <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkggh/201805/P020180531534645032372.pdf>, 2018.
- [2] Veetil P C, Speelman S, Van Huylenbroeck G. Estimating the impact of water pricing on water use efficiency in semi-arid cropping system: an application of probabilistically constrained nonparametric efficiency analysis. *Water Resources Management*, 2013, 27(1): 55-73.
- [3] Higuerey A, Trujillo L, Gonzalez M M. Has efficiency improved after the decentralization in the water industry in Venezuela? *Utilities Policy*, 2017, 49: 127-136.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [9] Buafua P M. Efficiency of urban water supply in Sub-Saharan Africa: do organization and regulation matter? *Utilities Policy*, 2015, 37: 13-22.
- [10] 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.
- [11] Nazari B, Liaghat A, Akbari M R, Keshavarz M. Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 7-18.
- [12] Romano G, Guerrini A. Measuring and comparing the efficiency of water utility companies: a data envelopment analysis approach. *Utilities Policy*, 2011, 19: 202-209.
- [13] Pointon C, Matthews K. Reprint of: Dynamic efficiency in the English and Welsh water and sewerage industry. *Omega*, 2016, 60: 98-108.
- [14] Alsharif K, Feroz E H, Klemer A, Raab R. Governance of water supply systems in the Palestinian Territories: a data envelopment analysis approach to the management of water resources. *Journal of Environmental Management*, 2008, 87(1): 80-94.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Guan X J, Sheng X L, Yu M. Evaluation of water resources comprehensive utilization efficiency in the Yellow River Basin. *Water Supply*, 2016, 16(6): 1561-1570.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 陈威, 杜娟, 常建军. 武汉城市群水资源利用效率测度研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(6): 1251-1258.
- [25] 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.
- [26] 刘晓君, 闫俐臻. 基于数据包络模型的西部水资源利用效率及影响因素研究. *水资源保护*, 2016, 32(6): 32-38.
- [27] 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.
- [28] 王景波, 袁清文, 姚苗苗. 基于改进非期望 SBM 模型的省级水资源效率测度. *统计与决策*, 2018, 34(21): 103-105.
- [29] 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.

- [30] 王竞优, 边杨子, 聂炜, 王玥, 石磊. 中国环境保护重点城市水资源利用效率分析. 科技导报, 2018, 36(2): 55-60.
- [31] 窦燕. 乌鲁木齐市各区县水资源利用效率研究. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 164-168.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Banker R D, Morey R C. The use of categorical variables in data envelopment analysis. Management Science, 1986, 32(12): 1613-1627.
- [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] 姜钰, 蔡秀亭. 中国森林生态安全动态测度及空间收敛性分析. 统计观察, 2019, 35(2): 91-95.
- [37] 吴义根, 冯开文, 曾珍. 我国省际区域生态效率的空间收敛性研究. 中国农业大学学报, 2019, 24(2): 202-214.
- [38] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于 SBM-Malmquist 生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究. 资源科学, 2018, 40(5): 993-1005.
- [39] 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.
- [40] 王喜峰. 考虑区域承载力的水资源效率研究. 城市与环境研究, 2018, (2): 97-110.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 张亮. 未来十年中国水资源需求展望. 发展研究, 2013, (11): 12-18.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 张峰, 薛惠锋, 董会忠, 毕研昭, 高敬云. 黄河三角洲水资源利用与经济增长的动态响应. 环境科学与技术, 2016, 39(6): 187-194.
- [48] 王燕华. 北京市人口变动及产业结构调整对水资源利用的影响. 中国水土保持科学, 2014, 12(3): 48-52.
- [49] 阚大学, 吕连菊. 中国城镇化对水资源利用的影响. 城市问题, 2018, (7): 4-12.
- [50] 杨华. 土地利用与水资源利用的相关性分析. 中国水运, 2015, 15(8): 160-161.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.