

引用格式:刘华军,乔列成,孙淑惠.黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J].资源科学,2020,42(1):57-68.[Liu H J, Qiao L C, Sun S H. Spatial distribution and dynamic change of water use efficiency in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 57-68.] DOI: 10.18402/resci.2020.01.06

# 黄河流域用水效率的空间格局及动态演进

刘华军,乔列成,孙淑惠

(山东财经大学经济学院,济南250014)

**摘要:**提高用水效率是实现水资源可持续发展的关键举措,深入探究黄河流域用水效率的空间格局及动态演进趋势,对推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。本文通过构建基于非期望产出的全局至强有效前沿最近距离模型(MinDS模型),对2000—2017年黄河流域用水效率进行科学测度,从全国视角、区域比较视角及流域内部视角全面刻画黄河流域用水效率的空间格局,并借助扩展的分布动态学模型探究黄河流域用水效率的动态演进趋势。研究结果表明:黄河流域用水效率高于全国平均水平,中下游地区用水效率始终高于中上游地区,呈现出“东高西低”的空间分布特征;黄河流域用水效率在部分年份存在极化现象,空间因素能够明显影响黄河流域用水效率未来的空间分布,相邻地区用水效率的相互作用导致长期内黄河流域用水效率差距逐渐缩小,存在着收敛于中间水平的趋势。

**关键词:**黄河流域;用水效率;空间格局;核密度估计;马尔科夫链

DOI:10.18402/resci.2020.01.06

## 1 引言

黄河流域生态保护和高质量发展已经上升为重大国家战略。作为中国重要的生态屏障和重要的经济地带,黄河流域在中国生态安全和社会经济发展方面具有十分重要的地位。党的十八大以来,黄河流域的生态环境治理和社会经济发展取得了巨大成就。然而,由于黄河流经黄土高原等自然环境脆弱地区,加之存在不合理的水资源利用方式,使得黄河流域的水资源短缺形势十分严峻。根据国家统计局的相关资料显示,黄河流域9省区的用水总量从2007年的1187.75亿 $m^3$ 上升至2017年的1275.60亿 $m^3$ ,年均增长率达0.72%,远高于全国水平(0.38%);废水排放量从2007年的124.95亿t上升至2017年的180.06亿t,年均增长率达3.78%,亦远高于全国水平(2.31%)。面对黄河流域严峻的发展形势,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调指出,要坚持绿水青山就是金山

银山的理念,坚持生态优先、绿色发展、以水而定、量水而行。这意味着中国对黄河流域的生态治理,尤其是用水治理进入新阶段。在此背景下,科学评价黄河流域的用水效率并探究其空间格局及动态演进趋势,对于转变黄河流域水资源开发利用方式,推动黄河流域生态保护和高质量发展至关重要。

随着用水矛盾问题日益突出,学者们围绕水资源进行的研究逐渐增多。从黄河流域水资源问题的相关研究来看,由于黄河流域水资源匮乏,尤其是干旱年份水资源供需矛盾尖锐,且具有水少沙多的典型特征,学者主要围绕水资源承载能力、水沙治理问题以及水文特征等方面展开研究,为黄河流域水环境的综合治理及可持续发展提供决策指导<sup>[1,2]</sup>。从用水效率评价方法来看,用水效率评价主要分为全要素用水效率和单要素用水效率两种,全要素用水效率由于考虑到整个生产过程中的多种投入,使得测算结果更具有实际意义<sup>[3]</sup>。鉴于数据包络分析

收稿日期:2019-11-13;修订日期:2019-12-22

基金项目:国家社会科学基金项目(18BJY140);山东省自然科学基金项目(ZR2019MG029);山东省泰山学者青年专家计划项目(tsqn20171208)。

作者简介:刘华军,男,山东广饶人,博士,教授,博士生导师,主要从事资源环境经济研究。E-mail: huajun99382@163.com

(Data Envelopment Analysis, DEA)模型在测度全要素用水效率方面的优势,大量文献在DEA框架下测度用水效率,其中,至前沿最远距离模型(Slack Based Measure, SBM)有效解决了效率测度的变量松弛问题,在用水效率测度中得到最广泛应用<sup>[4,5]</sup>。从用水效率研究视角来看,学者主要围绕用水效率的分布格局、影响因素及空间交互影响等进行研究<sup>[3,6]</sup>。从用水效率的评价对象来看,相关研究主要从全国层面展开<sup>[7,8]</sup>,自长江经济带等上升为国家战略后,关于区域用水效率的研究增多<sup>[9,10]</sup>。

已有研究为本文奠定了良好基础,提供了强有力的理论依据与方法论支撑,但有待进一步完善。①在评价方法上,应用广泛的SBM模型存在使效率值最小化的固有属性,在评价无效的决策单元(Decision Making Unit, DMU)时会低估其实际表现,而至强有效前沿最近距离模型(Minimum Distance to Strong Efficient Frontier, MinDS)使用距离前沿面的最短距离来评价DMU的效率值,解决了SBM模型的这一问题。②在评价对象上,大量文献集中于全国及长江经济带等区域层面对全要素用水效率展开研究,缺少对黄河流域全要素用水效率的研究。基于此,本文在全要素思想下,采用MinDS模型对黄河流域的用水效率进行测度。以此为基础,通过全国视角、区域比较视角以及流域内部视角对黄河流域用水效率的空间格局进行考察,并进一步采用核密度估计(Kernel Density Estimation)和马尔可夫链(Markov Chain, MC)分析方法探究其动态演进。

## 2 研究方法 with 数据

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 基于非期望产出的MinDS模型

基于Aparicio等<sup>[11]</sup>设计的MinDS模型计算方法,本文先通过SBM模型(或其他等价模型)求得有效DMU的集合 $\mathbf{F}$ ,然后利用混合整数线性规划方法,以有效子集 $\mathbf{F}$ 作为其参考集,采用强有效前沿上距离最近的点作为投影点,求得MinDS模型效率值。

假设共有 $A(a=1, 2, \dots, A)$ 个时期和 $N(n=1, 2, \dots, N)$ 个DMU,每个DMU有 $m$ 种投入,记为 $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ),投入的权数为 $v_i$  ( $v_i \geq 1$ );  $q_1$ 种期望产出,记为 $y_r$  ( $r=1, 2, \dots, q_1$ ),权数为 $\mu_r$  ( $\mu_r \geq 1$ );  $q_2$ 种非期望产出,记为 $z_p$  ( $p=1, 2, \dots, q_2$ ),权数为 $\beta_p$  ( $\beta_p \geq$

1)。每个DMU的权重为 $\lambda_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ )。  $M$ 为足够大的正数。  $b_j$ 为0-1变量,当 $b_j=1$ 时,  $d_j \leq M, \lambda_j=0$ , 此时的 $DMU_j$ 不是参考标杆;当 $b_j=0$ 时,  $d_j=0, \lambda_j \leq M$ , 此时的 $DMU_j$ 是参考标杆。在全局参比下,规模收益可变的非期望MinDS模型如式(1)-(2)所示:

$$\begin{aligned} \max \rho_k &= \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{s_i^-}{x_{ik}}\right)}{\frac{1}{q_1} \sum_{r=1}^{q_1} \left(1 + \frac{s_r^+}{y_{rk}}\right) + \frac{1}{q_2} \sum_{p=1}^{q_2} \left(1 + \frac{s_p^-}{z_{pk}}\right)} \quad (1) \\ \text{s.t.} & \sum_{j \in \mathbf{F}} \sum_{a=1}^A x_{ij} \lambda_j + s_i^- = x_{ik}; \quad s_i^- \geq 0 \\ & \sum_{j \in \mathbf{F}} \sum_{a=1}^A y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{rk}; \quad s_r^+ \geq 0 \\ & \sum_{j \in \mathbf{F}} \sum_{a=1}^A y_{pj} \lambda_j + s_p^- = z_{pk}; \quad s_p^- \geq 0 \\ & \lambda_j \geq 0, j \in \mathbf{F} \\ & -\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \sum_{r=1}^{q_1} \mu_r y_{rj} - \sum_{p=1}^{q_2} \beta_p z_{pj} + d_j = 0 \quad (2) \\ & d_j \leq M b_j; \quad \lambda_j \leq M(1 - b_j) \\ & b_j \in \{0, 1\}; d_j \geq 0 \end{aligned}$$

根据Hu等<sup>[12]</sup>全要素用水效率的测算思路,用水效率的计算公式如式(3)所示:

$$E_t^k = \frac{W_t^k - S_t^k}{W_t^k} \quad (3)$$

式中:  $E_a^k$ 为黄河流域 $k$ 省区在 $a$ 时期的用水效率;  $W_a^k$ 为 $k$ 省区在 $a$ 时期的实际水资源消耗量;  $S_a^k$ 为 $k$ 省区在 $a$ 时期水资源消耗量的松弛变量。如果松弛变量为0,则该省区的用水效率为1。水资源消耗量的松弛变量大并不一定代表用水效率低,用水效率取决于水资源消耗量和松弛变量与实际消耗量间的比值,比值越大则用水效率越低。

#### 2.1.2 核密度估计方法

核密度估计能有效展示黄河流域用水效率分布的整体情况,通过进一步考虑空间因素,能更全面地掌握空间条件下黄河流域用水效率的动态变化。

##### (1)传统核密度估计

属于非参数方法的核密度估计是研究不均衡分布的一种常用方法。该方法主要用于估计随机变量的概率密度,以连续密度曲线来表达随机变量的分布形态。假定 $f(x)$ 为随机变量 $X$ 的密度函数,处于 $x$ 的概率密度具体如式(4)所示,同时,本文选择常用的高斯核作为核函数的表达形式,表达式如

2020年1月

式(5)所示。

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (4)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (5)$$

式中: $K(\cdot)$ 表示为核函数; $N$ 表示为观测值的个数; $X$ 表示为观测值; $x$ 表示为观测值的均值; $h$ 表示为带宽,决定了核密度曲线的光滑程度和估计精度,带宽越大,曲线越光滑,估计精度越低;带宽越小,曲线越不光滑,估计精度越高。

### (2)空间条件下的核密度估计

传统核密度估计虽可以展现变量的分布形态,但未得到某地区经过一段时期之后的具体变化情况,而空间条件下的核密度估计方法则是用于估计在随机过程中出现状态变换的概率密度函数,能够以变量动态分布的三维图和密度等高线图准确判定变化规律,因此可用于探究各个地区在经过一段时期之后的变化趋势<sup>[13]</sup>。在随机核估计中,本文亦采用高斯核函数进行计算,表达式为:

$$g(y|x) = \frac{f(x, y)}{f(x)} \quad (6)$$

式中: $f(x)$ 表示为 $x$ 的边际核密度函数; $f(x, y)$ 表示 $x$ 与 $y$ 的联合核密度函数,表达式为:

$$f(x, y) = \frac{1}{Nh_x h_y} \sum_{i=1}^N K_x\left(\frac{X_i - x}{h_x}\right) K_y\left(\frac{Y_i - y}{h_y}\right) \quad (7)$$

### 2.1.3 马尔科夫链分析方法

#### (1)传统马尔科夫链分析方法

马尔科夫链分析方法是通过构建马尔科夫转移矩阵,来反映黄河流域各省区用水效率的内部动态演进特征。马尔科夫链方法是一个随机过程 $\{x(a), a \in A\}$ ,对所有时期 $a$ 和所有可能发生的状态 $j, i$ 以及 $ik(k=0, 1, \dots, a-2)$ ,满足式(8)。即随机变量 $X$ 在 $a$ 时期所处状态 $j$ 的概率仅仅取决于 $X$ 在 $a-1$ 时期的状态,与之前的状态无关。

$$P\{X_a = j | X_{a-1} = i, X_{a-2} = i_{a-2}, \dots, X_0 = i_0\} = P\{X_a = j | X_{a-1} = i\} = P_{ij} \quad (8)$$

$$p_{ij} = n_{ij} / n_i \quad (9)$$

由此可以看出马尔科夫链方法是一类特殊的随机过程,其动态行为的特征是状态 $X_a$ 。 $P_{ij}$ 为某一省区的水资源利用效率从 $a$ 年的 $i$ 类型转移到 $a+1$ 年的 $j$ 类型的转移概率; $n_i$ 为样本期内第 $i$ 种用水效

率水平状态所出现的总次数; $n_{ij}$ 为用水效率水平由第 $i$ 种状态转移到第 $j$ 种状态所发生的次数。具体如式(9)所示。

#### (2)空间马尔科夫链分析方法

空间马尔科夫链方法是将“空间滞后”这一概念引入马尔科夫分析过程中所得到的<sup>[14]</sup>。利用该模型可以考察相邻省区的用水效率对本省区用水效率状态转移的影响。其具体方法是通过设定空间权重矩阵,把 $N \times N$ 的转移概率矩阵分解为 $N \times N \times N$ 的转移概率矩阵,从而 $P_{ij}$ 表示为某省区在 $a$ 时期空间滞后类型为 $N_i$ 的情况下,由 $a$ 时期的 $i$ 类型转移到 $a+1$ 时期的 $j$ 类型的概率,以此揭示空间效应对黄河流域用水效率动态演进的影响。

### 2.2 样本数据的选取和来源

为契合黄河流域生态保护和高质量发展的主题,体现全要素下用水效率的测算思想,同时考虑到相关指标合理性以及数据来源的可得性,本文选取2000—2017年中国30个省市自治区(西藏及港澳台除外)的相关投入与产出数据,基于全国视角、区域比较视角和流域内部视角测度黄河流域的用水效率。指标选取和数据处理情况具体如下:①以2000年为基期的资本存量(亿元)表征资本投入。资本存量根据永续盘存法计算得到,相关数据来自《中国统计年鉴》。②以按三次产业划分的就业人员总数(万人)表征劳动力投入。其中河北与甘肃相关数据分别来自《河北经济年鉴》和《甘肃发展年鉴》,其余数据来自于分省统计年鉴。③以用水总量(亿 $m^3$ )表征用水投入。2000—2003年用水总量数据来自《中国水资源公报》,2004—2017年数据来自国家统计局。④以能源消费总量(万t标准煤)表征能源投入。相关数据除2000—2002年宁夏缺失数据来自于《宁夏统计年鉴》、2002年海南缺失数据采用前后两年取均值补齐外,其余均来自《中国能源统计年鉴》。⑤以2000年为基期的地区生产总值表征期望产出,其中名义生产总值与地区生产总值指数等相关数据均来自国家统计局。⑥以废水排放量(万t)、二氧化硫排放量(t)和二氧化碳排放量(t)表征非期望产出。分省2004—2017年废水排放量和2000—2017年二氧化硫排放量来自国家统计局;2000—2003年废水排放量来自《中国环境年鉴》;2000—2017年二氧化碳排放量来自中国碳排放数据库

(CEADs),其中宁夏2000—2002年以及海南2002年的数据缺失,本文采用简单线性差值法,根据2003—2004年的宁夏碳排放数据推断出2000—2002年宁夏缺失数据,海南的2002年数据则根据2000—2001年海南碳排放数据推算得出。

### 3 黄河流域用水效率的空间格局

基于全国30个省市区和黄河流域9个省区<sup>①</sup>的投入产出数据分别构建最佳生产前沿,运用MinDS模型测度出各省区的用水效率,并从全国视角、区域比较视角和黄河流域内部视角等3个层次全面刻画黄河流域用水效率的空间格局。

#### 3.1 全国视角下黄河流域用水效率的空间格局

为把握黄河流域用水效率在全国的格局及定位,利用30个省份的投入产出数据构建最佳生产前沿,从全国视角考察黄河流域用水效率的空间格局。

图1刻画了黄河流域以及全国的用水效率演变趋势。总体上,全国视角下黄河流域以及全国用水效率保持了较为一致的变动趋势,均呈现为先波动上升后波动下降,且在大部分年份黄河流域用水效率均明显高于全国水平。具体来看,黄河流域用水效率从2000年的0.84上升至2003年的0.98,此时达到样本考察期内的最高值,年均增速为5.00%,之后黄河流域用水效率呈现微弱波动下降趋势,年均下降1.25%;全国用水效率从2000年的0.83波动上升至2006年的0.89,此时达到样本考察期内的最大

值,年均增速为1.14%,之后呈现微弱的波动下降趋势,年均下降2.13%。由此可看出,黄河流域用水效率高于全国平均水平,但在样本考察期后期,黄河流域及全国的用水效率均呈现微弱下降趋势,原因可能在于经济的快速发展以及总人口的增长所带来的农工业及生活等方面用水量的快速增加,且部分地区的节水技术推广较为缓慢。表1报告了黄河流域各省区在全国的排名情况,2000年,山西、山东、河南、陕西及内蒙古用水效率均达到最优,并列第1名;甘肃的用水效率为0.85,在全国30个省区中排名第4;四川、宁夏和青海的用水效率介于0.40~0.50之间,在全国30个省区中分列第8、9和10位。2017年,黄河流域大部分省区用水效率及排名情况均保持原有水平或有所提高,而内蒙古较2000年出现较大幅度下降,用水效率仅为0.18,在全国30个省份中排名第16,表明在推动黄河流域生态保护和高质量发展过程中,需着重提高内蒙古的用水效率。

#### 3.2 区域比较视角下黄河流域用水效率的空间格局

鉴于黄河流域生态保护和高质量发展与长江经济带发展均是依托于河流的重大国家战略,且这两个重大国家战略均强调生态保护,具有较大相似性。因此,本部分采用基于30个省份投入产出数据测度得到的用水效率,着重进行黄河流域与长江经济带用水效率的比较,并进一步考察黄河流域中上游及中下游地区<sup>②</sup>与长江经济带上、中、下游地区<sup>③</sup>用水效率的演变趋势。

图2描述了黄河流域、长江经济带总体及各自

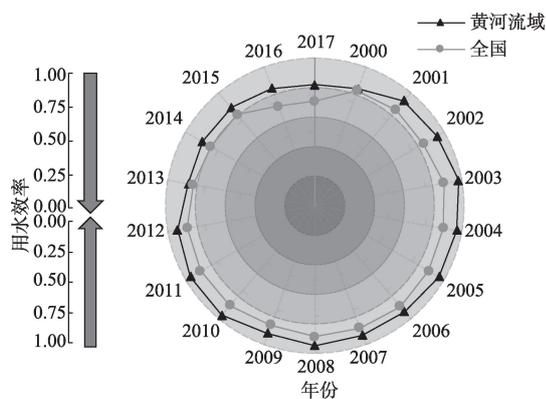


图1 黄河流域与全国用水效率的演变趋势

Figure 1 Trend of change of water use efficiency in the Yellow River Basin and in China

表1 全国视角下黄河流域各省区排名

Table 1 Water use efficiency ranking of provinces in the Yellow River Basin from a national perspective

省区	2000		2017	
	效率	排名	效率	排名
山西	1.00	1	1.00	1
山东	1.00	1	1.00	1
河南	1.00	1	1.00	1
陕西	1.00	1	1.00	1
内蒙古	1.00	1	0.18	16
四川	0.49	8	0.82	4
甘肃	0.85	4	0.88	3
青海	0.43	10	1.00	1
宁夏	0.45	9	0.81	5

① 黄河流域9个省区:山西、内蒙古、山东、河南、四川、陕西、甘肃、青海和宁夏。

② 黄河流域中上游:青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古;中下游:山西、陕西、河南、山东。引自文献[15]。

③ 长江经济带上游:重庆、四川、贵州、云南;中游:江西、湖北、湖南;下游:上海、江苏、浙江、安徽。

分地区的用水效率演变。在演变趋势方面,黄河流域与长江经济带在整个样本考察期内均呈现先波动上升后波动下降的趋势,其中,2个区域均在2000—2003年呈现波动上升趋势,在2004—2017年呈现波动下降趋势。在演变程度方面,2个区域用水效率水平在样本期的大部分年份中较为相近,黄河流域用水效率水平维持在0.82~0.98之间,而长江经济带用水效率水平维持在0.77~0.99之间,相较于黄河流域来说,上下波动程度较大。在分区方面,黄河流域中下游及中上游地区用水效率差距较为明显,中下游地区用水效率始终高于中上游地区,原因可能在于黄河中上游地区生态环境最为脆弱,且多高耗水行业;而长江经济带各个分区的用水效率在2012年之前较为相近,2012年之后上游地区用水效率始终优于中游及下游地区,原因可能在于

《长江经济带发展规划纲要》的出台,使得长江经济带明确了生态优先、绿色发展的总体战略,有利于构建长江上游地区生态屏障,使得用水效率优于中游及下游地区。

### 3.3 流域内部视角下黄河流域用水效率的空间格局

为准确探究黄河流域各省区用水效率的演变态势,本部分利用黄河流域9个省区的投入产出数据进行用水效率的测算,从流域内部视角出发,对其空间格局进行考察。

表2给出了流域内部视角下黄河流域各省区的用水效率,从时间演变来看,各个省区的用水效率演变趋势大不相同。内蒙古和四川的用水效率总体上呈现先降后升的演变趋势,分别于2011和2004年达到样本期的最低点(0.44、0.84);青海和宁夏的用水效率呈现波动上升趋势,在样本期的年均增速

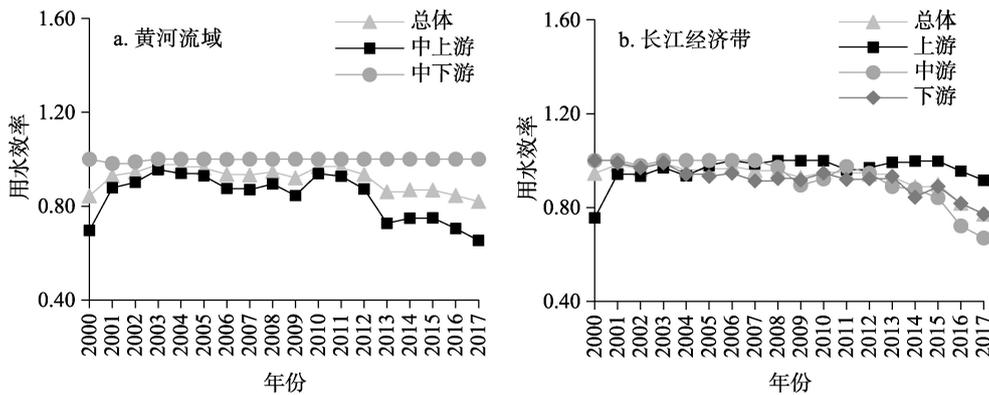


图2 黄河流域和长江经济带用水效率的演变趋势

Figure 2 Trend of change of water use efficiency in the Yellow River Basin and the Yangtze River Economic Belt

表2 流域内部视角下黄河流域各省区的用水效率

Table 2 Water use efficiency of provinces in the Yellow River Basin from an internal perspective

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
山西	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
山东	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
河南	1.00	0.90	0.97	1.00	1.00	1.00	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
陕西	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
中下游	1.00	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
内蒙古	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.79	0.66	0.54	0.44	0.52	0.73	0.86	0.93	0.96	1.00
四川	1.00	0.92	0.95	0.84	0.84	0.86	0.90	0.88	0.95	0.92	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
甘肃	0.74	0.84	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.69	0.64
青海	0.39	0.56	0.64	0.77	0.85	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
宁夏	0.23	0.27	0.50	0.71	0.66	0.64	0.66	0.69	0.61	0.60	0.54	0.66	0.69	0.65	0.65	0.62	0.60	0.66
中上游	0.70	0.88	0.90	0.96	0.94	0.93	0.87	0.87	0.89	0.85	0.94	0.93	0.87	0.73	0.75	0.75	0.70	0.65

分别为5.56%和6.41%;甘肃用水效率呈现先上升后下降的趋势,在2017年达到样本期的最低点(0.64);山西、山东、河南和陕西变化较为平稳,用水效率水平维持在0.90以上。从空间分布来看,黄河流域用水效率具有明显的空间非均衡性,呈现出“东高西低”的空间分布特征,用水效率较高地区主要集中于山东、河南、山西和陕西等黄河流域的中下游地区,中上游地区用水效率亟待提升。

为了更加精确刻画流域内部视角下黄河流域用水效率的空间格局形态演化趋势,本文基于ArcGIS平台,选择2000、2005、2011及2017年为代表性年份,对演化趋势进行定量识别(表3)。从标准差椭圆形来看,平均形状指数在2000—2011年逐渐减小,椭圆形状逐渐偏离正圆,在2011—2017年又有所增大,说明黄河流域的用水效率先趋于分散后又呈现出集中的趋势。从方位角来看,黄河流域用水效率的标准差椭圆由2000年的64.44°增加到2011年的80.52°,这说明黄河流域用水效率的空间分布格局由“偏东北—偏西南”分布向“正东—正西”方向偏移,到了2017年有所回转,方位角旋转到71.71°。从重心分布、移动轨迹及方向等方面来看,各考察时点的重心在107.65°—109.32°E、36.13°—36.74°N之间移动,具体到行政区,主要分布在陕西和甘肃的行政边界附近;在南北方向上,2000—2005和2011—2017年,黄河流域用水效率重心向北移动,2005—2011年,重心向南移动;在东西方向上,2000—2011年,黄河流域用水效率重心向西移动,2011—2017年,重心向东移动;总体上,黄河流域用水效率重心偏向西南移动。

## 4 黄河流域用水效率的动态演进

### 4.1 黄河流域用水效率的核密度估计

为从整体上把握黄河流域用水效率的动态演进趋势,本部分首先采用传统核密度考察黄河流域

用水效率的分布形态演进;其次,以3年为时间跨度分析了黄河流域各省区用水效率的动态演进趋势(无条件核密度估计);再次,考察了静态条件下相邻省区对本省区用水效率的影响(空间条件静态核密度估计);最后,加入时间因素,并将相邻省区分为两类(高水平与低水平),探究不同水平相邻省区对本省区用水效率动态演进的影响(空间条件动态核密度估计)。

#### 4.1.1 传统核密度估计

本部分运用高斯核密度估计方法得到黄河流域2000、2005、2009、2013以及2017年用水效率的核密度图(图3)。

第一,核密度整体在初始阶段随时间变化向右移动明显,在2005年之后较为稳定,未发生明显移动,说明样本期初期黄河流域用水效率整体上升较快,但是2005年后整体用水效率的提升不明显。第二,2000年黄河流域用水效率分布存在左拖尾现象,这是由于初期宁夏、青海等中上游省区用水效率严重低于山东及山西等中下游省区,并且主峰扁平,未出现明显的极化现象,2005年开始出现一高一低两个波峰,二者的高度差距有所减小,表明2005年后黄河流域的用水效率出现了明显的两极分化,但分化程度逐渐降低。第三,主峰高度先上升后下降,主峰宽度先变窄后变宽,次峰宽度先变窄后变宽,这表明黄河流域用水效率的极化趋势先加强,后减弱。

#### 4.1.2 无条件核密度估计

图4是2000—2017年黄河流域用水效率的无条件核密度图及密度等高线图。其中,坐标轴 $X$ 为 $a$ 年本省区的用水效率,坐标轴 $Y$ 为 $a+3$ 年本省区的用水效率,与 $X$ - $Y$ 平面相垂直的 $Z$ 轴为核密度,表示点 $(x,y)$ 所对应点的概率密度。在密度等高线图中,越是内部的等高线,代表的概率越大,向外依次递

表3 黄河流域用水效率的标准差椭圆参数

Table 3 Parameters of standard deviation ellipse of water use efficiency in the Yellow River Basin

年份	转角/°	长半轴/km	短半轴/km	平均形状指数	重心坐标	移动距离/km	东西距离/km	南北距离/km
2000	64.44	822.37	540.75	0.66	109.32° E, 36.58° N	—	—	—
2005	74.76	867.74	519.11	0.60	108.11° E, 36.74° N	109.39	107.82	17.79
2011	80.52	872.75	456.83	0.52	107.65° E, 36.13° N	79.34	41.31	67.83
2017	71.71	872.70	525.12	6.02	108.30° E, 36.58° N	60.65	57.92	17.80

注:平均形状指数指短半轴与长半轴之比。分布重心未发生移动,用“—”表示。

2020年1月

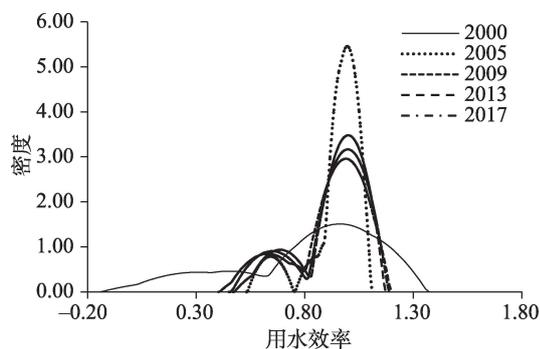


图3 黄河流域用水效率的传统核密度图

Figure 3 Traditional Kernel density map of water use efficiency in the Yellow River Basin

减,等高线的密集程度代表省区用水效率的收敛程度,等高线越密集说明收敛趋势越明显。若整个图形集中在正45°线上,表明本省区在 $a+3$ 年的效率水平同 $a$ 时期相同,没有发生变化;若整个图形沿着顺时针方向旋转45°,那么概率主体就会集中在 $Y$ 轴某个值附近并且平行于 $X$ 轴,这说明 $a+3$ 年黄河流域所有省区的用水效率都收敛于某一效率水平。

根据图4,大部分图形集中在45°对角线上方,并且有3个主要的波峰,这说明无条件黄河流域用水效率在 $a+3$ 年总体来看是上升的,并且存在着俱乐部收敛的可能性,此结论与上文对黄河流域中上游及中下游地区用水效率对比分析的结果相符。青海、宁夏等中上游省区用水效率极低,倾向于稳定在某一中低水平,而山东、河南等中下游省区的用水效率基本稳定在最优水平,这与两个最高的波峰恰好对应。通过进一步分析等高线分布的

方向可以看出, $X$ 轴小于0.8部分对应的图形集中在0.6~0.8区间并且存在平行于 $X$ 轴的趋势,高于0.8的部分仍然处于45°对角线上,这说明在无条件下低水平省区的用水效率倾向于向0.6~0.8集中,高水平省区相对稳定。

#### 4.1.3 空间条件下静态核密度估计

为了判断黄河流域用水效率是否存在空间效应,本文利用空间条件的静态核密度估计来探究黄河流域用水效率提升的收敛模式,核密度估计结果见图5。

$X$ 轴是相邻省区 $a$ 年的用水效率, $Y$ 轴是本省区 $a$ 年的用水效率。如果存在明显的空间效应,即效率高的省区和效率高的省区相邻,效率低的省区同效率低的省区相邻,那么概率密度的分布应该集中在45°对角线上并沿对角线分布。根据图5,通过对概率密度分布的整体态势进行分析,可以看出绝大部分图形在45°对角线以上,并且图形主体在 $y=1$ 近平行于 $X$ 轴,因此可以做出初步判断,在空间条件下若不考虑时间跨度,只有个别高水平相邻省区间的用水效率提升具有相似性,其他省区和其相邻省区并未呈现出明显的空间效应。

#### 4.1.4 空间条件下动态核密度估计

在空间条件的基础上加入时间跨度,进一步分析相邻省区对本省区用水效率的影响,按照相邻省区用水效率的均值与整个黄河流域用水效率的均值之比,将相邻省区划分为两类。比值介于0.8~1.0的省区被划分为一类空间滞后类型,即低水平省区;比值介于1.0~1.2的省区被划分为二类空间滞后

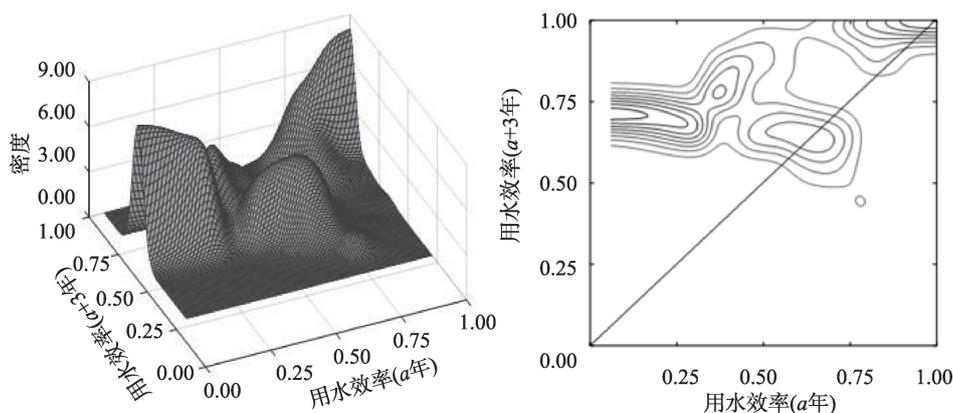


图4 黄河流域用水效率的无条件核密度图及密度等高线图

Figure 4 Unconditional kernel density map and density contour map of water use efficiency in the Yellow River Basin

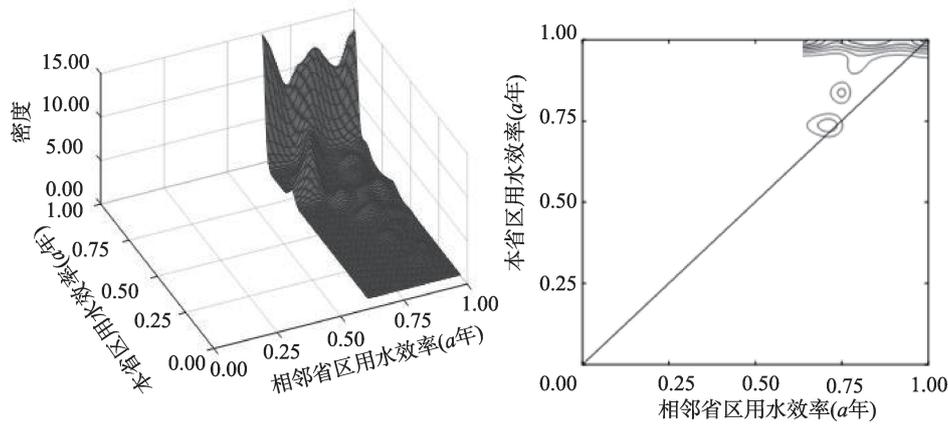


图5 空间条件下黄河流域用水效率的静态核密度图及密度等高线图

Figure 5 Static kernel density map and density contour map of water use efficiency in the Yellow River Basin considering spatial proximity of provinces

类型,即高水平省区。 $X$ 轴为 $a$ 年相邻省区的用水效率水平,即空间滞后项, $Y$ 轴为 $a+3$ 年本省区的用水效率水平。

根据图6和图7,一类空间滞后和二类空间滞后条件下的概率密度分布均位于 $45^\circ$ 对角线附近,说明相邻省区与本省区用水效率的提升具有相似性,与低水平相邻的省区倾向于处于低水平,与高水平相邻的省区倾向于处于高水平。在一类空间滞后条件下,概率密度分布虽位于 $45^\circ$ 对角线附近,但是概率密度主体较 $45^\circ$ 对角线向上偏离,这说明虽然与低水平相邻的省区倾向处于低水平,但其用水效率有向上转移的趋势。概率密度主体有2个波峰,其中主峰比次峰偏离 $45^\circ$ 对角线的距离更远。结合

各省区样本数据发现,次峰对应于宁夏等省区,用水效率较低,虽然随着时间的推移有所上升,但仍处于低水平省区,没有明显的改善;主峰对应青海、甘肃、四川等省区,虽然与低水平省区相邻,但其用水效率趋于上升。在二类空间滞后条件下,概率分布同样位于 $45^\circ$ 对角线附近,但是概率主体相对于 $45^\circ$ 对角线向下偏移,这意味着与高用水效率省区相邻的省区虽倾向处于高效率水平,但是其有向下转移的趋势。二类空间滞后条件下的图形分布大致上平行于 $X$ 轴,这说明当某一省区的用水效率水平升高到一定程度以后,即使与高水平省区相邻,其用水效率也不会再进一步升高,反而有较大概率向下转移的趋势。与样本数据结合来看,内蒙古等省

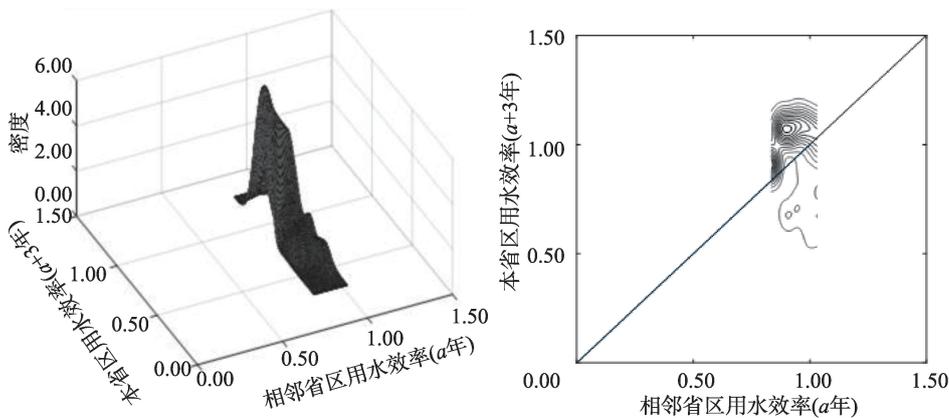


图6 一类空间滞后条件下黄河流域用水效率的动态核密度图及密度等高线图

Figure 6 Dynamic kernel density map and density contour map of water use efficiency in the Yellow River Basin under the first type of spatial lag

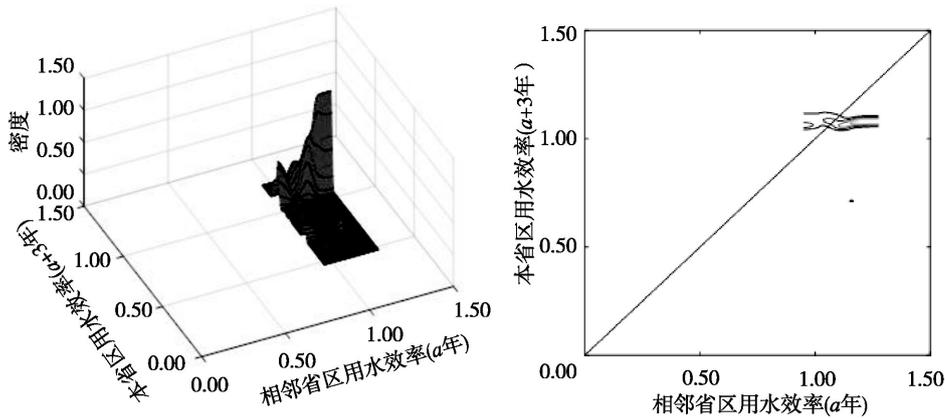


图7 二类空间滞后条件下黄河流域用水效率的动态核密度图及密度等高线图

Figure 7 Dynamic kernel density map and density contour map of water use efficiency in the Yellow River Basin under the second type of spatial lag

区虽然与高水平省区相邻,但是其用水效率并未一直稳定在高水平,而是有向下转移的趋势。

综合图6和图7来看,在考虑空间因素和时间跨度的条件下,黄河流域各省区的用水效率会受到相邻省区用水效率的影响,某一省区在 $a$ 年与低水平省区相邻,其用水效率在 $(a+3)$ 年倾向于处在低效率水平;某省区在 $a$ 年与高水平省区相邻,3年后其用水效率则倾向处于高水平。值得注意的是,低效率水平省区的用水效率分布较 $45^\circ$ 对角线向上偏离,高效率水平省区的用水效率分布较 $45^\circ$ 对角线向下偏移,这说明低效率水平省区和高效率水平省区都存在向某一中间水平聚集的趋势。

#### 4.2 黄河流域用水效率的马尔科夫链分析

核密度估计在总体上描述了黄河流域用水效率的演变态势,在此基础上,马尔科夫链能够详细刻画不同效率水平省区之间发生转移的概率大小和转移方向。因此,本部分基于传统和空间马尔科夫链分析方法来进一步探究黄河流域用水效率的演进趋势。

##### 4.2.1 传统马尔科夫链分析

根据整个样本考察期的长短,设定时间跨度 $A$ 为1年、2年、3年、4年和5年,并将各省区的用水效率划分为4种类型:低、中低、中高和高水平。运用传统马尔科夫链分析方法得到的转移概率矩阵如表4所示。

由表4可以明显看出,除中低水平以外,其余类型省区对角线上的概率值并未明显高于非对角线

上的概率值,这说明黄河流域各省区用水效率并不稳定,保持初始状态的概率较小,内部流动性较大。黄河流域用水效率的状态转移主要趋向于中低水平,其次是中高水平,向低水平和高水平状态转移的概率较小。另外,除低水平省区之外,其余省区在各类时间跨度条件下向中低水平转移的概

表4 黄河流域用水效率的传统马尔科夫转移概率矩阵

Table 4 Matrix of traditional Markov transfer probability of water use efficiency in the Yellow River Basin

时间跨度/年	类别	低	中低	中高	高
1	低	0.59	0.41	0.00	0.00
	中低	0.03	0.82	0.15	0.00
	中高	0.03	0.76	0.18	0.03
	高	0.02	0.78	0.14	0.06
2	低	0.44	0.56	0.00	0.00
	中低	0.03	0.78	0.13	0.06
	中高	0.03	0.75	0.19	0.03
3	低	0.04	0.75	0.15	0.06
	中低	0.40	0.57	0.03	0.00
	中高	0.03	0.73	0.17	0.07
	高	0.07	0.70	0.20	0.03
4	低	0.04	0.71	0.15	0.06
	中低	0.39	0.54	0.07	0.00
	中高	0.04	0.71	0.18	0.07
	高	0.11	0.68	0.18	0.04
5	低	0.07	0.67	0.19	0.07
	中低	0.38	0.54	0.04	0.04
	中高	0.04	0.69	0.23	0.04
	高	0.12	0.62	0.23	0.04
	高	0.03	0.74	0.15	0.08

率均超过0.60,低水平省区在 $A=1$ 时向中低水平转移的概率为0.41,在其余类型的时间跨度条件下向中低水平转移的概率均超过0.50。可以明显看出,随着时间跨度的增大,各类用水效率水平向中低水平的转移概率逐步下降,向中高水平的转移概率正逐步增加。当 $A=1$ 时,低、中低、中高和高水平地区向中低水平转移的概率分别为0.41、0.82、0.76和0.78,当 $A=5$ 时,低、中低、中高和高水平地区向中低转移的概率变为0.54、0.69、0.62和0.74,除了低水平转移到中低水平的概率增加了0.13,其他地区向中低水平转移的概率均有所下降。

#### 4.2.2 空间马尔科夫链分析

为进一步反映相邻省区的用水效率水平对本省区的影响,本文基于邻接权重对黄河流域用水效率进行了空间马尔科夫链分析。卡方检验结果表明,当时间跨度为1年、2年、3年、4年及5年时, $Q$ 统计值均在1%的水平下显著,这说明在不同的时间间隔条件下空间因素对各省区用水效率的状态转移产生了显著的影响。

按照用水效率的高低将相邻省区划分为4个等级(低、中低、中高和高水平),以此来考察在空间条件下各省区用水效率的演变趋势。空间条件下的马尔科夫转移概率矩阵如表5所示。总体来看,加

入空间条件之后,各省区用水效率仍倾向于集中在中低水平和中高水平,向高水平省区转移的概率几乎为0,这与传统马尔科夫转移矩阵结果较为一致。相邻省区效率水平的升高对于该省区用水效率的提升具有促进作用,当本省区为低水平或者中低水平时,促进作用并不明显,但是当本省区为中高水平或者高水平时,促进效果较为明显,特别是当相邻省区由中高水平提升至高水平时,本省区向中高省区和高水平省区转移的概率明显增加。随着时间跨度从1年上升到5年,低水平和中低水平省区平稳转移的概率会增加,中高水平和高水平省区向中高水平转移的概率会增加。综上可知,黄河流域各省区的用水效率受地理因素的影响,一个省区用水效率的变化会受到相邻省区用水效率水平的影响。整体趋势表现为:若某省区与高水平省区相邻,其向上转移的概率会增加;若与低水平省区相邻,其向上转移的概率会减小,向下转移概率明显增加。值得注意的是,处于各效率水平的省区都有向中低水平转移的趋势,随着时间跨度的增加,这种转移发生的概率会减小,这与前文空间条件的动态核密度估计的结果保持一致。

## 5 结论与建议

准确掌握黄河流域用水效率的空间格局及其

表5 黄河流域用水效率的空间马尔科夫转移概率矩阵

Table 5 Matrix of Markov transfer probability of water use efficiency in the Yellow River Basin considering spatial proximity of provinces

$A=1$						$A=5$					
	邻居	低	中低	中高	高		邻居	低	中低	中高	高
低	低	0.00	1.00	0.00	0.00	低	低	0.50	0.50	0.00	0.00
	中低	0.00	0.67	0.33	0.00		中低	0.00	0.40	0.40	0.20
	中高	0.00	0.67	0.33	0.00		中高	0.67	0.00	0.33	0.00
	高	0.05	0.90	0.00	0.015		高	0.06	0.88	0.00	0.06
中低	低	0.83	0.17	0.00	0.00	中低	低	0.75	0.25	0.00	0.00
	中低	0.09	0.82	0.09	0.00		中低	0.13	0.75	0.13	0.00
	中高	0.25	0.25	0.50	0.00		中高	0.25	0.50	0.25	0.00
	高	0.00	0.62	0.31	0.08		高	0.00	0.70	0.20	0.10
中高	低	0.56	0.44	0.00	0.00	中高	低	0.17	0.67	0.08	0.08
	中低	0.00	1.00	0.00	0.00		中低	0.00	0.83	0.17	0.00
	中高	0.00	1.00	0.00	0.00		中高	0.00	1.00	0.00	0.00
	高	0.00	0.75	0.13	0.13		高	0.00	0.71	0.14	0.14
高	低	0.75	0.25	0.00	0.00	高	低	0.50	0.50	0.00	0.00
	中低	0.00	0.82	0.18	0.00		中低	0.00	0.71	0.29	0.00
	中高	0.00	0.83	0.13	0.04		中高	0.00	0.72	0.22	0.06
	高	0.00	0.78	0.22	0.00		高	0.00	0.50	0.50	0.00

2020年1月

动态演进趋势对进一步提升用水效率、缓解用水矛盾具有重要意义,是推动黄河流域生态保护和高质量发展的科学前提。本文采用基于非期望产出的全局MinDS模型测算2000—2017年黄河流域各省区的用水效率,从全国视角、区域比较视角以及黄河流域内部视角等3个层次出发,全面描述黄河流域用水效率的空间格局,并将核密度估计与马尔科夫链分析方法相结合,深入探究黄河流域用水效率的动态演进趋势。相关研究结论如下:

(1)在全国视角下,黄河流域与全国用水效率变动趋势较为一致,并且在大部分年份黄河流域用水效率明显高于全国水平;在区域比较视角下,黄河流域及长江经济带用水效率水平相近,但黄河流域中下游及中上游用水效率差距更为明显,中下游地区用水效率始终高于中上游地区;在流域内部视角下,黄河流域用水效率存在明显“东高西低”的空间分布特征,空间集聚格局显示出由“偏东北—偏西南”向“正东—正西”方向偏移的趋势。

(2)黄河流域各省区用水效率存在两极分化现象,但两极分化程度逐渐减小。在考虑时间跨度的条件下,地理位置邻近所产生的交互影响与空间效应能够明显影响黄河流域各省区用水效率的变化,与高水平省区相邻会增加本省区向上转移的概率,与低水平省区相邻会增加本省区向下转移的概率,并且黄河流域整体的用水效率存在收敛于中间水平的趋势。

上述研究结论对推进黄河流域水资源可持续利用具有重要的政策含义。

第一,目前黄河流域的用水效率整体处于较高水平,但其潜在的下降风险必须引起重视,因此要在深挖上游省区用水效率提升潜力的同时,严格控制下游高效率省区的用水方式,避免粗放式、竞争性利用水资源现象的出现。

第二,准确把握黄河流域用水效率的空间差异性,加快制定具有地域特色的用水政策,由于黄河流域各省区水资源禀赋、经济发展水平及气候条件等方面存在较大差异,导致不同省区之间用水效率差距较大,因此在分解节水目标时,要因地制宜,充分考虑不同省区的用水条件,避免出现“一刀切”现象。

第三,注重实现省区用水效率的协同提升,积

极促进黄河流域不同省区间节水减排技术的交流与合作,推动先进措施和经验向落后省区扩散,同时也要提高黄河流域各省区间水资源的流动性,提高水资源配置效率。

#### 参考文献(References):

- [1] 张宁宁, 粟晓玲, 周云哲, 等. 黄河流域水资源承载力评价[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1759-1770. [Zhang N N, Su X L, Zhou Y Z, et al. Water resources carrying capacity evaluation of the Yellow River Basin based on EFAST weight algorithm[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1759-1770.]
- [2] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.
- [3] 杨骞, 武荣伟, 王弘儒. 中国农业用水效率的分布格局与空间交互影响: 1998-2013年[J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(2): 72-88. [Yang Q, Wu R W, Wang H R. Regional disparities and spatial interaction of agricultural water use efficiency: 1998-2013[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2017, 34(2): 72-88.]
- [4] 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. Interprovincial 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.]
- [5] 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[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 993-1005. [Sun C Z, Ma Q F, Zhao L S. Green efficiency changes for water resources in China based on SBM-Malmquist model[J]. Resources Science, 2018, 40(5): 993-1005.]
- [6] 李静, 任继达. 中国工业的用水效率与决定因素: 资源和环境双重约束下的分析[J]. 工业技术经济, 2018, 37(1): 122-129. [Li J, Ren J D. Study on efficiency of industrial water use in China based on min DS model: An empirical analysis under the dual restrictions of resources and environment[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2018, 37(1): 122-129.]
- [7] 孙才志, 刘玉玉. 基于DEA-ESDA的中国水资源利用相对效率的时空格局分析[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1696-1703. [Sun C Z, Liu Y Y. Analysis of the spatial-temporal pattern of water resources utilization relative efficiency based on DEA-ESDA in China[J]. Resources Science, 2009, 31(10): 1696-1703.]
- [8] 杨骞, 刘华军. 污染排放约束下中国农业水资源效率的区域差异与影响因素[J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(01): 114-128+158. [Yang Q, Liu H J. Regional disparity and influencing factors of agricultural water resources efficiency with the con-

- straint of pollution[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2015, (1): 114-128.]
- [9] 张陈俊, 许静茹, 张丽娜, 等. 长江经济带水资源消耗时空差异驱动效应研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2247-2259. [Zhang C J, Xu J R, Zhang L N, et al. Driving effect of spatial-temporal difference in water resource consumption in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2247-2259.]
- [10] 张慧, 刘秋菊, 史淑娟. 黄河流域农业水资源利用效率综合评价研究[J]. *气象与环境科学*, 2015, 38(02): 72-76. [ZHANG H, LIU Q J, SHI S J. Study of Comprehensive Evaluation of Agricultural Water Resources Utilization Efficiency in the Yellow River Basin[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2015, 38(02): 72-76.]
- [11] Aparicio J, Ruiz J L, Sirvent I. Closest targets and minimum distance to the Pareto-efficient frontier in DEA[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2007, 28(3): 209-218.
- [12] Hu J L, Wang S C, Yeh F Y. Total-factor water efficiency of regions in China[J]. *Resources Policy*, 2006, 31(4): 217-230.
- [13] Quah D T. Empirics for Growth and Distribution: Stratification, Polarization, and Convergence Clubs[J]. *Journal of Economic Growth*, 1997, 2(1): 27-59.
- [14] Anselin L, Gallo J L, Jayet H. *Spatial Panel Econometrics*[M], Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [15] 王喜, 秦耀辰, 鲁丰先, 等. 黄河中下游地区主要省份低碳经济发展水平的时空差异研究[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(4): 505-513. [Wang X, Qin Y C, Lu F X, et al. Temporal and spatial differences in the level of low carbon economic development among the provinces in the middle and lower reaches of the Yellow River Basin[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(4): 505-513.]

## Spatial distribution and dynamic change of water use efficiency in the Yellow River Basin

LIU Huajun, QIAO Liecheng, SUN Shuhui

(School of Economics, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China)

**Abstract:** Improving water use efficiency is the key measure to realize the sustainable development of water resources. It is of great significance to explore the spatial pattern and dynamic change of water use efficiency in order to promote the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. In this study, we built a global Minimum Distance to Strong Efficient Frontier (MinDS model) based on unexpected output to accurately measure the water use efficiency of the Yellow River Basin from 2000 to 2017. The spatial pattern of water use efficiency of the Yellow River Basin was comprehensively depicted from the perspective of national, regional, and intraregional comparisons. The change of distribution dynamics of water use efficiency was investigated by an extended distribution dynamic model. The results show that the water use efficiency of the Yellow River Basin is higher than the average level in China. The water use efficiency of the lower reaches is higher than that of the upper reaches. A spatial pattern of “high in the east and low in the west” is very clear. The polarization of water use efficiency in the Yellow River Basin is obvious in some years. Spatial factors can significantly affect the regional distribution of water use efficiency. The interaction of water use efficiency in adjacent areas leads to the gradual narrowing of water use efficiency gap in the Yellow River Basin in the long term. And water use efficiency converges to the middle level.

**Key words:** Yellow River Basin; water use efficiency; spatial pattern; kernel density; Markov chains