



中国农业资源与区划

Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning

ISSN 1005-9121, CN 11-3513/S

《中国农业资源与区划》网络首发论文

题目: 长江经济带农业用水绿色效率测度及影响因素分析——基于超效率 EBM-Geodetector 模型

作者: 李青松, 张凤太, 苏维词, 杨庆, 孙长城, 魏珍

收稿日期: 2020-12-28

网络首发日期: 2021-08-03

引用格式: 李青松, 张凤太, 苏维词, 杨庆, 孙长城, 魏珍. 长江经济带农业用水绿色效率测度及影响因素分析——基于超效率 EBM-Geodetector 模型. 中国农业资源与区划. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20210802.1536.012.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

绿色发展 ·

长江经济带农业用水绿色效率测度及影响因素分析*

——基于超效率 EBM-Geodetector 模型

李青松¹，张凤太^{2*}，苏维词^{1,3}，杨庆²，孙长城²，魏珍²

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院，重庆 401331； 2. 重庆理工大学管理学院，重庆 400054；
3. 贵州省山地研究所，贵阳 550001)

摘 要 **[目的]**农业用水的可持续利用关系到区域农业绿色发展及社会经济高质量发展。**[方法]**基于 2010—2018 年长江经济带 11 省市的面板数据，运用超效率 EBM 模型对长江经济带农业用水经济效率、环境效率及绿色效率进行测度，并借助核密度估计及 ArcGIS 空间分析方法分析其时空演变规律，最后利用**地理探测器模型探究其影响因素**。**[结果]**结果表明：(1) 2010—2018 年长江经济带 11 省市农业用水经济效率、环境效率及绿色效率的总体效率值分别为 0.879、0.933、0.939，农业用水的绿色效率高于环境效率和经济效率，即农业用水产生了较好的社会效益。(2) 近 9 年长江经济带 11 省市农业用水经济效率、环境效率及绿色效率总体平均值均呈轻微波动下降趋势，农业用水科学利用问题需得到进一步的重视。(3) 长江经济带下游地区农业用水绿色效率均值最高，中游地区次之，上游地区最低。其中上海市农业用水绿色效率多年均值最高 (1.206)，云南省最低 (0.513)，地区差异较显著，但核密度估计显示 2010—2018 年区域内农业用水绿色效率差距在缩小，总体上呈均衡协调发展趋势。(4) 城镇化水平、R&D 占比、人均节水灌溉面积、单位国内生产总值耗水、人均教育财政支出、人均水资源量等是长江经济带农业用水绿色效率差异的主要影响因素。**[结论]**研究长江经济带农业水资源绿色效率并探究其影响因素，可以为推动长江经济带农业用水绿色可持续利用提供某些参考。

关键字 农业用水 绿色效率 超效率 EBM-Geodetector 模型 影响因素 长江经济带

中图分类号：TV213.9 **文献标识码**：A

引言

中国是传统的农业大国，2018 年全国农业用水 3 693.1 亿 m³，占用水总量的 61.4%^[1]，农业仍然是我国用水量最大的生产部门。长江沿线省市是我国重要的农业区，农业科学用水关系到长江经济带社会经济高质量发展。2016 年 9 月《长江经济带发展规划纲要》正式印发，文件明确提出要把保护和修复长江生态环境摆在首要位置，走“生态优先、绿色发展”之路，而严格控制农业面源污染是其中的重点工作之一。2018 年 4 月习近平总书记在长江考察之行中再次强调长江经济带发展要“共抓大保护、不搞大开发”，实现绿色的、可持续

收稿日期：2020-12-28

作者简介：李青松 (1995—)，男，四川宜宾人，硕士研究生。研究方向：区域经济与可持续发展。

※通讯作者：张凤太 (1979—)，男，山东临沂人，博士，教授，硕士生导师。研究方向：资源环境管理与高质量发展。Email: zhftthero45@cqut.edu.cn。

***资助项目**：国家社科基金重点项目“长江经济带生态保护和高质量发展的非协调性耦合识别与协同机制创新研究”(20AJY005)；教育部人文社科基金项目“长江经济带水资源绿色效率综合测度、时空演化及提升路径研究”(19YJCZH241)；教育部人文社科规划项目“三峡库区城乡融合发展的多维测度及优化路径研究”(20YJAZH093)

的发展。在此背景下,研究长江经济带农业用水绿色效率问题,对推动长江经济带农业绿色发展及区域水资源高效利用具有重要意义。

水资源利用效率是衡量水资源投入产出关系的指标^[2],包括农业、工业、生活用水等方面,水资源利用所产生的效益又包括经济、环境和社会等效益。当前,学术界对水资源利用效率进行了大量研究,并主要集中在工业^[3-5]、农业^[6-8]及综合研究^[9-10]领域,且在早期研究中多以 GDP 作为单一产出指标^[11],即主要对水资源利用的经济效率进行研究。在研究方法上,以 DEA 模型中的 CCR、BCC、SBM 模型及随机前沿生产函数(SFA)为主,也有少部分学者以熵值法^[12]、AHP-模糊综合评价模型^[13]等测算水资源利用效率。在研究的空间尺度上,省级尺度研究较多^[14-16],而任玉芬^[17]、韩文艳^[18]等则从市域尺度进行研究,朱达等^[19]对我国省会城市水资源利用效率进行研究并指出绝大部分城市水资源利用效率仍有较大的进步空间。随着水资源利用产生的环境问题不断受到重视,在产出指标中加入非期望指标的水资源环境效率研究开始增多,陈磊等^[20]运用考虑非期望产出的 DEA 模型对中国各省市水资源的经济环境效率进行评价,刘渝等^[21]将农业氨氮及 COD 等非期望产出纳入农业水资源产出指标,对中国各省市农业水资源环境效率进行评价,结果表明多数省市农业水资源环境效率呈上升趋势。水资源绿色效率是在水资源经济效率和环境效率研究的基础上,增加了社会综合发展指数这一产出指标,从而实现“经济-社会-生态环境”三者的协调发展^[22]。当前对水资源绿色效率的研究仍较少,且以国内学者研究为主。孙才志、赵良仕、马奇飞等^[23-26]将社会综合发展指数纳入产出指标,运用 SBM-DEA 模型对中国水资源绿色效率时空演变及空间关联网络等进行研究,指出中国水资源绿色效率地区差异显著且中西部地区有很大的提升空间,并运用 OLS、GWR、GMM 等模型探究水资源绿色效率的影响因素。张玮等^[27]运用 EBM 评价模型对长江经济带绿色水资源效率进行评价,并提出制定科学的用水政策是提高研究区用水效率的关键。马海良等^[28]选取 Malmquist-Luenberger 生产率指数测算 2003—2013 年我国 30 个省市的水资源绿色效率并进行收敛性检验,指出不考虑非合意产出时水资源利用效率被高估。总体上看,目前对农业用水绿色效率研究较少,且缺少对农业用水经济效率、环境效率与绿色效率的对比研究。长江经济带是我国经济社会发展的重要战略支撑带,水资源的合理利用关系到区域经济社会的健康发展,目前针对长江经济带的水资源绿色效率研究主要集中在工业^[29-30]及综合研究^[31]领域,尚未有专门针对长江经济带农业用水绿色效率测度的相关研究。

在已有研究的基础上,文章以长江经济带 11 省市为研究对象,运用超效率 EBM 模型测算 2010—2018 年长江经济带农业用水经济效率、环境效率和绿色效率,并利用地理探测器探究绿色效率的影响因素。可能的创新点在于,以农业用水绿色效率作为切入视角进行研究,并构建农村社会发展指数(RSDI)这一产出指标体系;构建综合考虑自然、社会经济的农业用水绿色效率影响因素指标体系,并运用地理探测器对长江经济带农业用水绿色效率影响因素进行分析。有针对性地测度长江经济带农业用水绿色效率,并探究其影响因素,以期对长江经济带农业绿色发展及区域经济社会可持续发展提供某些参考借鉴。

1 研究区概况

长江经济带横贯我国东中西 3 大区域,覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 省市,总面积约 205 万 km²。2018 年,长江经济带 11 省市人口总计 597 83 万人,经济总量 402 985.24 亿元,分别占全国的 42.84%和 44.76%,在我国发展总体格局中具有举足轻重的作用^[32]。

2018 年,长江经济带 11 省市农业总产值 278 22.87 亿元,占全国农业总产值的 42.98%,同期农业用水量 1 380.3 亿立方米,占全国农业用水总量的 37.38%,以较少的水资源投入获

得了较大的农业产值，但与水资源绿色高效利用和长江经济带高质量发展的要求仍有差距。

2 研究方法

2.1 农业用水绿色效率内涵及其测度方法

绿色发展理念背景下，农业用水追求经济效益、环境效益和社会效益的统一。根据孙才志等^[22]对水资源绿色效率内涵的界定，该文在构建投入产出指标时，以农业水足迹、农业劳动力和农业投资额作为投入指标，以农业产值、农业灰水、农村社会发展指数作为产出指标，各产出指标分别代表农业用水的经济效益、环境效益和社会效益。这种投入产出的比值可以反映农业用水绿色利用效率，并将其定义为“农业用水绿色效率”，用以测度农业用水实现经济-社会-生态可持续发展的程度。

该文选用超效率 EBM 模型测度长江经济带农业用水经济效率、环境效率和绿色效率。现有的水资源效率测度研究以传统 DEA 模型中基于径向或非径向的 CCR、BCC 模型及 SBM 模型为主，但均存在一定不足：径向模型要求所有投入产出要素均以同比例缩减或扩张，不符合实际；非径向模型虽然考虑了松弛问题，但损失率投入产出目标值与实际值之间的比例信息^[33]。Tone 等^[34]提出的混合距离函数即 EBM 模型，有效克服了以上不足，因此该文运用考虑非期望产出的 EBM 模型。因 EBM 模型测算结果可能存在大量效率值为 1 的有效决策单元，无法对有效决策单元进行进一步的比较分析，Andersen 等^[35]建立了超效率 DEA 模型，实现对有效决策单元的计算。该文借鉴韩洁平等^[36]的研究，构建基于非导向并考虑非期望产出的超效率 EBM 模型规划式：

$$\gamma^* = \min \frac{\theta - \varepsilon^- \sum_{i=1}^m \frac{w_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\varphi + \varepsilon^+ \left(\sum_{r=1}^s \frac{w_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \sum_{p=1}^q \frac{w_p^{u-} s_p^{u-}}{u_{pk}} \right)}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, s; p = 1, 2, \dots, q$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- \leq \theta x_{ik} \\ & \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ \geq \varphi y_{rk} \\ & \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j u_{pj} + s_p^+ \leq \varphi u_{pk} \\ & \lambda_j \geq 0, s_i^-, s_r^+, s_p^+ \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中， γ^* 为待测度省市的水资源绿色效率值； k 表示决策单元数； x_{ik} 、 y_{rk} 、 u_{pk} 分别表示第 k 个决策单元的投入、期望产出和非期望产出； s_i^- 、 s_r^+ 、 s_p^{u-} 分别表示投入、期望产出和非期望产出的松弛变量； w_i^- 、 w_r^+ 、 w_p^{u-} 表示各投入指标、期望产出指标和非期望产出指标的权重； θ 和 φ 是 γ^* 中的径向成分； ε 是一个取值范围为[0~1]的关键参数，表示非径

向部分的重要程度，当 $\varepsilon=0$ 时，超效率 EBM 模型相当于径向模型，当 $\theta=\varepsilon=1$ 时，超效率 EBM 模型相当于非径向 SBM 模型。

2.2 核密度估计

核密度估计是概率论中用来估计未知的密度函数，是一种非参数检验方法^[37]。该文采用核密度估计法对长江经济带农业用水绿色效率的时间演变规律进行测算与分析。对于数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，核密度估计的函数表达式为：

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

式中，函数 K 是一个加权函数； n 为观测值数量； h 表示宽带， $x-x_i$ 表示 x 与 x_i 之间的距离。该文选用高斯核函数，其表达式为：

$$Gaussian = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2} \quad (3)$$

式中， t 表示时间，因非参数估计没有明确的函数表达式，通常采取对比核密度图形分布的方式来分析其动态变化规律^[38]。

2.3 Geodetector 模型

地理探测器 (Geodetector) 是探测空间分异并揭示各驱动因素重要程度的统计方法，在自然和社会科学各领域得到广泛运用^[39]。该文利用地理探测器分析长江经济带农业用水绿色效率的影响因素，其表达式为：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式中， L 为各影响因素的分层或分类个数， N 和 N_h 分别为全区和层 h 的单元数， σ^2 和 σ_h^2 分别为全区和层 h 的农业用水绿色效率离散方差。 q 表示各影响因素对农业用水绿色效率的影响程度，取值范围为 $[0 \sim 1]$ ， q 值越大，说明该因素对农业用水绿色效率空间差异的影响越大，反之则越小。

2.4 指标构建

2.4.1 投入指标

- (1) 农业水足迹：即各省市的农业用水量。
- (2) 农业劳动力：以各省市第一产业从业人员数作为农业劳动力的投入量。
- (3) 农业投资额：以各省市财政支出中农林水财政支出额作为农业投资额。

2.4.2 产出指标

- (1) 农业产值 (期望产出 1)：即各省市农、林、牧、渔业总产值 (不含农、林、牧、渔服务业)。
- (2) 农村社会发展指数 (期望产出 2)：在孙才志等^[40]构建的社会发展指数 (SDI) 指标体系的基础上，构建农村社会发展指数 (RSDI) 指标体系 (表 1)，并利用熵值法计算其指数值，计算步骤可参阅王富喜等^[41]的研究。

表 1 农村社会发展指数指标体系

目标层	指标层	单位	指标属性
农村社会发展	人口自然增长率	%	正
	农村人均可支配收入	元	正
	农村居民恩格尔系数	%	负
	人均农业机械总动力	kW/人	正
	农村人均用电量	kW h/人	正
	每千农业人口村卫生室人员	人/千人	正
	城乡收入比	%	负

(3) 农业灰水（非期望产出）：即农业污水，农业部门生产过程中所产生的面源污染是我国地表水污染是重要来源^[42]，农业面源污染具有难以量化的特点，曾昭等^[43]根据氮肥淋失率来计算农业面源污染灰水足迹，该文借鉴此方法来估算长江经济带各省市农业灰水，计算公式如下：

$$WF_{agr-grey} = \frac{L}{(C_{max} - C_{nat})} = \frac{\alpha \times Appl}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (5)$$

式中， $WF_{agr-grey}$ 为农业灰水足迹； L 为污染物排放量（kg/a）； $C_{\max}$ 为达到环境水质标准情况下的污染物最高浓度（kg/m³），该文以《地表水环境质量标准基本项目标准限值》（GB 3838—2002）^[44]中Ⅲ类水的氨氮标准限值为依据，即 0.0001kg/m³； C_{nat} 为受纳水体的初始浓度（kg/m³），通常设为 0^[45]； α 表示进入水体的氮肥引起的污染量占氮肥施用量的比例，即氮肥淋失率，该文以长江经济带非点源氮淋溶流失系数平均值 14.3%^[46]替代； $Appl$ 表示施用的氮肥总量（kg/a）。

为对比农业用水经济效率、环境效率和绿色效率的差异，该文在借鉴孙才志等^[40]对 3 种水资源效率界定的基础上对农业用水经济效率、环境效率和绿色效率进行界定（表 2）。在投入指标不变的情况下，农业用水经济效率的产出指标仅为农业产值，侧重于农业用水投入产出的经济价值；农业用水环境效率的产出指标在农业产值的基础上加入了农业灰水这一非期望产出，考虑了农业用水过程中的农业面源污染等环境问题；农业用水绿色效率的产出指标则包含农业产值、农业灰水和农村社会发展指数 3 方面，即综合考虑了农业用水过程中所产生的经济效益、环境效益和社会效益，表现农业用水绿色发展程度，后者是对前者的继承与发展。

表 2 农业用水效率类型界定表

类型	投入指标	产出指标
农业用水经济效率	农业水足迹、农业劳动力、农业投资额	农业产值
农业用水环境效率	农业水足迹、农业劳动力、农业投资额	农业产值、农业灰水
农业用水绿色效率	农业水足迹、农业劳动力、农业投资额	农业产值、农业灰水、农村社会发展指数

2.4.3 影响因素指标

农业用水不同于工业、生活用水，受自然环境的影响较大，该文在科学性和数据可得性的基础上，综合社会经济和自然 2 方面构建农业用水绿色效率影响因素的指标体系（表 3），并利用地理探测器模型进行计算分析。

表 3 农业用水绿色效率影响因素指标体系

指标层	计算方式	单位
城镇化水平（X1）	城镇常住人口/总人口	%
经济发展水平（X2）	GDP/总人口	元/人
R&D 占比（X3）	R&D/GDP	%
人均节能环保财政支出（X4）	节能环保财政支出/总人口	%
人均农业财政支出（X5）	农业财政支出/农村人口	元/人
人均教育财政支出（X6）	教育财政支出/总人口	元/人
人均耕地灌溉面积（X7）	耕地灌溉面积/农村人口	hm ² /人
人均节水灌溉面积（X8）	各地区节水灌溉面积/农村人口	hm ² /人
单位国内生产总值耗水（X9）	用水量（t）/GDP（万元）	t/万元
人均水资源量（X10）	水资源总量/总人口	m ³ /人
坡度小于 20°占比（X11）	坡度小于 20°面积/总面积	%
年均降水量（X12）	12 个月降水累加	mm
径流系数（X13）	总径流量/总降水量	%

2.5 数据来源

该文数据主要来源于《中国统计年鉴》（2011—2019 年）、各省市统计年鉴（2011—2019 年）、《中国农村统计年鉴》（2011—2019 年）、《中国环境统计年鉴》（2011—2018 年）、《中国水资源公报》（2011—2018 年）、各省市水资源公报（2011—2018 年）、《2018 年农村水利水电工作年度报告》、《长江经济带发展统计年鉴—2018》等，地形坡度数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)并经 ArcGIS 处理后所得。

3 实证结果分析

3.1 农业用水经济效率、环境效率、绿色效率对比分析

运用 Maxdea8.0 软件，投入指标均设置为农业水足迹、农业劳动力、农业投资额，产出指标先后设置为农业产值、农业产值+农业灰水、农业产值+农业灰水+农村社会发展指数，分别测算出长江经济带农业用水经济效率、环境效率和绿色效率（表 4），由于篇幅限制，仅列出部分年份数据进行对比分析。

表 4 2010—2018 年长江经济带农业用水效率

地区	2010			2014			2018			多年平均		
	经济效率	环境效率	绿色效率	经济效率	环境效率	绿色效率	经济效率	环境效率	绿色效率	经济效率	环境效率	绿色效率
上海	1.066	1.069	1.266	0.695	0.673	1.194	0.463	0.502	1.193	0.682	0.688	1.206
江苏	1.022	1.019	1.012	1.052	1.036	1.023	1.123	1.073	1.047	1.072	1.047	1.031
浙江	1.102	1.077	1.050	1.069	1.079	1.052	1.036	1.075	1.050	1.069	1.077	1.051
安徽	0.816	0.800	0.860	0.791	0.849	0.669	0.788	0.803	0.758	0.781	0.805	0.759
江西	0.811	1.020	1.014	0.705	1.016	1.010	0.701	1.014	1.010	0.725	1.019	1.013

湖北	1.010	1.010	1.015	1.084	1.047	1.032	1.024	1.027	1.019	1.038	1.027	1.021
湖南	1.014	1.034	1.025	0.864	1.032	1.021	0.727	0.816	0.691	0.895	0.989	0.961
重庆	1.128	1.122	1.091	1.145	1.121	1.082	1.178	1.096	1.070	1.136	1.103	1.076
四川	1.014	1.027	1.018	0.903	1.012	1.008	0.828	0.955	0.717	0.928	1.004	0.946
贵州	0.492	0.588	0.569	0.687	0.817	0.568	0.795	1.050	1.033	0.669	0.826	0.755
云南	0.569	0.581	0.515	0.690	0.723	0.426	0.695	0.696	0.583	0.669	0.676	0.513
平均	0.913	0.941	0.948	0.880	0.946	0.917	0.851	0.919	0.925	0.879	0.933	0.939
变异系数	0.225	0.196	0.224	0.195	0.154	0.254	0.242	0.199	0.205	0.196	0.159	0.196

由表 4 可知，与农业用水经济效率和环境效率相比，2010—2018 年长江经济带农业用水绿色效率总体平均值最大(0.939)，环境效率次之（0.933），经济效率最小（0.879），农业用水产生了较好的社会效益。尤其是上海市，近年来农业用水绿色效率显著高于同时段农业用水经济效率和环境效率，上海市作为长三角核心城市，社会经济发展水平高，其郊区农业、休闲观光农业、乡村旅游等得到较快发展，农业农村现代化程度高，农业用水产生了大量非农效益，促进了农业农村的高质量发展。总体上看，2010—2018 年长江经济带农业用水绿色效率高于同期农业用水经济效率和环境效率，而区域内农村社会发展指数总体不断提升是重要原因。2004—2018 年中央已连续 15 年发布以“三农”问题为主题的中央一号文件，加强农村交通、水利、教育、医疗、环保等基础设施建设，多措并举推动社会主义新农村建设，促进了长江经济带农业水资源科学利用与农村社会经济的高质量发展。

从效率变化趋势上看，长江经济带农业用水经济效率、环境效率、绿色效率均值分别由 2010 年的 0.913、0.941、0.948 降至 2018 年的 0.851、0.919、0.925，年均变化率分别为-0.069%、-0.023%、-0.025%，总体平均值均呈轻微波动下降趋势。近年来，受农村产业结构调整与农业产业化发展等影响，乡村旅游、休闲农业等发展迅速，农村地区第三产业比重不断提高，农业产值比重降低，而产出指标中的农业产值不含农、林、牧、渔服务业，因此在农业投入形成的产出中，未将农业生产过程中产生的服务业等产值统计在内，导致农业投入产出效率不足，农业用水经济效率、环境效率和绿色效率的产出指标均包含农业产值，这是长江经济带农业用水经济效率、环境效率和绿色效率整体均呈波动下降趋势的重要原因；此外，农业现代化过程中，大量农药化肥的使用也造成了较为严重的面源污染，不利于农业用水环境效率和绿色效率的提高。就各省市效率值变化情况而言，由变异系数可以看出，2010—2018 年长江经济带农业用水经济效率、环境效率的区域差异总体呈波动增大趋势，绿色效率变异系数由 2010 年的 0.224 缩小至 2018 年的 0.205，说明在加入农村社会发展指数这一产出指标之后，农业用水效率的区域差异缩小，即区域内农业用水绿色效率趋向均衡协调发展。

3.2 农业用水绿色效率时空演变分析

3.2.1 全区总体演变分析

由表 5 可知，2010—2018 年长江经济带农业用水绿色效率平均值总体呈轻微波动下降趋势，最低值出现在 2013 年(0.897)，其余年份平均值均大于 0.9。其中 2013 年农业用水绿色效率值最低与该年我国南方地区发生大面积旱灾，农业生产与农村社会经济发展受到影响有关。根据长江流域上中下游地理分界点，将长江经济带 11 省市划分为上游（云南、贵州、四川、重庆）、中游（湖南、湖北、江西）和下游（上海、江苏、浙江、安徽）。分上中下游看，2010—2018 年下游地区农业用水绿色效率平均值最高（1.047），中游地区次之（1.018），上游地区效率值最低（0.798），反映出长江经济带农业用水绿色效率总体呈由下游地区向中上游地区递减的空间分布格局。

表 5 2010—2018 年长江经济带农业用水绿色效率

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	平均
上海	1.266	1.239	1.185	1.193	1.194	1.193	1.193	1.193	1.193	1.206
江苏	1.012	1.017	1.015	1.023	1.023	1.049	1.042	1.048	1.047	1.031
浙江	1.050	1.053	1.050	1.051	1.052	1.049	1.052	1.050	1.050	1.051
安徽	0.860	0.831	0.834	0.649	0.669	0.737	0.726	0.768	0.758	0.759
江西	1.014	1.015	1.014	1.013	1.010	1.018	1.014	1.011	1.010	1.013
湖北	1.015	1.013	1.011	1.025	1.032	1.022	1.024	1.027	1.019	1.021
湖南	1.025	1.029	1.031	1.023	1.021	1.023	1.019	0.787	0.691	0.961
重庆	1.091	1.077	1.088	1.079	1.082	1.062	1.070	1.063	1.070	1.076
四川	1.018	1.016	1.012	1.014	1.008	1.002	0.719	1.010	0.717	0.946
贵州	0.569	0.556	0.610	0.418	0.568	1.009	1.007	1.027	1.033	0.755
云南	0.515	0.515	0.549	0.380	0.426	0.494	0.490	0.667	0.583	0.513
上游	0.798	0.791	0.815	0.723	0.771	0.892	0.822	0.942	0.851	0.798
中游	1.018	1.019	1.019	1.020	1.021	1.021	1.019	0.942	0.907	1.018
下游	1.047	1.035	1.021	0.979	0.985	1.007	1.003	1.015	1.012	1.047
平均	0.948	0.942	0.945	0.897	0.917	0.969	0.942	0.968	0.925	0.939

为进一步分析长江经济带农业用水绿色效率在时间上的总体演变过程，该文运用 Stata15.1 对表 5 中的农业用水绿色效率进行核密度估计，选取 2010 年、2014 年、2018 年 3 个时间节点作为代表年份，得出核密度分布图（图 1）。

从形状上看，2010 年、2014 年、2018 年 3 个时期的核密度曲线均呈不规则双峰分布，其中多数较高效率地区落在右侧主峰内，少数较低效率地区落在左侧低峰内，说明大多数省市农业用水绿色效率较高；3 个时期的高峰集中区域呈负偏态分布，即多数省市的农业用水绿色效率高于区域平均水平。

从位置上看，核密度曲线左侧起始位置由 2010 年到 2014 年向左移，后由 2014 年到 2018 年向右大幅移动，表明研究区内农业用水绿色效率最低值由 2010 年到 2014 年下降，后由 2014 年到 2018 年有明显提升，发展趋势良好；右侧结尾由 2010 年到 2014 年和 2018 年向左移，表明区域内农业用水绿色效率最高值有下降趋势，区域内水资源绿色效率总体差距缩小。

从峰度上看，核密度曲线主峰由 2010 年的窄峰转变为 2014 年和 2018 年的宽峰，且峰值发生明显下降，2014 年和 2018 年峰值发生轻微波动，表明区域内农业用水绿色效率分布集中程度降低，趋向于区域协调稳定发展。

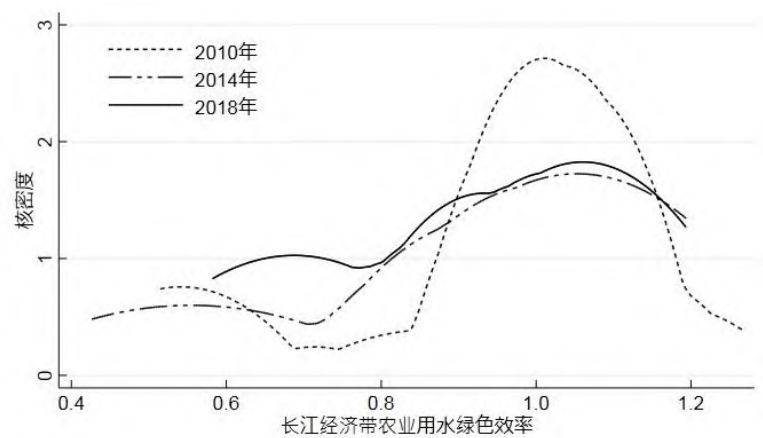


图1 长江经济带农业用水绿色效率的核密度分布

3.2.2 各省市时空演变分析

(1) 在时间序列变化上,运用 Origin 2018 对长江经济带 11 省市的农业用水绿色效率绘制箱线图(图 2)以进行对比分析。箱线图中箱体形状、中位数、均值及异常值等信息可以反映各地区农业用水绿色效率的时间变化情况。由图 2 可知,2010—2018 年,各地区农业用水绿色效率变化情况差异显著,贵州、湖南、四川、安徽、云南和上海 6 省市农业用水绿色效率分布相对离散,年际变化相对显著,其中贵州省年际变化最大,结合表 5 可知其农业用水绿色效率有一个明显的上升过程;江苏、浙江、江西、湖北和重庆 5 省市农业用水绿色效率分布相对集中,年际变化相对稳定,且维持在较高水平。从异常值的分布情况来看,上海、湖南、四川、云南四省市均出现了异常值,不同之处在于湖南和四川 2 省的异常值均低于均值,而云南和上海 2 省市的异常值包括高于均值的分布和低于均值的分布。

具体而言,2017 年的云南以及 2010、2011 年的上海异常值高于各自的均值,2013 年的云南、2017 年和 2018 年的湖南以及 2016 年和 2018 年的四川异常值低于各自的均值。就农业用水绿色效率较低的异常值而言,2013 年云南出现低水平异常值,主要是因为 2013 年云南发生了严重旱灾,农业生产、农村社会经济活动等都受到了不同程度的影响;2016—2018 年湖南及四川农业用水绿色效率出现低水平的异常值,与近些年中西部部分省市城镇化进程加快,农业劳动力大量流出,农业劳动力、农业用水等投入减少,农业产出不足,农村社会经济发展较为滞后有关。需要借鉴贵州等省份近些年在普及节水农业、推动农民工返乡创业就业、助力乡村旅游等有利于推动农业用水科学利用及农业农村现代化方面采取的有力措施。

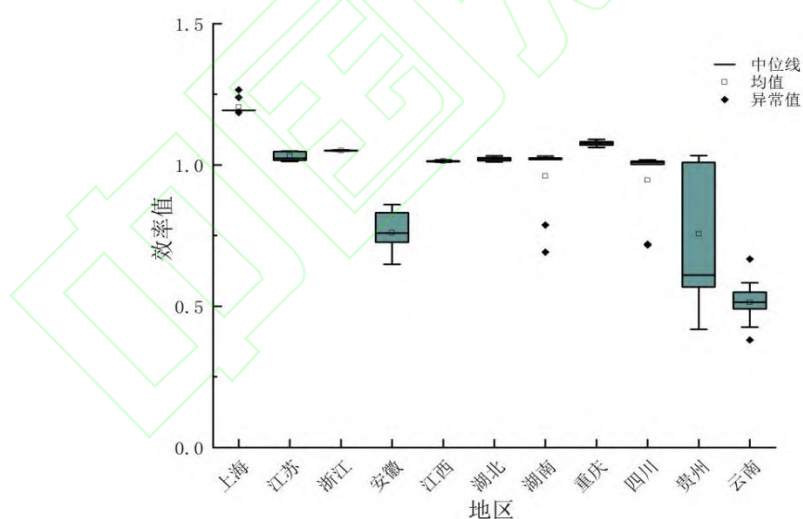


图2 长江经济带农业用水绿色效率箱线图

(2) 在时空演变上,运用 ArcGIS10.4.1 对长江经济带 11 省市 2010 年、2014 年、2018 年 3 个时间节点及多年平均农业用水绿色效率进行相等间隔分类(图 3),颜色越深代表效率越高。由图 3 可知,2010—2018 年长江经济带 11 省市农业用水绿色效率较高的省市数量总体呈减少趋势,需要引起重视。重庆、湖北、江西、浙江、江苏、上海 6 省市农业用水绿色效率始终维持在较高水平,其中上海市一直是长江经济带 11 省市中农业用水绿色效率最高的地区,上海是我国最大的经济中心城市,新农村建设成效显著,农村社会发展水平及农业现代化较高,农业用水产生了良好的社会效益。四川、湖南 2 省农业用水绿色效率出

现了较大幅度的下降，贵州省则呈明显上升趋势，作为相邻省份，应积极加强交流合作，推动农业科学用水方面的经验和技術共享。云南、安徽 2 省农业用水绿色效率在波动中趋于稳定，但处于较低水平，尤其是安徽省，2010—2018 年农业用水绿色效率均低于周边省份，这与安徽省农业现代化水平、农村社会经济发展水平较低有关，作为我国传统的农业大省之一，其农业用水方式是否合理关系到区域社会的健康发展，需要依托其毗邻江苏、浙江等农业用水绿色效率较高地区的区位优势并根据地方实际采取切实有效的措施推动农业水资源的合理利用。从各省份多年平均农业用水绿色效率空间分异来看，2010—2018 年长江经济带多年平均农业用水绿色效率空间差异显著，上海是农业用水绿色效率最高的地区，云南省最低，效率值总体呈由长江经济带下游地区向上游地区递减的空间分布特征。长江经济带作为我国“T”字型发展战略的重要组成部分，农业科学用水、农业农村可持续发展对推动区域乃至全国社会-经济-生态系统健康发展具有重要意义，目前各省市农业用水绿色效率仍存在较大的差异，应制定科学合理的农业用水政策，加强交流合作，促进区域农业水资源利用的协调发展。

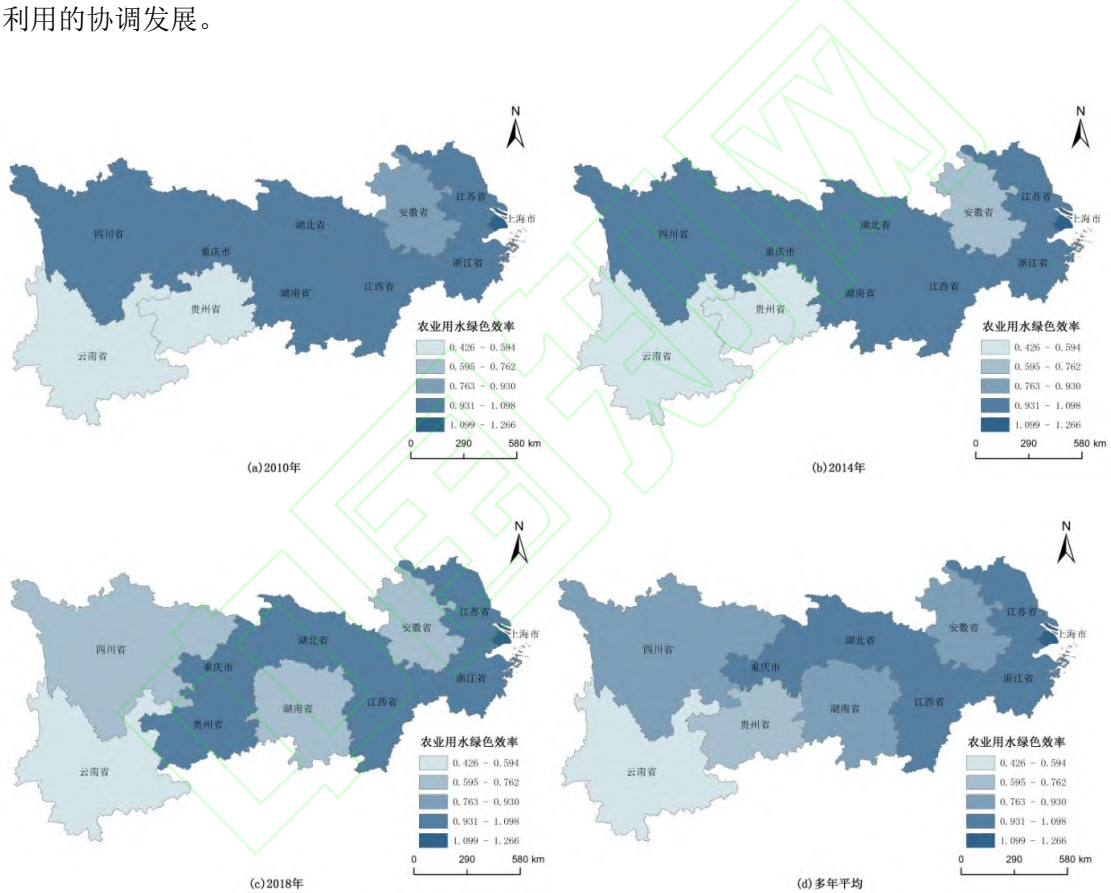


图 3 长江经济带农业用水绿色效率时空分异

4 影响因素分析

农业用水绿色效率是对农业用水所产生的社会-经济-生态效益的综合测度，因此长江经济带农业用水绿色效率时空分异也受到自然社会等多重因素的影响。结合长江经济带农业用水绿色效率影响因素指标体系（表 3），选取 2010 年、2014 年、2018 年 3 个时间节点，并根据自然断点法将各影响因素指标原始数据划分为 5 类，运用地理探测器工具进行因子探测分析，测算结果（表 6）如下：

表6 长江经济带农业用水绿色效率影响因素探测结果

因子排序	2010 年		2014 年		2018 年		平均	影响趋势
	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>q</i>	
城镇化水平 (X1)	0.951	0.014	0.832	0.199	0.579	0.921	0.788	↓
经济发展水平 (X2)	0.937	0.035	0.809	0.293	0.417	0.994	0.721	↓
R&D 占比 (X3)	0.894	0.041	0.825	0.119	0.577	0.384	0.765	↓
人均节能环保财政支出 (X4)	0.095	0.996	0.847	0.069	0.572	0.959	0.505	↑
人均农业财政支出 (X5)	0.427	0.981	0.370	0.955	0.379	0.989	0.392	↓
人均教育财政支出 (X6)	0.557	0.845	0.594	0.685	0.554	0.797	0.568	↓
人均耕地灌溉面积 (X7)	0.380	0.664	0.447	0.570	0.659	0.469	0.495	↑
人均节水灌溉面积 (X8)	0.888	0.037	0.322	0.848	0.737	0.472	0.649	↓
单位国内生产总值耗水 (X9)	0.647	0.285	0.503	0.686	0.791	0.242	0.647	↑
坡度小于 20°占比 (X10)	0.315	0.812	0.317	0.787	0.732	0.160	0.455	↑
人均水资源总量 (X11)	0.403	0.699	0.555	0.560	0.637	0.360	0.532	↑
年均降水量 (X12)	0.125	0.994	0.215	0.968	0.786	0.428	0.375	↑
径流系数 (X13)	0.066	1.000	0.397	0.989	0.098	1.000	0.187	↑

由表 6 可知,各影响因素在不同年份对长江经济带农业用水绿色效率产生了不同程度的影响。从多年平均的影响程度上看,各社会经济因素的影响程度总体上高于各自然因素,同时 9 项社会经济因子中有 6 项的影响作用总体呈减弱趋势,3 项自然因子的影响作用总体均呈增强趋势,表明 2010—2018 年长江经济带农业用水绿色效率空间分异受社会经济因素的影响在减弱,而受自然等不确定因素的影响在增强,这可能与国家推进区域协调发展战略,区域社会经济差距逐步缩小等因素有关。城镇化水平、R&D 占比、经济发展水平、人均节水灌溉面积、单位国内生产总值耗水、人均教育财政支出、人均水资源量以及人均节能环保财政支出等是长江经济带农业用水绿色效率差异的主要影响因素,多年平均 *q* 值均大于 0.5,以下主要对多年平均 *q* 值大于 0.5 的影响因素进行分析。

城镇化水平多年平均 *q* 值为 0.788,是各因素中对农业用水绿色效率空间分异影响最大的因素,城镇化发展伴随着资金、技术、人才等流入广大农村地区,对推动农村地区水资源科学利用与农村社会经济发展具有重要作用。2010—2018 年,*q* 值由 0.951 下降至 0.579,且 *P* 值增大表明其显著性也有明显下降趋势,上海、江苏等高水平城镇化地区城镇化发展速度比较缓慢,而云南、贵州等城镇化水平较低的省市城镇化却得到较快发展,区域间城镇化水平差距逐步缩小,因此城镇化水平对长江经济带农业用水绿色效率空间分异的影响呈减弱趋势。

R&D 占比、人均教育财政支出和人均环保财政支出等 3 个因素均为财政投入方面对农业用水绿色效率的影响,多年平均 *q* 值分别为 0.765、0.568 和 0.505,三者分别侧重于科技、教育和节能环保领域,都对长江经济带农业用水绿色效率空间分异有重要影响。2010—2018 年 R&D 占比和人均教育财政支出的影响呈减弱趋势,而人均环保财政支出的影响呈增强趋势,需要继续加强在节能环保领域的财政投入,推动长江经济带农业用水绿色可持续利用。单位国内生产总值耗水多年平均 *q* 值为 0.647,且影响作用呈增强趋势,单位国内生产总值耗水量的多少可以反映技术革新和节能环保的发展情况,因此需要不断加强科技创新,推动节水工艺发展,降低单位国内生产总值耗水,实现农业用水的高效利用。

经济发展水平即人均 GDP 多年平均 *q* 值为 0.721,其中 2010 年 *q* 值达到 0.937,且在 5%水平下显著,对长江经济带农业用水绿色效率的时空分异有显著影响。长江下游的上海、

江苏、浙江等省市经济发展水平较高，政府财政收入较多，有更多的资金用于推动农村基础设施建设、完善居民福利等，有利于农业科学用水和农村社会经济发展；而云南、贵州、四川等长江经济带中上游省市经济发展水平相对较低，农村基础设施建设相对落后，农业用水绿色效率也相对较低。2010—2018 年经济发展水平对农业用水绿色效率空间分异的影响总体上呈减弱趋势，且显著性水平发生明显下降，这可能与国家大力推进西部大开发及相关政策向中西部省市倾斜，区域经济发展水平差距缩小有关。

人均节水灌溉面积多年平均 q 值为 0.649，其中 2010 年 q 值为 0.888，且在 5% 水平下显著，农业节水灌溉面积的多少对农业用水有直接影响。江苏、上海、浙江等省市农业现代化程度较高，人均节水灌溉面积较广，有利于这些地区农业用水的高效利用；相比较而言，长江经济带中上游省市农业现代化程度较低，人均节水灌溉面积较小，节水农业亟待发展，需要加快推广节水灌溉技术在长江经济带中上游省市的应用，促进各省市农业用水的可持续利用。2010—2018 年 q 值总体呈波动下降趋势，反映出人均节水灌溉面积对长江经济带农业用水绿色效率空间分异的影响作用在减小，这与近年来各省市相继采取的推动普及节水灌溉农业等有力措施有关。

人均水资源量多年平均 q 值为 0.532，人均水资源量是一个受自然和社会环境共同影响的因素。长江经济带沿线省市均属于水资源较丰富地区，但上海、江苏、浙江等下游省市人口密度更大，人均水资源量较少，推动着节水农业的发展，人们的节水意识普遍较高，促进了这些地区农业用水的高效利用；中上游省市人均水资源量相对较多，农业生产过程中大水漫灌等现象仍较普遍，农业用水效率相对较低。2010—2018 年人均水资源量对农业用水绿色效率的影响呈增强趋势，人均水资源相对丰富地区应利用好自身优势，科学合理地利用水资源，使其产生广泛的社会、经济和生态效益。

总体上看，2010—2018 年长江经济带城镇化水平、R&D 占比、经济发展水平、人均教育财政支出等社会经济因素对农业用水绿色效率的影响总体上虽然呈减弱趋势，且显著性水平也在下降，但这些因素对长江经济带农业用水绿色效率空间分异仍有重要影响，需要继续推动区域内城镇化发展，加大科研、教育、环保等财政投入，即加强对农业用水绿色效率上升有明显促进作用的可控因素的影响。虽然年均降水量、地形坡度等自然因素对长江经济带农业用水绿色效率的影响总体上呈增强趋势，但属于不可控因素，各省市应根据地区自然地理环境，因地制宜，采取合理的用水措施，促进农业用水科学利用和社会经济的可持续发展。

5 结论与对策

该文基于超效率 EBM 模型对 2010—2018 年长江经济带 11 省市农业用水绿色效率进行测度，并借助核密度估计、箱线图与 ArcGIS 图示化等方法分析其时空演变，最后运用地理探测器对影响因素进行探究。研究表明：

(1) 2010—2018 年长江经济带 11 省市农业用水绿色效率总体上高于经济效率和环境效率，农业用水产生了良好的社会效益。但受农村产业结构调整及农业产业化发展等影响，农业用水经济效率、环境效率、绿色效率总体上均呈轻微波动下降趋势。

(2) 分地区看，2010—2018 年长江经济带不同省市农业用水绿色效率存在较大差异，下游地区总体上优于中上游地区。核密度估计显示区域内绿色效率差距呈减小趋势，农业用水绿色效率趋向于区域均衡协调发展。

(3) 2010—2018 年，江苏、湖北、贵州、云南 4 省农业用水绿色效率总体呈波动上升趋势，上海、浙江、安徽、江西、湖南、重庆、四川 7 省市总体呈波动下降趋势。其中贵州省总体呈较大幅度上升趋势，湖南、四川 2 省则呈较大幅度下降趋势，出现较大下降趋势的省份应思考现行农业用水政策是否合理并积极做出改进。

(4) 城镇化水平、R&D 占比、经济发展水平、人均节水灌溉面积、单位国内生产总值耗水、人均教育财政支出、人均水资源量以及人均节能环保财政支出等是长江经济带农业用水绿色效率空间分异的主要影响因素。

目前,受自然地理环境及社会经济发展水平差异等影响,长江经济带 11 省市农业用水绿色效率还存在较大差异且有较大提升空间。因此,本研究的政策启示在于:

(1) 各省市应结合本地情况,因地制宜,采取科学合理的农业用水政策。长江经济带作为一个跨度较大的区域,上中下游地区自然及社会经济条件也存在较大差异,因此各省市需要根据各地区的实际情况,综合考虑各方面因素,对不合理的现行措施进行改进,采取适合本省市农业绿色发展的农业用水政策。

(2) 加强省市间合作,学习借鉴有利于农业用水绿色高效利用的方法。长江经济带各省市应打破行政壁垒,提高区域协调合作能力,尤其是邻近省市,自然社会经济条件差异相对较小,在农业供水和用水方面具有一定的相似性,更应加强交流合作,推动实现相关技术经验共享。

(3) 加大对科技、教育、环保等的财政投入,注重农业用水基础性研究。科学技术是第一生产力,农业用水的科学合理利用离不开相关科学技术的研究,各省市应加大对农业用水关键领域研究的经费投入,提高科技成果转化能力,并推广有利于农业用水高效利用的先进科技,普及节水灌溉农业等。多措并举,推动长江经济带农业用水绿色可持续利用,助力长江经济带经济-社会-生态环境的绿色高质量发展。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 2018 年中国水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [2] 魏楚, 沈满洪. 水资源效率的测度及影响因素: 基于文献的述评. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 197-204.
- [3] Liu K D, Yang G L, Yang D G. Investigating industrial water-use efficiency in mainland China: An improved SBM-DEA model. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110859.
- [4] Zou D L, Cong H B. Evaluation and influencing factors of China's industrial water resource utilization efficiency from the perspective of spatial effect. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(1): 173-182.
- [5] 陈关聚, 白水秀. 基于随机前沿的区域工业全要素水资源效率研究. 资源科学, 2013, 35(8): 1593-1600.
- [6] Wang F T, Yu C, Xiong L C, et al. How can agricultural water use efficiency be promoted in China? A spatial-temporal analysis. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 145: 411-418.
- [7] 李明璁. 基于 DEA 方法的中国农业水资源利用效率研究. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9): 106-114.
- [8] 崔永正, 刘涛. 黄河流域农业用水效率测度及其节水潜力分析. 节水灌溉, 2021(1): 100-103.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 孙才志, 马奇飞, 李素娟. 中国水资源绿色效率 TFP 变化趋势预测. 人民黄河, 2018, 40(2): 42-48.
- [12] 卢艳领, 陈志国, 刘振国. 基于熵值法的河北省农业用水利用效率研究. 中国农业资源与区划, 2015, 36(3): 136-142.
- [13] 罗勇, 王乐志, 傅春, 等. 基于主客观耦合的区域水资源综合利用效率评价. 人民长江, 2019, 50(12): 80-84.
- [14] 王莹. 中国省际水资源利用效率及影响因素分析——基于超效率 DEA 与 Tobit 模型. 中国农村水利水电, 2015(5): 41-44+52.
- [15] 董战峰, 喻恩源, 袁浪, 等. 基于 DEA 模型的中国省级地区水资源效率评价. 生态经济, 2012(10): 43-47.
- [16] 苏时鹏, 黄森慰, 孙小霞, 等. 省域水资源可持续利用效率分析. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 803-809.
- [17] 任玉芬, 方文颖, 王雅晴, 等. 我国城市水资源利用效率分析. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1507-1516.
- [18] 韩文艳, 陈兴鹏, 张子龙, 等. 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.
- [19] 朱达, 唐亮, 谢启伟, 等. 基于 DEA 方法的我国省会城市水资源利用效率研究. 生态学报, 2020(6): 1-11.
- [20] 陈磊, 吴继贵, 王应明. 基于空间视角的水资源经济环境效率评价. 地理科学, 2015, 35(12): 1568-1574.
- [21] 刘渝, 宋阳. 基于超效率 SBM 的中国农业水资源环境效率评价及影响因素分析. 中国农村水利水电, 2019(1): 102-107.
- [22] 孙才志, 赵良仕, 马奇飞. 中国水资源绿色效率研究. 北京: 科学出版社, 2020.
- [23] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析. 地理科学进展, 2018, 37(7): 901-911.
- [24] 孙才志, 马奇飞. 中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究. 地理研究, 2020, 39(1): 53-63.
- [25] 孙才志, 邵晓雯, 赵良仕. “四化”对中国水资源绿色效率的驱动效应研究. 中国地质大学学报(社会科学版), 2018, 18(1): 57-67.
- [26] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理. 地理学报, 2020, 75(5): 1022-1035.
- [27] 张玮, 刘宇. 长江经济带绿色水资源利用效率评价——基于 EBM 模型. 华东经济管理, 2018, 32(3): 67-73.
- [28] 马海良, 丁元卿, 王蕾. 绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析. 自然资源学报, 2017, 32(3): 406-417.
- [29] 张熙悦, 孙芳城, 王怀祖. 基于“生产——治理”两阶段评价的长江经济带工业水资源绿色效率研究. 江西财经大学学报, 2020(2): 26-36.
- [30] 汪克亮, 刘悦, 史利娟, 等. 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素——基于 EBM-Tobit 模型的两阶段分析. 资源科学, 2017, 39(8): 1522-1534.
- [31] 杨高升, 谢秋皓. 长江经济带绿色水资源效率时空分异研究——基于 SE-SBM 与 ML 指数法. 长江流域资源与环境, 2019,

28(2): 349-358.

[32] 长江经济带发展统计监测协调领导小组办公室. 长江经济带发展统计年鉴 2018. 北京: 中国统计出版社, 2019.

[33] 龙亮军. 综合福利视角下中国生态文明建设绩效评价及国际比较. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1259-1272.

[34] Tone K, Tsutsui M. An epsilon- based measure of efficiency in DEA-A third pole of technical efficiency. European Journal of Operational Research, 2010, 207(3): 1554-1563.

[35] Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. Management Science, 1993, (39): 1261-1264.

[36] 韩洁平, 程序, 闫晶, 等. 基于网络超效率 EBM 模型的城市工业生态绿色发展测度研究——以三区十群 47 个重点城市为例. 科技管理研究, 2019, 39(5): 228-236.

[37] 高铁梅. 计量经济分析方法与建模 Eviews 应用及实例. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[38] 王泽宇, 张震, 韩增林, 等. 中国 15 个副省级城市经济转型成效测度及影响因素分析. 地理科学, 2015, 35(11): 1388-1396.

[39] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

[40] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究. 自然资源学报, 2017, 32(12): 1999-2011.

[41] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析. 地理科学, 2013, 33(11): 1323-1329.

[42] 杨林章, 吴永红. 农业面源污染防控与水环境保护. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 168-176.

[43] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1169-1178.

[44] GB 3838—2002. 中华人民共和国国家标准—地表水环境质量标准. GB 3838—2002.

[45] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London, UK: Earthscan, 2011.

[46] 高伟, 陈岩, 严长安, 等. 长江经济带氮淋溶流失空间格局及其水环境影响评估. 环境科学学报, 2020, 40(1): 325-333.

MEASUREMENT OF GREEN EFFICIENCY OF AGRICULTURAL WATER IN THE YANGTZE RIVER ECONOMIC BELT AND ANALYSIS OF INFLUENCING FACTORS* —BASED ON THE SUPER-EFFICIENCY EBM-GEODETECTOR MODEL

Li Qingsong¹, Zhang Fengtai², Su Weici^{1, 3}, Yang Qing²,
Sun Changcheng², Wei Zhen²

(1.College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

2. College of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

3. Institute of Mountain Resources of Guizhou Province, Guiyang 550001, Guizhou, China)

Abstract The sustainable utilization of agricultural water is related to the green development of regional agriculture and the high-quality development of social economy. Based on the panel data of 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt from 2010 to 2018, the super-efficiency EBM model was used to measure the economic efficiency, environmental efficiency and green efficiency of agricultural water in the region, Kernel density estimation and ArcGIS spatial analysis were used to analyze its temporal and spatial evolution characteristics, and the geodetector model was used to explore its influencing factors. The results show that: (1) The overall efficiency values of economic efficiency, environmental efficiency and green efficiency of agricultural water in 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt from 2010 to 2018 were 0.879, 0.933, and 0.939, respectively. The green efficiency of agricultural water was higher than environmental efficiency and economic efficiency. Agricultural water has produced substantial social benefits. (2) In the past nine years, the overall average values of economic efficiency, environmental efficiency and green efficiency of agricultural water in 11 provinces and cities of the Yangtze River Economic Belt showed a slight downward trend. The scientific utilization of agricultural water needs further attention. (3) The average green efficiency of agricultural water in the lower reaches of the Yangtze River Economic Belt is the highest, followed by the middle reaches, and the upper reaches the lowest. Among them, Shanghai has the highest multi-year average value of green efficiency of

agricultural water (1.206), and the lowest in Yunnan province (0.513). Regional differences are significant, but Kernel density estimation shows that the gap in green efficiency of agricultural water in the region was narrowed from 2010 to 2018, showing a balanced and coordinated development trend. (4) The level of urbanization, the proportion of R&D, per capita water-saving irrigation area, water consumption per unit of GDP, per capita education expenditure, and per capita amount of water resources, are the main factors affecting the difference in green efficiency of agricultural water in the Yangtze River Economic Belt. Studying the green efficiency of agricultural water in the Yangtze River Economic Belt and exploring its influencing factors can provide some references for promoting the green and sustainable use of agricultural water in the Yangtze River Economic Belt.

Keywords agricultural water; green efficiency; super-efficiency EBM-Geodetector model; influencing factors; Yangtze River Economic Belt

