

文章编号:1005-0930(2024)04-1035-014 中图分类号:TV213.4 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.04.010

黑龙江省水资源绿色效率时空演变 及影响因素分析

姜秋香, 隆睿睿, 王子龙, 王晋京,
吴云星, 郭伟鹏

(东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:水资源绿色效率研究对于践行绿色发展观、实现水资源高效利用具有重要意义.利用SBM(slack based measure)模型测算了2003~2018年黑龙江省水资源绿色效率并进行时空演变分析,同时利用空间自相关法进行水资源绿色效率的空间聚集性研究,最后进行投入和产出变量调整情景模拟和水资源绿色效率的影响因素分析.研究发现:黑龙江省平均水资源绿色效率处于较低水平,但总体呈波动上升的趋势;黑龙江省南部水资源绿色效率上升幅度较大,北部地区效率也有所提升,东部和西部地区效率相对较低且变化不大;黑龙江省水资源绿色效率具有空间聚集性特征,高高聚集和低低聚集分别位于南部和西部地区,低高聚集分布在东部地区;用水量、劳动力、固定资产投资和灰水足迹对水资源绿色效率为负向影响,GDP和社会综合指数则对水资源绿色效率提升具有积极作用,不同地区的主要影响因素也存在差异.通过研究水资源绿色效率对社会环境和相关政策变化的动态响应及其影响因素,有利于加强区域水资源管理和优化水资源利用方式,进一步推动黑龙江省可持续发展.

关键词:SBM模型;水资源绿色效率;时空演变;空间自相关分析;空间聚集;影响因素;黑龙江省

水资源是国家发展和人民赖以生存的基础.中国是严重缺水的国家之一,水资源时空分布不均匀,各地区经济发展不平衡,各地区的供水与需求矛盾越来越严重^[1],严重制约着经济社会的可持续发展.在绿色发展理念下,经济稳步提升是发展的前提,生态环境是发展的基础,社会产出是发展的目标^[2].水资源的优化管理不再局限于提高经济效率,而是致力于寻求提高绿色效率、清洁生产和可持续发展的最佳途径^[3].因此研究水资源绿色效率可以缓解水资源供需矛盾,推动资源环境约束下经济发展模式的转变,最终实现“经济-社会-生态环境”三者的共赢.

收稿日期:2023-07-27;修订日期:2023-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(42071243);黑龙江省科学基金项目(YQ2020E001)

作者简介:姜秋香(1982—),女,博士,教授.E-mail:jiangqiuxiang914@163.com

通信作者:王子龙(1982—),男,博士,教授.E-mail:wangzilong2017@126.com

早期水资源效率的计算仅考虑水资源利用过程中所产生的经济收益^[4-7],而在资源和环境的约束下,将经济视为唯一产出计算水资源利用效率不符合当前社会发展的要求.在此基础上,结合绿色发展理念,孙才志等^[8]提出水资源绿色效率是水资源等生产要素投入与经济、社会和生态环境产出的比率.数据包络分析法 DEA (data envelopment analysis) 能够衡量拥有多个输入和输出变量的不同决策单元的相对生产效率^[9],其主要包括传统的 BCC 和 CCR 模型以及改进后的 SBM 和 SSBM (super slack based measure) 模型,该方法广泛应用于水资源绿色效率研究领域^[10-11].Hu 等^[12]利用 CCR 模型,考虑 COD (化学需氧量) 排放量对中国水资源消耗的生态效率进行了评价,总体而言,东南沿海地区在用水量方面的生态效率更高,而中西部和北部的生态效率较低.章恒全等^[13]以废水排放量为非期望产出,通过 SBM 模型计算中国水资源绿色效率,发现我国省际间水资源绿色效率发展不平衡,总体为缓慢上升的趋势.Wang 等^[14]将淡水消耗量和废水排放量结合到统一的分析框架中,并利用 EBM (epsilon based measure) 模型评估了长江经济带 11 个省区的绿色用水效率,研究发现,长江经济带的绿色用水效率相对较低.在水资源绿色效率的时空分布规律研究方面,张峰等^[15]基于空间收敛效应检验了 2000~2018 年中国工业绿色全要素水资源效率,结果显示效率值呈“东部>西部>中部”的空间格局;李健和谢衡^[16],Zou 和 Cong^[17]则分别从静态和动态变化分析研究区的效率变化特征.水资源绿色效率影响因素的研究多采用地理探测器模型^[16]、Tobit 模型^[18]和 Malmquist 指数模型^[19],研究发现水资源绿色效率的影响因素包括经济发展水平、节水技术、供水结构、科技进步和环境规制力度等.

综上所述,学者对水资源绿色效率的研究已取得了较为丰富的成果,但仍需进一步深入探讨.首先,以往的水资源绿色效率评价中,非期望产出多考虑污水、COD 和氨氮的排放量,以此衡量工业废水和城市生活污水产生的点源污染,但未包含农业生产过程中造成的面源污染.以灰水足迹作为非期望产出,可以从稀释水量的角度全面衡量工业、农业和生活的水污染程度;其次,目前农业灰水足迹的计算多采用统一的化肥淋溶率,未考虑不同作物对化肥的需求量,而对于农业用水较多和农业污染较严重的地区,依据作物种植结构计算农业灰水足迹将更加全面地展示不同地区农业污染的真实情况.

鉴于此,以黑龙江省为研究地区,以灰水足迹为非期望产出,依据作物种植结构衡量农业灰水足迹,利用 SBM 模型计算地区水资源绿色效率并分析其时空演变过程,利用空间自相关法研究空间异质性和相似性,通过模拟分析投入和产出变量对不同地区水资源绿色效率的影响程度,旨在为地方政府制定提高水资源绿色效率相关政策提供科学依据,促进区域水资源可持续利用和经济社会的绿色发展.

1 研究方法与数据来源

1.1 SBM 模型

DEA 模型是由 Charnes 等开发的一种定量分析方法,通过使用多输入和多输出下的多目标决策模型对决策单元进行相对效率评估^[20],其中 CCR 和 BCC 模型是最早提出的模型^[21].传统 DEA 模型从径向和角度两个方面度量效率值,没有考虑投入产出的松弛性问题,使得效率值的度量不够准确^[22].Tone^[23]提出非径向和非角度的 SBM 模型,它直接

对输入和输出的松弛变量进行处理,消除了因径向和角度选择差异所带来的偏差和影响^[24].模型计算公式如下

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{s_n^x}{x_{k'n}^{t'}}}{1 + \frac{1}{M+I} \left(\sum_{m=1}^M \frac{s_m^y}{y_{k'm}^{t'}} + \sum_{i=1}^I \frac{s_i^b}{y_{k'i}^{t'}} \right)} \\ x_{k'n}^{t'} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1, k \neq k'}^K \lambda_k^t x_{kn}^t + s_n^x, n = 1, 2, \dots, N \\ y_{k'm}^{t'} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1, k \neq k'}^K \lambda_k^t y_{km}^t - s_m^y, m = 1, 2, \dots, M \\ b_{k'i}^{t'} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1, k \neq k'}^K \lambda_k^t b_{ki}^t + s_i^b, i = 1, 2, \dots, I \\ \lambda_k^t \geq 0, s_n^x \geq 0, s_m^y \geq 0, s_i^b \geq 0, k = 1, 2, \dots, K \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: ρ 为水资源绿色效率值; N 、 M 、 I 分别为投入变量、期望产出变量和非期望产出变量的个数; K 为研究对象的个数, $K=13$; T 为研究年的个数, $T=16$; x_{kn}^t 、 y_{km}^t 、 b_{ki}^t 分别为第 k 个地区在第 t 年的投入、期望产出和非期望产出变量; s_n^x 、 s_m^y 、 s_i^b 分别为第 n 个投入、第 m 个期望产出和第 i 个非期望产出的松弛变量; λ_k^t 为权向量; $x_{k'n}^{t'}$ 、 $y_{k'm}^{t'}$ 、 $b_{k'i}^{t'}$ 为第 k' 个地区在第 t' 年的投入、期望产出和非期望产出变量.当 $0 < \rho < 1$ 时,表明决策单元存在效率损失,可以通过调整投入和产出提高水资源绿色效率;当 $\rho \geq 1$ 时, $s_n^x = s_m^y = s_i^b = 0$,表明决策单元效率达到有效值,水资源绿色效率有效且水资源配置合理^[25].

1.2 空间自相关分析方法

探索性空间数据分析 ESDA (exploratory spatial data analysis) 可以通过空间分析技术对地区某些特征进行可视化表达,进而直观描述空间分布特征和集聚特性^[26].其中空间自相关分析是 ESDA 中的代表性方法,其核心是通过研究不同数据的空间异质性和相似性,从而解决数据的空间关联性问题.根据分析地区关系的不同,空间自相关分析可分为全局空间自相关和局部空间自相关两部分.

1.2.1 全局空间自相关分析 全局空间自相关可以判断某一地区与其相邻地区的要素属性值是否存在显著相关性.主要运用全局 Moran's I 指数判断水资源绿色效率在空间上是否有显著的聚集或者分散现象.全局 Moran's I 指数介于 $-1 \sim 1$ 之间, $[-1, 0)$ 、 0 和 $(0, 1]$ 分别表示全局空间呈负相关性、不相关和正相关性.全局 Moran's I 指数计算公式如下^[27]

$$I = \frac{k \sum_{i=1}^K \sum_{j \neq i}^K W_{ij} (a_i - \bar{a}) (a_j - \bar{a})}{\sum_{i=1}^K \sum_{j \neq i}^K W_{ij} \sum_{i=1}^K (a_i - \bar{a})}, k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

式中: I 为全局 Moran's I 指数; a_i 、 a_j 分别为决策单元 i 、 j 的水资源绿色效率值; $\bar{a}$ 为研究区水资源绿色效率的平均值; W_{ij} 为空间权重,决策单元 i 与 j 地理位置不相邻时取值为 0 ,

相邻时取值为 1.

通常用 Z 值来检验全局 Moran's I 指数的统计结果, Z 值计算公式为

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}} \quad (3)$$

式中: $E(I)$ 为 Moran's I 指数的期望值; $Var(I)$ 为 Moran's I 指数的方差. 在检验 Moran's I 指数的显著性时, 前提是提出某一地区与相邻地区的水资源绿色效率不相关的假设, P 值代表该假设成立的可能性, 当 $P < 0.05$ 时拒绝该假设, 认为相邻地区水资源绿色效率相关, 则全局 Moran's I 指数具有显著性. 因此当 $Z > 1.96$ 同时 $P < 0.05$ 时, 水资源绿色效率值在空间上呈显著聚集分布; $Z < -1.96$ 且 $P < 0.05$ 时, 效率值趋于分散分布; 当 $Z = 0$ 时, 效率值呈现空间独立分布的特征^[28].

1.2.2 局部空间自相关分析 全局 Moran's I 指数是总体统计量, 不能展示存在较强空间相关性的地区. 为了研究各个地区水资源绿色效率是否存在高值或低值的局部空间集聚, 以及哪些地区对全局空间自相关的贡献较大, 则需要进行局部空间自相关分析^[29]. 使用局部 Moran's I 指数绘制散点图进行象限划分, 可以展示单个地区与相邻地区间的集聚关系类型, 每个象限对应不同的空间聚集关系, 第一象限至第四象限分别为高高聚集、低高聚集、低低聚集和高低聚集. 利用局部 Moran's I 指数绘制 LISA 集聚图, 该图可以直观地显示在不同显著性水平下局部地区的聚集类型. 局部 Moran's I 指数计算公式如下

$$I' = \frac{(a_i - \bar{a})}{S^2} \sum_{j \neq i}^K W_{ij} (a_j - \bar{a})$$

$$S^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (a_i - \bar{a})^2 \quad (4)$$

式中: I' 为局部 Moran's I 指数. 若 $I' > 0$, 表示同一类型的地区存在空间聚集现象; 若 $I' < 0$, 表示不同类型的地区存在空间聚集; 若 $I' = 0$, 表示不存在空间聚集现象.

1.3 指标选取和数据来源

水资源绿色效率的测度需要与社会、经济和生态等因素相结合, 因此投入变量从用水、劳动力和资本的角度考虑, 产出变量包括经济和社会的产出以及非期望产出. 具体指标选择如下:

(1) 用水投入. 实际生产生活中使用的水资源总量, 包括工业、农业、生活和生态用水量.

(2) 劳动力投入. 包括城镇就业人数和农村劳动力总和.

(3) 资本投入. 包括各个地区的农、林、渔业、制造业和服务业等相关行业的固定资产投资总额.

(4) 经济产出. 以各地区的 GDP 作为经济产出.

(5) 社会产出. 为了全面、科学地反映社会发展水平和经济状况, 考虑经济、社会生活、人口、文化和医疗事业相关因素, 根据参考文献[30]选择指标计算社会产出. 具体指标包含人口自然增长率、非农业人口比例、科教事业占总财政支出比例、平均每万人口的医生数和平均每万人口的大学生数, 根据以上指标计算衡量社会产出的综合指数. 社会综合指数 S_k 计算公式如下

$$S_k = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c R_{ik}, k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

式中: c 为评价指标的数量; R_{ik} 为第 k 个城市的第 i 个指标原始数据的归一化值,采用极值处理法进行归一化处理^[31].

(6) 非期望产出.灰水足迹是以自然本底浓度和现有水质标准为基准,将一定的污染物负荷吸收同化所需淡水的体积^[32].黑龙江作为中国粮食生产大省,其主要农作物为水稻、玉米和大豆,近 10 年来 3 种粮食播种面积占农业总播种面积的 91%^[33].基于此,将灰水足迹 W_{grey} 视为非期望产出变量,根据黑龙江省主要粮食作物水稻、玉米和大豆的氮肥的淋溶率和施氮量计算农业灰水足迹,生活和工业灰水足迹计算方法借鉴参考文献^[34].灰水足迹计算公式如下

$$\begin{cases} W_{\text{grey}} = W_{\text{grey-a}} + W_{\text{grey-l}} + W_{\text{grey-i}} \\ W_{\text{grey-a}} = \frac{\alpha_1 S_1 F_1 + \alpha_2 S_2 F_2 + \alpha_3 S_3 F_3}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $W_{\text{grey-a}}$ 为农业灰水足迹, m^3 ; $W_{\text{grey-l}}$ 为生活灰水足迹, m^3 ; $W_{\text{grey-i}}$ 为工业灰水足迹, m^3 ; α_1 、 α_2 和 α_3 分别为水稻、玉米和大豆的氮肥淋溶率^[34],%; S_1 、 S_2 和 S_3 分别为水稻、玉米和大豆的单位面积平均施氮量, kg/m^2 ; F_1 、 F_2 和 F_3 分别为水稻、玉米和大豆的种植面积, m^2 ; C_{max} 为污染物水质标准浓度, kg/m^3 ; C_{nat} 为自然容许浓度,取值一般为 $0\text{kg}/\text{m}^3$.

以黑龙江省 13 个地区为研究对象,从地区的角度评价水资源绿色效率及其时空演变趋势.相关数据来源于《黑龙江省统计年鉴》^[35] (2004~2019 年) 和《黑龙江省水资源公报》^[36] (2003~2018 年).

2 结果与讨论

2.1 黑龙江省水资源绿色效率的时空演变

2.1.1 时间演变分析 利用 DEA 模型和 DEA solver 软件,分别计算不考虑灰水足迹的 CCR 模型^[21]和考虑灰水足迹的 SBM 模型两种情况下黑龙江省整体水资源绿色效率.通过两种模型对比发现,CCR 模型计算的水资源绿色效率比 SBM 模型的效率值更高(图 1(a)).说明在黑龙江省水资源利用过程中,灰水足迹作为非期望产出制约了水资源绿色效率的进一步提高,而利用传统 DEA 模型的效率评价与水资源实际利用过程相比有所偏差.因此 SBM 模型能够更准确地地区别灰水足迹在水资源利用过程中所产生的影响.

利用 SBM 模型计算黑龙江省 2003~2018 年 13 个地区的水资源绿色效率(图 1(b)).从整体来看,2003~2018 年黑龙江省水资源绿色效率的平均值为 0.374,水资源绿色效率值变化趋势呈“W”型,总体呈波动上升的趋势.其中,2003~2006 年呈下降趋势,2006 年达到水资源绿色效率最低值 0.306.2006 年黑龙江省政府积极响应国家颁布的《取水许可证管理办法》,通过严格规范各地区的用水收费标准,调整用水结构,有效控制了过度用水的现象,在一定程度上缓解缺水压力,促进了水资源的优化配置与可持续利用,使 2011 年水资源绿色效率值上升到 0.391.2011 年黑龙江省提出的“十二五”规划纲要中指出,全省经济将呈现新的形式,主要目标为调整经济结构,不过分追求经济快速发展,减小固定

资产投资规模.在经济调控手段的影响下,固定投资减少的同时经济发展速度降低,导致2013年黑龙江省水资源绿色效率下降到0.313.从2015年“绿色发展”的理念提出后,黑龙江省以践行绿色发展观为切入点,在保证经济发展的前提下强调水资源利用过程绿色化,增加环境治理投资,强化技术创新,初步实现了“经济-社会-生态”的和谐发展,使2018年水资源绿色效率提升至0.517.总体来说,黑龙江省水资源绿色效率虽处于上升的状态,但仍存在较大的效率损失.

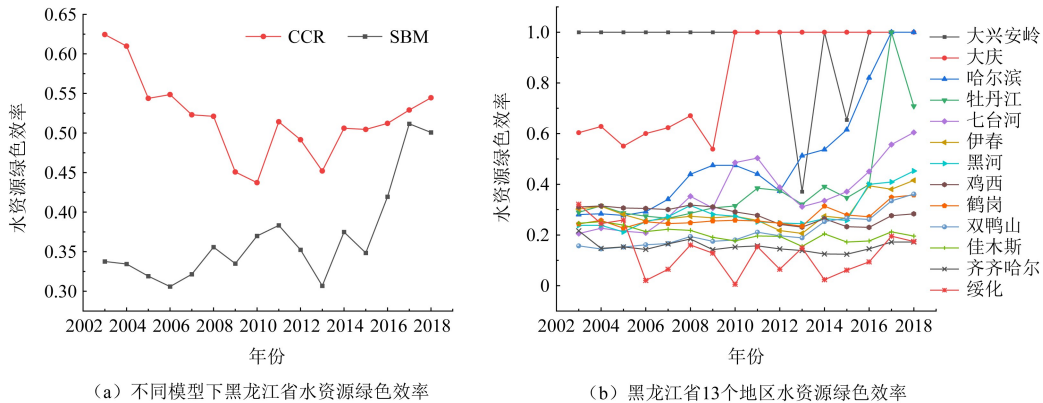


图1 黑龙江省及13个地区的水资源绿色效率值

Fig.1 The green efficiency value of water resources in 13 cities in Heilongjiang Province

从局部地区来看,2003~2018年黑龙江省大部分地区水资源绿色效率呈上升趋势.哈尔滨、牡丹江、七台河和大庆上升幅度较大,范围为0.39~0.72,黑河、双鸭山、鹤岗和伊春的水资源绿色效率也略有上升;绥化的水资源绿色效率处于波动下降状态,由2003年的0.321下降至2018年的0.174,其余城市水资源绿色效率总体呈平稳趋势.

2.1.2 空间演变分析 采用自然断点法将研究时段的水资源绿色效率分为低水平(0.00~0.22)、较低水平(0.23~0.31)、较高水平(0.32~0.60)和高水平(0.61~1.00)4个等级.根据黑龙江省水资源绿色效率的时间趋势变化情况,选择2003、2006、2009、2012、2015和2018年共6个代表年进行空间演变分析(图2).

以哈尔滨、七台河和大庆为代表的南部地区水资源绿色效率从低水平提升为高水平,牡丹江也有一定提升.由于该地区社会发展水平提升,受经济发展水平、技术水平和相关政策等驱动因素的影响,水资源绿色效率发展较为迅速.北部地区的大兴安岭、黑河和伊春为林业资源型城市,水资源丰富、植被覆盖率高,主要产业为旅游业、林业、矿产资源开发和特色种植业等,产业发展速度慢,人口少且社会发展相对落后,水资源利用量少,其中大兴安岭水资源绿色效率始终处于高水平,黑河和伊春的效率从较低水平提升到较高水平.鹤岗和双鸭山通过进行经济结构改革,着力提升农业农村发展质量,使经济社会平稳发展,通过整改水源地环境问题使得水污染得到一定改善,因此水资源绿色效率水平有一定提升.

绥化、佳木斯、齐齐哈尔和鸡西水资源绿色效率普遍较低.绥化、鸡西和佳木斯处于平原地区,具有农业优势,农业用水量大,但是节水灌溉技术未得到有效地普及,同时化肥和

农药进入水体使得水污染较为严重,农业灰水足迹较大,因此水资源绿色效率偏低.齐齐哈尔以工业为主,但与大庆和哈尔滨同样以工业为主的地区相比,水资源绿色效率水平较低,这与社会发展水平和经济发展速度相关.

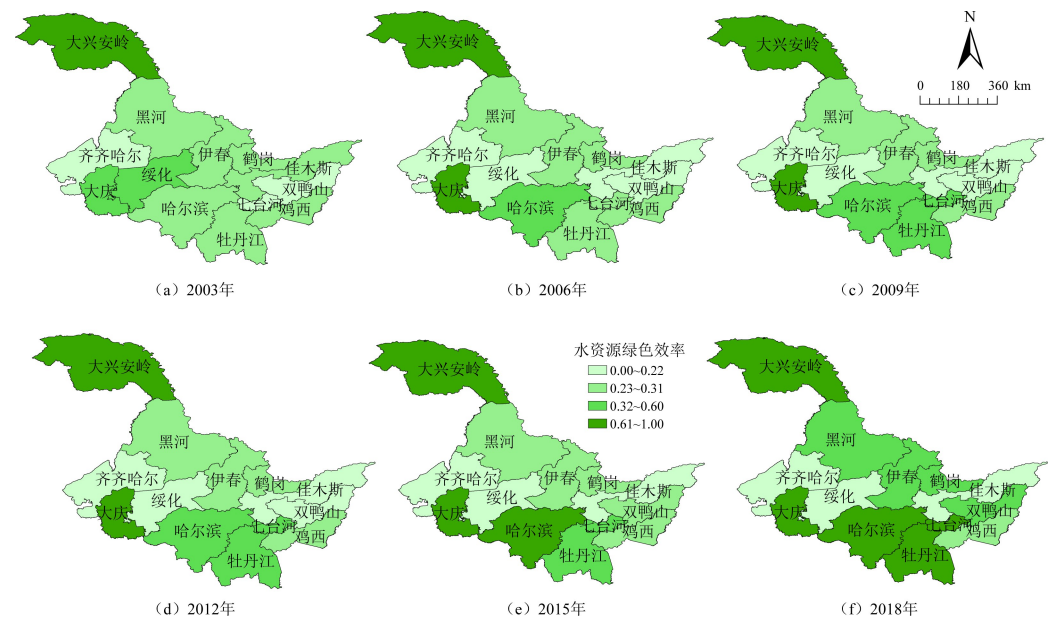


图2 代表年黑龙江省水资源绿色效率空间分布等级

Fig.2 Spatial distribution level map of Heilongjiang Province water resources green efficiency in representative years

2.2 黑龙江省水资源绿色效率的空间自相关分析

2.2.1 全局自相关分析 通过对比得出黑龙江省水资源绿色效率具有一定的空间差异,且相似地区呈现聚集特性的结论.因此,进一步运用空间自相关分析方法研究水资源绿色效率空间关联性和演变趋势.利用 GeoDa 软件计算黑龙江省各地区水资源绿色效率的全局 Moran's I 指数(表1),分析全省水资源绿色效率的关联程度.全局 Moran's I 指数 Z 值均大于 1.96,且 $P<0.05$,说明黑龙江省的水资源绿色效率呈正相关性,证明水资源绿色效率值相似的地区相邻.由表1可知,全局 Moran's I 指数随着时间变化呈曲折上升趋势,2003~2009 年从 0.101 上升到 0.197,2012 年下降至 0.116,之后逐渐上升,2018 年上升到 0.157.随着经济社会的发展,黑龙江省的水资源绿色效率空间自相关性先增强后减弱再逐渐提高.

表1 代表年黑龙江省水资源绿色效率的全局 Moran's I 指数

Table 1 The global Moran's I index representing the green efficiency of water resources in Heilongjiang Province

指标	2003 年	2006 年	2009 年	2012 年	2015 年	2018 年
全局 Moran's I 指数	0.101	0.148	0.197	0.116	0.135	0.157
P	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001
$Z(I)$	3.238	3.774	3.901	4.150	4.078	4.013

2.2.2 局部自相关分析 为了更加清晰且直观地显示水资源绿色效率的空间聚集状态,根据局部 Moran's I 指数绘制散点图(图3)。

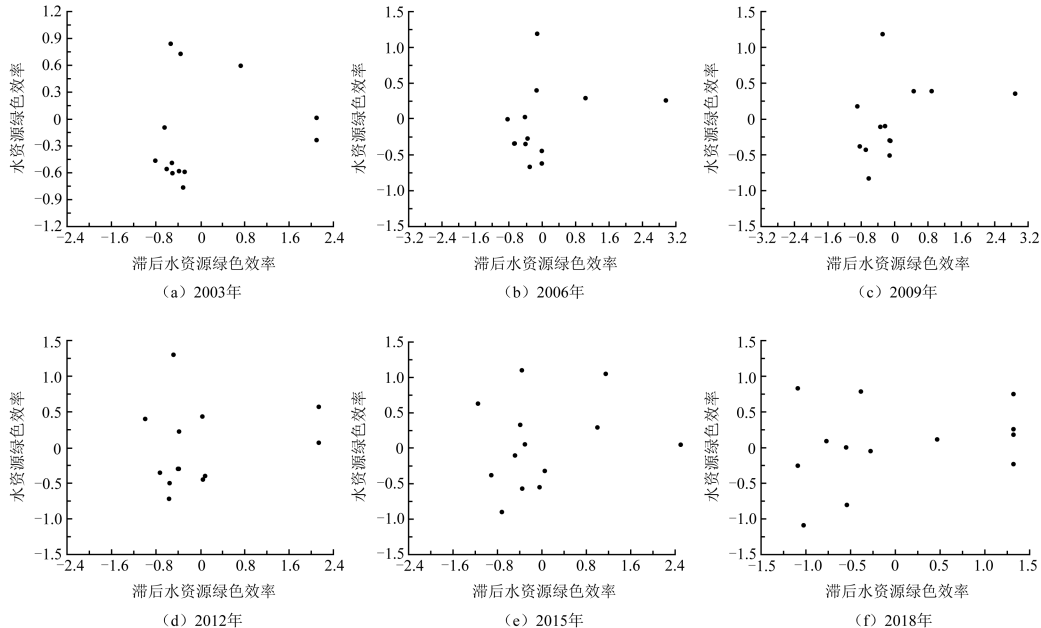


图3 代表年黑龙江省水资源绿色效率局部 Moran's I 散点

Fig.3 Local Moran's I scatter plot of water resources green efficiency in Heilongjiang Province in representative years

不同代表年份的散点分布趋势如下:2003~2009年 Moran's I 指数散点分布比较集中在第三象限,地区水资源绿色效率主要表现为低低聚集,同时其他象限的散点分布反映局部地区存在低高聚集和高高聚集.其中,2003、2006和2009年的高高聚集地区数量分别为1、2、3,表明整体空间自相关性逐渐增强.2012年 Moran's I 指数散点聚集特性出现变化,部分地区由低低聚集向低高和高低聚集转变,这反映了水资源绿色效率的空间相关性从趋同发展向差异化发展转变的现象.2012年国务院发布《关于实行最严格的水资源管理制度的指导意见》,在政府约束性逐渐加强的前提下,部分地区面临水资源利用与经济社会发展不匹配的问题,地区之间产业结构和经济发展能力不同,使得水资源利用效率提升情况具有一定差异.2015年 Moran's I 指数散点虽然在局部数量和分布位置上发生了改变,但是整体格局与2012年差别不大.2018年 Moran's I 指数散点再次向一、三象限靠拢,高高聚集和低低聚集的地区分别有4个和5个,高高聚集地区明显增多,整体空间聚集性虽然不如2009年空间聚集性强,但可以看出黑龙江省大部分地区的水资源绿色效率值均有所提升.这说明黑龙江省在政府规制和经济发展下,各个地区均采取适合当地发展的政策来提高水资源利用水平,在水资源绿色效率整体水平提升的背景下,形成2018年的 Moran's I 指数散点的分布状态。

为了揭示具体地区的水资源绿色效率空间聚集显著性问题,结合局部 Moran's I 散点图和局部 Moran's I 指数绘制代表年的 LISA 集聚图(图4),主要探讨通过5%显著性水

平检验的地区.

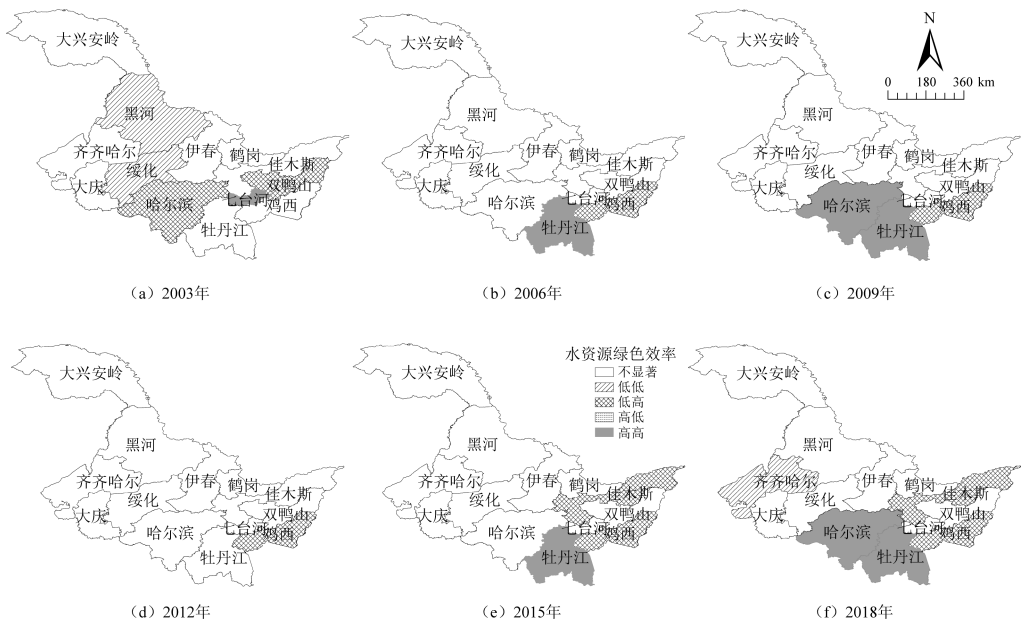


图4 代表年黑龙江省水资源绿色效率 LISA 集聚

Fig.4 LISA aggregation map of water resources green efficiency in Heilongjiang Province in representative years

高高聚集主要为南部的哈尔滨和牡丹江,牡丹江自 2006 年成为高高聚集区,之后哈尔滨于 2009 年步入高高聚集行列.哈尔滨是工业建设的重点地区,受经济发展水平、技术水平、相关政策等驱动因素的影响,教育、医疗和人才等方面的优势比较突出;牡丹江是重要的通商口岸,地理位置优越,经济发展依靠于进出口贸易,经济产业结构较为合理,工业和农业用水量相对较少.哈尔滨和牡丹江均为社会发展速度较快的地区,水环境保护程度较高,在一定程度上能够改善灰水足迹强度,因此形成高高聚集态势.

水资源绿色效率的低低聚集主要位于黑龙江省西北部,由于黑河和绥化具有优越的地理条件,经济产业以第一产业为主,农业人口所占比例较高,城乡发展不均衡,社会发展水平较为落后,导致该地区水资源绿色效率较低.齐齐哈尔是“一五”期间国家投资兴建起来的重工业基地,其产业结构偏向重型高耗水工业,缺少资金和技术的支持,环境规制不够严格,一定程度上加剧了水资源的不合理利用和污染的现象,导致水资源绿色效率较低.2003 年后黑河和绥化的水资源绿色效率由低低聚集区转为不显著地区,而齐齐哈尔则由不显著地区转为低低聚集区,证明水资源绿色效率低的地区会对周围地区产生负向影响.

水资源绿色效率低高聚集主要分布在高高聚集周围,由哈尔滨和双鸭山逐渐转移到佳木斯和鸡西.鸡西有着丰富的煤炭资源,水资源利用量较多,由于资金和技术落后,环境污染治理被忽略,工业灰水足迹较高.而佳木斯处于三江平原腹地,种植作物以水稻为主,由于化肥、农药等的排放加剧水资源的污染,生态环境同样遭到破坏.水资源利用过程中

忽视环境治理,因此鸡西和佳木斯的水资源绿色效率低于周围地区。

2.3 黑龙江省水资源绿色效率影响因素分析

通过时空演变分析得出黑龙江省水资源绿色效率的变化规律,但地区水资源绿色效率的提升机制需要进一步分析.投入和产出变量对于水资源绿色效率具有直接影响,但由于自然资源禀赋、社会经济发展现状和水资源利用政策的差异,各变量对不同地区提高水资源绿色效率的贡献度也有一定的差异.因此,假定6种不同情景,其中情景1、2和3表示在其他变量保持不变的前提下分别改变用水量、劳动力数量和固定资产投资量;情景4、5和6则分别改变GDP、社会综合指数和灰水足迹.由于2015年我国提出了“绿色发展”理念,在国家相关政策的影响下黑龙江省水资源绿色效率普遍提升,因此将2015~2018年各地区投入和产出变量的年平均变化率作为各变量的调整变化率.同时,2018年黑龙江省各变量与现阶段社会实际发展水平相匹配,因此将2018年作为基准年进行模拟.利用SBM模型计算不同情景下各地区的水资源绿色效率,模拟结果以水资源绿色效率相对于2018年的变化率表示,以此分析不同变量的调整对现阶段各地区水资源绿色效率的影响程度(表2).由于哈尔滨、大庆和大兴安岭的水资源绿色效率值在2018年已达到有效值1(图1),不存在效率损失,因此,仅以其余10个未达到有效值的地区为研究对象.

表2 不同情景水资源绿色效率模拟结果(单位:%)

Table 2 Simulation results of green efficiency of water resources under different scenarios(unit:%)

地区	情景1		情景2		情景3		情景4		情景5		情景6	
	用水量 变化率	水资源 绿色效率 变化率	劳动力 变化率	水资源 绿色效率 变化率	固定资 产投资 变化率	水资源 绿色效率 变化率	GDP 增长率	水资源 绿色效率 变化率	社会综 合指数 变化率	水资源 绿色效率 变化率	灰水 足迹 变化率	水资源 绿色效率 变化率
绥化	-2.90	0.98	0.35	-0.09	5.32	-2.05	2.24	2.39	58.48	16.50	-0.94	0.05
齐齐哈尔	0.34	-0.08	-1.43	0.55	7.59	-2.81	1.80	1.84	22.69	5.46	-0.95	0.07
鸡西	-1.14	0.09	-0.99	0.41	1.98	-1.01	1.31	1.24	12.46	2.90	0.00	0.00
佳木斯	8.04	-0.74	0.03	-0.01	4.02	-1.84	7.70	8.10	-5.55	-1.95	-5.68	1.06
七台河	-1.40	0.2	3.76	-1.34	-13.84	6.53	5.58	6.14	-3.40	-1.24	0.00	0.00
伊春	-2.86	0.54	-3.16	1.36	-1.31	0.53	3.37	3.40	9.09	1.98	0.00	0.00
鹤岗	0.50	-0.03	5.50	-2.34	2.91	-1.42	2.92	2.91	8.41	1.82	-17.37	6.97
双鸭山	1.13	-0.10	4.35	-1.52	4.74	-2.54	5.3	5.50	10.11	2.55	-27.87	7.70
黑河	-7.39	3.21	1.28	-0.35	6.11	-1.89	4.11	4.40	12.06	3.00	-23.81	4.89
牡丹江	-1.07	0.47	-0.94	0.35	7.85	-1.52	3.39	4.85	1.76	0.48	-13.40	7.41

从不同变量的角度分析,用水量、劳动力、固定资产投资和灰水足迹对水资源绿色效率的提升产生负向影响,而GDP和社会综合指数对水资源绿色效率具有促进作用.由此可知,在保证各项投入尽可能少的前提下,同时发展相关创新技术以促进经济社会的发展,实现水资源的合理利用,才能真正实现水资源绿色效率的稳步提升.

从地区来看,水资源绿色效率较低的齐齐哈尔、绥化和鸡西,其社会综合指数对水资源绿色效率的提升率分别为16.5%、5.46%和2.90%,与其他因素相比,社会综合指数对于水资源绿色效率的正向影响较为显著;绥化和齐齐哈尔的水资源绿色效率受劳动力和用水量的负向影响.该地区在社会发展稳步提升的同时应该注重引进创新技术和培养高技术人才,实现合理的水资源利用.佳木斯、七台河和伊春的水资源绿色效率受GDP影响较

为明显,变化率分别为 8.10%、6.14%和 3.40%,同时社会综合指数对佳木斯和七台河的水资源绿色效率产生抑制作用。尽管经济水平提高为当地水污染治理提供资金基础和技术支持,提升了水污染防治能力,有利于水资源绿色效率的提升,但经济快速发展的同时要意识到社会高质量发展的必要性。鹤岗、双鸭山、黑河和牡丹江由于灰水足迹的减少,使水资源绿色效率提升率分别为 6.97%、7.70%、4.89%和 7.41%;鹤岗和双鸭山的水资源绿色效率受用水量增加的负向影响,黑河的水资源绿色效率则受劳动力增加的负向影响。灰水足迹是抑制水资源绿色效率提升的重要因素,2015 年以来上述地区水资源污染情况得到有效治理,因此该地区应推动现代农业发展,打造绿色有机产品品牌,同时建立水源保护区,关停高污染企业和治理中小型工业,以此减少废水排放量和提升水资源绿色效率。

2.4 讨论

“绿色发展”是当今时代的主基调,水资源绿色效率与社会、经济和环境等因素相结合,研究了基于经济社会背景下的水资源利用效率。研究期内黑龙江省水资源绿色效率整体较低,这与孙才志等^[8]得出的黑龙江省水资源绿色效率总体处于较低水平的结论一致。鉴于黑龙江省农业用水占比较大,在后续研究中可选择农业用水量和农业污染等方面的指标计算农业水资源绿色效率,使结果更有针对性。此外,水资源绿色效率驱动因素的指标体系中涉及自然、经济和社会等方面,如何建立指标体系并深入研究水资源绿色效率驱动机制,为加快黑龙江省生态文明建设和高质量发展提供决策指导,需在后续研究中进一步完善。

3 结论

基于绿色发展理念,利用 SBM 模型计算黑龙江省 13 个地区 2003~2018 年的水资源绿色效率值并对其时空演化过程进行评价,同时采用空间自相关法对其空间分布聚集性分析,进一步通过模拟分析其影响因素。研究结论如下:

(1)从时间维度分析,黑龙江省总体的水资源绿色效率呈波动上升的趋势,从 0.306 增长到 0.517,但总体效率不高。13 个城市中有 8 个呈上升趋势,变化幅度为 0.11~0.72;

(2)从空间演变过程分析,不同地区水资源绿色效率变化差异较大,南部地区效率值上升较大,北部和中部地区变化幅度较小。黑龙江省应积极响应国家相关政策,以南部地区作为示范区,在保证水资源绿色效率稳步提升的同时,避免两极分化现象的加剧,促进各地区交流水资源高效利用技术,从而形成良性机制,带动中部和北部地区水资源绿色效率协调发展;

(3)从空间聚集性分析,黑龙江省水资源绿色效率局部地区之间存在一定的空间关联性。对于以哈尔滨为中心的高高聚集区,应建立相关机制,积极引导其继续提升水资源绿色效率,还可以通过加强经济联系和产业合作的方式,加强其与周边地区的联系,在保证其稳步发展的同时,辐射带动周边地区水资源绿色效率的提升。对于齐齐哈尔为中心的的低低聚集和低高聚集区佳木斯和鸡西,政府应加强监管力度,培育全民节水观念,增强环境规制,从而缩小与高水平地区的差异,实现绿色城市的建设;

(4)模拟结果表明,不同地区的各变量对水资源绿色效率的敏感度有所差别,应结合地区实际情况制定相关政策。绥化、齐齐哈尔和鸡西受社会发展水平影响较大的地区应积

极推动经济的发展,促进地区产业转型升级,实施地区差异化管理,引进先进技术和人才,提高社会发展水平;鹤岗、双鸭山和黑河以灰水足迹作为主要影响因素的地区在水资源管理过程中不能局限于考虑经济效益,应更多考虑关于水环境影响因素,加强节水技术、水污染防治技术和水资源开发技术的创新力度,同时应出台相关政策增强环境规制,进而减少灰水足迹的产生,实现水资源的高效持续利用。

参考文献

- [1] 陈燕飞,张翔.河流水环境的可恢复性及其评价研究[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):34-46
Chen Yanfei, Zhang Xiang. Water environment resilience and its resilient assessment of rivers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(1): 34-46
- [2] Liang L, Yong Y, Yuan C. Measurement of urban land green use efficiency and its spatial differentiation characteristics: An empirical study based on 284 cities [J]. China Land Sci, 2019, 33: 80-87
- [3] 程永毅,沈满洪.要素禀赋、投入结构与工业用水效率——基于2002—2011年中国地区数据的分析[J].自然资源学报,2014,29(12):2001-2012
Cheng Yongyi, Shen Manhong. Factor endowments, inputs structure and industrial water efficiency: A study based on China's provincial data during 2002—2011 [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2001-2012
- [4] 孙爱军,董增川,王德智.基于时序的工业用水效率测算与耗水量预测[J].中国矿业大学学报,2007,(4):547-553
Sun Aijun, Dong Zengchuan, Wang Dezhi. Prediction of technical efficiency and water consumption of industrial water in China based on time series [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, (4): 547-553
- [5] Dhehibi B, Lachaal L, Elloumi M, et al. Measuring irrigation water use efficiency using stochastic production frontier: An application on citrus producing farms in Tunisia [J]. African Journal of Agricultural and Resource Economics, 2007, 2(1): 1-15
- [6] Speelman S, D'haese M, Buysse J, et al. Technical efficiency of water use and its determinants, study at small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa [J]. Energy Economics and Policy, 2007, 2(3): 1-28
- [7] 张永凯,孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护,2021,37(4):37-43
Zhang Yongkai, Sun Xuemei. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 37-43
- [8] 孙才志,姜坤,赵良仕.中国水资源绿色效率测度及空间格局研究[J].自然资源学报,2017,32(12):1999-2011
Sun Caizhi, Jiang Kun, Zhao Liangshi. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(12): 1999-2011
- [9] 刘静,吴普特,王玉宝,等.基于数据包络分析的河套灌区农业生产效率评价[J].农业工程学报,2014,30(9):110-118
Liu Jing, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Assessment of agricultural productive efficiency for Hetao Irrigation District based on data envelopment analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(9): 110-118
- [10] 朱晓梅,魏加华,杨海娇,等.黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析[J].水资源保护,2022,38(1):153-159
Zhu Xiaomei, Wei Jiahua, Yang Haijiao, et al. Evaluation and driving factor analysis of water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 153-159
- [11] 焦士兴,王安周,张崇崇,等.河南省水资源效率综合测度及时空分异[J].水资源保护,2022,38(2):48-55
Jiao Shixing, Wang Anzhou, Zhang Chongchong, et al. Comprehensive measurement and temporal-spatial analysis of water resources efficiency in Henan province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 48-55
- [12] Hu P, Chen N, Li Y, et al. Efficiency evaluation of water consumption in a Chinese province-level region based on data envelopment analysis [J]. Water, 2018, 10(6): 1-21
- [13] 章恒全,蔡晓莹,黄元龙,等.中国绿色水资源利用效率的时空分布差异[J].水利经济,2020,38(3):1-6
Zhang Hengquan, Cai Xiaoying, Huang Yuanlong, et al. Spatial and temporal distribution differences of green efficiency in utilization of water resources in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(3): 1-6

- [14] Wang K L, Wang J, Wang J, et al. Investigating the spatiotemporal differences and influencing factors of green water use efficiency of Yangtze River Economic Belt in China[J]. PLoS One, 2020, 15(4): 1-24
- [15] 张峰, 王晗, 薛惠锋. 工业绿色全要素水资源效率的空间格局特征[J]. 软科学, 2020, 34(10): 43-49
Zhang Feng, Wang Han, Xue Huifeng. Spatial pattern characteristics of industrial green total factor water resources efficiency[J]. Soft Science, 2020, 34(10): 43-49
- [16] 李健, 谢衡. 京津冀绿色水资源利用效率及其时空差异与驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 10-18
Li Jian, Xie Heng. Calculation of green water resources utilization efficiency in Jing-Jin-Ji urban agglomeration and analysis of its spatio-temporal differences and driving factors[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(6): 10-18
- [17] Zou D, Cong H. Evaluation and influencing factors of China's industrial water resource utilization efficiency from the perspective of spatial effect[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 173-182
- [18] Guo Y, Hu Y, Shi K, et al. Valuation of water resource green efficiency based on SBM-TOBIT panel model: Case study from Henan province, China[J]. Sustainability, 2020, 12(17): 1-17
- [19] Wang G, Chen J, Wu F, et al. An integrated analysis of agricultural water-use efficiency: A case study in the Heihe River Basin in Northwest China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 89: 3-9
- [20] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444
- [21] Banker R D, Charnes A, Cooper W W, et al. Constrained game formulations and interpretations for data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 1989, 40(3): 299-308
- [22] 王成金, 杨威, 许旭, 等. 工业经济发展的资源环境效率评价方法与实证——以广东和广西为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 97-109
Wang Chengjin, Yang Wei, Xu Xu, et al. Appraising model of utilizing efficiency of resources and environment for industry and empirical study in Guangxi and Guangdong[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(1): 97-109
- [23] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509
- [24] Malin S, Linling Z, Qingxian A, et al. Statistical analysis and combination forecasting of environmental efficiency and its influential factors since China entered the WTO: 2002-2010-2012[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 42: 42-51
- [25] 章恒全, 黄元龙, 秦腾, 等. 考虑非期望产出的工业水资源绿色效率研究——基于 SBM-Tobit 面板模型[J]. 水利经济, 2019, 37(5): 35-40
Zhang Henquan, Huang Yuanlong, Qin Teng, et al. Green use efficiency of industrial water resources considering unexpected output based on SBM-Tobit regression model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 35-40
- [26] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程[M]. 北京: 科学出版社, 2010
Wang Jinfeng, Liao Yilan, Liu Xin. Tutorial on spatial data analysis[M]. Beijing: Science Press, 2010
- [27] 辛会杰, 潘玉君. 基于 ESDA 人均耕地面积时空格局变化研究——以河南省为例[J]. 咸阳师范学院学报, 2021, 36(4): 57-61
Xin Huijie, Pan Yujun. Based on the temporal and spatial pattern change of ESDA per capita cultivated land area—Taking Henan Province as an example[J]. Journal of Xianyang Normal University, 2021, 36(4): 57-61
- [28] 郝汉舟, 周校兵. 中国省际绿色发展指数空间计量分析[J]. 统计与决策, 2018, 34(12): 114-118
Hao Hanzhou, Zhou Xiaobing. Spatial econometric analysis on chinese inter-provincial green development index[J]. Statistics & Decision, 2018, 34(12): 114-118
- [29] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115
- [30] 朱庆芳. 衡量城市经济社会发展的新指标体系[J]. 中国经贸导刊, 2001, (13): 11
Zhu Qingfang. A new index system for measuring urban economic and social development[J]. China Economic & Trade Herald, 2001, (13): 11
- [31] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015, (2): 12-15
Zhu Xian, Wei Guodong. Discussion on the fine standard of dimensionless method in entropy method[J]. Statistics & Decision, 2015, (2): 12-15
- [32] Hoekstra Arjeny Chapagain. 水足迹评价手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012
Hoekstra Arjeny Chapagain. The Water Footprint Assessment Manual[M]. Beijing: Science Press, 2012

- [33] 陈红,王浩坤,秦帅.水足迹视角下黑龙江粮食生产用水绿色效率研究——基于三阶段SBM-Malmquist指数分析法[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2790-2804
Chen Hong, Wang Haokun, Qin Shuai. Study on green efficiency of grain water resources in Heilongjiang Province from the perspective of water footprint: Based on Three-stage Sbm-malmquist index analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12): 2790-2804
- [34] Zhang L, Dong H, Geng Y, et al. China's provincial grey water footprint characteristic and driving forces [J]. Science of The Total Environment, 2019, 677: 427-435
- [35] 黑龙江省统计局.黑龙江统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2004—2018
Bureau of Statistics of Heilongjiang. Heilongjiang Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2004—2018
- [36] 黑龙江省水利厅.黑龙江省水资源公报[M].哈尔滨:黑龙江人民出版社,2003—2018
Heilongjiang Water Resources Department. Heilongjiang Water Resources Bulletin [M]. Harbin: Heilongjiang People's Publishing House, 2003—2018

Calculation of Green Water Resources Efficiency in Heilongjiang Province and Analysis of Spatial-temporal Evolution and Influencing Factors

JIANG Qiuxiang, LONG Ruirui, WANG Zilong, WANG Jinjing,
WU Yunxing, GUO Weipeng

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract

Calculating the green water resources efficiency is of significance for achieving the green development concept and the water resources efficient utilization. We measured the green water resources efficiency in Heilongjiang Province from 2003 to 2018 and analyzed the spatial-temporal evolution using the slack based measure (SBM) model. And the spatial aggregation of the green water resources efficiency through the spatial autocorrelation method. The influencing factors were analyzed by adjusting scenario simulation of input and output variables. The results show that the average green water resources efficiency in Heilongjiang Province is at a low level, but it shows a fluctuating upward trend. The green water resources efficiency in the southern part of Heilongjiang Province has increased greatly, and the efficiency in the northern region has also increased. The efficiency in the eastern and western regions is relatively low and has not changed much. The green water resources efficiency has the characteristics of spatial aggregation. High-high aggregation and low-low aggregation are located in the southern and western regions, respectively, and low-high aggregation is distributed in the eastern region. Water consumption, labor, fixed asset investment and grey water footprint have a negative impact on the green water resources efficiency, while GDP and social comprehensive index play a positive role, and the main influencing factors in different regions are also different. The finding can be used to strengthen regional water resources management and optimize water resources utilization, and further promote the sustainable development of Heilongjiang Province.

Keywords: SBM model; green water resources efficiency; spatial-temporal evolution; spatial autocorrelation analysis; spatial aggregation; influence factor; Heilongjiang Province