

黄河流域经济规模与水资源边际效益异速增长 时空特征及驱动因素

马维兢¹, 张闻顺¹, 李程祎², 寇敬雯¹, 王梅梅¹, 薛冰³

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 宁夏大学经济管理学院, 银川 750021;
3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要: 在柯布一道格拉斯生产函数的基础上, 尝试构建了黄河流域“经济规模—水资源边际效益”异速增长模型, 并通过多元线性回归模型与地理加权回归模型探究了水资源边际效益的关键影响因素及其空间异质性。结果表明: 2007—2020年黄河流域三次产业水资源边际效益的多年平均值分别为 102.34 元/m³、3755.56 元/m³、457.73 元/m³, 总体呈现增长趋势。农业经济规模—水资源边际效益以正异速增长为主, 工业呈现先负异速后正异速的阶段性变化趋势, 第三产业以负异速增长为主。工业废水达标率、有效灌溉面积、第一产业比例、人均绿地面积、第三产业比例为黄河流域水资源边际效益的主要影响因素。研究结果有助于正确认识黄河流域经济增长与水资源之间的权衡与协同。

关键词: 边际效益; 异速增长; 柯布一道格拉斯函数; 地理加权回归; 黄河流域

水资源是社会、经济、环境可持续发展最重要的自然资源之一, 也是支持生态系统功能不可或缺的生态资源, 对人类生活和自然保护至关重要^[1]。根据最新的预测, 到 2050 年全球将会出现超过 50 亿的人口因为水资源的匮乏而陷入困境^[2]。中国是一个水资源严重稀缺的发展中国家, 水资源在时间和空间分布上存在显著的异质性^[3]。在生态文明建设背景下, 如何协调水资源与经济社会发展之间的内在矛盾、促进二者协同发展是水资源可持续利用面临的问题之一^[4,5]。

边际效益表示每增加一个单位投资要素, 所造成的生产总值产量增加量, 并考虑在另外的经济活动或决策单元中所得到的超额利润。水资源边际效益反映着经济体制调节政策对水资源利用效率的直接影响, 水资源边际效益的计算可以成为区域水资源优化配置的主要依据^[6]。目前国内外学者关于水资源带来的经济效益在各部门的分配, 以达到合理分配用水量、提高经济效益的目的, 已经进行了大量的理论和实践研究。关于水资源边际效益的主要研究方法有边际效益法^[7]、水足迹法^[8]、影子价格法^[9]、分摊系数法^[10]、残值法^[11]、成本效益分析法^[12]、机会成本法^[13]等。由于不同时期、不同地区经济发展水平、技术水平、用水量等的不同, 水资源边际效益存在明显差异。如 J. Warford 等^[14]对水价格和用水关系进行研究, Ward 等^[15]对水资源价格与水资源配置的关系进行了研究。水资源利用边际效益研究可为水资源系统合理配置与优化、水资源投资决策、水资源项目效益评价等提供重要的参考。

生产函数反映了生产要素投资组合与最大产出之间的经济关系, 是将最大产出归属

收稿日期: 2023-04-17; 修订日期: 2023-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42201302); 兰州大学“双一流”建设人才引进项目 (561120213)

作者简介: 马维兢 (1988-), 男, 宁夏中宁人, 博士, 研究员, 研究方向环境经济与环境管理。

E-mail: maweijing@lzu.edu.cn

于生产要素投资的指数型分配的重要理论基础^[16]。通过将水资源视为生产要素之一,利用其对产出函数中生产要素进行的弹性分析,可以评估水资源的边际效益^[17]。目前大多数学者进行的是关于水资源利用效率的研究以及水资源效率的测算^[18,19],在研究尺度上,主要以省域为研究单元^[20,21]。从时间、空间角度全面分析三次产业水资源边际效益以及深入探讨经济规模与边际效益异速增长关系的研究较少。近年来运用数理经济模型的动态前沿方法在边际效益测算中得到了广泛的应用,可以较为简便地测算水资源边际效益。

通过异速增长模型探索经济增长与水资源边际效益的关系可以更加直观地展现区域水资源边际效益现状,从而更加精准地协调水资源在各区域、各部门的分配,以使整体的水资源边际效益最大化。赫胥黎等^[22]在1936年创造了“异速增长(Allometry)”一词,是指两个因素之间的不成比例的发展和生长关系,并将其用于相对增长领域。这一方法也正被越来越多地应用于非生物学领域。纳罗尔等^[23]最初将异速增长定律引入社会科学,以研究城市化。Lee^[24]运用异速增长法则研究表明美国城市体系存在负异速增长现象。近年来随着分形理论的引入与发展,人们逐渐深化了对异速增长法则的理解与认识。目前,异速增长模型逐渐应用于地理研究的许多领域^[25,26],用以分析一个地区局部与整体之间的相对发展速度。因此将异速增长分析作为表征经济规模与水资源边际效益相对增长关系的方法运用到经济规模与边际效益的研究中,可促进研究的深入,调整经济发展方式,实现水资源的合理分配和有效利用,推动黄河流域朝着高质量发展的方向迈进。促进经济社会的可持续繁荣发展,为其他城市群和地区的经济发展与水资源分配提供宝贵的实践借鉴。

黄河流域是中国重要的区域经济板块,也是重要的生态功能区、基础工业基地、人口密集区^[27,28]。长期面临着水资源不足、水资源供需结构矛盾等诸多问题,黄河流域可持续发展面临着挑战^[29,30]。经过历史上的长期开发以及近年来的发展和建设,黄河流域区域经济取得了巨大成就,基本形成了有利于未来发展的国土空间发展格局和经济社会格局。但由于资源开发等的过快增加,区域资源环境受到严峻挑战,面临水资源等关键自然资源稀缺、利用效率不高等诸多问题^[31]。一定条件下,提高用水效益是满足重要行业用水需求和达到总体利益最大化的必然结果^[32]。因此,如何将水资源合理地分配到各部门,使得水资源经济效益总体达到最大,成为黄河流域高质量发展亟需解决的问题^[33]。

因此,本文以黄河流域为例,主要探讨以下几个问题:(1)运用柯布一道格拉斯生产函数,将水资源作为生产要素分三次产业来计算黄河流域各省域的水资源边际效益并探究其时空异质性;(2)尝试构建“经济规模—水资源边际效益”异速增长模型,探究经济发展与水资源边际效益的相对增长关系;(3)构建黄河流域水资源边际效益影响因素的理论框架,并利用双对数回归模型以及地理加权回归模型探索其主要的影响因素以及黄河流域水资源边际效益影响因素是否具有明显的空间异质性。研究结果对于指导水资源在各部门的合理分配,缓解人水矛盾、促进经济增长方式转变,使水资源产生最大的经济效益,从而完善区域综合发展具有重大的意义。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 柯布一道格拉斯生产函数

水资源边际效益是指在其他条件不变的情况下,增加一单位水带来的产出增加量。

柯布—道格拉斯生产函数可以表示产出与雇佣劳动力、固定资产投资之间的函数关系。表达式为:

$$Y = AK^\alpha L^\beta \quad (1)$$

式中: Y 为国民生产总值(亿元); A 为常数,表示效率系数; K 表示资本(亿元); L 表示劳动力(万人); α 表示资本弹性; β 表示劳动弹性。

将水资源作为投入要素纳入生产函数中,从而计算水资源对国民收入的贡献率,公式为:

$$Y = AK^\alpha L^\beta W^r \quad (2)$$

式中: A 表示技术效率; L 表示劳动力(万人); K 表示固定资产投资(亿元); W 表示用水量(亿 m^3); r 为用水弹性^[34]。

通过水资源弹性系数求得水资源边际效益。将式(2)进行线性化:

$$\ln Y = \ln A + \alpha \ln L + \beta \ln K + r \ln W \quad (3)$$

然后,求解式(3)中 W 的偏导数,可得:

$$X = \frac{\partial Y}{\partial W} = r \times \frac{Y}{W} \quad (4)$$

式中: X 为水的边际效益; Y/W 为每单位用水量所产生的产出,表明水资源的边际效益可以通过用水弹性系数乘以万元产值用水量的倒数来表示。

规模报酬是所有投入按相同比例变化引起的产出变化,即生产规模变化引起的产出的变化情况。在水资源生产函数中, $\alpha + \beta + r$ 可称为规模弹性。

当 $\alpha + \beta + r = 1$ 时,规模报酬不变;

当 $\alpha + \beta + r > 1$ 时,规模报酬呈现递增趋势;

当 $\alpha + \beta + r < 1$ 时,规模报酬呈现递减趋势。

运用 γ (称为折算用水弹性系数)可以有效消除规模弹性造成的影响,从而更加准确地反映水资源投入要素对产出的影响:

$$\gamma = r/(\alpha + \beta + r) \quad (5)$$

1.1.2 异速增长模型

异速增长是生物学和生态学中一个经典的尺度概念,反映了生物体部分和整体之间虽然相似,但表达方式却截然不同。异速增长关系一般被定义为系统中局部的增长率与整个系统的增长率相比较,这两者的描述方式虽然不同,但表达的意思是相似的。相对增长率之间存在一种恒定的比例关系。在某一特定时间尺度上,不同速度的增长之间存在着非线性的关系。异速增长模型计算公式表达了一个结果随着时间的推移呈指数级增长的关系。异速增长模型计算公式为^[24]:

$$D_t = aE_t^b \quad (6)$$

对式(6)两边取对数:

$$\ln D_t = \ln a + b \ln E_t \quad (7)$$

式中: D_t 是 t 时刻水资源边际效益; E_t 是 t 时刻经济规模; a 是比例系数; b 是标度指数。研究表明,异速增长系数 b 处于 $2/3 \sim 1$ 之间,平均值约为0.85,即 $b = 0.85$ ^[35,36]时,经济规模与水资源边际效益等速增长; $b > 0.85$ 时,为正异速增长,此时经济规模相对增速小

于水资源边际效益相对增速； $b < 0.85$ 时，为负异速增长，此时经济规模相对增速大于水资源边际效益相对增速。将正异速增长划分为两级、负异速增长划分为三级，各异速级别划分标准及特征见表1。

表1 经济规模与水资源边际效益的异速增长关系的协调分类表				
Table 1 Allometric growth relationship classification table for economic scale and marginal benefits of water resources				
增长类型	异速级别	划分标准	异速关系类型	异速关系特征
正异速增长	正异速2级	$1 < b < 2$	边际效益扩张强型	边际效益相对增长速度远高于经济规模的相对增长速度
	正异速1级	$0.85 < b < 1$	边际效益扩张弱型	边际效益相对增长速度稍高于经济规模的相对增长速度
负异速增长	负异速1级	$0.5 < b < 0.85$	经济扩张弱型	边际效益相对增长速度稍低于经济规模的相对增长速度
	负异速2级	$0 < b < 0.5$	经济扩张强型	边际效益相对增长速度远低于经济规模的相对增长速度
	负异速3级	$b < 0$	经济环境有所收缩	边际效益和经济规模其中一个减少或同时减少

1.1.3 双对数回归模型

使用双对数回归模型有几个潜在的优势。首先，它能够转换数据，使之更符合线性回归的假设。其次，对数变换可以减小异方差的问题，即方差在不同水平上的变化不均匀的情况。此外，对数变换还可以使数据更易于解释，因为回归系数可以被解释为自变量的弹性。因此本文选用模型^[37]如下：

$$\ln y_i = a_0 + a_1 \ln x_{i1} + a_2 \ln x_{i2} + \cdots + a_n \ln x_{in}$$

(8)

式中： y 为用水边际效益； a_0 为常数项； a_1, a_2, \cdots, a_n 分别为各回归系数； $i=1, 2, 3$ 分别代表三次产业，即 y_1 代表农业用水边际效益， $y_2、y_3$ 同理； $x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in}$ 分别为各产业相对的影响因素的值。

1.1.4 地理加权回归

采用地理加权回归模型（Geographically Weighted Regression Model，GWR）^[38]，探究各个影响因素在不同地域空间的异质性。GWR是基于普通偏最小二乘法（Ordinary Partial Least，OPLS）的一种扩展模型，GWR模型的一般公式如式：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$

(9)

式中： y_i 为因变量； $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距； x_{ik} 为第*i*个样本的第*k*个自变量； (u_i, v_i) 是样本*i*的坐标； $\beta_k(u_i, v_i)x_{ik}$ 为样本*i*的第*k*个自变量的系数； $\varepsilon_i (i=1, 2, 3, \cdots, k)$ 为随机扰动项。

1.2 研究区概况

受不同地形及气候的影响，黄河流域九省区水资源分布不均。中上游部分地处干旱半干旱气候区，水资源较为穷乏。由于经济发展的诉求，黄河流域对于水资源的使用量也逐渐增大，其水资源供需矛盾问题日趋严重。

如图1所示，从用水结构上来看，黄河流域农业用水量明显高于其他产业用水量。2007—2019年，农业用水总量占总用水量的63.86%~68.31%，表明农业用水是黄河流域用水大户。工业用水占总用水量的13.57%~17.91%；第三产业用水占总用水量的14.62%~22.58%，工业用水和第三产业用水量占比相差不大，明显低于农业用水量，三次产业用

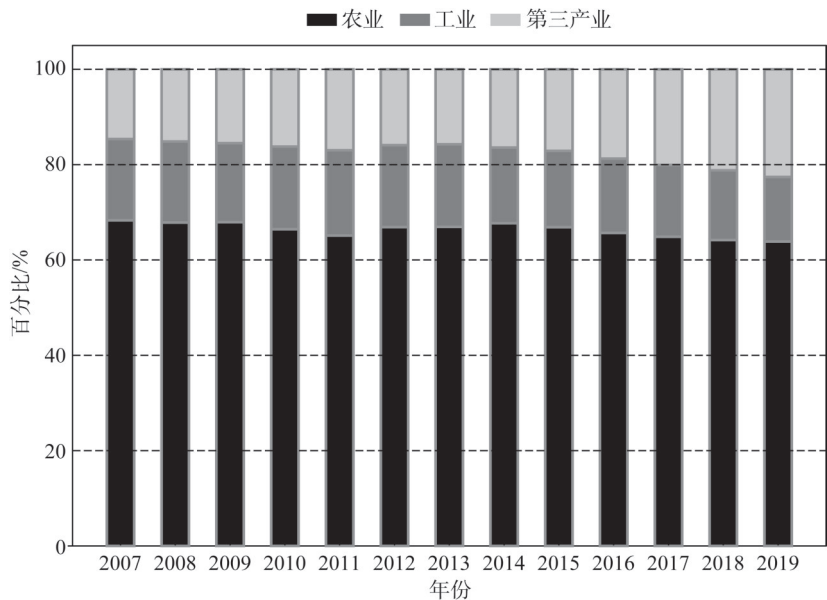


图1 黄河流域三次产业多年用水百分比

Fig. 1 Percentage of annual water use by the three industries in the Yellow River Basin

水量多年比例基本一致，第三产业用水近几年来有小幅度的上升。

如表2所示，黄河流域耕地实际灌溉亩均用水量除了甘肃、青海、宁夏外，全部低于全国平均水平，可见黄河流域节水工作取得明显成绩。然而还存在部分省份人均用水浪费现象。例如宁夏人均用水量高达1011 m³，远远超过全国平均用水量的431 m³。整体来看，宁夏、青海人均用水量高于全国平均水平，水资源浪费严重，其耕地实际灌溉亩均用水量也高于全国水平。

1.3 数据来源

本文基于柯布一道格拉斯生产函数所需指标数据，将黄河流域九省区三次产业用水

表2 黄河流域主要用水指标与全国主要用水指标情况比较

Table 2 Comparison of the main water use indicators in the Yellow River Basin and the main national water use indicators

地区	耕地实际灌溉亩均 用水量/m ³	农业灌溉水有效利 用系数	城镇居民人均生活用 水量/(L/d)	农村居民人均生活 用水量/(L/d)	人均综合用水量 /m ³
山西	189	0.546	97	63	204
内蒙古	271	0.547	96	84	752
山东	169	0.643	87	68	224
河南	157	0.615	119	72	247
四川	365	0.477	163	107	302
陕西	287	0.577	113	85	239
甘肃	446	0.565	80	45	416
青海	478	0.500	108	69	432
宁夏	706	0.543	112	30	1011
全国	368	0.559	139	89	431

量作为投入指标,采取黄河流域九省区2007—2020年相关数据进行分析处理,数据来源于黄河流域各省份统计年鉴、《中国统计年鉴》、水资源公报以及各省份水利厅等部门公布的相关统计数据。

2 结果分析

2.1 黄河流域水资源边际效益

2.1.1 黄河流域水资源边际效益时空演变分析

如图2所示,黄河流域九省区边际效益总体呈现增长趋势。其中第三产业用水边际效益涨幅最高,2007—2020年间涨幅超过了200%,农业用水和工业用水边际效益涨幅也都超过了180%。就边际效益值来看,黄河流域工业用水边际效益明显高于农业和第三产业用水边际效益,研究期间农业用水边际效益多年平均值为102.34元/m³,而工业用水边际效益高达3755.56元/m³。

2.1.2 黄河流域各省区农业用水边际效益分析

如图3所示,黄河流域农业用水边际效益在2007—2020年总体呈现增长趋势。增长幅度较大的依次是山东省从2007年的19.33元到2020年的52.02元、山西省从2007年的16.73元到2020年的43.7元、河南省从2007年的13.33元到2020年的32.2元。其余省份边际效益较小,且变化幅度不大。

山东省农业用水边际效益从2007年到2019年上涨了169%。山东省农业用水边际效益一直呈现增长状态,然而其农业用水量一直是黄河流域内最多的省份。山东省水资源先天不足,水资源成为现在制约其高质量发展的瓶颈。河南省的情况与山东省类似,其农业用水边际效益较高并且连年增长,耕地实际灌溉亩均用水量、降水量均小于全国水平,可见高效节水建设的完善,但是仍需要解决水资源不足的发展瓶颈问题。内蒙古、甘肃、宁夏、青海、陕西农业用水边际效益较低且多年变化幅度不大,其中青海省农业用水边际效益最低,2020年仅相当于山东省的5.8%,青海省农业用水弹性系数为0.68,即青海省农业用水每增加一个单位,农业万元产值仅增加0.68单位。四川省农业用水弹性系数为-0.69,表明四川省的农业用水处于饱和状态。

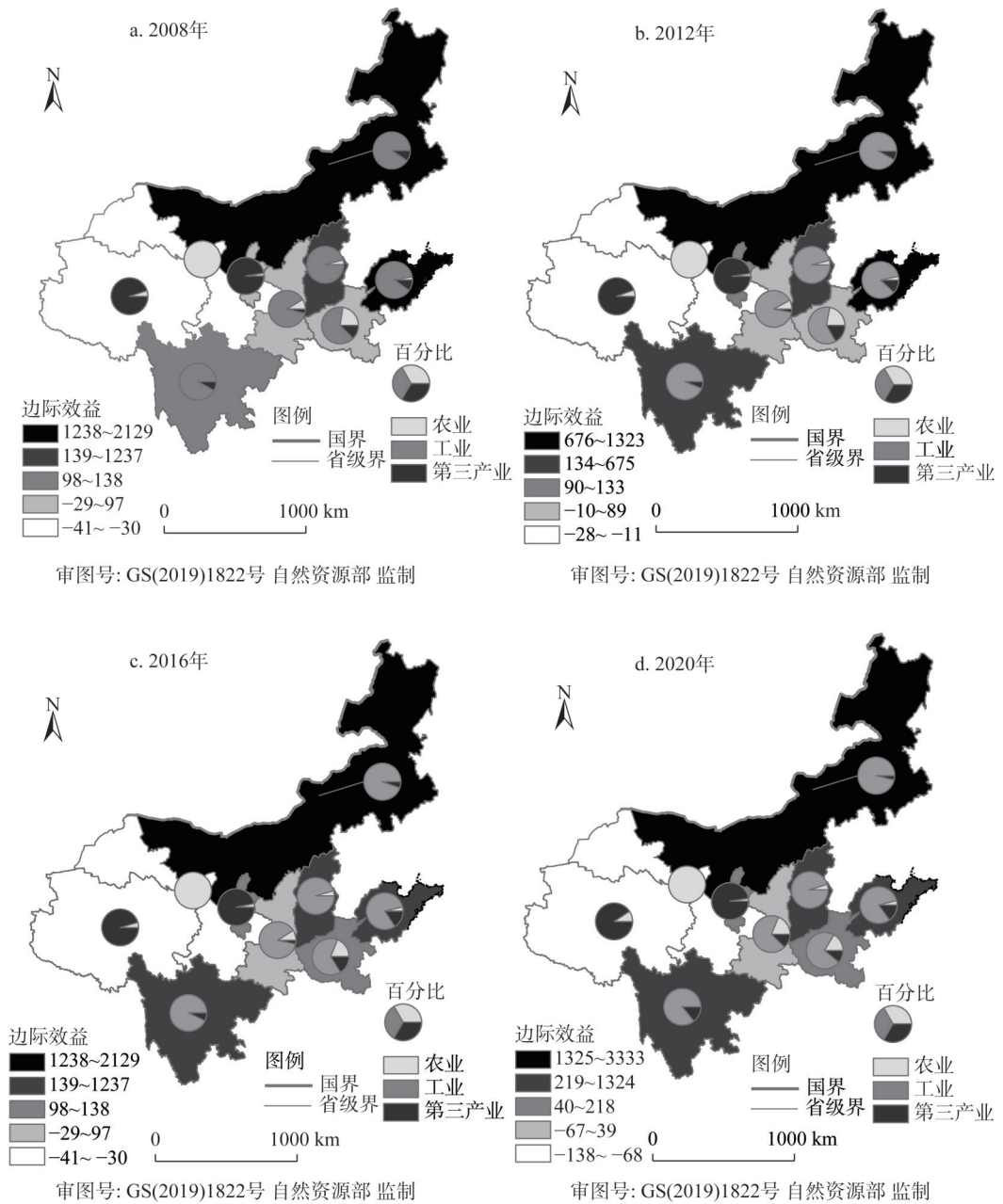
2.1.3 黄河流域各省区工业用水边际效益分析

如图4所示,2007—2020年黄河流域各省区工业用水边际效益除了内蒙古外波动幅度相对较缓,总体呈现上升趋势。

其中边际效益最高的地区是内蒙古,工业用水边际效益从2007年的758.21元上升到2020年的3192.23元,研究期间工业用水边际效益涨幅达到321%。工业用水弹性系数达到了6.23,表明每增加一个单位工业用水,工业万元生产总值增加6.23个单位。山东、四川、山西工业用水边际效益依次减少,研究期间增长幅度都超过了100%。其中甘肃、青海、宁夏三省区的弹性系数为负值,表明工业用水处于饱和状态,继续增加工业用水量意义不大。

2.1.4 黄河流域各省区第三产业用水边际效益分析

由图5所示,第三产业用水边际效益总体呈上升趋势,并且各省区变化情况差异明显,呈现出阶段性特点。其中宁夏的增长速度最快,从2007年的61.04元到2020年的234.3元,



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图2 各省区水资源边际效益及各产业比例

Fig. 2 The marginal benefits of water resources in each province and the proportion of each industry

增长率达到了283%。其次是山东、内蒙古，增长率也都超过了100%。从2019年到2020年宁夏、山东、四川三个省区的边际效益都有较大的提高，主要是由于黄河流域高质量发展的提出，提高了水资源的利用效率和效益，第三产业生产总值加大。青海、河南、陕西其第三产业用水弹性系数较小，接近饱和，但仍为正值。山西、甘肃的边际效益都为负值，表明第三产业用水已经饱和。

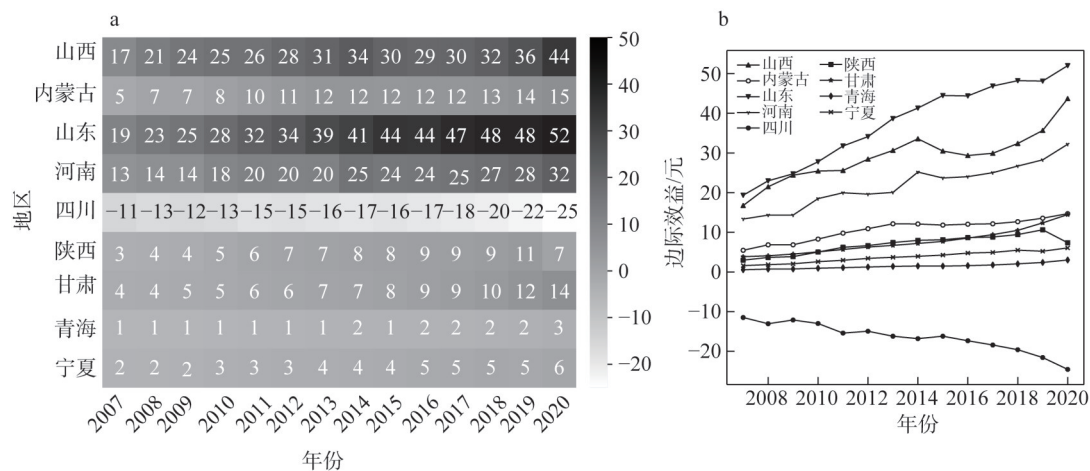


图3 黄河流域各省区农业用水边际效益

Fig. 3 Marginal benefits of agricultural water use in the provinces of the Yellow River Basin

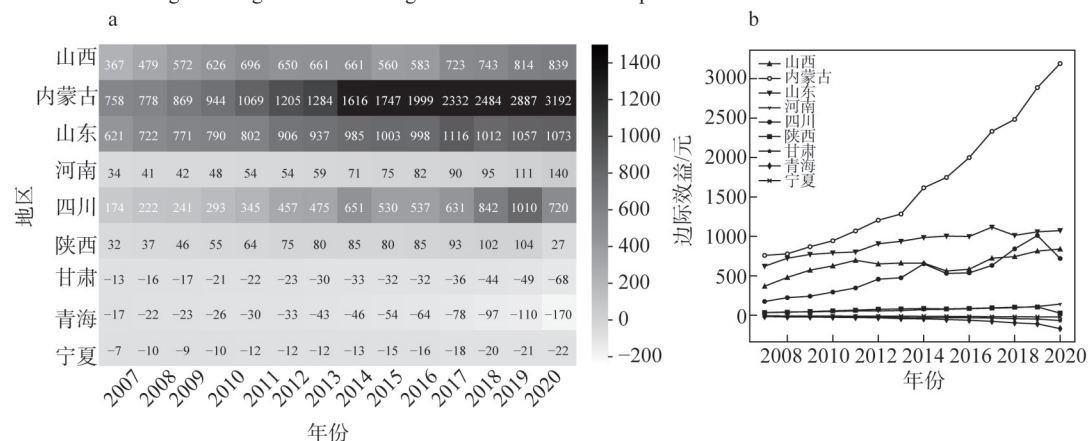


图4 黄河流域各省区工业用水边际效益

Fig. 4 Marginal benefits of industrial water use in the provinces of the Yellow River Basin

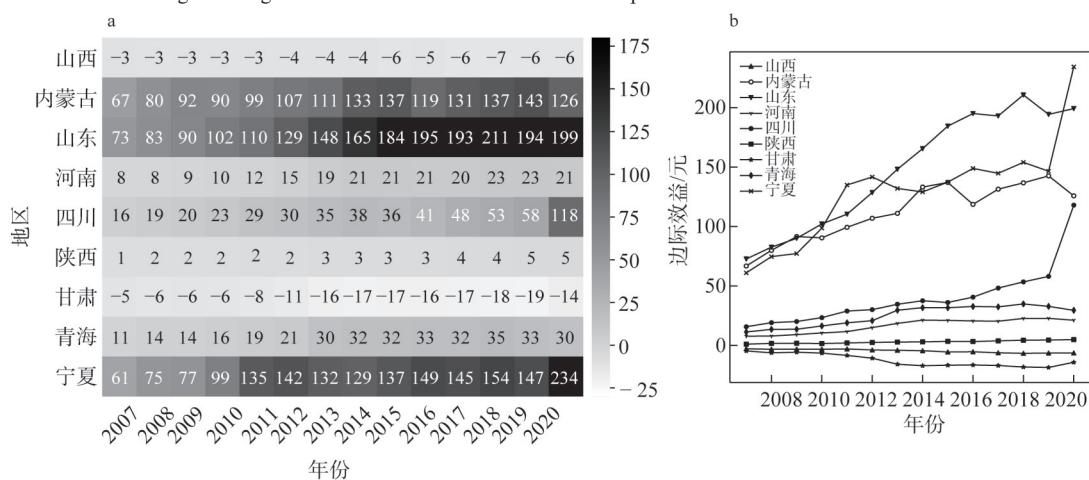


图5 黄河流域各省区第三产业用水边际效益

Fig. 5 Marginal benefits of water use for the tertiary industry in the provinces in the Yellow River Basin

2.2 黄河流域经济规模—水资源边际效益异速增长特征

2.2.1 农业经济规模—农业用水边际效益的横向异速关系

由图6可以看出, 2007—2013年农业经济规模—农业用水边际效益以正异速增长为主, 仅有山西、四川为负异速。其中异速最大值为山东1.163。2014—2020年农业经济规模—农业用水边际效益以正异速增长为主, 除了四川农业用水边际效益达到饱和之外其余省份全都需要加大农业用水的投入, 其中异速最大值为山东1.501, 说明此时水资源边际效益增速远高于经济规模增速, 因此可增加山东农业用水的投入, 促进经济规模的提升, 会更加促进水资源水边际效益的提升。

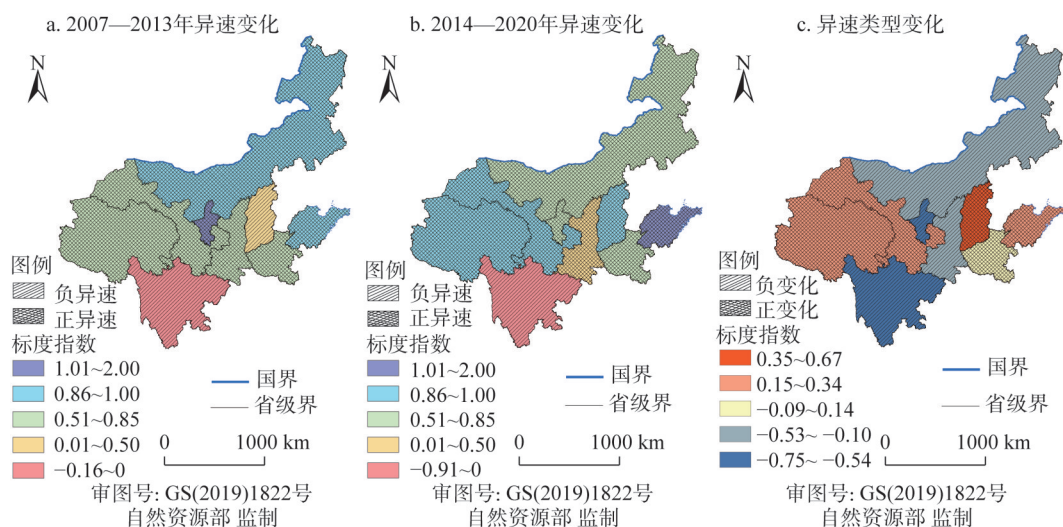


图6 农业经济规模—边际效益异速变化

Fig. 6 The scale of agricultural economy-marginal benefit changes at different speeds

比较2007—2013年和2014—2020年农业经济规模—农业用水边际效益异速的变化。其中向下变动型为内蒙古、山西、宁夏, 表明这些省区边际效益增速下降。而山东、河南、陕西、青海为向上变动型, 反映出这些省份相对来说边际效益增加更加容易。因此可以加大这些省份的农业用水投入, 使其农业用水边际效益整体达到最大化, 从而更加合理有效地利用好水资源。

2.2.2 工业经济规模—工业用水边际效益的横向异速关系

由图7可以看出, 2007—2013年工业经济规模—工业用水边际效益以负异速增长为主, 仅有四川、陕西为正异速。2014—2020年工业经济规模—工业用水边际效益以正异速增长为主, 其中甘肃、青海、宁夏工业用水边际效益达到饱和。

比较2007—2013年和2014—2020年工业经济规模—工业用水边际效益异速的变化。其中向下变动型为山东、陕西、甘肃、宁夏和青海。而山西、内蒙古、河南、四川为向上变动型, 反映出这些省区工业用水边际效益增加更加容易。并且这些省区在2014—2020年间全部为正异速, 因此可以加大这些省区的工业用水投入, 使其工业用水边际效益整体达到最大化, 从而更加合理有效地利用好水资源。

2.2.3 第三产业经济规模—第三产业用水边际效益的横向异速关系

由图8可以看出, 2007—2013年第三产业经济规模—第三产业用水边际效益以负异

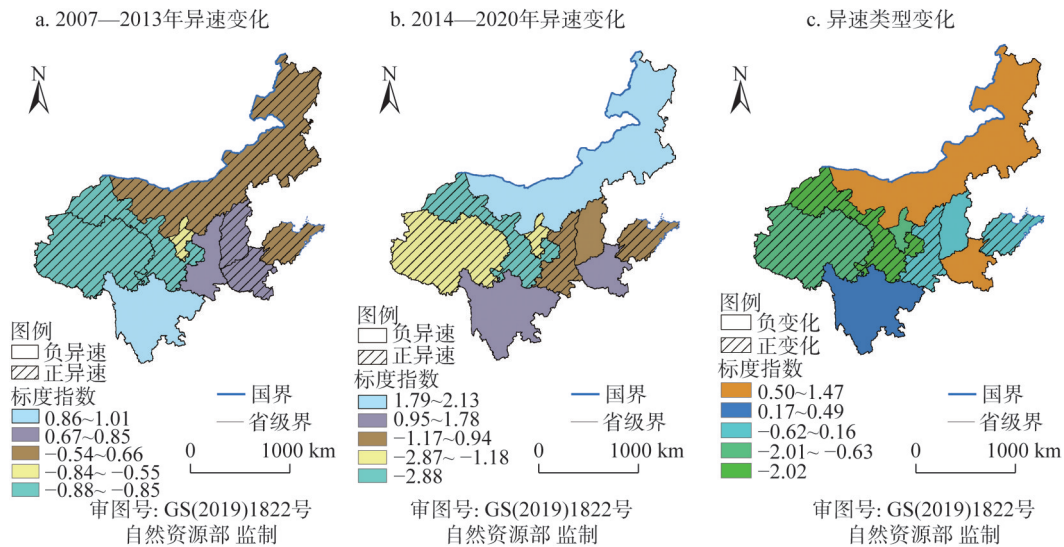


图7 工业经济规模—边际效益异速变化

Fig. 7 Industrial economic scale-variation of marginal benefits

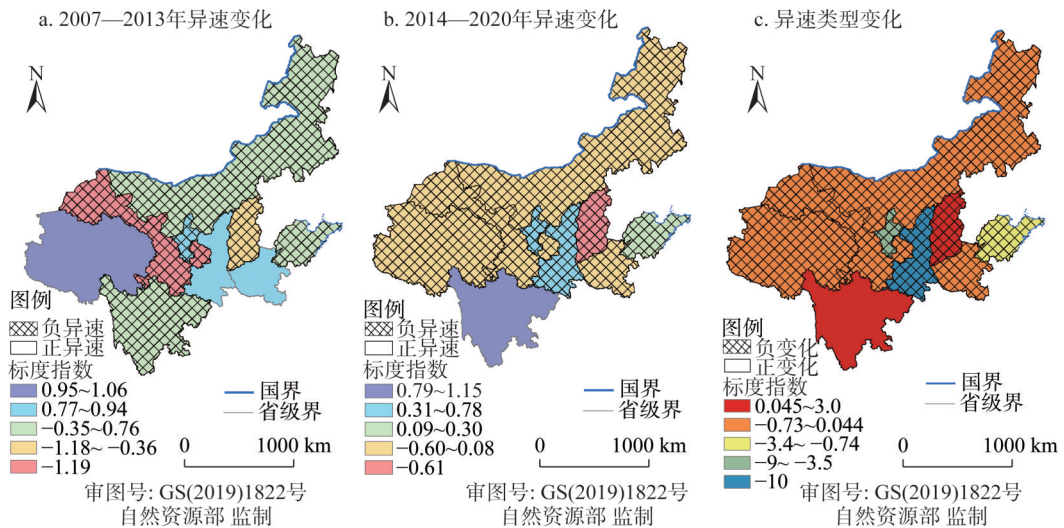


图8 第三产业经济规模—边际效益异速变化

Fig. 8 The economic scale of the tertiary industry-variation of marginal benefits

速增长为主，仅有河南、陕西、青海为正异速。其中异速最大值为青海的1.06。2014—2020年第三产业经济规模—第三产业用水边际效益以负异速增长为主，其中山西、青海第三产业用水边际效益达到饱和，仅有四川为正异速，其异速值为1.46。

比较2007—2013年和2014—2020年第三产业经济规模—第三产业用水边际效益异速的变化。大部分省份为向下变动型，仅四川、甘肃为向上变动型。反映出这两个省份第三产业用水边际效益增加更加容易。并且四川省在2014—2020年间为正异速，因此可以加大这些省份的第三产业用水投入，使其第三产业用水边际效益整体达到最大化，从而更加合理有效地利用好水资源。

2.3 黄河流域水资源边际效益影响因素分析

2.3.1 指标构建

综合前人研究经验^[32,39-42]，影响因素必须考虑生产要素的投入和产出两方面的内容，由于黄河流域各省区的地理环境、经济发展水平、三次产业的技术水平等的不同，其产业间以及不同地区间的水资源边际效益差异明显。因此根据地理环境、经济发展水平、技术水平、产业结构等构建水资源边际效益影响因素指标体系，如表3所示。

表3 黄河流域水资源边际效益影响因素指标体系

Table 3 Influence factors index system for the marginal benefits of water resources in the Yellow River Basin			
类别	影响因子	单位	指标说明
农业	有效灌溉面积	千 hm ²	按折纯算法计算
	化肥使用量	万 t	
	农业万元产值用水量	m ³ /万元	
	粮食单位面积产量	kg/hm ²	
	第一产业比例	%	
	政策因素	%	农业固定资产投资/总投资
工业	劳动生产率	%	工业增加值/从业人员人数
	工业万元产值用水量	m ³ /万元	反映工业用水技术水平
	第二产业比例	%	
	工业废水达标率	%	
	政策因素	%	工业固定资产投资/总投资
第三产业	城市化水平	%	城镇人口/总人口
	人均绿地面积	hm ²	第三产业固定资产投资/总投资
	第三产业比例	%	
	第三产业万元产值用水量	m ³ /万元	
	政策因素	%	

2.3.2 影响因素分析

在进行回归分析之前首先对相关数据取对数，之后进行皮尔森相关性分析，结果如表4所示。

采用线性回归模型对黄河流域三次产业水资源边际效益进行分析，得到相应的分析结果见表5。

其中工业废水达标率、有效灌溉面积、第一产业比例、人均绿地面积、第三产业比例均通过了显著性检验，工业万元产值用水量、农业万元产值用水量、城市化水平、政策因素没有通过显著性检验。因此认为工业废水达标率、有效灌溉面积、第一产业比例、人均绿地面积、第三产业比例是影响黄河流域三次产业水资源边际效益最主要的影响因素。

由图9可知，有效灌溉面积、人均绿地面积、工业废水达标率、第三产业比例均呈现正向作用。工业用水边际效益受到工业废水达标率的影响较大。农业用水边际效益受到有效灌溉面积、第一产业比例影响较大。基于产业结构与发展现状，想要通过降低第一产业比例提高水边资源际效益的可行性较低，因此需要促进灌溉技术的研发等手段提高水资源利用率，从而实现提升农业用水边际效益的目的；人均绿地面积、第三产业比

表4 相关性分析结果

Table 4 Correlation analysis results

	指标	工业万元产值用水量	工业废水达标率		
工业	相关性	-0.635**	0.713**		
	p值	0.000	0.000		
	指标	有效灌溉面积	农业万元产值用水量	第一产业比例	
农业	相关性	0.530**	0.323*	-0.624**	
	p值	0.000	0.030	0.000	
	指标	城市化水平	人均绿地面积	政策因素	第三产业比例
第三产业	相关性	0.491**	0.844**	-0.295*	0.521**
	p值	0.001	0.000	0.049	0.000

注：*表示在0.01级别（双尾）相关性显著，*表示在0.05级别（双尾）相关性显著。

例为促进第三产业水资源边际效益的重要影响因素。因此有必要适当加大第三产业比例，并提高人均公园绿地面积。从经济效益角度来看，人均公园绿地面积创造了通过吸引外来人口与当地入旅游消费的直接经济效益以及通过净化空气、水质等提高环境效益的间接经济效益。

2.3.3 GWR模型检验

本文利用地理加权回归进一步对黄河流域三次产业水资源边际效益各影响因素进行分析，以探索其是否具有明显的时空异质性。

通过研究发现有效灌溉面积、农业万元产值用水量、第一产业比例、人均绿地面积、第三产业比例、工业万元产值用水量这6个影响因素最终消除了多重共线性的影响，因此选取这6个影响因子进行了地理加权回归分析，以探求三次产业水资源边际效益影响因素的空间异质性，结果如图10所示。

有效灌溉面积对青海、四川影响作用最大，对于山东、内蒙古影响作用最小。农业万元产值用水量对青海影响作用最大，对山东影响作用最小。第一产业比例对青海、甘肃、内蒙古影响作用最大，对河南影响作用最小。由此表明，农业用水边际效益影响因素对于青海、甘肃影响作用最大，四川、内蒙古次之，对于山东的影响最不明显。工业用水边际效益影响因素对于内蒙古和甘肃影响最为明显，对于青海、宁夏、山西次之，对于四川、河南、陕西、山东影响效果最不明显。人均绿地面积对山东影响作用最大，内蒙古、山西、河南次之，对青海的影响效果最不明显。第三产业比例对青海、甘肃影响作用最大，四川、宁夏次之，对山东影响效果最不明显。因此第三产业用水边际效益影响因素对于整体来说影响效果较为均匀。

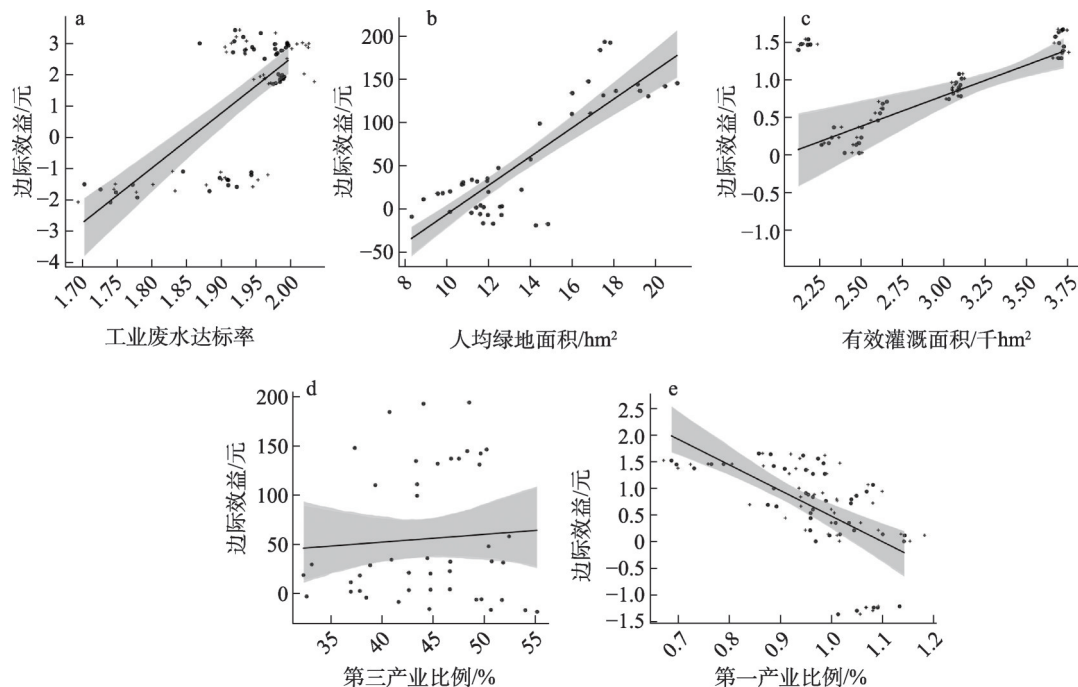
表5 回归模型分析结果

Table 5 Analysis results of regression model

变量	标准化系数	p值
工业万元产值用水量	-0.152	0.426
工业废水达标率	0.588	0.003
有效灌溉面积	0.539	0.000
农业万元产值用水量	0.038	0.698
第一产业比例	-0.644	0.000
城市化水平	-0.169	0.077
人均绿地面积	1.035	0.000
政策因素	-0.125	0.132
第三产业比例	-0.236	0.009

3 讨论

2007—2020年，黄河流域农业用水量占总用水量的63%~68%，水资源利用率相对较



注：阴影表示置信区间，+表示在原数据基础上加上一个小范围的浮动（抖动）。

图9 水资源边际效益主要影响因素回归分析

Fig. 9 Regression analysis of main factors affecting marginal benefits of water resources

低。由于黄河流域农业用水需求量较大，因此如何利用农业用水资源对于提高整体经济效益至关重要。内蒙古、甘肃、宁夏、青海、陕西由于经济发展水平的限制以及农业科技水平的不足、相关基础设施不够完善等原因导致农业用水边际效益值较低，农业总产值也会较低。四川降水丰富，水资源充足，由于其农业用水达到饱和，农业用水相对供给比较充沛，因此建议四川可以适当减少农业用水量，将更多的水资源投入到其他产业。除四川农业用水达到饱和，黄河流域上中游农业用水边际效益较低。黄河下游省份相对农业用水效率较高，仍存在水资源不足的问题。

黄河流域三次产业用水边际效益空间差异明显。随着工业化进程的加快，内蒙古工业用水短缺问题亟需解决，需要更多的水资源投入到工业生产中，更需要加快节水型工业的发展和成熟。山东、四川、山西工业用水边际效益依次减少，研究期间增长幅度都超过100%。这三个省份工业基础雄厚，工业生产总值较高，水资源利用率提高，边际效益不断增长。陕西、甘肃、青海、宁夏边际效益较低，经济相对落后，工业基础相对欠发达，传统耗水企业较多，节水工业不够成熟。总体来说，黄河上游省份工业用水较为充足，水资源边际效益较低。黄河中下游省份相对工业基础较好，水资源边际效益较高，因此需要提升黄河上游省份水资源利用效率，并且将水资源适当分配到下游省份，提高整体的经济效益。青海、甘肃、山西相对较差的经济发展水平和管理水平导致水资源浪费现象较多，因此边际效益偏低。而第三产业发达的山东、四川第三产业用水边际效益较高，因此经济发展水平的提高有利于提高水资源的利用效率。

研究表明，经济发展水平、科技水平等是对水资源边际效益影响力较大的因素^[43]。

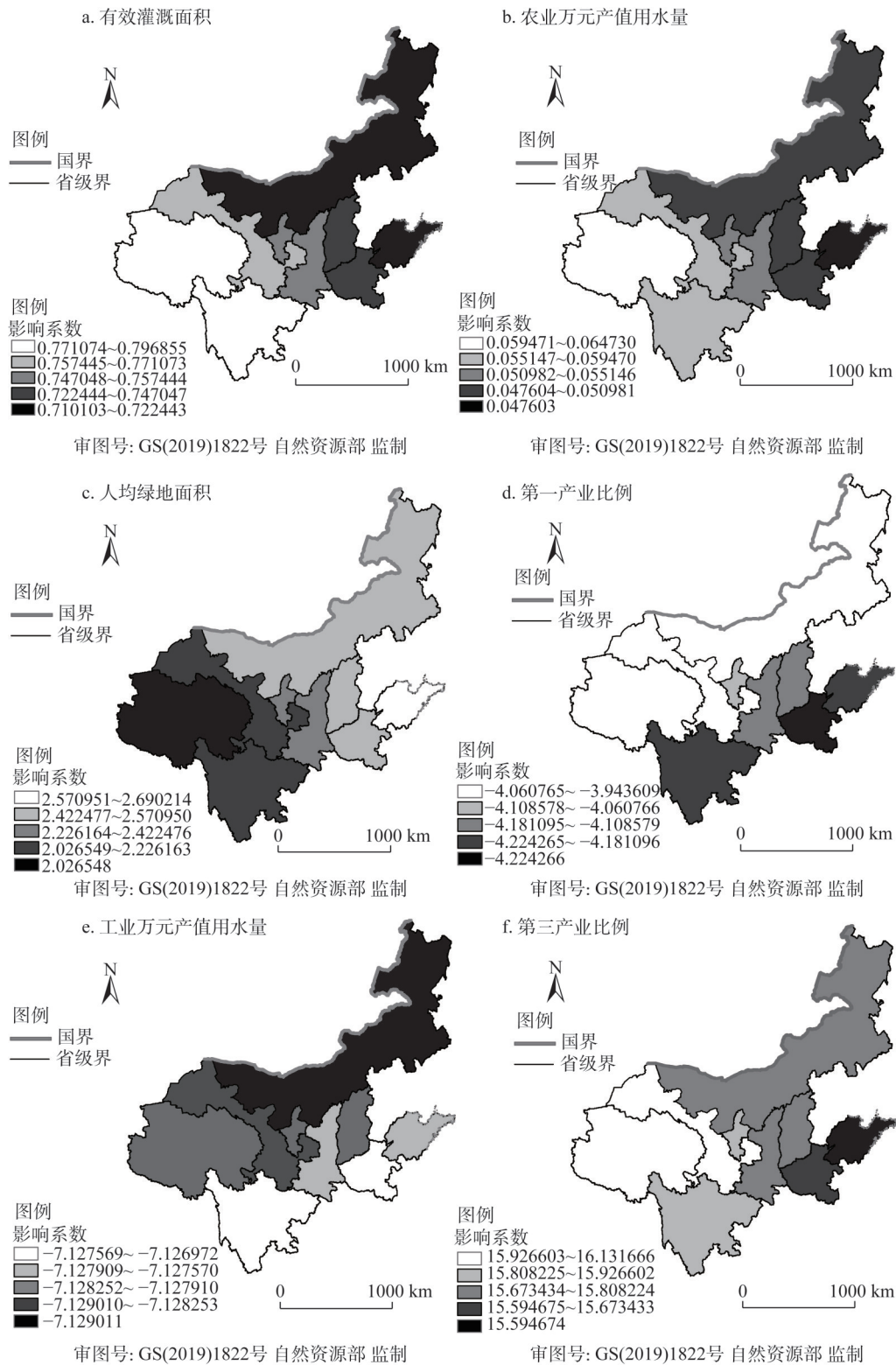


图 10 水资源边际效益影响因素空间异质性

Fig. 10 Spatial heterogeneity of factors affecting marginal benefits of water resources

农业经济规模—农业用水边际效益以正异速增长为主,仅有山西、四川为负异速。2007—2013年和2014—2020年农业经济规模—农业用水边际效益异速变化向下变动型为内蒙古、山西、宁夏,向上变动型为山东、河南、陕西、青海。2007—2013年工业经济规模—工业用水边际效益以负异速增长为主,2014—2020年工业经济规模—工业用水边际效益以正异速增长为主,其中甘肃、青海、宁夏工业用水边际效益达到饱和。第三产业经济规模—第三产业用水边际效益以负异速增长为主。2007—2013年和2014—2020年农业经济规模—农业用水边际效益异速变化大部分为向下变动型,仅四川、甘肃为向上变动型。

工业废水达标率、有效灌溉面积、第一产业比例、人均绿地面积、第三产业比例,为黄河流域水资源边际效益的主要影响因素。各影响因素正负影响在各省份相同,并且具有明显的空间异质性,其中青海、甘肃、内蒙古在农业用水边际效益和工业用水边际效益方面受到影响效果最为显著,山东、河南、山西受影响效果最不明显。因此需要针对性着力发展现代农业,提高节水技术,大力发展现代农业;提高工业水平,大力推进生产过程的先进技术改造和生产设备更新换代,应用先进适用技术提升水资源经济效益;不断优化第三产业结构,完善基础设施建设,使黄河流域水资源达到可持续利用。

4 结论

本文基于边际效益理论,首先运用生产函数理论计算了黄河流域三次产业水资源边际效益,并基于此构建了经济规模—边际效益异速增长模型,之后建立影响因素理论框架,并通过双对数线性回归模型探究三次产业用水边际效益的主要影响因素,最后运用地理加权回归模型,尝试探索黄河流域三次产业水资源边际效益各影响因素是否具有明显的空间异质性。最终得到主要结论如下:

(1) 黄河流域三次产业用水边际效益总体呈现增长趋势,第三产业用水边际效益增长最为迅速,幅度最大超过200%。农业、工业用水边际效益增长速度大致相同,相对较缓,涨幅也都超过了180%;总体来说农业用水边际效益在三次产业中明显最低。黄河流域农业用水的需求量不断增长,因此有必要对如何利用农业用水,提高水资源经济效益进行重点研究;随着工业化进程的加快,许多省份工业用水短缺问题亟需解决,需要更多的水资源投入到工业生产中,更需要加快节水型工业的发展和成熟。

(2) 农业经济规模—农业用水边际效益以正异速增长为主,仅有山西、四川为负异速。2007—2013年和2014—2020年异速变化类型中向下变动型为内蒙古、山西、宁夏,山东、河南、陕西、青海为向上变动型;2007—2013年以负异速增长为主,2014—2020年以正异速增长为主,其中甘肃、青海、宁夏工业用水边际效益达到饱和;第三产业以负异速增长为主。2007—2013年和2014—2020年异速变化大部分为向下变动型,仅四川、甘肃为向上变动型。

(3) 黄河流域水资源边际效益主要影响因素有:工业废水达标率、有效灌溉面积、第一产业比例、人均绿地面积、第三产业比例,并且各影响因素具有明显的空间异质性。虽然黄河流域各省份受到三次产业相关影响程度各不相同,但是青海、甘肃、内蒙古在农业用水边际效益和工业用水边际效益方面受到影响效果最为显著,山东、河南、

山西受影响效果最不明显。为此, 应该不断提高灌溉和节水技术, 优化产业结构与种植结构, 大力发展现代农业。同时需要不断提升工业技术水平, 逐步提高污水资源利用率, 不断加强水资源的节约利用。并且通过合理调整第三产业结构、改善基础设施建设, 实现对黄河流域水资源的可持续利用。

基于黄河流域高质量发展背景, 黄河流域水资源的合理分配有着迫切的现实诉求, 受数据资料以及边际成本核算复杂性的制约, 研究基于柯布—道格拉斯生产函数测算了水资源边际效益, 并且尝试构建经济规模—边际效益异速增长模型。在分析各产业水资源边际效益影响因素的基础上, 运用双对数回归模型探索其主要的影响因素, 并分区探测影响因素的空间异质性, 以期揭示不同区域三次产业水资源边际效益驱动力的空间差异。研究结果将为黄河流域水资源和经济协调发展提供更具针对性的意见和建议, 以便更好地实现“绿水青山”与“金山银山”的有机统一^[44]。

参考文献(References):

- [1] NOURI H, STOKVIS B, GALINDO A, et al. Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: The effect of soil mulching and drip irrigation. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 241-252.
- [2] MICHELLE V V, EDWARD J, MARTINA F, et al. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(2): 1-13.
- [3] ZHANG Y, KHAN S U, SWALLOW B, et al. Coupling coordination analysis of China's water resources utilization efficiency and economic development level. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 373(1): 133874, Doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133874.
- [4] MARASENI T, AN-VO D-A, MUSHTAQ S, et al. Carbon smart agriculture: An integrated regional approach offers significant potential to increase profit and resource use efficiency, and reduce emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 282: 124555, Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124555.
- [5] RAVAR Z, ZAHRAIE B, SHARIFINEJAD A, et al. System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security and nexus in Gavkhuni Basin in Iran. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105682, Doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105682.
- [6] AYF Z, BYPL A, CJ S, et al. Optimizing water resources allocation and soil salinity control for supporting agricultural and environmental sustainable development in Central Asia-Science Direct. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135281, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135281.
- [7] 岳思羽, 李怀恩. 渭河干流宝鸡段水资源边际效益的研究. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 19-24. [YUE S Y, LI H N. Study on the marginal benefits of water resources in Baoji section of main stream of Weihe River. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(2): 19-24.]
- [8] DUMONT A, SALMORAL G, LLAMAS M R. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir Basin (Spain). *Water Resources and Industry*, 2013, 1: 60-76.
- [9] BIERKENS M F, REINHARD S, DE BRUIJN J A, et al. The shadow price of irrigation water in major groundwater-depleting countries. *Water Resources Research*, 2019, 55(5): 4266-4287.
- [10] ARENA C, CANNAROZZO M, FORTUNATO A, et al. Evaluating infrastructure alternatives for regional water supply systems by model-assisted cost-benefit analysis: A case study from Apulia, Italy. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 1460-1469.
- [11] KIPROP J K, LAGAT J, MSHENGA P, et al. Determining the economic value of irrigation water in Kerio Valley Basin (Kenya) by residual value method. *Journal of Economics and Sustainable Development*, 2015, 6(7): 102-107.
- [12] SANDERS G D, MACIEJEWSKI M L, BASU A. Overview of cost-effectiveness analysis. *The Journal of the American Medical Association*, 2019, 14: 1400-1401.

- [13] LU C, ZHAO T, SHI X, et al. Ecological restoration by afforestation may increase groundwater depth and create potentially large ecological and water opportunity costs in arid and semiarid China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 1213-1222.
- [14] J. WARFORD G S J, 杨宜勇, 邱天朝. 资源、环境管理与经济发展: 发展中国家的资源环境管理与经济政策. *中国人口·资源与环境*, 1992, 2(1): 78-84. [J. WARFORD G S J, YANG Y Y, QIU T C. Environmental management and economic development. *China Population, Resources and Environment*, 1992, 2(1): 78-84.]
- [15] WARD F A, MICHELSEN A J W P. The economic value of water in agriculture: Concepts and policy applications. *Water Policy*, 2002, 4(5): 423-446.
- [16] 房汉国. 产出缺口估算与通货膨胀关系研究: 基于生产函数法. *当代经济*, 2022, 39(4): 3-9. [FANG H G. Research on the relationship between output gap estimation and inflation: Based on the production function method. *Contemporary Economics*, 2022, 39(4): 3-9.]
- [17] MOHAJAN H, KJAOSHUE S. Estimation of cost minimization of garments sector by cobb-douglas production function: Bangladesh perspective. *Annals of Spiru Haret University, Economic Series*, 2021, 21(2): 267-299.
- [18] MENON M, CASSON S A, WARREN J M, et al. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 103, Doi: 10.3389/fpls.2019.00103.
- [19] ZOU D, CONG H. Evaluation and influencing factors of China's industrial water resource utilization efficiency from the perspective of spatial effect. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 60(1): 173-182.
- [20] 王智勇, 王劲峰, 于静洁, 等. 河北省平原地区水资源利用的边际效益分析. *地理学报*, 2000, 55(3): 318-328. [WANG Z Y, WANG J F, YU J J, et al. Analysis on marginal revenues of water in Hebei province. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 318-328.]
- [21] 刁子乘, 赵晶. 中国北方地区工业用水边际效益及影响因素研究. *人民珠江*, 2022, 43(11): 8-15. [DIAO Z C, ZHAO J. Marginal benefit of industrial water use in Northern China and its influencing factors. *Pearl River*, 2022, 43(11): 8-15.]
- [22] HUXLEY J S, TEISSIER G. Terminology of relative growth. *Nature*, 1936, 137(3471): 780-781.
- [23] NAROLL R S, VON BERTALANFFY L. The principle of allometry in biology and the social sciences. *General Systems Yearbook*, 1956, 1(Part II): 76-89.
- [24] LEE Y. An allometric analysis of the US urban system: 1960-1980. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1989, 21(4): 463-476.
- [25] BATTY M, CARVALHO R, HUDSON-SMITH A, et al. Scaling and allometry in the building geometries of Greater London. *The European Physical Journal B*, 2008, 63(3): 303-314.
- [26] LOBO J, BETTENCOURT L M, STRUMSKY D, et al. Urban scaling and the production function for cities. *PLoS One*, 2013, 8(3): e58407, Doi: 10.1371/journal.pone.0058407.
- [27] REN H, LIU B, ZHANG Z, et al. A water-energy-food-carbon nexus optimization model for sustainable agricultural development in the Yellow River Basin under uncertainty. *Applied Energy*, 2022, 326: 120008, Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120008.
- [28] 金凤君, 马丽, 许堃, 等. 黄河流域产业绿色转型发展的科学问题与研究展望. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 537-543. [JIN F J, MA L, XU D, et al. Scientific issues and research prospects of industries green transformation of Yellow River Basin. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(4): 537-543.]
- [29] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 等. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504-509. [FU B J, WANG S, SHEN Y J, et al. Mechanism of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River Basin. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(4): 504-509.]
- [30] LU C, JI W, HOU M, et al. Evaluation of efficiency and resilience of agricultural water resources system in the Yellow River Basin, China. *Agricultural Water Management*, 2022, 266: 107605, Doi: 10.1016/j.agwat.2022.107605.
- [31] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略. *改革*, 2019, (11): 33-39. [JIN F J. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. *Reform*, 2019, (11): 33-39.]
- [32] 盖美, 郝慧娟, 柯丽娜, 等. 辽宁沿海经济带水资源边际效益测度及影响因素分析. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 78-

91. [GAI M, HAO H J, KE L N, et al. The Marginal benefit of water resources and its influence factors in Liaoning Coastal Economic Belt. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 78-91.]
- [33] LETCHER R A, CROKE B F W, JAKEMAN A J, et al. Integrated assessment modelling for water resource allocation and management: A generalised conceptual framework. *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22(5): 733-742.
- [34] 吕素冰. 水资源利用的效益分析及结构演化研究. 大连: 大连理工大学, 2012. [LYU S B. Benefit analysis of water use and evolution of water consumed structure. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.]
- [35] 王成新, 王波涛. 基于结构视角的中国人口城市化与土地城市化异速增长研究. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(8): 135-141. [WANG C X, WANG B T. Study on population urbanization allometric growth on China based on the structural. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(8): 135-141.]
- [36] 尹上岗. 长三角地区城市人口—绿地面积异速增长特征及驱动机制. *地理研究*, 2021, 40(10): 2780-2795. [YIN S G. The characteristics and driving mechanism of allometric growth of urban and green space area in the Yangtze River Delta region population. *Geographical Research*, 2021, 40(10): 2780-2795.]
- [37] 沈杨, 汪聪聪, 高超, 等. 基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 329-342. [SHEN Y, WANG C C, GAO C, et al. Spatio-temporal distribution and its influencing factors of carbon emissions in economic zone of Zhelang Bay Area based on urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 329-342.]
- [38] 赵泳春, 苏方林. 经济差异化增长下生态系统服务价值的时空演变特征: 以珠江—西江经济带为例. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1782-1798. [ZHAO Y C, SU F L. Spatio-temporal dynamic characteristics of the ecosystem service values under differential economic growth: A case study of the Pearl River-West River Economic Belt. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1782-1798.]
- [39] ZHANG X, XU D, WANG Z. Optimizing spatial layout of afforestation to realize the maximum benefit of water resources in arid regions: A case study of Alxa, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320(1): 128827, Doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128827.
- [40] WANG G, XIAO C, QI Z, et al. Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun city, China. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107232, Doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107232.
- [41] ZHANG Y, LIU W, CAI Y, et al. Decoupling analysis of water use and economic development in arid region of China: Based on quantity and quality of water use. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143275, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143275.
- [42] CHEN Y, YIN G, LIUKJ R, CONSERVATION, et al. Regional differences in the industrial water use efficiency of China: The spatial spillover effect and relevant factors. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167: 105239, Doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105239.
- [43] 许海东. 基于 Cobb-Douglas 生产函数的城市工业用水资源边际效益研究. *水利技术监督*, 2019, 147(1): 107-109. [XU H D. Study on marginal benefits of urban industrial water resources based on cobb-douglas production function. *Technical Supervision in Water Resources*, 2019, 147(1): 107-109.]
- [44] 尹上岗, 杨山, 龚海波. 长三角工业经济规模与污染排放异速关系及互动机制. *地理学报*, 2022, 77(9): 2202-2218. [YIN S G, YANG S, GONG H B. The allometric relationship and interaction mechanism of industrial economics and the emissions of industrial pollution in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2202-2218.]

Spatiotemporal characteristics and driving factors of allotropic growth of economic scale and marginal benefits of water resources in the Yellow River Basin

MA Wei-jing¹, ZHANG Wen-shun¹, LI Cheng-yi², KOU Jing-wen¹,
WANG Mei-mei¹, XUE Bing³

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Economics and Management, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Institute of Applied Ecology, CAS, Shenyang 110016, China)

Abstract: On the basis of the Cobb- Douglas production function, for the first time, we constructed an allometric growth model of "economic scale - marginal benefit of water resources" in the Yellow River Basin (YRB), and further explored the key factors affecting the marginal benefits of water resources and their spatial heterogeneity through multiple linear regression models and geographically weighted regression models. The results show that the multi-year averages of the marginal benefits of water resources of the three industries in the YRB from 2007 to 2020 were 102.34 yuan/m³, 3755.56 yuan/m³, and 457.73 yuan/m³, respectively, showing an overall growth trend. The scale of agricultural economy-the marginal benefit of water resources was dominated by positive allometric growth, the industry presented a phased change trend of first negative allometric growth and then positive allometric growth, and the tertiary industry was mainly in negative allometric growth. The industrial wastewater discharge standard-meeting rate, the effective irrigation area, the proportion of the primary industry, the per capita green area, and the proportion of the tertiary industry were the main factors affecting the marginal benefit of water resources in the YRB. The research results are beneficial to correctly understand the trade-off and synergy between economic growth and water resources in the YRB.

Keywords: marginal benefit; allometric growth; Cobb- Douglas function; geographically weighted regression; Yellow River Basin