

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0021

黄硕俏, 吴泽宁, 狄丹阳. 水资源工业生产价值能值评估及空间分布[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 202-208. HUANG S X, WU Z N, DI D Y. Study on emergy and spatial distribution of industrial production value of water resources [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 202-208. (in Chinese)

水资源工业生产价值能值评估及空间分布

黄硕俏, 吴泽宁, 狄丹阳

(郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001)

摘要:从生态经济学的角度,运用能值分析方法,以黄河流域60个地市为研究对象,量化了流域水资源工业生产价值,并通过空间自相关分析法,研究了水资源工业生产价值空间分布特征。结果表明:黄河流域水资源工业生产价值介于16.3~26.9元/m³,流域中东部价值较高;黄河流域水资源工业生产价值全局Moran(莫兰)指数为0.3271,呈显著的正向空间自相关特征;Moran散点图和LISI(局部空间关联)聚集图显示,黄河流域水资源工业生产价值以“H-H”(高值)型集聚为主,主要集中在流域中东部。研究成果可为黄河流域工业系统水量分配提供理论支撑,为流域水资源优化配置提供数据参考。

关键词:能值;水资源;工业生产价值;空间自相关;黄河流域

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on emergy and spatial distribution of industrial production value of water resources

HUANG Shuoqiao, WU Zening, DI Danyang

(School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: From the perspective of eco-economics, the emergy analysis method was used to quantify the industrial production value of water resources in 60 cities of the Yellow River basin, and the spatial distribution characteristics of industrial production value of water resources were studied by spatial autocorrelation analysis. The results showed that the industrial production value of water resources in the Yellow River basin ranged from 16.3 to 26.9 yuan/m³, and this value was higher in the middle and eastern parts of the basin. The global Moran index of the industrial production value of water resources in the Yellow River basin was 0.3271, which showed a significant positive spatial autocorrelation. Moran scatter plot and LISI agglomeration map showed that the industrial production value of water resources in the Yellow River basin was mainly "H-H" (high value) agglomeration, which mainly gathered around the middle and eastern parts of the basin. This study can provide theoretical support for water allocation in the industrial system of the Yellow River basin and data reference for optimal allocation of water resources in the basin.

Key words: emergy; water resources; industrial production value; spatial autocorrelation; the Yellow River basin

“水资源短缺、空间分布不均”是我国的基本国情和基本水情^[1-2]。当前,我国水资源空间分布与地区工业发展水平不相匹配^[3],该问题在黄河流域表

现得尤为突出。按省级行政分区来看,黄河流域水资源量以青海省的208.33亿m³为最多,占流域水资源总量的29.5%;宁夏为10.51亿m³,仅占流域

收稿日期:2019-05-06 修回日期:2019-07-12 网络出版时间:2019-07-18
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190717.1314.002.html>
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404404)
作者简介:黄硕俏(1994—),女,浙江丽水人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:2722273465@qq.com
通信作者:狄丹阳(1990—),女,河南洛阳人,博士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:didanyanghs@163.com

水资源量的 1.5%,为省级行政区最小值^[4-5]。水资源短缺,空间分布不均,日益成为制约黄河流域可持续发展的瓶颈^[6]。为解决水资源供需矛盾,寻找水资源合理分配的理论依据,专家学者们对水资源价值展开了丰富的研究。王勇等人^[7]以 CGE 模型为工具,计算了张掖市工、农业生产的边际水价,但该方法所要求的资料量大且计算困难。毛春梅等^[8]以水资源价值理论为基础,采用影子价格法计算了黄河流域水资源价值,但没有进行水资源价值空间差异分析。另一方面,目前的水资源价值研究在内容上多忽视了水资源的自然属性,在尺度上多集中于时序视角下的省级行政区域或市级行政区域的研究,基于流域层面的水资源价值空间分布研究较少。本研究采用能值方法对水资源工业生产价值进行量化,使水资源价值的核算更具客观性,运用空间自相关分析法分析水资源工业生产价值空间分布特征,丰富了水资源价值研究的内容。本研究为制定差别化的水资源分配政策提供理论依据和决策参考,也可为其他流域的同类研究提供借鉴。

1 研究方法

1.1 能值理论与方法

能值是指一种流动或贮存的能量所包含另一种类别能量的数量^[9],实质是包被能。任何形式的能量均源于太阳能,故以太阳能为基准,将不同种类、不可比较的能量、物质转换成同一量纲的能值^[10],用以衡量和比较不同类别、不同等级能量的真实价值^[11]。形成任何资源、产品或者劳务所直接或间接应用的太阳能之量,就是其所具有的能值。计算公式为

$$EM = \tau \times B \quad (1)$$

式中:EM 为能值, sej; τ 为能值转换率, sej/J 或 sej/g; B 为能量或物质的质量, J 或 g。

能值/货币比率是反映工业系统的资源开发程度及工业现代化水平的指标。能值/货币比率越高,表示单位货币所换取的能值财富越多,说明地区工业发展对自然资源的依赖性较大,工业现代化水平较低。计算公式为

$$EDR = EM_U / GNP \quad (2)$$

式中:EDR 为能值/货币比率, sej/元; EM_U 为全社会全年使用的能值, sej; GNP 为国民生产总值, 元。

结合对黄河流域工业结构的分析,对区域尺度的水资源价值能值量化方法^[12-16]进行改进,提出流域尺度的水资源价值能值量化方法。黄河流域涉及的空间大、范围广,伴随着能量和物质的转换、迁移,水

体的能值转换率也在不断变化。因此,根据能值转换率的基本计算原理将黄河流域天然水体太阳能值转换率的计算分为以下三个区段:①头道拐以上段。②头道拐至花园口段。③花园口以下段。计算公式为

$$\tau = EM_W / W \quad (3)$$

式中: τ 为流域天然水体能值转换率, sej/m³; EM_W 为流域年降水总能值, sej/a; W 为流域降水量, m³。

水资源工业生产价值是用货币形式表示单位水资源对工业生产的贡献量。水资源工业生产价值越大,说明单方水对工业生产贡献的效益越高。计算公式为

$$EM \$_{PI} = \frac{EM_{IY} \times EM_{IW}}{EM_{IU} \times W_1 \times EDR} \quad (4)$$

式中: $EM \$_{PI}$ 为水资源工业生产价值, 元/m³; EM_{IY} 为工业产出总能值, sej; EM_{IW} 为工业用水能值, sej; EM_{IU} 为工业投入总能值, sej; W_1 为工业用水量, m³; EDR 为能值/货币比率, sej/元。

1.2 空间自相关分析

空间自相关分析法在揭示某区域某种地理现象或某一属性值与邻近区域的某种现象或属性值的关联程度上具有独特优势,得到学术界的普遍认可^[17],主要分为全局空间自相关和局部空间自相关。

1.2.1 全局空间自相关分析

全局空间自相关用于分析流域水资源工业生产价值整体空间关联程度,判断是否存在空间集聚现象。常用全局 Moran 指数 I ^[18-20] 表征,计算公式为

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 (\sum_i \sum_j w_{ij})} \quad (5)$$

式中: I 为全局 Moran 指数; X_i 为流域某地市 i 的水资源工业生产价值; W_{ij} 为空间权重矩阵,如果 i 与 j 相邻,则权重设置为 1,反之则为 0; \bar{x} 为流域水资源工业生产价值的平均值; S^2 为流域水资源工业生产价值的方差。

全局 Moran 指数 I 的含义见表 1。

表 1 全局 Moran 指数的意义
Tab. 1 Significance of global moran index

I 值	关联模式	代表的意义
$I > 0$	正相关	正向同质的空间集聚效应;越接近于 1,空间集聚效应越明显
$I = 0$	不相关	不存在空间相关性
$I < 0$	负相关	整体存在明显差异;越接近-1,空间差异越显著

1.2.2 局部空间自相关分析

局部空间自相关主要考察流域某地市水资源工业生产价值与邻近地市的空间集聚程度。通过局部

空间自相关分析,可以确定流域水资源工业生产价值空间聚集类型和集聚位置。常用局部 Moran 指数 I_i [21-23] 表征,计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (6)$$

式中: I_i 表示局部 Moran 指数,其余符号及意义同前。

实际研究中,常用 Moran 散点图和 LISA 集聚图来表征区域局部空间单元之间的关系。Moran 散点图分为 4 个象限:第一象限为 H-H 关联模式,表示高值地地聚集;第二象限为 L-H 关联模式,表示高值地地包围低值地地;第三象限为 L-L 关联模式,表示低值地地聚集;第四象限为 H-L 关联模式,表示低值地地包围高值地地。与全局 Moran 指数相比,Moran 散点图的优势在于可以识别出流域各个地地水资源工业生产价值的空间聚集模式,LISA 集聚图则可以显示空间聚集位置。

2 实例应用

2.1 研究区域概况

黄河流域地处我国北中部,位于东经 $95^{\circ}53' \sim$

$119^{\circ}05'$,北纬 $32^{\circ}10' \sim 41^{\circ}50'$,自西向东,依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东。目前,黄河流域已初步形成了门类较齐全的工业生产格局,但以原材料为主的能源、矿产工业所占比重较大,煤炭、电力、石油和天然气等产业,具有显著的优势。

黄河流域是能源开发的重要工业带,也是用水大户。近年来黄河断流,地下水超采严重,给流域工业发展带来极为不利的影 响;加之人口增多,城市化速度加快,导致黄河流域工业用水被其他部门占用,缺水情况愈发严重。

本研究所需的用水量数据来自《中国水统计年鉴 2016》、《黄河流域水资源公报 2015》以及各地市《水资源公报 2015》。能值量化所需的数据来自《中国工业统计年鉴 2016》、各省《统计年鉴》和各地市《统计年鉴》,能值/货币比率来自文献[24-26]。

2.2 结果及分析

2.2.1 黄河流域水资源工业生产价值量化

根据流域天然水体能值转换率计算方法,计算黄河流域各区段能值转换率见表 2。

表 2 黄河流域天然水体能值转换率

Tab. 2 Emergency conversion rate of natural water in the Yellow River basin

项目	头道拐以上段	头道拐至花园口段	花园口以下段
降雨量/ 10^8m^3	1.41×10^3	1.72×10^3	1.30×10^2
降雨量/mm	1.36×10^3	1.54×10^3	5.73×10^2
雨水化学能/ $(\text{J} \cdot \text{a}^{-1})$	6.96×10^{17}	8.48×10^{17}	6.40×10^{16}
雨水能值转换率	1.54×10^4	1.54×10^4	1.54×10^4
雨水总能值/ $(\text{sej} \cdot \text{a}^{-1})$	1.07×10^{22}	1.31×10^{22}	9.89×10^{20}
水资源总量/ 10^8m^3	2.58×10^2	2.17×10^2	2.04×10^1
地表水总化学能/J	1.28×10^{17}	1.07×10^{17}	1.01×10^{16}
更新周期/a	1.00×10^0	1.00×10^0	1.00×10^0
流域面积/ km^2	1.95×10^5	3.55×10^5	2.26×10^4
单方水能值转换率/ $(\text{sej} \cdot \text{m}^{-3})$	4.16×10^{11}	6.04×10^{11}	4.84×10^{11}

基于黄河流域天然水体能值转换率计算结果,根据式(1)分别计算黄河流域各地市工业生产投入和产出的太阳能值。以郑州市为例,计算过程与结果见表 3。原始数据来源于《郑州市统计年鉴 2016》、《河南省水资源公报 2015》。

根据黄河流域各地市工业系统能值投入产出数据量化水资源工业生产价值,使用自然断点法,绘制黄河流域水资源工业生产价值空间分布见图 1。

分析图 1 可知,黄河流域水资源工业生产价值空间分布不平衡。流域中东部水资源工业生产价值较高,西部较低。流域水资源工业生产价值在

$16.30 \sim 26.91$ 元/ m^3 范围,西安市(陕西省)最高,海北州(青海省)最低,分别为 26.91 元/ m^3 和 16.30 元/ m^3 。

计算黄河流域各省、自治区水资源工业生产价值的平均值,见图 2。

结合图 1 和 2 分析可知,随着黄河流域走势从西到东,水资源工业生产价值呈上升趋势。究其原因,主要是西部地区虽然自然资源丰富,但地理条件恶劣,阻碍了工业生产活动。而中东部地区地势平坦开阔,发达的水运、铁路为大量大宗工业产品的运输提供了便捷。中东部现代化水平高,机器大生产

表 3 2015 年郑州市水资源工业生产价值能值分析

Tab. 3 Energy value analysis of industrial production value of water resources in Zhengzhou City in 2015

项目	原始数据	能值转换率/($\text{sej} \cdot \text{J}^{-1}$)、($\text{sej} \cdot \text{m}^{-3}$)、($\text{sej} \cdot \text{\$}^{-1}$)、($\text{sej} \cdot \text{g}^{-1}$)、($\text{sej} \cdot \text{t}^{-1}$)	太阳能值/ sej
能值投入			1.30×10^{22}
1.1 可更新资源			1.53×10^{20}
1.1.1 太阳能	$4.21 \times 10^{19} \text{ J}$	1.00×10^0	4.21×10^{19}
1.1.2 风能	$6.29 \times 10^{16} \text{ J}$	6.23×10^4	3.92×10^{19}
1.1.3 工业用水	$1.19 \times 10^8 \text{ m}^3$	6.04×10^{11}	7.20×10^{19}
1.2 不可更新资源			1.28×10^{22}
1.2.1 原煤及煤制品	$8.46 \times 10^{16} \text{ J}$	4.00×10^4	3.39×10^{21}
1.2.2 天然气	$3.98 \times 10^{15} \text{ J}$	4.80×10^4	1.91×10^{20}
1.2.3 原油	$2.75 \times 10^{16} \text{ J}$	5.40×10^4	1.49×10^{21}
1.2.4 电力	$4.03 \times 10^{16} \text{ J}$	1.60×10^5	6.45×10^{21}
1.2.5 其他燃料	$6.11 \times 10^{15} \text{ J}$	4.00×10^4	2.44×10^{20}
1.2.6 原材料	$8.44 \times 10^8 \text{ \$}$	9.28×10^{11}	7.83×10^{20}
1.2.7 劳务	$2.89 \times 10^8 \text{ \$}$	9.28×10^{11}	2.68×10^{20}
1.2.8 固定资产折旧	$1.74 \times 10^7 \text{ \$}$	9.28×10^{11}	1.61×10^{19}
能值产出			8.30×10^{22}
2.1 原煤生产量	$1.02 \times 10^{18} \text{ J}$	4.00×10^4	4.10×10^{22}
2.2 火力发电量	$1.59 \times 10^{16} \text{ J}$	1.60×10^5	2.55×10^{21}
2.3 钢及钢材	$7.60 \times 10^{10} \text{ g}$	1.40×10^9	1.06×10^{20}
2.4 铝及铝材	$3.20 \times 10^{10} \text{ g}$	1.60×10^{10}	5.12×10^{20}
2.5 汽油	$1.50 \times 10^{15} \text{ J}$	6.60×10^4	9.93×10^{19}
2.6 柴油	$1.95 \times 10^{15} \text{ J}$	6.60×10^4	1.28×10^{20}
2.7 燃料油	$9.26 \times 10^{14} \text{ J}$	5.40×10^4	5.00×10^{19}
2.8 水泥	$7.68 \times 10^{11} \text{ g}$	2.07×10^9	1.59×10^{21}
2.9 玻璃	$3.00 \times 10^{10} \text{ g}$	8.40×10^8	2.52×10^{19}
2.10 塑料	$3.31 \times 10^{11} \text{ g}$	3.80×10^8	1.26×10^{20}
2.11 农药	$4.25 \times 10^{10} \text{ g}$	1.60×10^9	6.80×10^{19}
2.12 氮肥	$6.67 \times 10^{10} \text{ g}$	3.80×10^9	2.53×10^{20}
2.13 磷肥	$3.57 \times 10^{10} \text{ g}$	3.90×10^9	1.39×10^{20}
2.14 机制纸及纸板	$2.17 \times 10^{12} \text{ g}$	3.90×10^9	8.46×10^{21}
2.15 自来水	$8.53 \times 10^{14} \text{ g}$	3.05×10^7	2.61×10^{22}
2.16 食品	$4.91 \times 10^8 \text{ \$}$	9.28×10^{11}	4.56×10^{20}
2.17 纺织制品	$1.17 \times 10^{19} \text{ \$}$	9.28×10^{11}	1.08×10^{21}
2.18 木材加工及家具制造	$1.83 \times 10^{18} \text{ \$}$	9.28×10^{11}	1.70×10^{20}
2.19 机械制品	$1.82 \times 10^{14} \text{ t}$	6.70×10^{15}	1.22×10^{20}
2.20 交通运输设备制造	$2.25 \times 10^7 \text{ \$}$	9.28×10^{11}	2.09×10^{19}

催生的流水线作业使得工业生产效率大大提高,水资源工业生产价值也随之提高。

2.2.2 黄河流域水资源工业生产价值全局自相关分析

运用全局空间自相关模型(见 1.2),可得黄河流域水资源工业生产价值全局 Moran 指数为 0.327 1,说明黄河流域水资源工业生产价值在空间上具有较强的正相关性。总体空间关联特征为工业

系统水资源高价值地市趋于和高价值地市相邻,低价值地市趋于和低价值地市相邻。

2.2.3 黄河流域水资源工业生产价值局部自相关分析

全局 Moran 指数只能反映黄河流域水资源工业生产价值整体空间集聚性,为了进一步探明流域水资源工业生产价值在局部空间上的聚类与异质情况,需对水资源工业生产价值进行局部空间自相关分析。



图 1 黄河流域水资源工业生产价值空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of industrial production value of water resources in the Yellow River basin

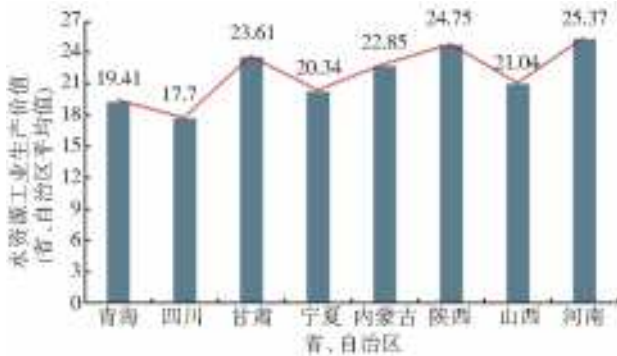


图 2 黄河流域各省区水资源工业生产价值

Fig. 2 Industrial production value of water resources in various provinces of the Yellow River basin

由图 3 统计可得,黄河流域水资源工业生产价值落在 Moran 散点图第一象限的有 31 个地市,落在第二、三、四象限的地市分别为 10、8 和 11 个。流域水资源工业生产价值以“H-H”型分布为主,还有少量的“L-L”型、“L-H”型和“H-L”型分布。这与全局 Moran 指数估计结果一致,水资源工业生产价值在空间上呈正相关。

为了更好地分析水资源工业生产价值空间分布特征,绘制流域水资源工业生产价值 LISA 集聚图(图 4)。

黄河流域水资源工业生产价值局部空间自相关表现为如下特征:水资源工业生产价值“H-H”型主要聚集在流域中东部,“L-L”型主要聚集在流域西部。主要原因如下:黄河流域中东部地势平坦广阔,

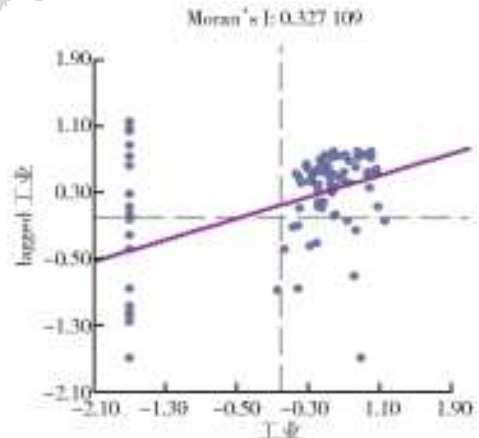


图 3 黄河流域水资源工业生产价值 Moran 散点图

Fig. 3 Moran scatter plot of industrial production value of water resources in the Yellow River basin

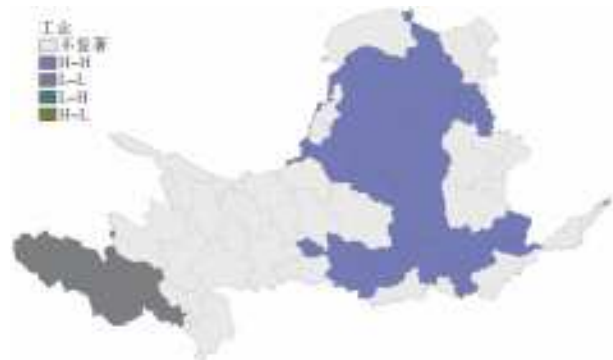


图 4 黄河流域水资源工业生产价值 LISA 集聚

Fig. 4 LISA agglomeration map of industrial production value of water resources in the Yellow River basin

气候温暖湿润,有利于厂房建设和劳动力聚集;良好的社会服务体系为工业生产提供优质保障。而流域西部地区恶劣的自然环境和落后的工业生产方式严重影响工业生产发展,导致水资源工业生产价值普遍较低,在空间上呈“L-L”型聚集。

3 结 语

(1)本文运用能值理论与方法,赋予了水资源工业生产价值新的内涵。通过改进的能值量化方法,实现黄河流域 60 个地市水资源工业生产价值客观全面的核算。

(2)从全局空间分析,黄河流域水资源工业生产价值在整体空间分布上具有明显自相关特征,呈聚集性分布。究其原因,主要是水资源工业生产价值与地市的区位交通条件、工业产品种类、技术水平、企业管理方式等社会经济因素关系密切,而上述因素在大体上均表现出地理上的类似性。此外,黄河是黄河流域工业生产的主要水源,这是流域水资源工业生产价值存在较强空间相关性的另一个原因。

(3)全局空间自相关是对黄河流域水资源工业生产价值的一个整体描述,仅仅适用于同质空间,在黄河流域各地市不同的自然环境和社会条件下,水资源工业生产价值的空间分布不一定是均匀同质的,会随着空间位置不同而变化,为了识别这种空间变化特征,需要用局部空间自相关分析法。研究表明黄河流域水资源工业生产价值以“H-H”型聚集为主,该聚集类型主要分布在流域中东部,还有少量的“L-L”型聚集在流域西部。

基于能值理论与空间自相关分析法的黄河流域水资源工业生产价值研究对流域水量分配具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 赵清,刘晓旭,蒋义行. 基于水银行机制的内蒙古水权制度改革探索[J]. 中国水利,2016(21):3-5. (ZHAO Q, LIU X X, JIANG Y X. Exploration of Inner Mongolia water right system reform based on water bank mechanism [J]. China Water Resources,2016 (21):3-5(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2016.21.003.
- [2] 于志鑫. 基于区域趋同的我国省际工业能效实证研究[D]. 大连:大连理工大学,2018. (YU Z X. Empirical study on inter-provincial industrial energy efficiency in China based on regional convergence [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2018. (in Chinese))
- [3] 宋先松,石培基,金蓉. 中国水资源空间分布不均引发的供需矛盾分析[J]. 干旱区研究,2005,22(2):162-166. (SONG X S, SHI P J, JIN R. Analysis of the contradiction between supply and demand caused by the uneven spatial distribution of water resources in China[J]. Arid area research,2005,22(2):162-166. (in Chinese)) DOI:10.13866/j.azr.2005.02.005.
- [4] 薛松贵. 黄河流域水资源综合规划概要[J]. 中国水利,2011(23):108-111. (XUE S G. Summary of comprehensive water resources planning in the Yellow River basin[J]. China Water Resources,2011(23):108-111. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2011.23.021.
- [5] 薛松贵,张会言. 黄河流域水资源利用与保护问题及对策[J]. 人民黄河,2011,33(11):32-34. (XUE S G, ZHANG H Y. The problem and countermeasure of water resources utilization and protection in the Yellow River basin[J]. Yellow River,2011,33(11):32-34. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2011.11.013.
- [6] 罗清. 黄河流域水资源承载能力研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2006. (LUO Q. Study on water resources carrying capacity of the Yellow River basin [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2006. (in Chinese))
- [7] 王勇,肖洪浪,任娟,等. 基于 CGE 模型的张掖市水资源利用研究[J]. 干旱区研究,2008(1):28-34. (WANG Y, XIAO H L, REN J, et al. Study on water resources utilization in Zhangye City based on CGE model[J]. Arid Zone Research,2008(1):28-34. (in Chinese)) DOI:10.13866/j.azr.2008.01.012.
- [8] 毛春梅,袁汝华. 黄河流域水资源价值的计算与分析[J]. 中国人口·环境与资源,2003,13(3):25-29. (MAO C M, YUAN R H. Calculation and analysis of water resources value in the Yellow River basin[J]. China Population·Environment and Resources,2003,13(3):25-19. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-2104.2003.03.006.
- [9] ODUM H T. Environmental accounting: Emery and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons,1996. DOI 10.2307/1127803.
- [10] 吕翠美,吴泽宁. 水资源生态经济价值能值分析框架[J]. 三峡大学学报(自然科学版)2010,32(1):27-31. (LYU C M, WU Z N. A framework for emery value analysis of water resources economic value [J]. Journal of Three Gorges University (Natural Sciences) 2010,32(1):27-31. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-48X.2010.01.008.
- [11] WU Z N, GUO X, GUAN X J, et al. Water efficiency evaluation of a regional water scheme-Zhengzhou, China, using a water ecological-economic system(WEES)and based on emery theory[J]. Water Science and Technology:

- Water Supply, 2017, 17(3): 674-687. DOI: 10. 2166/ ws. 2016. 167.
- [12] ODUN H T, ODUM E C. Ecology and economy; Energy analysis and public policy in texas [M]. Texas: The Office of Natural Reasource and Texas Deparment of Agriculture, 1987.
- [13] 郭溪, 吴泽宁, 王慧亮. 区域工业生产系统用水正负效益分析及能值评估[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(4): 1-5, 52. (GUO X, WU Z N, WANG H L. Analysis of positive and negative benefits of water use in regional industrial production systems and emergy value assessment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 36(4): 1-5, 52. (in Chinese))
- [14] WU Z N, GUO X, LYU C M, et al. Study on the quantification method of water pollution ecological compensation standard based on emergy theory[J]. Ecological Indicators, 2018(92). (189-194) DOI: 10. 1016/j. ecolind. 2017. 09. 052.
- [15] 吴泽宁, 吕翠美, 胡彩虹, 等. 水资源生态经济价值能值分析理论方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (WU Z N, LYU C M, HU C H, et al. Theoretical methods and applications of energy value analysis of water resources ecological economic value [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [16] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1293-1298. (LYU C M, WU Z N. Emery analysis method for sustainable development evaluation of regional water resources eco-economic syste [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2010, 30(7): 1293-1298. (in Chinese)) DOI: 10. 12011/1000-6788(2010)7-1293.
- [17] 张乐勤, 方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 24-29. (ZHANG L Q, FANG Y Y. Spatial pattern analysis of ecological pressure of water resources in Anhui Province based on spatial autocorrelation analysis[J]. Water resources protection, 2017, 33(1): 24-29. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2017. 01. 006.
- [18] QIN Y F, WANG L D, QIN Z H, et. al. Spatial autocorrelation analysis of genetic structure of *Zelkova Schneideriana* in Mailing Town, Guangxi[J]. Agricultural Biotechnology, 2018, 7(5): 176-179. DOI: 10. 19759/j. cnki. 2164-4993. 2018. 05. 047.
- [19] 盛伟. 基于 Geoda-GIS 的西藏自治区区域经济空间差异分析[J]. 生态经济评论, 2014(00): 187-196. (SHENG W. Analysis of regional economic spatial differences in Tibet autonomous region based on Geoda-GIS [J]. Ecological Economic Review, 2014(00): 187-196. (in Chinese))
- [20] WANG D, ZHOU Q B, YANG P, et al. Design of a spatial sampling scheme considering the spatial autocorrelation of crop acreage included in the sampling units[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(9): 2096-2106. DOI: 10. 1016/S2095-3119 (17) 61882-3.
- [21] 万鲁河, 王绍巍, 陈晓红. 基于 GeoDA 的哈大齐工业走廊 GDP 空间关联性[J]. 地理研究, 2011, 30(6): 977-984. (WAN L H, WANG S W, CHEN X H. GDP spatial correlation of the industrial corridor in Hadaqi based on GeoDaA [J]. Geographical research, 2011, 30(6): 977-984. (in Chinese))
- [22] 曾永明, 张果. 基于 GeoDA-GIS 的四川省县域经济空间分异研究[J]. 云南地理环境研究, 2010, 22(4): 52-58, 76 (ZENG Y M, ZHANG G. Study on spatial differentiation of county economy in Sichuan based on GeoDA-GIS [J]. Yunnan Geographic Environment Research 2010, 22(4): 52-58, 76. (in Chinese)) DOI: doi:10. 3969/j. issn. 1001-7852. 2010. 04. 009.
- [23] 王晓瑜. 县域耕地资源价值空间分布差异特征及其形成机制[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. (WANG X Y. Differential characteristics and formation mechanism of the spatial distribution of cultivated land resources in counties [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese))
- [24] 吴泽宁, 田桂桂, 王慧亮. 基于物质循环的河道内生态用水价值及其能值评估[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 6-10. (WU Z N, TIAN G G, WANG H L. Evaluation of ecological water value and emergy value in river channel based on material cycle [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 6-10. (in Chinese))
- [25] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009. (LYU C M. Research on ecological economic value of regional water resources based on emergy theory [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009. (in Chinese))
- [26] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳, 等. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社. 2002. (LAN S F, QIN P, LU H F, et al. Emery analysis of eco-economic system [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2002. (in Chinese))