

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2020.0132

栗欣如,姜文来,杨亚东,等.我国水利绿色发展空间异质性及主控因子[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):191-200. LI X R,JIANG W L,YANG Y D,et al.Spatial heterogeneity and its dominant factors of water conservancy green development in China[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(6):191-200.(in Chinese)

## 我国水利绿色发展空间异质性及主控因子

栗欣如,姜文来,杨亚东,冯欣

(中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

**摘要:**通过构建水利绿色发展指数测算模型,对2017年我国31省(自治区、直辖市)水利绿色发展水平进行了评价,并引入空间自相关和空间热点探测分析法对我国水利绿色发展水平的空间相关性和异质性进行分析,从准则层和指标层识别水利绿色发展空间分异的主控因子。结果表明:我国水利绿色发展水平整体呈现东部高于西部的态势,优良等级的省份主要位于我国华北和华东地区;我国水利绿色发展水平在空间上呈现较强的异质性,热点区包括北京和天津两市,冷点区包括新疆、西藏、青海、甘肃和黑龙江等5省(自治区);水利绿色发展水平空间差异主要受水土流失治理率、水利信息化水平、生态用水比例、生产用水综合经济效率和大专以上管理人员比重等指标影响较大。

**关键词:**水利绿色发展;空间异质性;空间自相关;空间热点探测;主控因子

中图分类号:TV213;P95 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Spatial heterogeneity and its dominant factors of water conservancy green development in China

LI Xinru,JIANG Wenlai,YANG Yadong,FENG Xin

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning of Chinese Academy of  
Agricultural Sciences,Beijing 100081,China)

**Abstract:** A calculation model is established to evaluate the level of water conservancy green development in 31 provinces (autonomous regions or cities) of China in 2017. Spatial autocorrelation and spatial hotspot detection are introduced to analyze the spatial heterogeneity of China's water conservancy green development level. The dominant factors are identified from the criterion and the index level. The results showed that: The water conservancy green development level is higher in the east than in the west, and the provinces with excellent grades are mainly distributed in north and east China; The level of water conservancy green development in China showed strong heterogeneity in space, and the hot spots of water conservancy green development levels are distributed in Beijing and Tianjin, while the cold spots are located in Xinjiang, Tibet, Qinghai, Gansu, and Heilongjiang provinces or autonomous regions; The spatial difference of water conservancy green development level is greatly influenced by soil erosion control rate, water conservancy informatization level, ecological water use ratio, comprehensive economic efficiency of production water use, and the proportion of managers above college level have a greater impact.

**Key words:** water conservancy green development; spatial heterogeneity; spatial autocorrelation; spatial hotspot detection; dominant factor

收稿日期:2019-12-05 修回日期:2020-04-23 网络出版时间:2020-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200506.1116.004.html>

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-ZDRW202012);国家自然科学基金(70773113)

作者简介:栗欣如(1991—),女,河南濮阳人,博士研究生,主要从事区域发展、农业资源管理研究。E-mail:82101171247@caas.cn

通信作者:姜文来(1964—),男,辽宁凌源人,博士,研究员,博士生导师,主要从事区域发展,水资源管理,生态环境等研究。E-mail:jiangwenlai@caas.cn

改革开放以来,我国各地区社会发展状况存在差异<sup>[1]</sup>,且经济总量差异呈扩大趋势<sup>[2]</sup>,与此同时,污染物排放已经超过环境承载能力,呈现生态“负债”和生态恶化格局<sup>[3-4]</sup>。在此背景下,水灾害频发、水资源短缺、水生态损害、水环境污染等新老问题不同程度地制约了区域经济发展。随着绿色发展理念的提出,我国经济、社会、生态三位一体的新型发展道路<sup>[5]</sup>逐渐开启,走水利绿色发展之路势在必行。我国《水利改革发展“十三五”规划》明确提出,要在推进水利绿色发展、可持续发展方面迈出新的步伐。事实上,受人口集中、土地集约化利用、社会经济发展等因素影响,区域之间水资源开发利用、水环境状况、水文化建设等存在很大差异<sup>[6-9]</sup>,推进水利绿色发展不仅要认清水利绿色发展整体现状,还需了解区域水利绿色发展进程差异及相互关系,为我国水利管理提供重要的决策参考。

根据以往研究,2011 年全国水利现代化程度呈东部沿海地区较高、中西部地区较低的态势,全国 67% 省(自治区、直辖市)的水利现代化水平高于全国平均水平<sup>[10]</sup>。同时,水利发展还涉及区域间的利益均衡、协调发展和社会公平等问题<sup>[11-13]</sup>。从水利发展相关评价角度出发,现有水利发展评价主要分为两类:一类是水利现代化评价<sup>[14-15]</sup>;一类是水利与社会经济协调发展评价<sup>[16-17]</sup>。两类评价大都逐渐将水生态、水环境等反映人水和谐的相关指标纳入了评价指标体系,但反映水生态与水利双赢目标的指标不容忽视,绿色发展理念在水利发展相关评价中仍有待深化。我国不同地区经济发展条件、水资源禀赋、水管理能力不尽相同,在一定程度上影响了水利绿色发展水平的空间差异,区域间水利绿色发展水平必然存在一定差异。地理学第一定律指出,“任何事物都与其他事物相关,相近的事物关联更紧密”<sup>[18]</sup>。这一定律在经济学<sup>[19-20]</sup>、社会学<sup>[21]</sup>、生态学<sup>[22]</sup>、土壤学<sup>[23]</sup>及其交叉学科<sup>[24-26]</sup>等众多领域得到了验证。水利发展涉及社会、经济、生态、资源等多个领域,这意味着水利绿色发展评价是一个多指标综合评价问题,可能存在地理上的区域关联,但目前水利发展空间相关方面的研究相对较少,因此有必要将空间统计方法引入到水利绿色发展地域空间关联性的研究中。

综上,采用熵值法和水利绿色发展指数测算模型对 2017 年我国 31 个省(自治区、直辖市)的水利绿色发展水平进行评价,并运用空间自相关和空间热点探测分析法对我国水利绿色发展水平的空间关联性和异质性进行了分析,最后从准则层和指标层

识别出水利绿色发展空间分异的主控因子,旨在揭示区域水利绿色发展水平差异及原因,为进一步提升水利绿色发展水平提供科学依据。

## 1 水利绿色发展内涵

水利绿色发展是指与水承载能力相适应、人与水和谐的水利发展<sup>[27]</sup>。水利绿色发展,发展水利是第一要务,没有水利的健康发展就难以支撑社会经济发展对水利相关服务的需求,社会经济的发展也会受到不同程度的影响。水利发展要向绿色转型,要摒弃只顾水利快速发展,不顾水资源承载力,不顾水生态的水利发展方式,向水利发展与生态环境和谐的方向转变,实现水利与水生态双赢的格局,这就需要在水资源开发、利用和管理过程中对社会、经济和生态环境造成的不利影响达到最小。水资源开发程度取决于经济结构、人口数量和生态需水量,同时水资源量也制约着社会 and 经济发展;水资源利用过程的关键是节水和水环境保护,节水和水环境保护程度也调节着水资源利用量;水资源管理及水利绿色发展的最终目标是实现水利活动对环境造成的影响达到最小,且同时兼顾经济效益、社会效益和生态效益的最大产出,反之,水资源管理及水利发展也依赖于经济、社会和生态系统的要素投入。简言之,本研究将水利绿色发展的内涵概括为“五化”,即合理化开发、高效化利用、生态化输出、人文化效益和常规化监管。同时将其提炼为两个维度:一个是经济-社会-生态维度,是指在经济、社会、生态发展与水利相关的要素构成的系统;另一个是输入-响应-输出维度,是指上述的水资源开发、利用、管理和产生效益过程中与经济、社会和生态的交叉要素构成的系统。两维度间要素既存在耦合协调作用,又包含相互制约关系。水利绿色发展的作用机理(图 1)表现为两维度相互交叉,水资源承载力对社会经济发展具有约束作用,社会经济发展对水利发展有促进作用。

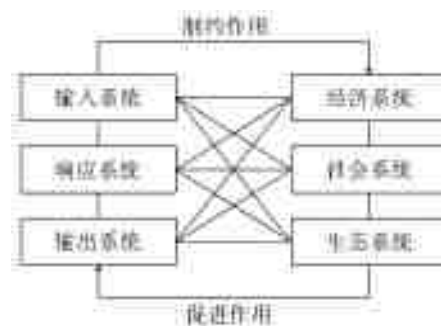


图 1 水利绿色发展作用机理

Fig. 1 Mechanism of water conservancy green development

水利绿色发展评价是以水利绿色发展作用机理为基础,从双维度出发构建绿色指标评价体系,并且以维度内耦合协调和维度间加权平均来综合测量区域水利绿色发展水平。构建的双维度指标评价体系相比前人研究的创新之处在于:增加了水系景观和水文化等社会福利方面指标来体现水利绿色发展中水生态和水利双赢目标;增加了水利投资比重等经济投入方面指标来反映经济与水利发展之间制约协调关系,以使水利绿色发展评价在体现水利生命周期过程对社会、经济和生态的绿色作用更具代表性。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 水利绿色发展指数模型

采用极值法对原始指标进行标准化处理<sup>[28]</sup>,利用熵值法计算各指标权重,计算各子系统绿色发展指数综合得分

$$S_k = \sum w_i x_{ij} \quad (1)$$

式中: $S_k$ 表示各子系统绿色发展指数综合得分; $S_{EN}$ 、 $S_S$ 、 $S_{EL}$ 、 $S_I$ 、 $S_R$ 、 $S_O$ 分别表示经济、社会、生态、输入、响应、输出子系统综合得分; $w_i$ 表示权重; $x_{ij}$ 为指标标准化值。这一测算方法由各个样本的实际数据求得最优权重,能够深刻地反映出指标信息熵值的效用价值,避免了人为影响因素,使其更具有客观性和可信度<sup>[29]</sup>。

水利绿色发展的人水和谐要求归根结底是指水利发展各子系统之间的和谐,即要求不同子系统之间的耦合协调性达到最优。水利绿色发展指数模型的建立旨在测量经济-社会-生态维度与输入-响应-输出维度之间的耦合协调程度。耦合原用于物理学中,指两个及以上因子之间相互耦合的物理学现象。借鉴耦合协调度模型概念<sup>[30]</sup>,计算各个子系统之间的耦合指数和耦合协调度<sup>[31]</sup>

$$C_n = [\prod S_k / (\sum S_k / 3)^3]^3 \quad (2)$$

式中: $C_n$ 表示维度内系统之间的耦合指数( $n=1, 2$ ),水利绿色发展是一个包括经济-社会-生态系统和输入-响应-输出系统相互交织的复杂过程,这里分别计算经济、社会、生态及输入、响应、输出系统之间的耦合指数  $C_1$ 、 $C_2$ 。

耦合指数用于衡量各子系统耦合关系作用强弱,但不能反映系统是否协调最优,评价结果在子系统发展指数取值均较低的情况下不可靠<sup>[32]</sup>。因此,构建了耦合协调度模型以准确判断经济-社会-生态及输入-响应-输出系统之间的耦合协调程度

$$D_1 = \sqrt{C_1 T} \quad (3)$$

$$D_2 = \sqrt{C_2 S} \quad (4)$$

$$T = \alpha S_{EN} + \beta S_S + \gamma S_{EL} \quad (5)$$

$$S = \delta S_I + \epsilon S_R + \eta S_O \quad (6)$$

式中: $D_1$ 表示社会-经济-生态系统之间的耦合协调度; $D_2$ 表示输入-响应-输出系统之间的耦合协调度; $T$ 为社会-经济-生态维度综合评价指数; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为调节系数,研究认为经济发展、社会发展和生态发展同等重要,因而设  $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ ; $S$ 为输入-响应-输出维度综合评价指数; $\delta$ 、 $\epsilon$ 、 $\eta$ 为调节系数,研究认为输入系统、响应系统和输出系统同等重要,因而设  $\delta = \epsilon = \eta = 1/3$ 。

$$G = 1/2(D_1 + D_2) = 1/2(\sqrt{C_1 T} + \sqrt{C_2 S}) \quad (7)$$

式中: $G$ 表示水利绿色发展指数,其值越大,表明地区水利绿色发展水平相对较高。

#### 2.1.2 空间自相关方法

全局空间自相关(global spatial autocorrelation),描述研究对象的属性特征,这里指水利绿色发展水平在空间范围内的表现状态,可以判断区域水利绿色发展水平的空间相关程度<sup>[32]</sup>,用 Global Moran's I 指数来衡量,具体计算方法见文献<sup>[32]</sup>。

#### 2.1.3 空间热点探测分析

Moran's I 只是在全域角度对研究对象的分布状态和关联性研究,但对集聚区的空间位置研究上略显不足<sup>[33-34]</sup>。空间热点探测分析(getis-ord  $g_i^*$ )用来检验水利绿色发展水平在局部地区是否存在统计上的集聚,并用可视化的方法揭示<sup>[35]</sup>。热点表示高水利绿色发展水平区域被其他同样具有高值水平的区域包围,并具有显著统计学意义;冷点表示低水利绿色发展水平区被其他同样具有低水平的区域所包围,并具有显著统计学意义。本文采用反距离权重矩阵,具体计算过程见文献<sup>[36]</sup>和文献<sup>[37]</sup>。空间热点探测分析结果将为区域水资源利用优化提供决策依据,使水利绿色发展更加均衡。

#### 2.1.4 绿色发展指标主控因子识别

对全国水利绿色发展指数测算是系统整体的评价,其在时间跨度上有很大的变化,有必要找出主要制约、阻碍系统绿色发展的指标。用在实际中应用较多的障碍度指标<sup>[38-39]</sup>识别水利绿色发展主控因子,其计算公式为

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 - x_{ij} & x_{ij} \leq 1 \\ 0 & x_{ij} > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$Z_j = w_j X_{ij} / (\sum_{i=1}^n w_j X_{ij}) \times 100\% \quad (9)$$

式中: $x_{ij}$ 为第  $i$  年第  $j$  个指标标准化的值; $X_{ij}$ 表示指标偏离度(单因素指标估计值与 100% 的差值); $w_j$ 为指标  $x_j$  的权重,表示因子贡献度<sup>[40]</sup>。采用式(8)和(9)可以计算出全国指标层障碍度和因素层障碍度。

## 2.2 指标构建与数据来源

根据综合性、系统性、代表性、可操作性、动态性和规范性原则,筛选出体现绿色发展“合理化开发、高效化利用、生态化输出、人文化效益、常规化监管”内涵的指标,同时征求相关专家意见,考虑指标数据的可获得性,最终选出 17 项指标。结合水利绿色发展既要绿色又要发展的本质,将指标整理为二维关联指标评价矩阵(表 1):一个维度是综合考虑水利与生态环境、社会经济系统之间存在的互动关系,构建了经济-社会-生态维度指标体系;另一维度是借鉴循环经济学的输入、产品消费

和输出的阶段划分,结合水利的生命周期性<sup>[41]</sup>,构建了输入-响应-输出维度的指标体系。(1)经济-社会-生态维度。我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾。强调水利发展要科学调整,以绿色发展为前提,合理安排经济发展、社会发展和生态保护。经济-社会-生态维度重点关注经济结构、水资源的社会管理和生态保护。(2)输入-输出-响应维度。习总书记提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思想,强调水利发展以系统治理为主线,输入系统代表水利活动中社会、经济和资源投入环节,响应系统代表水资源利用中的利用方式、资源利用率和生态作用,输出系统代表水利的社会效益、经济效益和生态效益。从要素投入多少、水资源利用效率和水利产出效益高低等方面,衡量水利发展的绿色水平。

表 1 二维关联评价指标矩阵

Tab. 1 Two-dimensional correlation evaluation indicator matrix

维度	输入系统(I)	响应系统(R)	输出系统(O)
经济(EN)	农业用水比例系数 $X_1$ 水利投资比重 $X_2$	工业用水重复率 $X_7$ 灌溉水有效利用系数 $X_8$	水旱灾害损失率 $X_{12}$ 生产用水综合经济效率 $X_{13}$
社会(S)	水利信息化水平 $X_3$ 大专以上管理人员比重 $X_4$ 人均用水量 $X_5$	防洪能力指数 $X_9$	农村地区饮水安全保证率 $X_{14}$ 水文化发展水平 $X_{15}$
生态(EL)	生态用水比例系数 $X_6$ 水资源利用率 $X_{17}$	水功能区水质达标率 $X_{10}$ 建成区绿化覆盖率 $X_{16}$	水土流失治理率 $X_{11}$

评价指标具体包括农业用水比例系数、水利投资比重、水利信息化水平等 17 项可量化指标,其中综合性指标 12 项,由分解指标计算而来(表 2)。研究数据主要来源有《中国统计年鉴 2018》《中国劳动统计年鉴 2018》《中国环境统计年鉴 2018》《中国水利统计年鉴 2018》《中国城乡建设统计年鉴 2017》《2017 年全国水利发展统计公报》《2017 年全国水资源公报》《2017 年全国水土保持公报》《2017 年全国水利网信发展报告》以及各省市环境状况公报和水土保持公报。

## 3 结果与分析

### 3.1 水利绿色发展水平空间特征

利用自然断点分级标准对我国 31 个省(自治区、直辖市)2017 年水利绿色发展指数划分为 3 个等级(表 3)。处于水利绿色发展优良等级的有 10 个省(直辖市),包括北京、天津、福建、浙江、江苏等,大部分位于华北和华东地区,可能的原因是得分较

高的区域在高标准农田建设、灌溉节水方面表现突出,水资源利用效率较高,水土流失治愈能力也较强;处于水利绿色发展中等等级的有河南、云南、安徽、海南等 11 省(直辖市),分布较为分散,这可能是由于这些省份农业用水占据很大比例,对水利管理人员的教育水平投入不足,为生态环境修复提供的水资源供给较少。水利绿色发展一般等级包括广西、甘肃、宁夏等 10 省(自治区),主要位于西北、西南和华南地区,可能的原因是:一方面这些地区经济水平相对较低,导致生产用水综合经济效率较低;另一方面,这些地区对水利的综合开发保护较弱,需要深入挖掘文化、旅游、生态等水利多功能性。

### 3.2 基于热点分析模型的水利绿色发展空间异质性

#### 3.2.1 水利绿色发展空间总体异质性

利用公式计算出水利绿色发展各子系统、系统间耦合协调度以及绿色发展指数的 Moran's I 值(表 4)。其中:生态系统指数和输入-响应-输出系统耦合

指数的空间自相关指数没有通过显著性检验( $Z(I) > 1.96, P(I) < 0.05$ ),空间分布呈现随机分布状态;其余空间自相关指数均为正值,空间集聚特征明显。换

言之,水利绿色发展各子系统(生态系统除外)综合指数、两维度的耦合协调度及水利绿色发展水平在空间上表现出异质性,在某些地方呈现相似值集聚特征。

表 2 水利绿色发展指数定量化测算指标体系  
Tab. 2 Quantitative water conservancy green development calculation indicator system

指标名称	指标分解	指标性质	权重
农业用水比例系数 $X_1/\%$	农业用水量占总用水量比例	-	0.058 7
水利建设投资比重 $X_2/\%$	水利建设投资占全国固定资产投资总额比重	+	0.061 3
水利信息化水平 $X_3/\%$	各类水文信息采集点占自动采集点比重	+	0.070 0
大专以上管理人员比重 $X_4/\%$	按全社会大专以上就业人员比重计算	+	0.062 2
人均用水量 $X_5/m^3$	-	-	0.054 1
生态用水比例系数 $X_6/\%$	农业用水量占总用水量比例	+	0.057 3
工业用水重复率 $X_7$	工业用水重复量/工业用水总量	+	0.056 0
灌溉水有效利用系数 $X_8$	-	+	0.062 2
防洪能力指数 $X_9/\%$	2级以上堤防长度占堤防总长度比例	+	0.054 8
水功能区水质达标率 $X_{10}/\%$	Ⅲ类以上水质占地表水评价河长比例	+	0.058 9
水土流失治理率 $X_{11}/\%$	水土流失治理面积占水土流失面积比例	+	0.057 8
水旱灾害损失率 $X_{12}/\%$	农作物受灾面积占播种面积比重	-	0.058 2
生产用水综合经济效率 $X_{13}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	国内生产总值/用水量(生态用水除外) $(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	+	0.054 5
农村地区饮水安全保证率 $X_{14}/\%$	村庄供水普及率	+	0.054 1
水文化发展水平 $X_{15}/\text{个}$	水利风景区数量	+	0.058 7
建成区绿化覆盖率 $X_{16}/\%$	-	+	0.061 3
水资源利用率 $X_{17}/\%$	水资源利用量/水资源总量	-	0.070 0

注:指标性质“+”表示正向影响;“-”表示负向影响;生产用水综合经济效率指标计算时将国内生产总值按 1978 年为基准年进行价格指数平减。

表 3 水利绿色发展水平等级划分  
Tab. 3 Classification of water conservancy green development level

等级	省(自治区、直辖市)	经济-社会-生态耦合协调度	输入-响应-输出耦合协调度	水利绿色发展指数	等级	省(自治区、直辖市)	经济-社会-生态耦合协调度	输入-响应-输出耦合协调度	水利绿色发展指数	等级	省(自治区、直辖市)	经济-社会-生态耦合协调度	输入-响应-输出耦合协调度	水利绿色发展指数
优良	北京	0.466 4	0.402 5	0.434 5	中等	河南	0.335 6	0.348 6	0.342 1	一般	广西	0.310 7	0.327 5	0.319 1
	天津	0.359 6	0.414 8	0.387 2		云南	0.336 3	0.341 2	0.338 7		甘肃	0.333 9	0.293 2	0.313 6
	福建	0.378 4	0.385 1	0.381 8		安徽	0.328 0	0.347 4	0.337 7		宁夏	0.306 2	0.320 2	0.313 2
	浙江	0.381 7	0.375 0	0.378 4		海南	0.344 5	0.329 9	0.337 2		湖南	0.311 4	0.304 5	0.307 9
	江苏	0.367 4	0.382 5	0.375 0		辽宁	0.347 7	0.321 3	0.334 5		江西	0.283 2	0.331 4	0.307 3
	山东	0.364 3	0.372 2	0.368 3		重庆	0.348 3	0.314 9	0.331 6		新疆	0.286 2	0.327 4	0.306 8
	广东	0.364 2	0.361 2	0.362 7		湖北	0.335 1	0.318 3	0.326 7		内蒙古	0.334 4	0.263 9	0.299 1
	陕西	0.363 9	0.358 5	0.361 2		贵州	0.332 8	0.318 4	0.325 6		西藏	0.299 7	0.273 3	0.286 5
	河北	0.347 9	0.367 8	0.357 8		四川	0.338 8	0.309 9	0.324 3		吉林	0.310 5	0.260 0	0.285 3
	上海	0.295 1	0.416 5	0.355 8		山西	0.333 8	0.312 5	0.323 2		青海	0.304 1	0.245 4	0.274 8
						黑龙江	0.322 0	0.320 4	0.321 2					

表 4 水利绿色发展水平的 Moran's I  
Tab. 4 Moran's I test of green development level of water conservancy

指标	经济	社会	生态	输入	响应	输出	T	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	G
Moran's I	0.19	0.19	-0.03	0.08	0.18	0.07	0.15	0.08	0.04	0.10	0.11	0.11
z 值	4.43	4.30	0.10	2.26	4.33	1.97	3.68	2.31	1.52	2.80	2.82	2.84
p 值	0	0	0.92	0.02	0	0.05	0	0.02	0.13	0.01	0	0
分布格局	集聚	集聚	随机	集聚	集聚	集聚	集聚	集聚	随机	集聚	集聚	集聚

### 3.2.2 水利绿色发展空间局部异质性

从经济-社会-生态维度看,三者之间的耦合协调度也在统计学上表现出空间集聚状态。热点区域较经济系统和社会系统都有所蔓延,几乎涵盖了华东地区的北部和华北、华中地区,说明这些地区水利发展的经济、社会、生态要素之间耦合效果较好。冷点区域位于中国西部地区,如新疆、西藏、青海、四川

和重庆等地(表 5)。从输入-响应-输出维度看,输入-响应-输出耦合协调度的空间集聚态势与经济-社会-生态耦合协调度有很大差别,热点区虽有向南北方向蔓延的趋势,但域集聚范围较小,黑龙江和西北、西南地区形成了冷点区。这说明双维度下区域水利绿色发展并不能形成相互促进作用,相反,省际间可能有一定的抑制作用。

表 5 中国水利绿色发展水平热点格局

Tab. 5 Hot spot pattern of water conservancy green development level in China

省(自治区、直辖市)	社会-经济-生态耦合协调度	输入-响应-输出耦合协调度	中国水利绿色发展指数	省(自治区、直辖市)	社会-经济-生态耦合协调度	输入-响应-输出耦合协调度	中国水利绿色发展指数
北京	次热点区	次热点区	热点区	重庆	冷点区	次冷点区	一般区域
天津	次热点区	次热点区	热点区	内蒙古	热点区	一般区域	次冷点区
河北	次热点区	次热点区	次热点区	辽宁	热点区	一般区域	次冷点区
上海	热点区	热点区	次热点区	吉林	热点区	一般区域	次冷点区
江苏	热点区	热点区	次热点区	湖南	一般区域	次热点区	次冷点区
浙江	一般区域	次热点区	次热点区	四川	冷点区	冷点区	次冷点区
安徽	热点区	热点区	次热点区	贵州	次冷点区	次冷点区	次冷点区
福建	次冷点区	次热点区	次热点区	云南	次冷点区	次冷点区	次冷点区
山东	次热点区	次热点区	次热点区	陕西	次热点区	一般区域	次冷点区
河南	热点区	热点区	次热点区	宁夏	次热点区	次冷点区	次冷点区
山西	热点区	一般区域	一般区域	黑龙江	次冷点区	冷点区	冷点区
江西	一般区域	次热点区	一般区域	西藏	冷点区	冷点区	冷点区
湖北	热点区	热点区	一般区域	甘肃	次冷点区	冷点区	冷点区
广东	一般区域	一般区域	一般区域	青海	冷点区	冷点区	冷点区
广西	次冷点区	次冷点区	一般区域	新疆	冷点区	次冷点区	冷点区
海南	次冷点区	次冷点区	一般区域				

中国水利绿色发展指数热点区包含北京和天津两市,说明这两市处在绿色发展指数高值集聚区,水利绿色发展综合水平较高。次热点区域包含河北、河南、山东、安徽、江苏、上海、浙江和福建等 8 省(直辖市)。冷点区和次冷点区范围较广,主要位于西北地区、西南地区和东北地区,说明这些地区的水利绿色发展水平相对较差,且在地理上呈现集聚状态。由此可以看出水利绿色发展水平在空间上呈现较强的异质性。

### 3.3 中国水利绿色发展空间分异主控因子分析

#### 3.3.1 区域水利绿色发展空间差异准则层主控因子

利用障碍度模型对水利绿色发展空间分异的准则层主控因子进行识别,将前 5 位主控因子列出(表 6),从频次上看,水利绿色发展水平空间差异的主控因子依次是输入系统、社会系统、经济系统、生态系统、响应系统和输出系统。

从各地来看,全国 87.10% 的省(自治区、直辖市)第一主控因子为输入系统,障碍度均在 40% 以上,第一主控因子北京为响应系统,上海为生态系

统,四川为社会系统,青海为经济系统。第二主控因子排序中,80.65% 省市均为社会系统,障碍度均在 35% 以上,天津市为生态系统,上海、四川、青海为输入系统,山东为生态系统,海南为经济系统。第三主控因子中,17 省市为经济系统,障碍度在 31%~37%;北京为输入系统,障碍度为 33%;天津、海南、青海为社会系统,障碍度在 34%~37%;河北、江苏、浙江、山东、宁夏为生态系统,障碍度在 32% 左右;山西、重庆为响应系统;甘肃为输出系统。

#### 3.3.2 区域水利绿色发展空间差异指标层主控因子

水利绿色发展指标层主控因子前 5 位分析结果显示,出现频次前 5 位的指标依次是水土流失治理率(30 次)、水利信息化水平(29 次)、生态用水比例(28 次)、生产用水综合经济效率(21 次)和大专以上学历人员比重(13 次)。这与系统层主控因子的分析结果基本吻合。从各省市来看,2017 年各省份水利绿色发展的主要主控因素差别较大,但每个省份前 3 位主控因素大致相同(表 7)。

表 6 区域水利绿色发展空间差异准则层主控因子

Tab. 6 Dominant criteria factors of spatial difference of regional water conservancy green development

省(自治区、直辖市)	主控 1 (障碍度%)	主控 2 (障碍度%)	主控 3 (障碍度%)	主控 4 (障碍度%)	主控 5 (障碍度%)	省(自治区、直辖市)	主控 1 (障碍度%)	主控 2 (障碍度%)	主控 3 (障碍度%)	主控 4 (障碍度%)	主控 5 (障碍度%)
北京	R(46.15)	S(42.48)	I(32.99)	EN(29.74)	EL(27.79)	湖北	I(43.05)	S(39.75)	EN(32.72)	O(30.58)	EL(27.53)
天津	I(46.06)	EL(41.40)	S(36.62)	R(29.30)	O(28.71)	湖南	I(42.19)	S(39.74)	EN(35.71)	R(29.39)	O(28.65)
河北	I(47.94)	S(36.90)	EL(33.09)	EN(30.01)	R(27.26)	广东	I(44.31)	S(39.48)	EN(32.58)	R(30.40)	EL(27.94)
山西	I(40.11)	S(35.72)	R(33.42)	EL(33.29)	EN(30.99)	广西	I(43.59)	S(42.04)	EN(31.60)	O(29.43)	R(27.14)
内蒙古	I(40.91)	S(38.16)	EN(37.12)	O(34.42)	R(25.51)	海南	I(44.28)	EN(37.61)	S(36.05)	R(32.02)	EL(26.33)
辽宁	I(42.70)	S(39.73)	O(32.98)	EN(31.15)	EL(29.12)	重庆	I(40.53)	S(40.07)	R(34.54)	EN(32.73)	EL(27.20)
吉林	I(42.34)	S(39.56)	O(33.01)	EN(31.45)	EL(28.99)	四川	S(35.86)	I(35.44)	EN(34.26)	R(33.36)	O(31.36)
黑龙江	I(47.02)	S(36.57)	EN(33.65)	EL(29.78)	O(27.39)	贵州	I(41.65)	S(40.09)	EN(32.76)	R(30.71)	O(27.77)
上海	EL(52.28)	I(43.91)	O(38.63)	S(34.27)	R(23.99)	云南	I(43.50)	S(41.17)	EN(30.77)	R(30.03)	EL(28.06)
江苏	I(51.54)	S(35.27)	EL(33.89)	EN(30.85)	R(30.06)	西藏	I(41.58)	S(37.88)	EN(36.98)	R(32.33)	O(26.09)
浙江	I(40.17)	S(35.83)	EL(33.56)	R(33.00)	EN(30.61)	陕西	I(45.31)	S(35.54)	EN(33.35)	EL(31.11)	R(29.19)
安徽	I(50.64)	S(47.57)	EN(33.66)	O(31.89)	EL(18.77)	甘肃	I(42.66)	S(39.49)	O(33.02)	EN(31.67)	EL(28.84)
福建	I(47.87)	S(41.16)	EN(32.02)	R(29.74)	EL(26.82)	青海	EN(39.24)	I(38.46)	S(33.76)	O(32.67)	R(28.90)
江西	I(45.14)	S(43.17)	EN(34.66)	R(28.85)	O(26.21)	宁夏	I(49.71)	S(36.67)	EL(32.16)	O(31.80)	EN(31.16)
山东	I(53.30)	EL(35.37)	EN(33.96)	R(32.62)	S(30.68)	新疆	I(47.07)	S(42.90)	EN(32.46)	R(29.39)	EL(24.64)
河南	I(44.73)	S(40.18)	EL(31.35)	EN(28.47)	O(28.26)						

因子出现频次:EN 29 次;S 31 次;EL 23 次;I 31 次;O 18 次;R 23 次。

表 7 分类型区域水利绿色发展空间差异指标层主控因子

Tab. 7 Dominant factors of water conservancy green development in different regions

区域类型	省(自治区、直辖市)	主控因子 1 (障碍度%)	主控因子 2 (障碍度%)	主控因子 3 (障碍度%)	主控因子 4 (障碍度%)	主控因子 5 (障碍度%)
热点区	北京	X <sub>3</sub> (17.82)	X <sub>15</sub> (17.44)	X <sub>11</sub> (16.00)	X <sub>7</sub> (15.89)	X <sub>2</sub> (11.59)
	天津	X <sub>3</sub> (14.10)	X <sub>15</sub> (12.70)	X <sub>10</sub> (12.22)	X <sub>2</sub> (11.56)	X <sub>11</sub> (10.02)
次热点区	河北	X <sub>3</sub> (10.96)	X <sub>6</sub> (10.49)	X <sub>11</sub> (10.24)	X <sub>4</sub> (8.55)	X <sub>13</sub> (8.31)
	上海	X <sub>3</sub> (15.44)	X <sub>11</sub> (14.01)	X <sub>15</sub> (13.69)	X <sub>13</sub> (10.36)	X <sub>16</sub> (7.70)
	江苏	X <sub>6</sub> (13.45)	X <sub>3</sub> (11.11)	X <sub>11</sub> (10.71)	X <sub>13</sub> (9.93)	X <sub>9</sub> (8.97)
	浙江	X <sub>6</sub> (13.24)	X <sub>11</sub> (11.89)	X <sub>9</sub> (10.49)	X <sub>13</sub> (8.88)	X <sub>15</sub> (8.26)
	安徽	X <sub>6</sub> (12.64)	X <sub>3</sub> (11.96)	X <sub>13</sub> (10.45)	X <sub>4</sub> (10.12)	X <sub>14</sub> (9.12)
	福建	X <sub>6</sub> (12.79)	X <sub>3</sub> (11.89)	X <sub>9</sub> (9.77)	X <sub>13</sub> (9.58)	X <sub>11</sub> (9.38)
	山东	X <sub>3</sub> (12.64)	X <sub>6</sub> (11.23)	X <sub>11</sub> (10.92)	X <sub>2</sub> (10.35)	X <sub>4</sub> (9.85)
	河南	X <sub>11</sub> (10.70)	X <sub>3</sub> (10.41)	X <sub>4</sub> (9.57)	X <sub>6</sub> (9.30)	X <sub>2</sub> (8.88)
一般区域	山西	X <sub>3</sub> (10.53)	X <sub>6</sub> (10.15)	X <sub>11</sub> (9.82)	X <sub>10</sub> (8.08)	X <sub>9</sub> (7.96)
	江西	X <sub>6</sub> (10.90)	X <sub>3</sub> (10.27)	X <sub>11</sub> (8.81)	X <sub>13</sub> (8.79)	X <sub>4</sub> (8.76)
	湖北	X <sub>6</sub> (11.26)	X <sub>3</sub> (9.64)	X <sub>11</sub> (8.99)	X <sub>13</sub> (8.54)	X <sub>4</sub> (7.96)
	广东	X <sub>6</sub> (11.88)	X <sub>11</sub> (10.08)	X <sub>3</sub> (9.65)	X <sub>15</sub> (8.82)	X <sub>13</sub> (8.38)
	广西	X <sub>6</sub> (10.74)	X <sub>11</sub> (9.48)	X <sub>13</sub> (8.83)	X <sub>3</sub> (8.67)	X <sub>4</sub> (8.44)
	海南	X <sub>6</sub> (10.67)	X <sub>7</sub> (9.75)	X <sub>11</sub> (9.59)	X <sub>3</sub> (9.49)	X <sub>13</sub> (8.66)
	重庆	X <sub>6</sub> (11.50)	X <sub>3</sub> (11.03)	X <sub>11</sub> (9.81)	X <sub>9</sub> (9.20)	X <sub>4</sub> (7.73)
次冷点区	内蒙古	X <sub>3</sub> (10.24)	X <sub>11</sub> (9.70)	X <sub>13</sub> (8.60)	X <sub>12</sub> (7.68)	X <sub>1</sub> (7.24)
	辽宁	X <sub>3</sub> (10.59)	X <sub>6</sub> (10.11)	X <sub>11</sub> (9.51)	X <sub>15</sub> (8.60)	X <sub>13</sub> (8.11)
	吉林	X <sub>3</sub> (9.84)	X <sub>6</sub> (9.48)	X <sub>11</sub> (9.17)	X <sub>14</sub> (8.75)	X <sub>13</sub> (8.03)
	湖南	X <sub>6</sub> (10.71)	X <sub>3</sub> (9.54)	X <sub>11</sub> (9.11)	X <sub>13</sub> (8.40)	X <sub>14</sub> (7.95)
	四川	X <sub>6</sub> (11.15)	X <sub>11</sub> (10.01)	X <sub>15</sub> (9.53)	X <sub>4</sub> (9.04)	X <sub>9</sub> (8.98)
	贵州	X <sub>6</sub> (11.04)	X <sub>3</sub> (10.24)	X <sub>4</sub> (9.22)	X <sub>11</sub> (9.12)	X <sub>13</sub> (8.42)
	云南	X <sub>6</sub> (10.96)	X <sub>3</sub> (10.53)	X <sub>11</sub> (9.73)	X <sub>4</sub> (9.68)	X <sub>9</sub> (9.18)
	陕西	X <sub>3</sub> (11.08)	X <sub>6</sub> (11.02)	X <sub>11</sub> (10.60)	X <sub>4</sub> (8.14)	X <sub>13</sub> (8.11)
	宁夏	X <sub>3</sub> (9.66)	X <sub>6</sub> (9.30)	X <sub>11</sub> (8.62)	X <sub>9</sub> (8.54)	X <sub>13</sub> (8.48)
冷点区域	黑龙江	X <sub>6</sub> (10.50)	X <sub>3</sub> (9.78)	X <sub>11</sub> (9.13)	X <sub>1</sub> (8.73)	X <sub>13</sub> (8.64)
	西藏	X <sub>6</sub> (9.77)	X <sub>3</sub> (9.25)	X <sub>11</sub> (8.77)	X <sub>7</sub> (8.77)	X <sub>15</sub> (8.19)
	甘肃	X <sub>3</sub> (10.24)	X <sub>6</sub> (9.90)	X <sub>11</sub> (9.62)	X <sub>13</sub> (9.00)	X <sub>4</sub> (8.39)
	青海	X <sub>3</sub> (9.64)	X <sub>11</sub> (9.12)	X <sub>6</sub> (8.88)	X <sub>12</sub> (8.04)	X <sub>16</sub> (7.99)
	新疆	X <sub>6</sub> (10.07)	X <sub>3</sub> (9.85)	X <sub>11</sub> (9.31)	X <sub>5</sub> (9.25)	X <sub>1</sub> (9.17)

空间集聚区域的主控因子存在相似特征。北京和天津位于空间热点区域,两市的主控因子中社会因子占比较高,前5位主控因子中有4个相同的指标,其中前2位障碍指标均为水利信息化水平(北京17.82%,天津14.10%)和水文化发展水平(北京17.44%,天津12.70%)。

处于水利绿色发展次热点区域的省市,其主控因子高度相似,主要集中在水利信息化水平、生态用水比例、水土流失治理率和生产用水综合经济效率等方面,此外其主要障碍因素还涉及管理人员受教育水平、防洪能力指数,这表明这些区域水利绿色发展的社会支撑系统和生态支撑系统亟待改善。上海的主控因子前5位排序依次为水利信息化水平、水土流失治理率、水文化发展水平、生产用水综合经济效率和建成区绿化覆盖率,障碍度分别为15.44%,14.01%,13.69%,10.36%和7.70%。生态用水比例、防洪能力指数是江苏水利绿色发展的主要控制因子,说明江苏省在生态环境保护用水和应对较大洪水或超标准洪水的防御能力有待提升。浙江省水利绿色发展水平主控因子前5位排序:生态用水比例、水土流失治理率、防洪能力指数、生产用水综合经济效率和水文化发展水平,其障碍度分别为:13.24%、11.89%、10.49%、8.88%和8.26%。

水利绿色发展水平冷热点一般区域主要包含山西、江西、湖北、广东、广西、海南等,这类地区主控因子主要有水利信息化水平、生态用水比例、水土流失治理率、水利管理人员受教育程度,此外还有水功能区水质达标率、防洪能力指数等。这说明这类区域内输入系统和响应系统都有待提高,需要在水资源开发时注重生态保护,在水资源利用时注重节约、高效和环境友好。

处于水利绿色发展冷点区域的省市,其主控因子高度相似,主要集中在水利信息化水平、生态用水比例、水土流失治理率和生产用水综合经济效率等方面。

水利绿色发展冷点区域的主控因子排名前3位的均为水利信息化水平、生态用水比例系数和水土流失治理率,障碍度为8.77%~10.24%。第4位和第5位主控因子在区域间有很大差异,西藏为工业用水重复率和水文化发展水平,甘肃为生产用水综合经济效率和大专以上管理人员比重,青海为水旱灾害损失率和建成区绿化覆盖率,宁夏为防洪能力指数和生产用水综合经济效率,新疆为人均用水量 and 农业用水比例系数。

## 4 结 论

对我国31省(自治区、直辖市)2017年的水利绿色发展水平、空间异质性及其主控因子进行测算,主要得出以下结论:

(1)我国水利绿色发展水平整体呈现东部高于西部的态势。水利绿色发展优良等级的省份主要位于华北和华东地区;水利绿色发展中等等级省份在全国范围内分布较为分散;水利绿色发展一般等级的省份主要位于在西北、西南和华南地区。

(2)我国水利绿色发展水平在空间上呈现较强的异质性和空间关联性。水利绿色发展指数热点区包含北京和天津两市;次热点区域包含河北、河南、山东等8省市;冷点区和次冷点区范围较广,主要位于西北地区、西南地区和东北地区。

(3)水利绿色发展水平空间差异的系统层主控因子依次是输入系统、社会系统、经济系统、生态系统、响应系统和输出系统,各区域间水利绿色发展水平空间异质性差异主要源自对水利发展投入要素的建设、管理和监督。指标层主控因子依次水土流失治理率(30次)、水利信息化水平(29次)、生态用水比例(28次)、生产用水综合经济效率(21次)和大专以上管理人员比重(13次)。因此,加大水利发展投入,进一步提升水利管理能力,加强水资源信息化监管是水利绿色发展水平提高仍需努力的重要方向。

### 参考文献:

- [1] 林毅夫,蔡昉,李周. 中国经济转型时期的地区差距分析[J]. 经济研究,1998(6):5-12. DOI:10.3969/j.issn.1009-3788.2018.04.057.
- [2] 王谦,董艳玲. 中国实体经济发展的地区差异及分布动态演进[J]. 数量经济技术经济研究,2018,35(5):77-94. DOI:10.13653/j.cnki.jqte.20180503.003.
- [3] 严岩,朱捷缘,吴钢,等. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展[J]. 生态学报,2017,37(8):2489-2496. DOI:10.5846/stxb201602010229.
- [4] 赵凌云,常静. 中国生态恶化的空间原因与生态文明建设的空间对策[J]. 江汉论坛,2012(5):31-35. DOI:10.3969/j.issn.1003-854X.2012.05.004.
- [5] 胡鞍钢. 中国创新绿色发展[M]. 北京:中国人民大学出版社,2012.
- [6] 蔡起华,朱玉春. 社会信任、关系网络与农户参与农村公共产品供给[J]. 中国农村经济,2015(7):57-69.
- [7] 宋敏,汪琦,吉晓雨. 中国全要素农田水利效率的地区



- 差异和门槛效应研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2017, 19(4): 40-46, 91. DOI: 10. 3876/j. issn. 1671-4970. 2017. 04. 008.
- [8] 叶文辉,郭唐兵. 我国农田水利运营效率的实证研究: 基于2003—2010年省际面板数据的DEA-TOBIT两阶段法[J]. 山西财经大学学报, 2014, 36(2): 63-71. DOI: 10. 13781/j. cnki. 1007-9556. 2014. 02. 005.
- [9] 刘昌雪,汪德根,李凤. 国家水利风景区空间格局演变及影响机理分析[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(4): 108-117, 2. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-0504. 2018. 04. 017.
- [10] 赵刚,左德鹏,徐宗学,等. 基于集对分析-可变模糊集的中国水利现代化时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2015, 37(11): 2211-2218.
- [11] ZHOU X Y. Spatial explicit management for the water sustainability of coupled human and natural systems[J]. Environmental Pollution, 2019(251): 292-301. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2019. 05. 020.
- [12] 孔珂,解建仓,岳新利,等. 水市场的博弈分析[J]. 水利学报, 2005(4): 491-495. DOI: CNKI: SUN: SLXB. 0. 2005-04-019.
- [13] LI J, QIAO Y, LEI X, et al. A two-stage water allocation strategy for developing regional economic-environment sustainability[J]. Journal of Environmental Management, 2019(244): 189-198. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2019. 02. 108.
- [14] 张丽平,贾绍凤. 上海市郊区水利现代化综合评价方法[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2004(1): 66-70, 80. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9398. 2004. 01. 015.
- [15] 吴丹. 中国利绿色现代化发展进程评价与战略构想[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9): 114-123. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-2104. 2015. 09. 015.
- [16] 毛慧慧,王勇,董琳. 海河流域水利与经济社会协调发展定量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2011(10): 44-47.
- [17] 易小兵,王小军,黄锦林. 区域水利-社会经济协调度评价与综合水平空间差异分析[J]. 节水灌溉, 2013(4): 57-63. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4929. 2013. 04. 015.
- [18] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46(S1): 234-240. DOI: 10. 2307/143141.
- [19] 陈秧分,李先德. 中国粮食产量变化的时空格局与影响因素[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 1-10. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2013. 20. 001.
- [20] 史焱文,李二玲,李小建,等. 农业产业集群创新通道及溢出效应: 以山东寿光蔬菜产业集群为例[J]. 地理科学进展, 2019, 38(6): 861-871. DOI: 10. 18306/dlxxjz. 2019. 06. 007.
- [21] 陈绍宽,韦伟,毛保华,等. 基于改进时空 Moran's I 指数的道路交通状态特征分析[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 527-533. DOI: 10. 7498/aps. 62. 148901.
- [22] 同琳静,刘洋洋,王倩,等. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 367-374. DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2019. 04. 055.
- [23] 杨勇,梅杨,张楚天,等. 基于时空克里格的土壤重金属时空建模与预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 249-255. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2014. 21. 030.
- [24] 苑韶峰,唐奕钰,申屠楚宁. 土地利用转型时空演变及其生态环境效应: 基于长江经济带127个地级市的实证研究[J]. 经济地理, 2019(9): 174-181. DOI: 10. 15957/j. cnki. jjdl. 2019. 09. 021.
- [25] 刘玉凤,高良谋. 中国省域 FDI 对环境污染的影响研究[J]. 经济地理, 2019, 39(5): 47-54. DOI: 10. 15957/j. cnki. jjdl. 2019. 05. 006.
- [26] 赵俊伟,陈永福,余乐,等. 中国生猪养殖业地理集聚时空特征及影响因素[J]. 经济地理, 2019, 39(2): 180-189. DOI: 10. 15957/j. cnki. jjdl. 2019. 02. 022.
- [27] 姜文来. 水利绿色发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 6-13.
- [28] 魏琦,张斌,金书秦. 中国农业绿色发展指数构建及区域比较研究[J]. 农业经济问题, 2018(11): 11-20. DOI: 10. 13246/j. cnki. iae. 2018. 11. 002.
- [29] 孟宪萌,胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2009(3): 257-262. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2009. 03. 002.
- [30] 王琦,陈才. 产业集群与区域经济空间的耦合度分析[J]. 地理科学, 2008(2): 145-149. DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2008. 02. 023.
- [31] VALERIE ILLINGWORTH. The penguin dictionary of physics [M]. Beijing: Foreign Language Press, 1996.
- [32] 沈宏婷,陆玉麒,沈惊宏. 中国省域创新投入-创新产出-创新效益的时空耦合研究[J]. 经济地理, 2017, 37(6): 17-22, 35. DOI: 10. 15957/j. cnki. jjdl. 2017. 06. 003.
- [33] 栗欣如,尤飞. 基于ESDA的广西木薯种植空间布局演变研究. 中国农学通报, 2017, 33(5): 139-145.
- [34] 臧漫丹,姜子孟,孔嘉婧. 中国省际水资源福利绩效时空分异分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 805-816. DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201904007.

- [35] 何文举,刘慧玲,颜建军. 基本公共服务支出? 收入水平与城市人口迁移关系:以湖南省市域中心城市为例[J]. 经济地理,2018,38(12):50-59. DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2018.12.007.
- [36] 王录仓,高静. 基于灌区尺度的聚落与水土资源空间耦合关系研究:以张掖绿洲为例[J]. 自然资源学报,2014,29(11):1888-1901. DOI:10.11849/zrzyxb.2014.11.008.
- [37] 韩增林,许旭. 中国海洋经济地域差异及演化过程分析[J]. 地理研究,2008(3):613-622. DOI:10.3321/j.issn:1000-0585.2008.03.015.
- [38] 张锐,刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(7):945-951.
- [39] 郝汉舟,汤进华,翟文侠,等. 湖北省绿色发展指数空间格局及诊断分析[J]. 世界地理研究,2017,26(2):91-100. DOI:10.3969/j.issn.1004-9479.2017.02.010.
- [40] 赵会顺,陈超,胡振琪,等. 天山北坡经济带城市土地集约利用评价及障碍因素分析[J]. 农业工程学报,2018,34(20):258-266. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.20.033.
- [41] 姜文来. 绿色水利及其与节水型社会关系研究[J]. 中国水利,2005(13):44-46. DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2005.13.015.

(上接第 155 页)

- [26] 桑军伟. 南水北调中线工程左岸排水建筑物险情及影响分析[J]. 建筑工程技术与设计,2017(28):1387. DOI:10.3969/j.issn.2095-6630.2017.28.311.
- [27] 聂艳华,黄国兵,何建国. 节制闸控制规则对南水北调工程应急调度的影响[J]. 水电与新能源,2011(4):62-65. DOI:10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.2011.04.024.
- [28] 赵鸣雁,孔令仲,郑艳侠,等. 串联渠池闸门同步关闭情况下关闭时间对闸前水位雍高影响[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(6):157-163,170. DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0166.
- [29] 胡丹,郑良,李硕,等. 南水北调中线明渠工程运行风险评估方法研究[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(6):98-101. DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.06098.