

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.004

# 基于熵-云模型的我国水利高质量发展评价

韩宇平<sup>1,2</sup>,苏潇雅<sup>3</sup>,曹润祥<sup>1</sup>,陈莹<sup>4</sup>

(1. 华北水利水电大学水资源学院,河南 郑州 450046;  
2. 河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室,河南 郑州 450046;  
3. 河北省水利水电第二勘测设计研究院,河北 石家庄 050000; 4. 水利部水资源管理中心,北京 100038)

**摘要:** 基于对水利高质量发展的概念解析,提出了以水旱灾害防御、水资源集约安全利用、水资源优化配置、河湖生态保护治理4项能力为切入点的判断准则,构建了水利高质量发展评价体系,并基于熵-云模型对全国31个省市区的水利高质量发展现状进行了评价。结果表明:水旱灾害防御能力方面,东部多数省份较优;水资源集约安全利用能力方面,黄河沿线各省份、海河流域及东南沿海表现较好;水资源优化配置能力方面,长江、珠江流域表现更好;河湖生态保护治理能力方面,西南及中东部表现突出。水利高质量评价结果的不确定性分析表明,水利高质量发展系统复杂度较高,有进一步改进和提升的空间。

**关键词:** 水利高质量发展;熵-云模型;水旱灾害防御;水资源集约安全利用;水资源优化配置;河湖生态保护治理

**中图分类号:** X24;TV212      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2022)01-0026-08

**Evaluation of high-quality development of water conservancy in China based on entropy-cloud model // HAN Yiping<sup>1,2</sup>, SU Xiaoya<sup>3</sup>, CAO Runxiang<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>4</sup> (1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Key Laboratory of Water Resources Conservation and Intensive Utilization in the Yellow River Basin, Zhengzhou 450046, China; 3. Hebei Second Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Shijiazhuang 050000, China; 4. Water Resources Management Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)**

**Abstract:** Based on the analysis of the concept of high-quality development of water conservancy, the judgment criteria based on the four abilities of flood and drought disaster prevention, intensive and safe utilization of water resources, water resources optimal allocation and ecological protection and management of rivers and lakes was proposed. The evaluation system of high-quality development of water conservancy was constructed, and the current situation of high-quality development of water conservancy in 31 provinces in China was evaluated based on entropy-cloud model. The results show that most eastern provinces are better in flood and drought disaster prevention ability. In terms of intensive and safe utilization capacity of water resources, provinces along the Yellow River, Haihe River Basin and southeast coast area perform well. In terms of the ability of water resources optimize allocation, the Yangtze River and Pearl River basins perform better. In terms of the ability of ecological protection and management of rivers and lakes, the southwest and middle-east area are outstanding. The uncertainty analysis of water conservancy high quality evaluation results show that the water conservancy high quality development system has high complexity and there is room for further improvement.

**Key words:** high-quality development of water conservancy; entropy-cloud model; flood and drought disaster prevention; intensive and safe utilization of water resources; water resources optimal allocation; ecological protection and management of rivers and lakes

我国水情复杂、治水任务繁重,水利建设在保障人民生命财产安全和促进经济社会持续发展中起着

举足轻重的作用。中华人民共和国成立以来,国家把治水兴利摆在关系国家事业发展全局的战略位

基金项目:国家自然科学基金(51679089)

作者简介:韩宇平(1975—),男,教授,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail: hanyp@ncwu.edu.cn

通信作者:曹润祥(1990—),男,讲师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: runx.cao@foxmail.com

置,积极发展水利建设,在兴利避害方面成效显著。总体看来,我国水利建设理念经过了工程水利、资源水利、生态水利等阶段,水利工作的重点也从兴修水利工程发展到“水利工程补短板、水利行业强监管”的阶段,在具体管理措施上先后经历了节水型社会建设、最严格水资源管理制度、水生态文明建设、河(湖)长制等,目前发展到幸福河湖建设阶段。“十四五”开启,我国进入新发展阶段,水利在贯彻落实总体国家安全观、保障“发展与安全”方面,也将面临更多新挑战、承担更多新任务<sup>[1]</sup>。一方面,水利的联动作用进一步凸显,水利发展将与经济社会发展、乡村振兴、国家发展战略实施、生态文明与文化建设、资源环境协调、防灾减灾等方面联系愈加密切<sup>[2]</sup>;另一方面,四水问题(水资源、水环境、水生态、水安全)的刚性约束作用将日益显现。因此,实现水利高质量发展是水利建设升级的必经之路。

现阶段,我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段,高质量发展成为许多学科的研究热点。任保平等<sup>[3]</sup>指出高质量发展的关键是要解决发展不平衡、不充分问题。左其亭等<sup>[4-5]</sup>基于流域视角,结合实际问题和发展需求,阐述了黄河流域生态保护和高质量发展研究框架,并在解读高质量发展概念内涵的基础上,提出包括社会、经济、资源、生态和文化等方面的“5准则”,构建高质量发展评价体系,并对黄河流域2008—2018年的高质量发展水平进行评估,结果表明2008—2018年黄河流域高质量发展水平大致呈递增趋势,流域各省差异先扩大后缩小。崔盼盼等<sup>[6]</sup>构建了黄河流域生态环境及高质量发展水平评价指标体系,并利用熵权法及弹性系数法,对二者的时空耦合特征进行剖析与评价,发现二者等级对应程度较弱,且在时间尺度上具有锁定效应。Li等<sup>[7]</sup>使用Haken模型分析了高质量发展对资源环境驱动机制的不同影响,结果表明中国绿色发展的首选路径和关键因素是高质量发展的导向。Li等<sup>[8]</sup>认为高质量发展是推动海洋经济可持续发展的创新之路,并以中国沿海地区为例,构建了中国海洋经济高质量发展的研究框架,分析了中国海洋经济高质量发展的时空变化特征。Huang等<sup>[9]</sup>根据新发展理念和系统理论,从创新发展、城乡协调、生态环境、对外开放、民生5个方面构建了中国高质量发展评价指标体系,并通过基于灰色关联度的G1方法和基于靶心距的协调度模型对中国部分省份的高质量发展水平进行了分析,结果表明中国各省份间高质量发展不平衡,对外开放子系统是发展最不平衡的子系统,其次是创新发展子系统。Chen等<sup>[10]</sup>探讨了产业结构对环境规制和区域经济

高质量发展的中介作用,实证结果表明,不同强度的环境规制对区域经济高质量发展有不同的影响,进而说明了调整环境规制政策可以有效促进产业结构升级,从而促进区域经济高质量发展。Hu等<sup>[11]</sup>从6个准则层构建了新时期农村经济高质量发展的评价体系,包括创新发展、基础设施、生态环境、经济成就、经济稳定性和市场机制等,采用熵权-模糊综合评价方法评价了中国农村经济综合高质量发展水平,结果表明,中国农村经济高质量发展水平普遍较低,大部分省份落后,把握中国农村经济的发展现状,明确区域间的均衡发展,可以为推动中国农村经济全面高质量发展提供依据。

目前,高质量发展相关研究成果对其概念内涵进行了较深入的探讨,但其探讨的主要对象一类是经济发展,另一类是涵盖社会、经济、生态、文化多领域协同发展的宏观系统<sup>[12]</sup>。而对于其他更为细分的行业,比如水利高质量发展的定义及其评判准则等,缺少相关的定量研究。基于上述问题,本文对水利高质量发展概念进行解析,提出水利高质量发展判断准则层,并构建水利高质量发展评价指标体系,运用熵-云模型对中国31个省份地区的水利高质量发展水平进行评价,并对评价结果的不确定性进行分析,以期为新时期中国不同地区的水利高质量发展方向提供参考依据。

## 1 水利高质量发展评价指标体系及模型

### 1.1 概念解析

水利的发展始终秉持趋利避害的目标,所谓水利高质量发展,进一步凭借科技创新凸现水“利”,规避水“害”是应有之义。首先,由于区域气候特征及我国独特的阶梯状地形地貌,加之全球变暖及周边海-气振荡周期的变化,使得我国水旱灾害频发;依靠水利建设构建可靠的防洪抗旱体系,提高水旱灾害防御能力,保障人民群众的生命财产安全,是水利高质量发展的基础要义。其次,在我国紧张的水资源供需矛盾面前,供水方面须合理开发,保障供水安全,确保工程措施运行良好,非工程措施持续完善;用水方面须推行水资源集约、高效、可持续利用理念,做到节水优先;实现水资源集约安全利用,从而促进生态环境安全、社会经济安全,是水利高质量发展的核心环节。第三,我国水资源时空分布极其不均,在新发展阶段中,应遵从空间均衡的理念,对区域水资源高效配置,体现最严格水资源管理制度下的“量、质、效”的调控要求。提升水资源优化配置能力,使有限的水资源尽可能满足经济社会高质量发展需求<sup>[2]</sup>,是水利高质量发展的机制保障。第

四,缓解水资源过度开发带来的各种生态问题,通过协调区域发展模式和生态系统质量,把握水资源开发与河湖生态保护的平衡,显著提升河湖生态保护治理能力,是水利高质量发展的战略任务。

基于以上对水利高质量发展的认识,本文将水利高质量发展定义为:水旱灾害防御、水资源集约安全利用、水资源优化配置、河湖生态保护治理4方面能力显著提高,可以支撑生态文明与经济社会高质量发展的水利发展状态。

## 1.2 水利高质量发展评价指标体系建立

基于对水利高质量发展的理解,以水旱灾害防御能力、水资源集约安全利用能力、水资源优化配置能力、河湖生态保护治理能力“4准则”为切入点,总结相关文献,采用理论分析法、频率统计法和专家咨询法等多种方法,按照科学性、代表性、完备性、可操作性等原则<sup>[13]</sup>,选取了22个评价指标,构建了水利高质量发展评价指标体系,如图1所示,括号中为指标权重,其相关统计数据可通过水利统计年鉴和水资源公报得到。

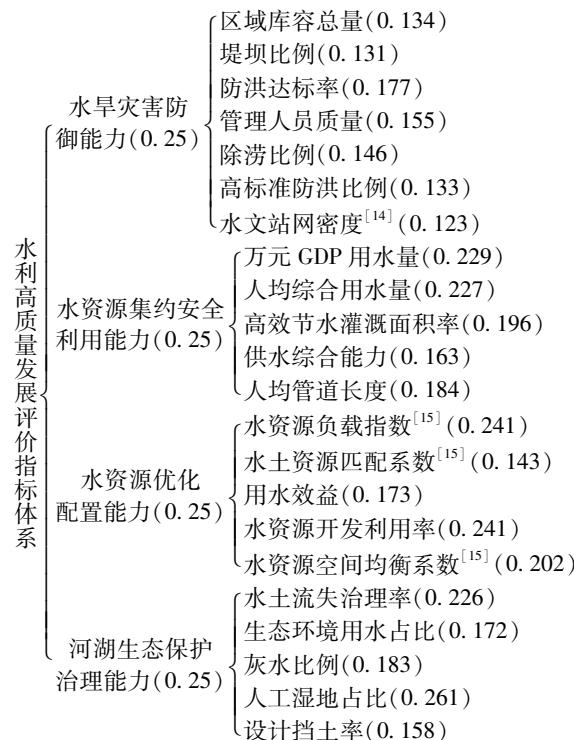


图1 水利高质量发展评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of high-quality development of water conservancy

## 1.3 熵-云耦合评价模型

### 1.3.1 熵权法

熵权法借鉴了信息论中“熵”的概念,基本思路是通过各评价指标的信息熵来决定其重要程度<sup>[16]</sup>。熵权法是一种常用的客观赋权法,在各种评价指标值确定的情况下,熵权值反映了各指标在竞争意义

上的相对激烈程度<sup>[17-18]</sup>。在水利高质量发展评价实例中,引入信息熵函数:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = -k_1 \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (1)$$

其中  $k_1 = \ln n$

式中: $H$  为水利高质量发展指标的信息熵; $p_i$  为第  $i$  个标准化后的统计值,其中,规定若  $p_i = 0$ ,则将  $p_i \ln p_i$  替换为 0; $k_1$  为标准化系数; $n$  为指标样本数量。

信息熵权  $w_j$  可表示为

$$w_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (2)$$

式中: $H_j$  为第  $j$  个评价指标的信息熵值; $m$  为指标的个数。

### 1.3.2 云模型

云模型是一种基于模糊数学和随机数学的算法,可对定性概念与其定量表示进行不确定性转换<sup>[19-20]</sup>。设  $X$  是用数值表示的定量域, $C$  是  $X$  的定性概念,如果定量值  $x \in X$ ,且  $x$  是  $C$  上的一个随机量,隶属度  $\beta(x) \in [0,1]$ 。 $x$  为云  $X$  的云滴,那么:

$$\beta: A \rightarrow [0,1], \forall x \in A, x \rightarrow \beta(x) \quad (3)$$

云滴是云的组成元素,云滴越确定,云就越确定。云模型用期望  $E_x$ 、熵  $E_n$ 、超熵  $H_e$  这 3 个数字特征,即  $C(E_x, E_n, H_e)$  反映整体特征<sup>[21]</sup>。云滴的期望  $E_x$  是在论域空间上的中心位置;熵  $E_n$  是不确定性的度量,反映定性概念的随机性和模糊性;超熵  $H_e$  是对熵  $E_n$  的不确定性的度量,即熵  $E_n$  的熵,可通过云滴的分散程度来体现。根据文献[22-23],评价因子对某一水利高质量发展因子的云数字特征  $C(E_x, E_n, H_e)$  可表示为

$$\begin{cases} E_x = (B_{\min} + B_{\max})/2 \\ E_n = (B_{\max} - B_{\min})/3 \\ H_e = k \end{cases} \quad (4)$$

式中: $B_{\min}$  和  $B_{\max}$  分别表示某一等级标准的最大与最小边界; $k$  值取经验值<sup>[24-25]</sup>。其中两端等级对应的云特征参数的调整处理参考文献[24]。

云滴的生成依靠云发生器实现。云发生器有正向云发生器(forward cloud generator, FCG)与逆向云发生器(backward cloud generator, BCG)之分,可分别实现定性与定量的转化和其反向过程<sup>[26]</sup>。其具体步骤参考文献[19,27]。

### 1.3.3 模糊熵

模糊熵是一种对模糊集的模糊程度的整体度量<sup>[28]</sup>。在水利高质量发展评价实例中,引入模糊熵的概念,用以分析云模型评价结果的不确定度。模

糊熵  $E$  的计算方法如下<sup>[17,29]</sup>:

$$E = -\frac{1}{k_2} \sum_{r=1}^N [C_{er} \ln C_{er} + (1 - C_{er}) \ln(1 - C_{er})] \quad (5)$$

其中  $k_2 = -\ln(\frac{1}{N}) - (N-1) \ln \frac{N-1}{N}$

式中: $C_{er}$ 为云模型评价等级  $r$  的确定度; $N$ 为高质量发展评价等级数量; $k_2$ 为标准化系数,这里同样规定若  $p_i = 0$ ,则将  $p_i \ln p_i$  替换为 0。模糊熵  $E$  越接近 0,说明其模糊性越小,反之越接近 1,模糊性越大。水利高质量发展熵-云模型评价流程如图 2 所示。

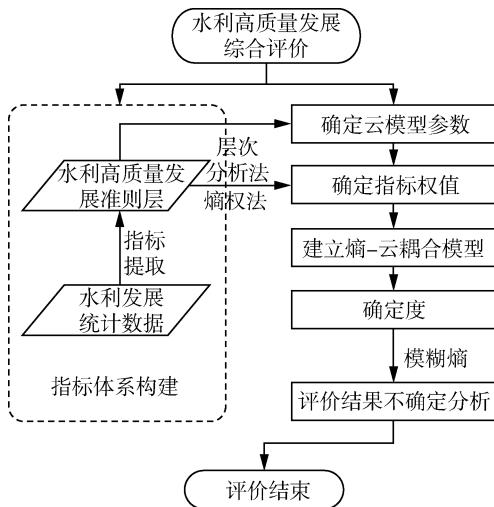


图 2 水利高质量发展熵-云模型评价流程

Fig. 2 Flow chart of entropy-cloud model for high-quality development of water conservancy

## 2 评价结果与分析

### 2.1 评价范围及数据来源

将全国 31 个省级行政区(因港澳台地区的资料暂缺,故不纳入评价范围)作为研究单元,对各个单元水利高质量发展水平进行评价。计算各指标所需要的水利发展相关数据来源于中国水利年鉴 2018,水资源和用水数据来源于水资源公报,社会经济数据来源于中国统计年鉴。

### 2.2 云模型构建

将每一个水利高质量发展评价指标对应于发展等级的隶属度看作是一个云,计算数字特征  $C(E_x, E_n, H_e)$ ,并通过 FCG 来生成隶属度云滴,从而建构云模型。实现隶属度从定性到定量之间一对多的映射。这一过程相较于传统的隶属度确定性计算方法,充分体现了隶属关系中的模糊性和随机性。

将准则层的各项指标数据代入云模型,经 FCG 生成 1000 个隶属度云滴如图 3 所示。图 3 中云滴对应的  $x$  轴为指标的标准化值,  $y$  轴表示其归属于某一个概念等级(本文设置 I ~ IV 共 4 个高质量发

展等级)的隶属度。读取各省份各个水利发展指标的统计数据,经计算,其最大隶属度方向及其确定度相对大小如图 4 所示。

### 2.3 各省份水利高质量发展评价结果分析

本文认为 4 个准则层对水利高质量发展具有同等的重要性,根据层次分析法主观定权,各层权重均为 0.25。结合熵权计算方法确定各个指标权重,结果如图 1 所示。根据算得的水利高质量发展各等级隶属度向量确定各准则层评价结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,在水旱灾害防御能力上,大致上东部多数省份较优,其中湖北、宁夏、青海和西藏分别因统计数据记录中堤坝防洪达标率、城市除涝建设、水文站网密度等方面相对薄弱的表现,致使评价结果相对较低。在水资源集约安全利用能力上,大致上多数黄河沿线省份、海河流域及东南沿海省份的计算结果较好。这些省份中,东南沿海省份经济发达,优势在于产业结构层面上耗水率相对更小,而沿黄、海河省份优势则在于较高的节水灌溉面积率。水资源优化配置能力上,长江、珠江流域及经济密度较小的西藏、青海都有较好的表现。对于长江、珠江流域而言,主要是由于地区本身的水资源较充沛,水土资源匹配度较好,而青藏地区主要是由于人口密度小,水资源开发利用低。在河湖生态保护治理能力上,西南及中东部表现更好,这是由于西南省份相对较好的水土保持工程建设,中东部省份拥有较高的生态环境用水占比及灰水使用率。水利高质量发展综合评价结果表明,京津沪三地区在水利高质量发展排第一梯队,这与地区相对较小的面积和较高的水利建设投入的事实相一致;而西部的宁夏、新疆与西藏地区则发展水平相对较低。

### 2.4 评价结果的不确定性分析

由图 4 可以看出,部分省份的个别指标即使在最大的隶属度方向上其确定性依然较小。运用模糊熵方法对综合评价结果的不确定性进行分析,评价结果气泡图如图 6 所示。可见,各省份评价结果的模糊熵大多数在 0.5 以上,根据刘登峰等<sup>[17]</sup>定义的等级归属与模糊熵对应关系,[0.5, 0.75)、[0.75, 1] 分别对应“较模糊”与“模糊”,因此结果具有相对较高的模糊性。以气泡大小表示最大隶属度,可以看到隶属度最值与等级划分没有明显的相关性。以上结果说明水利高质量发展系统复杂度较高,目前发展状态下各省份多个指标之间等级归属的一致性较差,这可能导致不同的评价方法下评价结果存在差异。结果的启发意义在于,目前各省份的水利高质量发展水平在不同指标维度上参差不齐,在不同

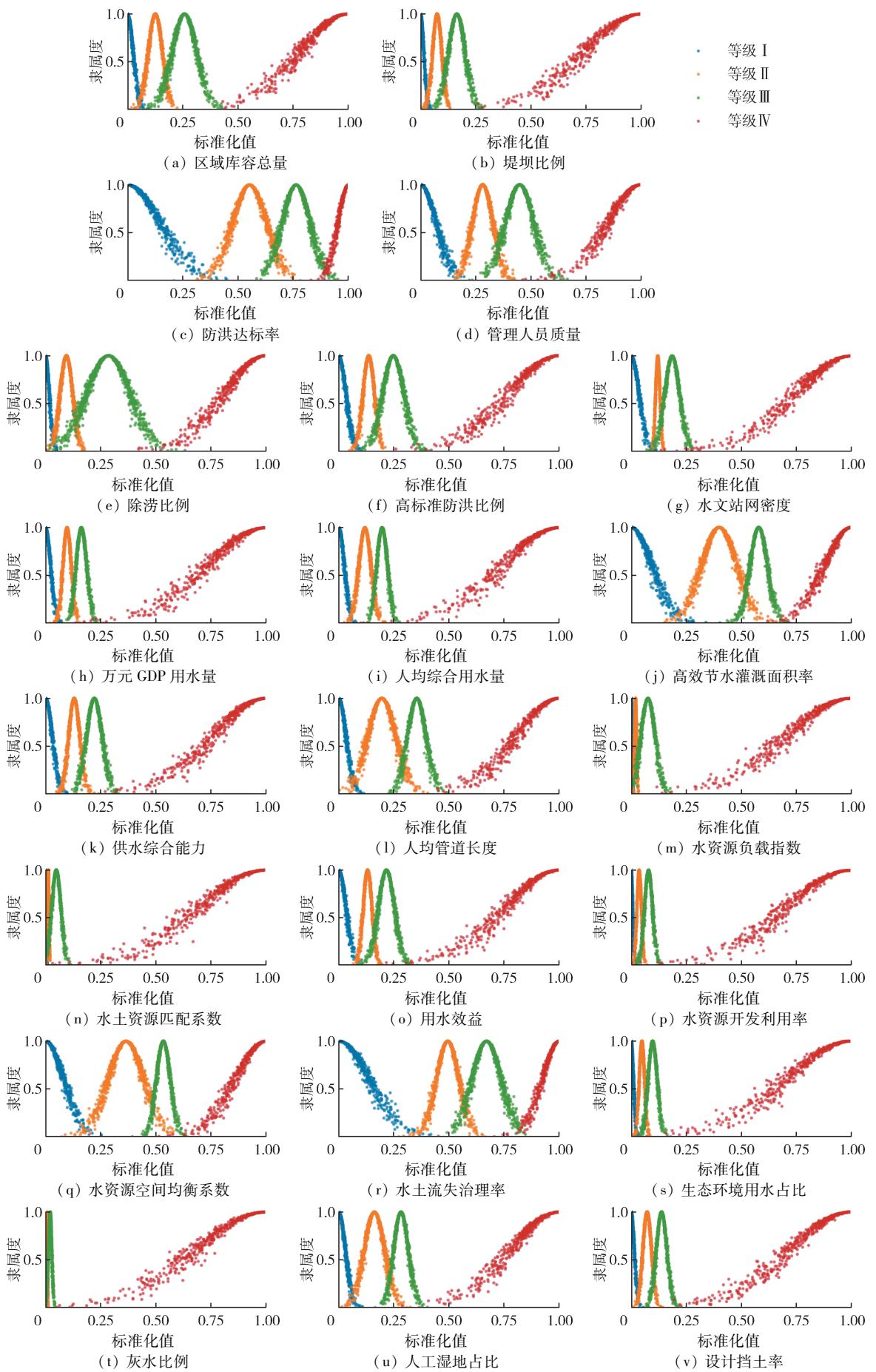


图3 不同指标的正态云

Fig. 3 Norm clouds for different indicators

的准则层下,各省水利发展面临着不尽相同的问题,各省份的水利高质量发展方向在于“补短板”。表现在图6中,水利高质量发展的路径,应由“低等

级,高模糊”指向“高等级,低模糊”,以右下角为目标方向,可以看出,现阶段各省份水利高质量发展都具有较大的发展空间。

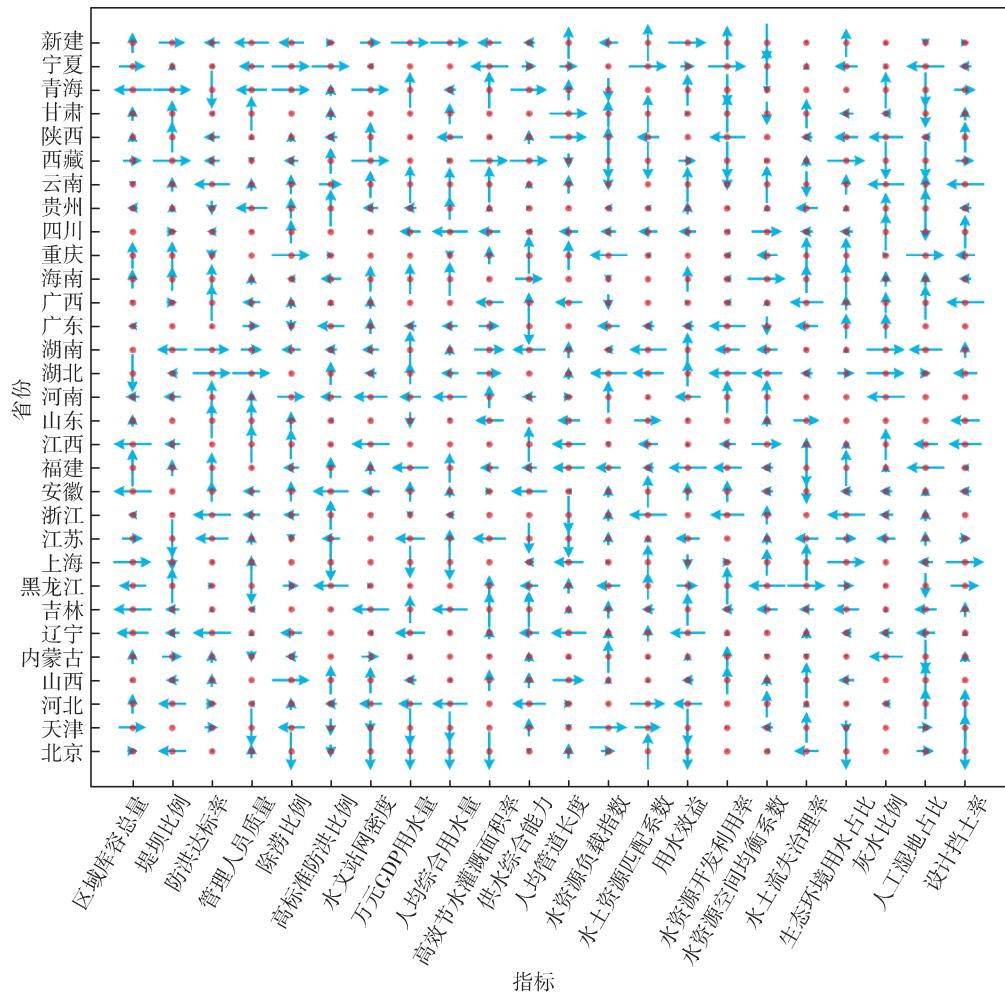
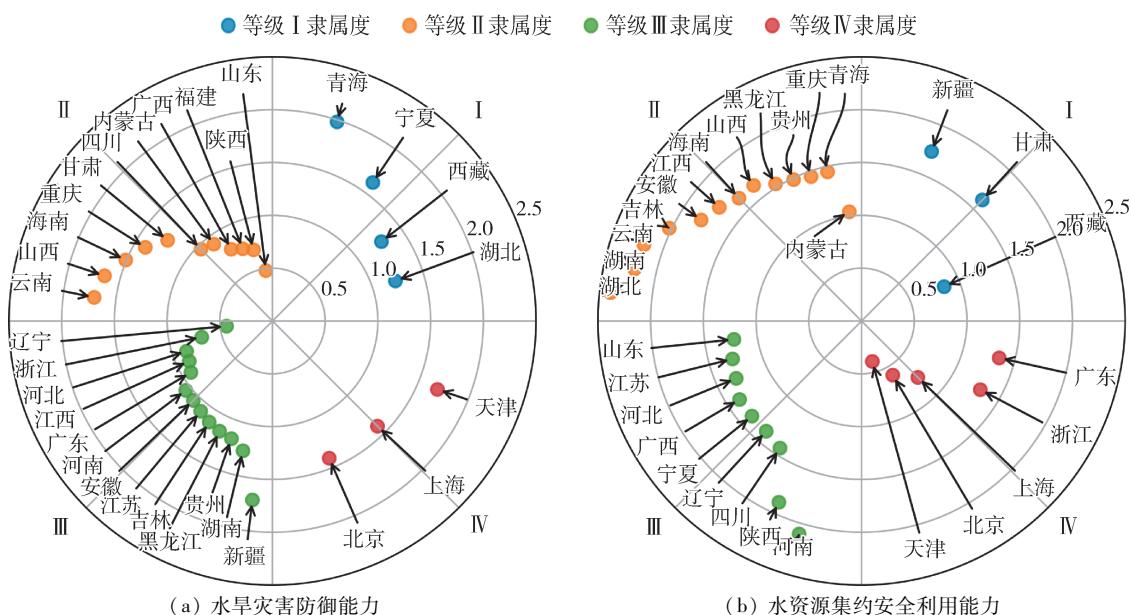
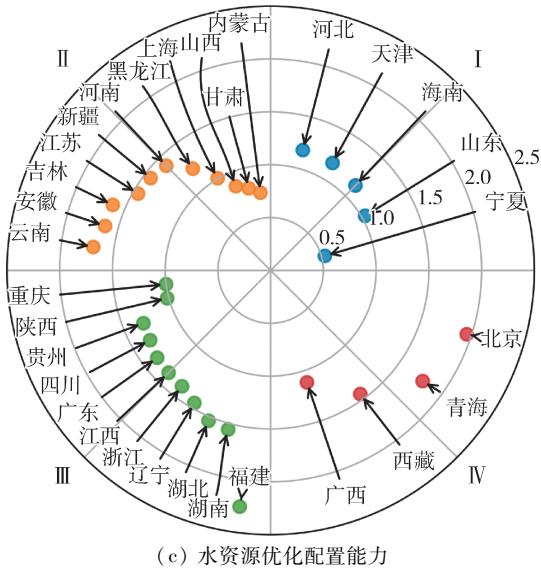


图4 各省份不同水利高质量发展因子最大隶属度方向及确定度相对大小

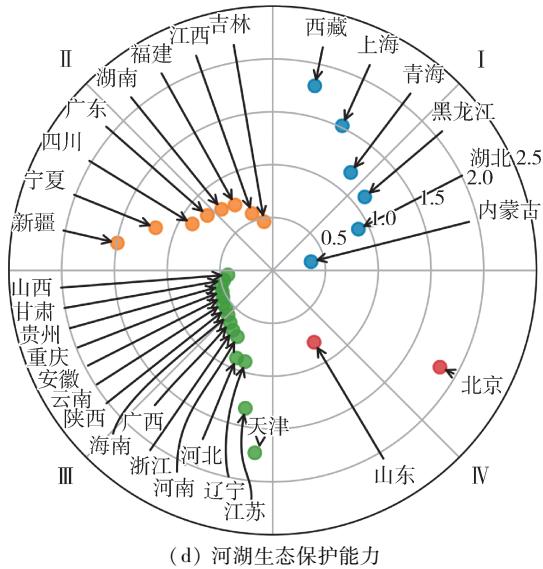
Fig. 4 Direction of maximum membership degree and relative size of certainty degree of different water conservancy high-quality development factors in each province

注:图中箭头“→”、“↑”、“←”、“↓”4种指向分别对应水利高质量发展等级I、II、III和IV;箭头长度表征确定性的相对大小。





### c) 水资源优化配置能力



(d) 河湖生态保护能力

图 5 各准则层水利高质量发展评价等级及最大隶属度

**Fig. 5 Water conservancy high-quality development level and maximum membership degree for each criterion layer**

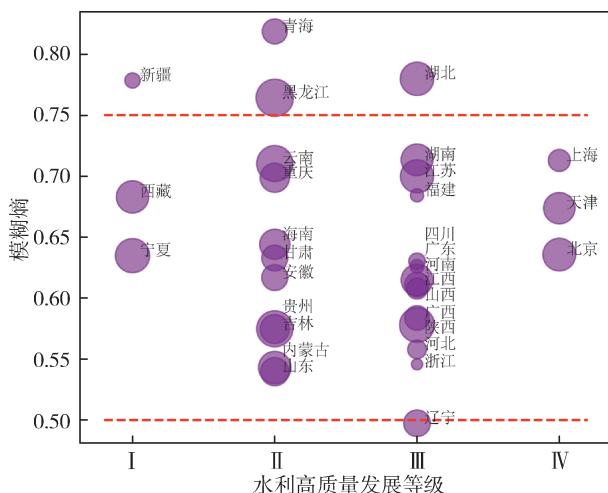


图 6 水利高质量发展评价结果气泡图

**Fig. 6 Bubble chart of evaluation results of high-quality development of water conservancy**

注:红线对应模糊熵 0.50 及 0.75。

3 结 论

- a. 在水利高质量发展的水旱灾害防御准则层面,东部多数省份较优;在水资源集约安全利用准则层面,多数黄河沿线省份、海河流域及东南沿海依统计数据计算的结果较好;在水资源优化配置准则层面,长江、珠江流域及经济密度较小的西藏、青海都有较好的表现;在河湖生态保护治理准则层面,西南及中东部表现更好。

**b. 水利高质量发展评价结果的不确定性分析**  
表明,由于目前发展状态下各省份多个指标之间等  
级归属一致性较差,导致评价结果的模糊性较高。

c. 目前各省份的水利高质量发展水平在不同指标维度上参差不齐,在不同的准则层下,各省水利

发展面临着不尽相同的问题,各省份的水利高质量发展方向在于“补短板”,水利高质量发展在现阶段具有较大的提升空间。

#### 参考文献：

- [ 1 ] 陈茂山,夏朋,王建平.准确把握新发展阶段水利的地位和作用 [J]. 中国水利, 2021 ( 2 ) : 4-6. ( CHEN Maoshan, XIA Peng, WANG Jianping. Accurately positioning the status and role of water resources in new development stage [J]. China Water Resources, 2021(2) : 4-6. (in Chinese))

[ 2 ] 谷树忠.系统推进水利高质量发展 [J]. 中国水利, 2021 ( 2 ) : 1-2. ( GU Shuzhong. Systematically promote water conservancy high-quality development [J]. China Water Resources ,2021(2) :1-2. (in Chinese))

[ 3 ] 任保平,李禹墨.新时代我国高质量发展评判体系的构建及其转型路径 [J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2018 ,47(3) :105-113. ( REN Baoping, LI Yumo. On the construction of Chinese high-quality development evaluation system and the path of its transformation in the new era [ J ]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition) ,2018 ,47 (3) : 105-113. (in Chinese))

[ 4 ] 左其亭.黄河流域生态保护和高质量发展研究框架 [J]. 人民黄河, 2019 , 41 ( 11 ) : 1-6. ( ZUO Qiting. Research framework for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin [ J ]. Yellow River,2019 ,41(11) :1-6. (in Chinese))

[ 5 ] 左其亭,姜龙,马军霞,等.黄河流域高质量发展判断准则及评价体系 [J]. 灌溉排水学报, 2021 ,40(3) :1-8. (ZUO Qiting, JIANG Long, MA Junxia, et al. Judgment criteria and evaluation system for high-quality development

- of the Yellow River basin [ J ]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40 ( 3 ) : 1-8. ( in Chinese )
- [ 6 ] 崔盼盼, 赵媛, 夏四友, 等. 黄河流域生态环境与高质量发展测度及时空耦合特征 [ J ]. 经济地理, 2020, 40 ( 5 ) : 49-57. ( CUI Panpan, ZHAO Yuan, XIA Siyou, et al. Level measures and temporal and spatial coupling analysis of ecological environment and high quality development in the Yellow River Basin [ J ]. Economic Geography, 2020, 40 ( 5 ) : 49-57. ( in Chinese ) )
- [ 7 ] LI Z, YANG W, WANG C, et al. Guided high-quality development, resources, and environmental forcing in China's green development [ J ]. Sustainability, 2019, 11 ( 7 ) : 1936.
- [ 8 ] LI B, TIAN C, SHI Z, et al. Evolution and differentiation of high-quality development of marine economy: a case study from China [ J ]. Complexity, 2020 ( 3 ) : 1-11.
- [ 9 ] HUANG X, CAI B, LI Y. Evaluation index system and measurement of high-quality development in China [ J ]. Revista De Cercetare Si Interventie Sociala, 2020, 68 : 163-178.
- [ 10 ] CHEN L, YE W, HUO C, et al. Environmental regulations, the industrial structure, and high-quality regional economic development: evidence from China [ J ]. Land, 2020, 9 ( 12 ) : 517.
- [ 11 ] HU H, MA Y, WU S. Fuzzy comprehensive evaluation on high-quality development of China's rural economy based on entropy weight [ J ]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38 ( 6 ) : 7531-7539.
- [ 12 ] 孟望生, 邵芳琴. 黄河流域环境规制和产业结构对绿色经济增长效率的影响 [ J ]. 水资源保护, 2020, 36 ( 6 ) : 24-30. ( MENG Wangsheng, SHAO Fangqin. Influence of environmental regulation and industrial structure on the growth efficiency of green economy in the Yellow River Basin [ J ]. Water Resources Protection, 2020, 36 ( 6 ) : 24-30. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 崔晨韵, 朱永华, 吕海深, 等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价 [ J ]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 ( 5 ) : 406-412. ( CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2020, 48 ( 5 ) : 406-412. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 马宗伟, 许有鹏, 钟善锦. 水系分形特征对流域径流特性的影响:以赣江中上游流域为例 [ J ]. 长江流域资源与环境, 2009, 18 ( 2 ) : 163-169. ( MA Zongwei, XU Youpeng, ZHONG Shanjin. Influence of river network fractal characteristic on runoff: case study in the basin of upper and middle courses of Gan River [ J ]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18 ( 2 ) : 163-169. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] 夏帆, 陈莹, 窦明, 等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用 [ J ]. 水资源保护, 2020, 36 ( 1 ) : 52-57. ( XIA Fan, CHEN Yin, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources [ J ]. Water Resources Protection, 2020, 36 ( 1 ) : 52-57. ( in Chinese ) )
- [ 16 ] 杜现增, 袁榆梁, 孟钰, 等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价 [ J ]. 水资源保护, 2021, 37 ( 3 ) : 145-151. ( DU Xianzeng, YUAN Yuliang, MENG Yu, et al. Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model [ J ]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 3 ) : 145-151. ( in Chinese ) )
- [ 17 ] 刘登峰, 王栋, 丁昊, 等. 水体富营养化评价的熵-云耦合模型 [ J ]. 水利学报, 2014, 45 ( 10 ) : 1214-1222. ( LIU Dengfeng, WANG Dong, DING Hao, et al. Eutrophication assessment by entropy-cloud model [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 ( 10 ) : 1214-1222. ( in Chinese ) )
- [ 18 ] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用 [ J ]. 环境科学学报, 2005 ( 4 ) : 552-556. ( ZOU Zhihong, SUN Jingnan, REN Guangping. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005 ( 4 ) : 552-556. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] PENG T, DENG H, LIN Y, et al. Assessment on water resources carrying capacity in karst areas by using an innovative DPESBRM concept model and cloud model [ J ]. Science of the Total Environment, 2021, 767 : 144353.
- [ 20 ] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [ J ]. 计算机研究与发展, 1995 ( 6 ) : 15-20. ( LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [ J ]. Journal of Computer Research and Development, 1995 ( 6 ) : 15-20. ( in Chinese ) )
- [ 21 ] PENG T, DENG H. Comprehensive evaluation for sustainable development based on relative resource carrying capacity: a case study of Guiyang, Southwest China [ J ]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 ( 16 ) : 20090-20103.
- [ 22 ] 李晓超, 钟登华, 任炳昱, 等. 基于模糊 RES-云模型的坝基岩体可灌性评价研究 [ J ]. 水利学报, 2017, 48 ( 11 ) : 1311-1323. ( LI Xiaochao, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Study on evaluation of rock mass groutability of dam foundation based on fuzzy RES-cloud model [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 ( 11 ) : 1311-1323. ( in Chinese ) )

(下转第 61 页)