

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0023

王杰,李占玲.基于熵权的TOPSIS综合评价法在大气环流模式优选中的应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):14-21. WANG J,LI Z L. Application of entropy weighted TOPSIS method for selection of general circulation models[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(2):14-21. (in Chinese)

基于熵权的 TOPSIS 综合评价法 在大气环流模式优选中的应用

王杰^{1,2},李占玲¹

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院,北京 100083;2. 山东省水利勘测设计院,济南 250013)

摘要:大气环流模式(GCMs)是定量评估气候变化及其影响效应的有效工具,GCMs的优选是使用该工具时不可缺少的重要环节。将TOPSIS综合评价法引入到GCMs的优选中,并结合熵权的概念对各项评价指标进行赋权,采用加权TOPSIS综合评价法对CMIP5中18个GCMs对黑河流域上游降水模拟方面的适用性进行评价;并通过传统rank score(RS)方法和降水预估精度两方面对该方法的结果进行验证。结果表明:对研究区1960—2005年降水模拟效果最好的是CSIRO-Mk3.6.0模式,模拟效果最差的是BNU-ESM模式;1960—2005年模拟性能优良和模拟性能较差的GCMs排序与传统RS方法得到的结果基本一致,与2006—2015年GCMs的排序也基本一致,这说明基于加权TOPSIS综合评价法对GCMs进行优选的结论具有很强的可靠性。该方法适用于多方案、多目标的GCMs优选,并由于其计算简单、计算过程中没有信息损失等优势而具有广阔的应用前景。

关键词:TOPSIS;熵权;大气环流模式;黑河;RS

中图分类号:P461 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of entropy weighted TOPSIS method for selection of general circulation models

WANG Jie^{1,2}, LI Zhanling¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China)

Abstract: The Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) method is widely used in resolving the multi-objective and multi-indicator decision making problems in published literature. In this study, TOPSIS was applied to evaluate the performance of precipitation simulations obtained from 18 General Circulation Models (GCMs) over the upper reaches of the Heihe River basin. Firstly, six indicators, such as mean value, normalized root mean square error, coefficient of variation, Mann-Kendall trend analysis statistic value, coefficient of inhomogeneity and Pearson correlation coefficient were used in the evaluation process. Secondly, the weight of each indicator was determined by using the entropy approach, and finally GCMs were ranked based on the entropy weighted TOPSIS method. The result showed that, CSIRO-Mk3.6.0 ranked 1st, and therefore was selected as the best alternative selection in precipitation simulation during the period of 1960 to 2005 over the study area. BNU-ESM ranked the last and was the worst alternative selection. The result was quite comparable with the traditional method of the rank score. Compared with the observations during the period of 2006 to 2015, CSIRO-Mk3.6.0 model also performed the best and BNU-ESM performed the worst in predicting the precipitation for the same period. Thus, it was concluded

收稿日期:2019-04-16 修回日期:2019-08-11 网络出版时间:2019-09-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190906.1332.010.html>

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(35832015028)

作者简介:王杰(1991—),男,山东济南人,从事水文学及水资源研究。E-mail:2105160030@cugb.edu.cn

通信作者:李占玲(1980—),女,内蒙古人,副教授,从事水文学及水资源研究。E-mail:zhanling.li@cugb.edu.cn

that the TOPSIS method could be applied in the similar studies since it has a rigorous theoretical basis, no requirement for data sample size, no loss of information in the calculation process, and easy to calculate.

Key words: TOPSIS; entropy weight; GCMs; Heihe River; Rank Score

气候变化对人类生活和社会发展的各个方面都具有重大影响。大气环流模式(GCMs, general circulation models)是定量评估气候变化及其影响效应的有效工具。由于不同 GCMs 的研究机构、分辨率、初始条件、参数设置等方面都不尽相同,因而即使对同一地区同一气象要素的时空分布特征及变化趋势进行模拟,结果也可能存在较大差异^[1]。因此在使用 GCMs 输出结果进行区域气候变化的研究之前,需要对 GCMs 的适用性进行评价。

目前对 GCMs 进行适用性评价的方法主要分为两大类。一类是基于单项指标的评价方法,如曹颖等^[2]用均值、标准差、相关系数、变异系数 4 项指标评价了 5 个 GCMs 对黄河流域降水的模拟效果;姜燕敏^[3]采用趋势分析、滑动平均和 EOF 等指标评价了 20 个 GCMs 的集合平均对中亚地区年平均气温的模拟能力;吕睿喆^[4]等使用相对误差、均方根误差和相关系数等指标评价了 5 个 GCMs 在乌梁素海流域的降水模拟效果。另一类是基于多项指标的综合评价方法,该方法是对各单项指标按照某种运算法则进行综合计算,从而对研究对象进行评价的一种方法,例如基于秩打分的 RS(rank score)评价方法。蒋昕昊等^[5]、李发鹏等^[6]、刘文丰等^[7]、李蓉等^[8]分别在长江流域、松花江流域、东南诸河流域、黑河流域使用 RS 方法评估了不同 GCMs 对气温、降水等气候要素的模拟能力;刘兆飞等^[9]利用改进的 RS 方法评价了 34 个 GCMs 对蒙古高原气温和降水的模拟能力。

TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution)法是有限方案多目标决策的综合评价方法之一,其概念简单、计算过程清晰、可操作性强。自 1981 年首次提出以来,已广泛应用于经济、工业技术、医药卫生、交通运输等领域,在水资源配置方案评价、水资源承载力评价、水环境质量评价、干旱评价等方面也逐渐发挥重要作用^[10-13]。比较 RS 方法在指标值进行秩代换过程中可能会损失一些有用信息量这一特点,该方法可以充分利用原始数据信息,在评价时没有信息损失,能够客观真实地反映实际情况;在计算过程中, TOPSIS 方法对原始数据进行同趋势和归一化处理,可以有效地消除不同指标间的影响^[14]。国外已有一

些学者将该方法应用于 GCMs 的评价与优选中。例如, Srinivasa 和 Kumar^[15-16]采用 TOPSIS 方法评价了 11 个 GCMs 对印度 3 个流域降水和气温要素的模拟能力,并最终优选出适合不同流域的 GCMs; Zamani 等^[17]采用该方法评价了 20 个 GCMs 对伊朗西部和西南部 3 个流域降水和气温要素的模拟能力,得到 MIROC-ESM 和 BCC-CSM1.1 模式适用性较强的结论。在国内,尚缺乏该方法在 GCMs 优选中的应用实例。

本文以黑河流域上游为研究区,采用 TOPSIS 综合评价法分析比较 CMIP5 (the fifth phase of coupled model inter-comparison project, 耦合模式比较计划第五阶段)中的 18 个 GCMs 对研究区降水要素的模拟能力,一方面以期找出对研究区适用性较强的大气环流模式,另一方面也可以为丰富 GCMs 优选方法提供借鉴和参考。

1 TOPSIS 综合评价法

TOPSIS 综合评价法,即逼近理想解排序法,是根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度,对评价对象的相对优劣程度进行排序的方法。该评价方法的步骤如下。

(1)构建决策矩阵并进行归一化处理。设有 m 个评价对象, n 项评价指标,建立原始决策矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。其中 x_{ij} 表示第 i 个评价对象的第 j 项评价指标的值, $i = 1, 2, 3, \dots, m, j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。将原始决策矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 归一化处理,形成标准矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}, y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min(j)}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}}$ 。其中, $x_{\max(j)}, x_{\min(j)}$ 表示所有评价对象中第 j 项指标对应的最大、最小值。

(2)构建加权标准化决策矩阵, $Z = (z_{ij})_{m \times n}, z_{ij} = W_j \times y_{ij}$ 。其中, W_j 为第 j 项评价指标的权重。在多指标综合评价方法中,确定各指标权重是其中一个重要环节。权重的合理与否直接关系到评价结果的客观性和合理性^[18]。目前确定指标权重的方法包括主观赋权法、客观赋权法和主客观综合集成赋权法,每种方法在确定权重时都具有一定的优势与劣势,相应的适用范围也存在较大差异^[19]。根据本研究样本量较大、样本信息完整的特点,采用客观赋权法中的熵权法确定各指标权重。

熵权法的基本思想是根据某同一指标计算值之间的变异程度来反应其重要程度,变异性大的指标一般对评价结果的影响更大^[12]。熵权法确定权重的步骤如下:

定义第 i 个评价对象的第 j 项评价指标所占的比重为 f_{ij} ,则有

$$f_{ij} = \frac{(1+y_{ij})}{\sum_{i=1}^m (1+y_{ij})} \quad (1)$$

定义第 j 项指标的熵值为 H_j ,则有

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (2)$$

则第 j 项指标的熵权 W_j 为

$$W_j = \frac{1-H_j}{n-\sum_{j=1}^n H_j}, \text{且满足 } \sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad (3)$$

(3) 确定理想解 z_j^* 和负理想解 z_j^{**} , 其中,理想解为各评价指标都达到最优水平的解,负理想解为各评价指标都达到最劣水平的解。

(4) 计算各指标与理想解 z_j^* 的距离 D_a^+ 和与负理想解 z_j^{**} 的距离 D_a^- 。

$$D_a^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_j - z_j^*)^2}, D_a^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_j - z_j^{**})^2} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(5) 计算评价对象与理想解的相对接近程度 C_a 。

$$C_a = \frac{D_a^-}{(D_a^- + D_a^+)} \quad C_a \in (0, 1) \quad (5)$$

根据 C_a 值的大小对评价对象进行排序。 C_a 值越接近 1 表示该评价对象越接近于理想解(最优水平), C_a 值越接近 0 表示该评价对象越接近于负理想解(最劣水平)。

2 应用实例

2.1 研究区概况

黑河是我国境内第二大内流河,发源于祁连山北麓,干流全长约 800 km;流域范围包括青海、甘肃、内蒙古 3 个省(自治区)的 14 个县市区,流域面积约 14 万 km^2 。自祁连山出山口至莺落峡为流域上游,河道长约 303 km,面积约 1.0 万 km^2 ,降水多、蒸发少、气温低,高寒阴湿,是黑河流域的主要产流区^[20]。现状和未来气候变化条件下,流域降水量的时空变化会直接影响到流域水资源的时空分布,进而对生态环境、社会经济、人类生活产生深远影响。

2.2 GCMs 数据及其评价指标

IPCC 第五次评估报告中使用的 CMIP5 气候模式相较于之前的气候模式拥有更高的时空分辨率和模拟精度,其情景数据广泛应用于气候、水文和生

态变化等评估中^[21]。本文从英国科学技术设施委员会环境数据分析中心(<http://www.ceda.ac.uk>)下载得到 18 个 GCMs 对降水模拟的基础数据(1960—2005 年),各模式的基本信息见表 1;通过线性插值法将其输出的降水数据统一降尺度到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的网格点上,并与黑河流域上游同期降水量站点观测数据进行比较,进而采用基于熵权的 TOPSIS 综合评价法对 18 个 GCMs 对研究区降水的模拟能力进行评估。

表 1 18 个大气环流模式基本信息

Tab. 1 Basic information of 18 GCMs

序号	模式	时间尺度	分辨率($^\circ$)	国家
1	ACCESS1.0	月	1.875×1.2414	澳大利亚
2	BCC-CSM1.1	月	2.8125×2.8125	中国
3	BNU-ESM	月	2.8125×2.8125	中国
4	CanESM2	月	2.8125×2.8125	加拿大
5	CCSM4	月	1.25×0.9375	美国
6	CNRM-CM5	月	1.40625×1.40625	法国
7	CSIRO-Mk3.6.0	月	1.875×1.875	澳大利亚
8	FGOALS-g2	月	2.8125×3	中国
9	GFDL-CM3	月	2.5×2	美国
10	GISS-E2-H	月	2.5×2	美国
11	GISS-E2-R	月	2.5×2	美国
12	HadGEM2-ES	月	1.875×1.2414	英国
13	INM-CM4	月	2×1.5	俄罗斯
14	IPSL-CM5A-LR	月	3.75×1.875	法国
15	MIROC5	月	1.40625×1.40625	日本
16	MPI-ESM-LR	月	1.875×1.875	德国
17	MRI-CGCM3	月	1.125×1.125	日本
18	NorESM1-M	月	2.5×1.875	挪威

研究区实测降水量数据包括黑河上游及其附近的 3 个气象站和 3 个雨量站(见图 1)1960—2015 年的逐日降水资料,数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)下载得到;使用泰森多边形法^[22]计算流域的面降水量。

常用于评价 GCMs 模拟效果的单项指标主要分为两大类^[2-9,23]:一类是基于时间序列的指标,包括相关系数、相对误差和均方根误差或归一化的均方根误差等;另一类是基于时间序列分布的指标,包括均值、标准差、变异系数、不均匀系数等。本文选用其中 6 项指标,包括均值(Mean)、变异系数(C_V)、Mann-Kendall 趋势分析中的 Z_C 统计量值(Z_C)、不均匀系数(C_L)、归一化均方根误差(NRMSE)、Pearson 相关系数(r)作为本次的评价指标。其中,Mean、 C_V 和 NRMSE 表示 GCMs 输出的降水数据



图1 黑河流域上游气象站、雨量站位置

Fig. 1 Locations of meteorological and rainfall stations in the upper reaches of Heihe River basin

与基于站点的观测数据二者在均值和方差的吻合程度^[24]; Z_c 值表示二者在年际上的变化趋势及其变化幅度; C_L 表示二者在年内分布的不均匀程度和分配特征; r 表示二者在时间序列上的相关性。

2.3 GCMs 优选结果与分析

将 18 个 GCMs 在黑河流域上游输出的 1960—2005 年降水模拟值与研究区 6 个站点同期观测值进行对比, 计算出各模式输出的降水模拟序列的均值、变异系数、Mann-Kendall 分析中的 Z_c 统计量、不均匀系数、归一化均方根误差, 以及降水模拟序列与实测序列的 Pearson 相关系数等 6 项评价指标。将实测降水序列的指标集合作为理想解, 将距离实测降水序列指标最远的指标集合作为负理想解, 通过计算各 GCMs 到理想解和负理想解的距离 (D_a^+ 和 D_a^-), 得出不同 GCMs 与理想解的相对接近程度, 从而对 GCMs 的适用性进行排序。

表 2 给出了 TOPSIS 方法中的原始决策矩阵, 以及对其进行归一化处理后的标准化决策矩阵; 根据公式(5), 采用熵权法计算得到评价指标 Mean、 C_V 、 Z_c 、 C_L 、NRMSE、 r 的权重系数分别为 0.152、0.230、0.260、0.199、0.047、0.111; 根据式(2), 计算得到加权标准化决策矩阵(表 3)。根据式(6)和式(7)得到各指标值到理想解的距离 D_a^+ 和到负理想解的距离 D_a^- , 以及各模式的相对接近程度值 C_a , 结果见表 4。

相对接近程度 C_a 值越高说明 GCMs 模式在黑河流域上游的降水模拟效果越好。从表 4 可以看出, 对于 1960—2005 年降水序列, 18 个 GCMs 的评分 C_a 值差别较大, 最高分为 CSIRO-Mk3.6.0, 分值为 0.773, 最低分是 BNU-ESM 模式, 分值为 0.080

分, 最高分与最低分差距达 0.693, 说明这两个模式在黑河流域上游的适用性存在较大差异。所有模式中, CSIRO-Mk3.6.0、CanESM2、MRI-CGCM3 对研究区降水的模拟表现较好, 分值均达到 0.7 以上。

2.4 与 RS 评价法的结果比较

为了验证 TOPSIS 综合评价法在 GCMs 优选应用中的可靠性, 进一步采用传统的 RS 方法对上述 GCMs 在研究区降水模拟方面的适用性进行评价, 从而对两种方法的优选结果进行比较。RS 评价法的思路是将 GCMs 输出数据的统计特征值与实测数据统计特征值的拟合程度作为目标函数, 对每个目标函数的表现进行秩评分^[7]。选用均值、标准差、变异系数、归一化均方根误差、相关系数、年际变化趋势、年内不均匀系数 6 个统计特征量的拟合程度建立目标函数并进行秩评分, 根据模式的表现差异分别赋予 0~10 的分值, 计算公式为

$$RS_i = \text{Int} \left[\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 10 \right] \quad (8)$$

式中: x_i 为第 i 个模式输出数据与实测数据统计特征值之间的相对误差; $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 为各模式相对误差的最大值和最小值; RS_i 为第 i 个统计特征量的评分值, 将模式相应所有统计特征量的评分值求平均得到最终 RS 评分结果, RS 值越小, 模式适用性越强。

表 5 给出了基于 RS 方法得到的 18 个 GCMs 对黑河上游降水序列(1960—2005 年)模拟性能的排序结果。可以看出, 评分由高到低排前三的依次为 CSIRO-Mk3.6.0、CanESM2、MRI-CGCM3 三个模式, 评分最低的是 BNU-ESM 模式, 此排序结果与加权 TOPSIS 综合评价法给出的结果基本一致。

表 2 18 个 GCMs 对黑河流域上游降水序列模拟(1960—2005 年)的评价指标

Tab. 2 The original and the normalized indicators for evaluating the performance of 18 GCMs in precipitation simulation (1960 to 2005) over the study area

模式	指标											
	Mean/mm		C_V		Z_C		C_L		NRMSE		r	
	原始值	归一化值	原始值	归一化值	原始值	归一化值	原始值	归一化值	原始值	归一化值	原始值	归一化值
ACCESS1.0	47.66	0.37	0.77	0.39	-0.96	0.07	0.32	0.49	0.94	0.53	0.73	0.52
BCC-CSM1.1	46.69	0.36	0.65	0.16	0.68	0.43	0.21	0.10	0.96	0.55	0.64	0.36
BNU-ESM	76.62	1.00	0.56	0.00	3.28	1.00	0.19	0.00	1.76	1.00	0.61	0.30
CanESM2	50.68	0.45	1.02	0.86	-0.09	0.26	0.40	0.79	1.11	0.63	0.84	0.71
CCSM4	49.05	0.41	0.86	0.56	-0.37	0.20	0.33	0.53	0.99	0.56	0.78	0.61
CNRM-CM5	55.17	0.54	1.00	0.81	2.00	0.72	0.37	0.67	1.27	0.72	0.82	0.68
CSIRO-Mk3.6.0	38.99	0.20	1.07	0.94	-1.29	0.00	0.40	0.79	0.77	0.44	0.82	0.68
FGOALS-g2	40.05	0.22	0.62	0.11	0.76	0.45	0.22	0.13	0.91	0.52	0.54	0.18
GFDL-CM3	46.24	0.35	0.75	0.36	-1.21	0.02	0.26	0.28	0.88	0.50	0.75	0.55
GISS-E2-H	59.13	0.63	0.72	0.29	-1.01	0.06	0.25	0.24	1.27	0.72	0.71	0.48
GISS-E2-R	48.53	0.40	0.60	0.07	0.98	0.50	0.19	0.03	1.14	0.65	0.44	0.00
HadGEM2-ES	46.03	0.35	0.82	0.47	-1.07	0.05	0.34	0.57	0.93	0.53	0.73	0.52
INMCM4	55.86	0.56	0.67	0.20	2.00	0.72	0.26	0.26	1.25	0.71	0.58	0.25
IPSL-CM5A-LR	32.34	0.05	0.61	0.10	-0.07	0.27	0.20	0.07	0.81	0.46	0.58	0.25
MIROC5	58.00	0.60	0.80	0.45	-0.39	0.20	0.32	0.49	1.21	0.69	0.80	0.64
MPI-ESM-LR	47.95	0.39	0.87	0.58	-0.20	0.24	0.31	0.44	0.99	0.56	0.76	0.57
MRI-CGCM3	31.00	0.03	0.93	0.69	-1.25	0.01	0.36	0.62	0.64	0.36	0.77	0.59
NorESM1-M	37.40	0.16	0.82	0.48	-0.39	0.20	0.28	0.34	0.81	0.46	0.67	0.41
观测值	29.81	0.00	1.10	1.00	0.41	0.37	0.46	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00

表 3 基于 TOPSIS 综合评价法的 18 个 GCMs 对黑河流域上游降水序列模拟(1960—2005 年)的加权标准决策矩阵

Tab. 3 The entropy weighted indicators for evaluating the performance of Precipitation simulation(1960 to 2005) obtained from 18 GCMs from (1960 to 2005) over the study area

模式	Mean/mm	C_V	Z_C	C_L	NRMSE	r	模式	Mean/mm	C_V	Z_C	C_L	NRMSE	r
ACCESS1.0	0.06	0.09	0.02	0.10	0.03	0.06	GISS-E2-H	0.10	0.07	0.02	0.05	0.03	0.05
BCC-CSM1.1	0.05	0.04	0.11	0.02	0.03	0.04	GISS-E2-R	0.06	0.02	0.13	0.01	0.03	0.00
BNU-ESM	0.15	0.00	0.26	0.00	0.05	0.03	HadGEM2-ES	0.05	0.11	0.01	0.11	0.02	0.06
CanESM2	0.07	0.20	0.07	0.16	0.03	0.08	INMCM4	0.08	0.05	0.19	0.05	0.03	0.03
CCSM4	0.06	0.13	0.05	0.11	0.03	0.07	IPSL-CM5A-LR	0.01	0.02	0.07	0.01	0.02	0.03
CNRM-CM5	0.08	0.19	0.19	0.13	0.03	0.08	MIROC5	0.09	0.10	0.05	0.10	0.03	0.07
CSIRO-Mk3.6.0	0.03	0.22	0.00	0.16	0.02	0.08	MPI-ESM-LR	0.06	0.13	0.06	0.09	0.03	0.06
FGOALS-g2	0.03	0.02	0.12	0.03	0.02	0.02	MRI-CGCM3	0	0.16	0.00	0.12	0.02	0.07
GFDL-CM3	0.05	0.08	0.01	0.06	0.02	0.06	NorESM1-M	0.02	0.11	0.05	0.07	0.02	0.05

2.5 基于 GCMs 的降水预估与实测降水比较

文中使用的 GCMs 数据对历史降水仅模拟到 2005、2006 年及以后均属于未来预测范畴。为进一步论证 GCMs 优选结果的可靠性,论文基于 18 个 GCMs 对 2006—2015 年研究区的降水进行预估,并与实测降水值进行比较,从而评选出对 2006—2015 年降水预估表现良好性能的 GCMs。在 2020 年以前,由于不同情景下温室气体浓度基本接近,这里只选择中等碳排放浓度 RCP 4.5 作

为未来气候的情景假设。对 RCP 4.5 气候情景下 18 个 GCMs 在 2006—2015 年的降水输出进行加权 TOPSIS 综合评价,得到各指标值到理想解的距离和到负理想解的距离,以及各模式的相对接近程度值,结果见表 5。可以看出,在 2006—2015 年,评分最高的是 CSIRO-Mk3.6.0 模式,评分最低的是 BNU-ESM 模式,与 1960—2005 年的排序结果一致。另外,总体来看,18 个 GCMs 的排序结果与 1960—2005 年的排序结果也非常接近,这说明

表 4 18 个 GCMs 对黑河上游降水序列模拟(1960—2005 年)和预估(2006—2015 年)的 TOPSIS 排序结果

Tab. 4 Ranking pattern of 18 GCMs (1960 to 2005 and 2006 to 2015) over the study area based on the entropy weighted TOPSIS method

序号	模式	1960—2005 年				2006—2015 年			
		D_a^+	D_a^-	C_a	排名	D_a^+	D_a^-	C_a	排名
1	ACCESS1.0	0.21	0.30	0.591	8	0.28	0.17	0.375	9
2	BCC-CSM1.1	0.28	0.19	0.401	14	0.34	0.18	0.349	11
3	BNU-ESM	0.39	0.03	0.080	18	0.38	0.08	0.166	18
4	CanESM2	0.10	0.34	0.771	2	0.18	0.27	0.597	4
5	CCSM4	0.17	0.29	0.638	4	0.18	0.22	0.556	5
6	CNRM-CM5	0.15	0.26	0.630	5	0.15	0.26	0.630	2
7	CSIRO-Mk3.6.0	0.12	0.40	0.773	1	0.11	0.29	0.721	1
8	FGOALS-g2	0.29	0.19	0.401	15	0.35	0.12	0.246	16
9	GFDL-CM3	0.24	0.30	0.556	11	0.26	0.13	0.338	12
10	GISS-E2-H	0.26	0.27	0.505	12	0.28	0.11	0.278	13
11	GISS-E2-R	0.32	0.16	0.337	16	0.34	0.07	0.175	17
12	HadGEM2-ES	0.19	0.32	0.627	6	0.23	0.21	0.477	7
13	INMCM4	0.28	0.13	0.308	17	0.31	0.11	0.257	14
14	IPSL-CM5A-LR	0.29	0.24	0.454	13	0.33	0.11	0.252	15
15	MIROC5	0.20	0.27	0.577	10	0.21	0.21	0.502	6
16	MPI-ESM-LR	0.17	0.28	0.620	7	0.23	0.15	0.403	8
17	MRI-CGCM3	0.15	0.37	0.711	3	0.14	0.23	0.612	3
18	NorESM1-M	0.20	0.28	0.586	9	0.25	0.14	0.361	10

表 5 18 个 GCMs 对黑河上游降水序列模拟(1960—2005 年)的 RS 排序结果

Tab. 5 Ranking pattern of 18 GCMs Precipitation simulation(1960 to 2005) over the study area based on the RS method

模式	Mean/mm	C_V	Z_c	C_L	NRMSE	r	RS 得分	RS 排名	TOPSIS 排名
ACCESS1.0	47.66	0.77	-0.96	0.32	0.94	0.73	4.00	10	8
BCC-CSM1.1	46.69	0.65	0.68	0.21	0.96	0.64	4.17	11	14
BNU-ESM	76.62	0.56	3.28	0.19	1.76	0.61	9.00	18	18
CanESM2	50.68	1.02	-0.09	0.40	1.11	0.84	3.00	3	2
CCSM4	49.05	0.86	-0.37	0.33	0.99	0.78	3.67	8	4
CNRM-CM5	55.17	1.00	2.00	0.37	1.27	0.82	4.33	12	5
CSIRO-Mk3.6.0	38.99	1.07	-1.29	0.40	0.77	0.82	2.67	1	1
FGOALS-g2	40.05	0.62	0.76	0.22	0.91	0.54	3.50	5	15
GFDL-CM3	46.24	0.75	-1.21	0.26	0.88	0.75	4.83	14	11
GISS-E2-H	59.13	0.72	-1.01	0.25	1.27	0.71	5.50	17	12
GISS-E2-R	48.53	0.60	0.98	0.19	1.14	0.44	4.33	13	16
HadGEM2-ES	46.03	0.82	-1.07	0.34	0.93	0.73	3.67	9	6
INMCM4	55.86	0.67	2.00	0.26	1.25	0.58	5.17	16	17
IPSL-CM5A-LR	32.34	0.61	-0.07	0.20	0.81	0.58	3.50	6	13
MIROC5	58.00	0.80	-0.39	0.32	1.21	0.80	4.83	15	10
MPI-ESM-LR	47.95	0.87	-0.20	0.31	0.99	0.76	3.50	7	7
MRI-CGCM3	31.00	0.93	-1.25	0.36	0.64	0.77	2.83	2	3
NorESM1-M	37.40	0.82	-0.39	0.28	0.81	0.67	3.00	4	9
观测值	29.81	1.10	0.41	0.46	0.00	1.00	—	—	—

根据加权 TOPSIS 综合评价法对 GCMs 进行优选,其结论具有很强的可靠性。

3 结 论

TOPSIS 综合评价法作为多目标决策分析中的

一种方案优选方法在诸多领域被广泛应用,其中一个重要原因就是该方法操作简便,对样本大小没有特殊要求,既适用于小样本资料,也适用于大样本资料;另外,它对原始数据直接进行运算,不存在信息损失的问题^[25]。将其应用于 18 个 GCMs 对黑河流

域上游降水模拟的优选中,同时借助熵权概念对TOPSIS评价法中标准化决策矩阵里的各项评价指标进行赋权,客观反映出各评价指标的相对重要程度,最后根据不同GCMs与理想解的相对接近程度给出不同GCMs在研究区降水模拟方面的适用性排序。该方法排序明确,结果直观。结果表明:CSIRO-Mk3.6.0模式对研究区降水1960—2005年模拟的适用性最强,BNU-ESM模式效果最差;TOPSIS综合评价法对于模拟性能优良和模拟性能较差的GCMs排序结果与传统RS方法得到的结果基本一致。通过比较2006—2015年降水实测值与RCP 4.5气候情景下GCMs同一时段的降水预估,也发现2006—2015年模拟性能优良和较差的GCMs排序结果与1960—2005年的基本一致。因此,TOPSIS综合评价法可以作为GCMs适用性评价方法的有力补充,可在今后开展的多目标GCMs综合评价或优选工作中发挥重要作用。

参考文献(References):

- [1] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094. 1.
- [2] 曹颖, 张光辉. 大气环流模式在黄河流域的适用性评价[J]. 水文, 2009, 29(5): 1-5. (CAO Y, ZHANG G H. Applicability evaluation of global circulation models in the Yellow River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(5): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2009.05.001.
- [3] 姜燕敏, 吴昊旻. 20个CMIP5模式对中亚地区年平均气温模拟能力评估[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 110-116. (JIANG Y M, WU H M. Simulation capabilities of 20 CMIP5 models for annual mean air temperatures in Central Asia[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2013, 9(2): 110-116. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.02.005.
- [4] 吕睿喆, 赵晓祥, 翁白莎, 等. 乌梁素海流域气候模式适用性评价及旱涝预估[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 53-57. (LYU R Z, ZHAO X X, WENG B S, et al. Climate model suitability evaluation and drought and flood forecast in Wuliangsuhai basin[J]. Yellow River, 2017, 39(4): 53-57. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.04.012.
- [5] 蒋昕昊, 徐宗学, 刘兆飞, 等. 大气环流模式在长江流域的适用性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(S1): 51-58. (JIANG X H, XU Z X, LIU Z F, et al. Evaluating the general circulation models over the Yangtze River basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(S1): 51-58. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.06.005.
- [6] 李发鹏, 徐宗学, 刘星才, 等. 大气环流模式在松花江流域的适用性评价[J]. 水文, 2011, 31(6): 24-31. (LI F P, XU Z X, LIU X C, et al. Assessment on performance of different general circulation models in Songhuajiang River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6): 24-31. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.06.005.
- [7] 刘文丰, 徐宗学, 李发鹏, 等. 大气环流模式(GCMs)在东南诸河流域的适用性评价[J]. 亚热带资源与环境学报, 2011, 6(4): 13-23. (LIU W F, XU Z X, LI F P, et al. Performance of different general circulation models (GCMs) in the basins of southeastern China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2011, 6(4): 13-23. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-7105.2011.04.003.
- [8] 李蓉. 多模式下黑河流域气候变化情景预估[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. (LI R. Projection of future climate change scenarios using Multi-GCMs in the Heihe River basin[D]. Beijing, Master Dissertation of China Agricultural University, 2017. (in Chinese))
- [9] 刘兆飞, 王蕊, 姚治君. 蒙古高原气温与降水变化特征及CMIP5气候模式评估[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 956-969. (LIU Z F, WANG R, YAO Z J. Air temperature and precipitation over the Mongolian Plateau and assessment of CMIP5 climate models[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 956-969. (in Chinese)) DOI: 10.18402/resci.2016.05.15.
- [10] 程佩瑄. 基于TOPSIS法的水环境质量评价研究: 以黄河兰州段为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. (CHENG P X. Water quality assessment study based on TOPSIS method; take Lanzhou section of Yellow River as an example[D]. Lanzhou: Master Dissertation of Lanzhou University, 2014. (in Chinese))
- [11] 郭磊. 基于熵权法和改进TOPSIS模型的水资源配置综合评价[J]. 水资源开发与管理, 2017(5): 70-73. (GUO L. Comprehensive evaluation on water resources allocation based on entropy weight method and improved TOPSIS model[J]. Water Resources Development and Management, 2017(5): 70-73. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2017.05.017.
- [12] 项琼. 基于组合权重TOPSIS模型的区域水资源承载力综合评价[J]. 西北水电, 2015(4): 6-10. (XIANG Q. The general assessment on bearing capacity of regional water resources based on TOPPSIS model of combined weight[J]. Northwest Hydropower, 2015

- (4):6-10. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-2610. 2015. 04. 002.
- [13] 王春懿,梁川,赵璐,等. 基于正交投影法改进 TOPSIS 模型的宁夏农业干旱风险评价[J]. 灌溉排水学报, 2018(1): 113-120. (WANG C Y, LIANG C, ZHAO L, et al. Assessment of agricultural drought risk based on Improved TOPSIS method in Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018(1): 113-120. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2017. 0261.
- [14] 赵领娣,王海霞,乔石,等. 用熵权的 TOPSIS 法评价城市经济实力[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(24): 301-306. (ZHAO L D, WANG H X, QIAO S, et al. Evaluating economic power of cities by entropy TOPSIS method[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(24): 301-306. (in Chinese))
- [15] SRINIVASA R K, KUMAR D N. Selection of global climate models[M]. In: Impact of Climate Change on Water Resources, Springer Climate, Springer, Singapore, 2018. DOI: 10. 1007/978-981-10-6110-3_2.
- [16] SRINIVASA R K, KUMAR D N. Ranking general circulation models for India using TOPSIS[J]. Journal of Water and Climate Change 2014, 6 (2): 288-299. DOI: 10. 2166/wcc. 2014. 074.
- [17] ZAMANI R, BERNDTSSON R. Evaluation of CMIP5 models for west and southwest Iran using TOPSIS-based method[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137 (1-2): 533-543. DOI: 10. 1007/s00704-018-2616-0.
- [18] 何超,李萌,李婷婷,等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016(2): 172-178. (HE C, LI M, LI T T, et al. Comparison and analysis of the four methods of determining weights in multi-objective comprehensive evaluation[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016 (2): 172-178. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-2375. 2016. 02. 015.
- [19] 刘秋艳,吴新年. 多要素评价中指标权重的确定方法评述[J]. 知识管理论坛(网络版), 2017 (6): 500-510. (LIU Q Y, WU X N. Review on the weighting methods of indexes in the multi-factor evaluation[J]. Knowledge Management Forum, 2017 (6): 500-510. (in Chinese)) DOI: 10. 13266/j. issn. 2095-5472. 2017. 054.
- [20] 黄文. 黑河流域上中游地区典型生态水文要素对气候变化的响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. (HUANG W. Impacts of climate change on typical ecohydrological variables in the upper-middle reaches of Heihe River basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014. (in Chinese))
- [21] WUEBBLES D, MEEHL G, HAYHOE K, et al. CMIP5 climate model analyses climate extremes in the United States[J]. Bulletin of American Meteorology Society, 2014, 95 (4): 571-583. DOI: 10. 1175/BAMS-D-12-00172. 1.
- [22] THIESSEN A H. Precipitation averages for large areas [J]. Monthly Weather Review, 1911, 39 (7): 1082-1084. DOI: 10. 1175/1520-0493 (1911) 39 < 1082b; PAFLA > 2. 0. CO; 2.
- [23] 高超,文化,宣伟栋,等. 基于分段三伽玛分布的降雨偏差纠正方法[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 169-178. (GAO C, WEN H, XUAN W D, et al. A separated three-gamma bias correction method for precipitation [J]. Advances in Water Science, 2018, 29 (2): 169-178. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 02. 003.
- [24] 徐宗学,刘浏. 气候变化影响下的流域水循环: 以长江和黄河典型流域为例[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 123-133. (XU Z X, LIU L. Impact of climate change on hydrological cycle: case studies in the Yangtze River and Yellow River basins [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(3): 123-133. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-1973. 2016. 03. 017.
- [25] 傅建霞,杨洪辉. TOPSIS 法与 RSR 法相结合综合评价国民体质健康水平[J]. 首都体育学院学报, 2009, 21 (3): 314-316. (FU J X, YANG H H. A Comprehensive evaluation of national constitutional health level by combined methods of TOPSIS and RSR[J]. Journal of Capital Institute of Physical Education, 2009, 21 (3): 314-316. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-783X. 2009. 03. 015.