

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.004

# 基于 ERG 需求模型的幸福河综合评价

贡力,田洁,靳春玲,陆丽丽,魏晓悦

(兰州交通大学土木工程学院,甘肃兰州 730070)

**摘要:**针对建设幸福河实现新时代河湖治理的目标,基于 ERG(existence relatedness growth)需求模型,建立了包括 23 个核心指标和 27 个可选指标的幸福河评价指标体系;运用 Matlab 软件,以幸福河等级指数为目标,采用投影寻踪模型建立幸福河评价指标值与幸福河等级指数之间的非线性关系,构建了基于改进的粒子群优化投影寻踪(IPSO-PPE)的幸福河等级评价模型,实现对幸福河的定量评价。以黄河甘肃段为例,分析了其 2010—2018 年幸福河等级指数变化的趋势,结果表明:黄河甘肃段幸福河等级指数整体呈上升趋势,由 2010 年的 E 等级(不幸福)提升到 2018 年的 B 等级(幸福指数较高),评价结果与 GRA-TOPSIS 法结果吻合率达到 88.9%,能较好地反映黄河甘肃段实际情况;水土流失、流域水患灾害、河流生态基流满足程度是制约黄河甘肃段幸福河等级指数的主要因素。

**关键词:**幸福河评价;ERG 需求模型;投影寻踪模型;敏感性分析;黄河甘肃段

**中图分类号:**TV213.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2022)03-0025-09

**Comprehensive evaluation of Happy River based on ERG demand model**//GONG Li, TIAN Jie, JIN Chunling, LU Lili, WEI Xiaoyue(*School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*)

**Abstract:**Aiming at the goal of building Happy River and realizing river and lake governance in the new era, an evaluation index system of Happy River, including 23 core indexes and 27 optional indexes, was established based on ERG (existence relevance growth) demand model. Using MATLAB software, taking Happy River grade index as the target, the nonlinear relationship between Happy River evaluation index value and Happy River grade index was established by using projection pursuit model, and the Happy River grade evaluation model based on improved particle swarm optimization projection pursuit evaluation (IPSO-PPE) was constructed to realize the quantitative evaluation of Happy River. Taking Gansu section of the main stream of the Yellow River as an example, the change trend of Happy River grade index from 2010 to 2018 was analyzed. The results show that the grade index of Happy River in Gansu section of the main stream of the Yellow River shows an upward trend as a whole, from grade E (unhappiness) in 2010 to grade B (higher happiness index) in 2018. The coincidence rate between the evaluation results and the results of GRA-TOPSIS method is 88.9%, which can better reflect the actual situation of Gansu section of the Yellow River. Soil erosion, flood disaster in the basin and the satisfaction degree of river ecological base flow are the main factors restricting the grade index of Happy River in Gansu section of the Yellow River.

**Key words:**Happy River evaluation; EGR demand model; projection pursuit model; sensitivity analysis; Gansu section of the Yellow River

河流是维系地球生态系统健康运行的命脉,起着物种流动、能量交换、物质循环、信息传递等作用<sup>[1]</sup>。随着工业化进程的加快、科技的进步以及城镇化的加速发展,人类对河流进行掠夺式开发,严重超出河流系统的承载能力,出现生态破坏、水环境恶

化、水资源短缺等一系列危及河流生命、人类健康和社会经济可持续发展的问题<sup>[2]</sup>。恢复河流生态系统健康、保障社会经济可持续发展、推动河流合理开发和可持续管理等已成为国内外共同关注的热点话题<sup>[3-5]</sup>。新时期,我国流域政治、经济、社会、文化和

基金项目:国家自然科学基金(51969011);甘肃省科技计划(20JR10RA274,20JR2RA002);甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-639)

作者简介:贡力(1977—),男,教授,博士,主要从事流域水安全及管理研究。E-mail:gongl@mail.lzjtu.cn

通信作者:田洁(1996—),女,硕士研究生,主要从事流域水安全及管理研究。E-mail:tianjiejiyi@foxmail.com

生态文明价值空前凸显,保护河流生态健康、推动社会经济发展、传承弘扬江河文化是实现人民对美好生活向往的重要环节,在流域生态保护和高质量发展的国家战略下,建设幸福河成为新时期生态文明和区域协调发展的新目标<sup>[6-7]</sup>。因此,明确幸福河的建设方向,构建系统的幸福河评价体系,并进行科学合理的评价是极其重要的。

许多学者从理解幸福河的基本内涵出发,对幸福河的建设进行了初步的探索。赵建军<sup>[8]</sup>认为幸福河建设是以满足人的生态安全需要、经济发展需要、民生福祉需要、文化积淀需要,进而实现人水和谐共生为指引方向的;王浩从防洪保安全、优质水资源、健康水生态、宜居水环境、先进水文化等5个方面对幸福河湖的指标体系和建设途径进行重点把控,指明当前幸福河湖建设的重点工作方向<sup>[9]</sup>;陈茂山等<sup>[10]</sup>从马克思主义的幸福观出发,以人与河流自身以及两者的内在联系阐述幸福河的内涵;唐克旺<sup>[11]</sup>从心理学的角度理解幸福河的内涵,引出层次化多维度的评价指标体系;韩宇平等<sup>[12]</sup>基于马斯洛需求层次论构建幸福河评价指标体系,对黄河上中下游进行实例研究;左其亭等<sup>[13]</sup>针对所建立的幸福河评价体系,采用“单指标量化-多指标综合-多准则集成”的方法更加客观地对幸福河进行定量评价。由于幸福河概念提出的时间相对较短,而且中国幅员辽阔,无论是在空间上还是时间上,幸福河的研究系统极为复杂,目前还处于初步探索阶段,幸福河评价指标体系和评价方法仍需进一步完善。

本文基于现有研究,在明确幸福河概念和内涵的基础上,引入ERG(existence relatedness growth)理论,从生存、生态和发展3方面建立幸福河评价的ERG需求模型,针对细化的评价指标,运用Matlab软件,基于投影寻踪模型,构建出河流幸福等级与幸福河评价指标的复杂非线性关系的改进粒子群优化投影寻踪(improved particle swarm optimization projection pursuit grade evaluation, IPSO-PPE)等级评价模型,并以黄河甘肃段为例进行应用分析。

## 1 幸福河评价的ERG需求模型

### 1.1 幸福河的内涵

河流主要具有生态、航运、水利、纳污、历史文化、游憩休闲、景观等7个功能,人类利用这些功能的过程就是对河流开发利用的过程。为了使河流能够持续发挥这些功能并造福人类,需要对河流进行合理开发、有效保护。建设幸福河是我国在新时代背景下提出的治理江河的新目标,在传统的健康河流以及纯粹的河流生态环境保护的范

畴内,结合水安全、水生态、水资源、水环境、水保护、水产业、水文化、水景观、水管理等9个方面理解,幸福河就是在维持河流生态系统自身健康的基础上,满足人民群众对美好生活的向往,达到人水和谐,实现流域高质量发展的一条平安健康、宜居富民的河流。幸福河的概念并不是绝对的,具有一定的主观性和可变性,幸福河概念的核心是:确保人类生存与河流生态和谐共生、平衡发展的良好关系。构建幸福河是指确保河流安全运行、控制解决河流灾害事故、维护河流水资源持续供给、提供河流优质水源、保护河流生态良性循环、建设河流健康生态环境、促进社会经济快速发展,最终达到人水和谐共同发展。

### 1.2 ERG需求模型

ERG理论是美国耶鲁大学的Clayton Alderfer在马斯洛需求层次理论的基础上提出的一种人本主义需求理论,即生存(existence)、相互关系(relatedness)和成长发展(growth)3个层面的需求<sup>[14]</sup>。ERG理论将人作为研究主体,通过人的生理、心理需求和价值实现,揭示人类行为和心理活动的普遍规律,被广泛运用到人力资源管理、高等教育和心理学等领域<sup>[15]</sup>。建设幸福河是人类的一种实践活动,而需求正是刺激人类完成这一有意识、有目的的实践活动的动机。基于此,本文运用ERG理论,从人类需求的心理和活动规律出发,建立幸福河评价的ERG需求模型。

a. 生存需求。是第一层级的需求,属于较低级的基本需求,是指河流健康运行、安全持续的供给水资源,满足生物生存、河流自身基本健康、企业生产运营的水量和保障水域内生存环境的安全。该层级主要满足水域安全运行、水域安全供给和水域持续供给3个方面的需求,若不满足则用水需求和灾害防治面临生存威胁。

b. 生态需求。是第二层级的需求,也是超越基本生存需求的需求层级。生态就是指一切生物的生存状态以及生物之间、生物与环境之间的关系,生态需求对应ERG需求理论中的相互关系需求。该层级主要满足水域生态环境和水域节水监管2方面的需求,使河流生态系统处于一种良性的动态循环状态,促进社会经济的可持续发展。

c. 发展需求。是第三层级的需求,即最高层级的需求。该层级满足河流文化发展、水域产业经济和人水和谐发展3个方面的需求,实现了人水和谐,经济、社会、环境协调发展,用水效率极高,水资源需求趋于稳定,使人类活动和河流生态系统处于一种动态平衡的状态。

## 2 幸福河评价体系

### 2.1 幸福河评价指标

幸福河的建设是动态可变和区域不定的,需要在明确评价的时间和区域特征的基础上构建幸福河的评价指标体系和确定划分标准。本文依据《河湖

健康评估技术导则》《水生态文明城市建设评价导则》以及管理部门颁发的标准和技术指南,借鉴河流评价的相关文献资料<sup>[16-17]</sup>,基于 ERG 需求模型,构建“目标-准则-指标”3 级体系的幸福河评价指标体系,包括 23 个核心指标和 27 个可选指标,共 50 个,如图 1 所示。

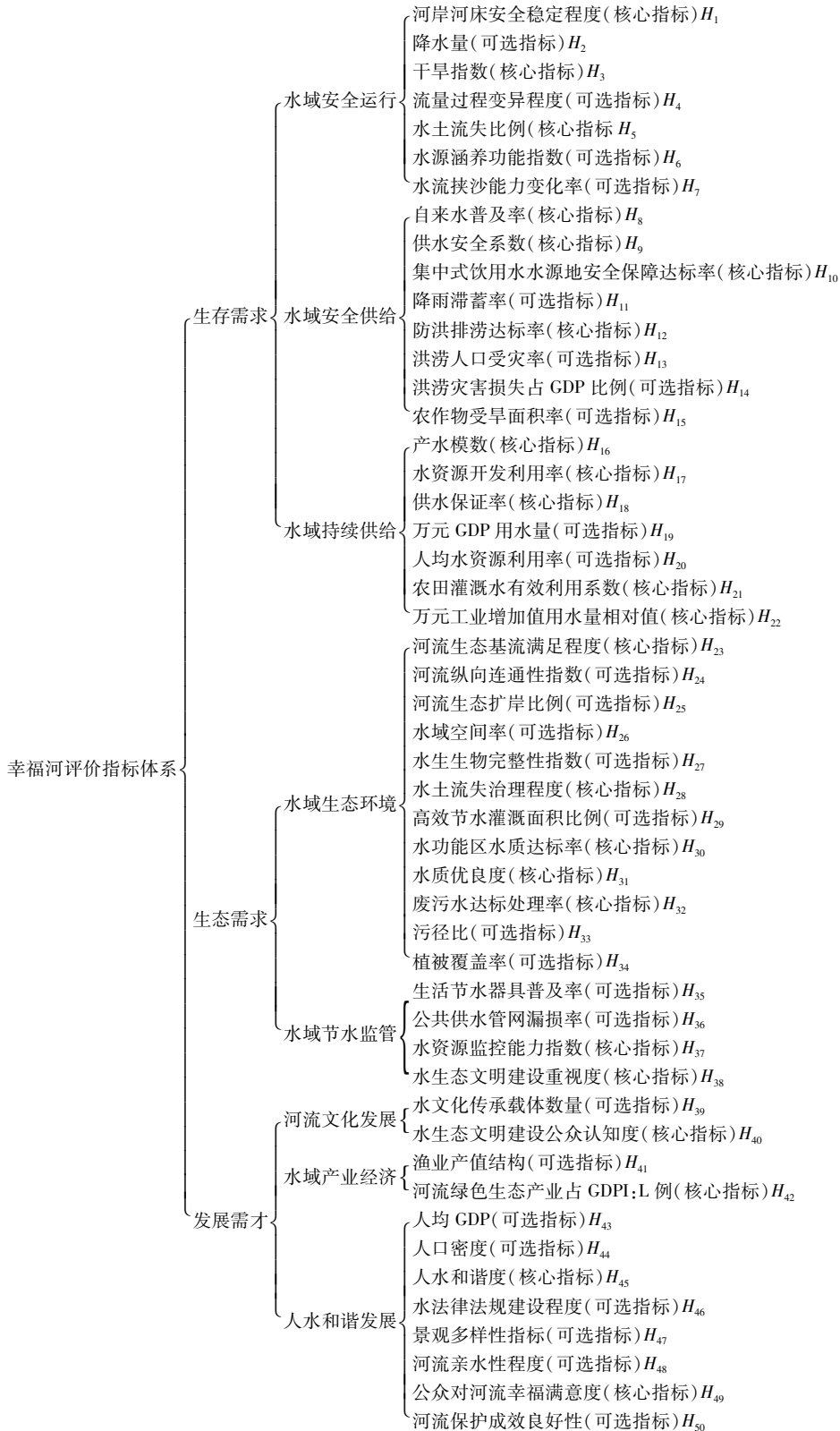


图 1 幸福河评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of Happy River

## 2.2 幸福河评价标准

评价标准是评价指标的价值尺度和界限,科学合理地划分评价指标的等级是衡量河流幸福程度的关键步骤。由于幸福河理念提出的时间较短,虽然已有一些研究,但目前还没有统一的幸福河指标评价标准。本文依据《水生态文明城市建设评价导则》等相关技术文件、文献资料的划分标准和专家经验值,对幸福河评价指标的判定标准进行等级划分,将河流的幸福程度划分为 A ~ E 5 个等级,如表 1 所示,具体的分级判定标准如表 2 所示(限于篇幅,只列出部分数据)。

## 2.3 幸福河评价方法

本文利用投影寻踪聚类技术构建幸福河评价模型,在数据降维过程中,运用改进的粒子群算法解决高维全局寻优问题,确定投影寻踪模型的最佳投影

方向<sup>[18-19]</sup>,构建 IPSO-PPE 模型进行幸福河评价,评价流程见图 2。

### 2.3.1 PPE 的建模原理

投影寻踪等级评价 (projection pursuit grade evaluation, PPE) 模型是根据给定的判别标准利用投影特征值对评价样本进行等级水平评价,步骤如下:

**步骤 1** 设评价指标值为  $\{A_{ij}^* \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p\}$ , 其中  $A_{ij}^*$  为第  $i$  个样本第  $j$  个指标值,  $n$  为样本数,  $p$  为指标数;对于正向指标和逆向指标,分别利用式(1)和式(2)进行标准化处理:

$$A_{ij} = \frac{A_{ij}^* - A_{j\min}}{A_{j\max} - A_{j\min}} \quad (1)$$

$$A_{ij} = \frac{A_{j\max} - A_{ij}^*}{A_{j\max} - A_{j\min}} \quad (2)$$

表 1 幸福河评价划分等级

Table 1 Grade division of Happy River evaluation

| 等级 | 含义     | 内容   |
|----|--------|--|
| A  | 幸福     | 河流生态系统健康,完全支持社会经济发展,人类对河流需求达到动态平衡状态,实现人水和谐发展 |
| B  | 幸福指数较高 | 河流生态系统基本健康,基本支持社会经济发展,人类社会对河流需求基本满足          |
| C  | 幸福指数较低 | 河流生态系统勉强支持社会经济发展,水域环境满足人类社会经济活动相对拮据,处于一种临界状态 |
| D  | 幸福指数低  | 河流生态系统趋向衰退状态,水域环境与社会经济发展不协调                  |
| E  | 不幸福    | 河流生态系统衰退,水域环境与社会经济发展极度不协调,不满足人类社会对河流的需求      |

表 2 评价指标分级标准

Table 2 Classification standard of evaluation indexes

| 等级 | $H_1/\%$ | $H_2/\text{mm}$ | $H_3$     | $H_4$     | $H_5/\%$ | $H_6$      | $H_7/\%$ | $H_8/\%$ | ... | $H_{50}/\%$ |
|----|----------|-----------------|-----------|-----------|----------|------------|----------|----------|-----|-------------|
| A  | [98,100] | $\geq 1000$     | [0,0.5]   | [0,0.2]   | [0,10]   | $\geq 1.5$ | [0,5]    | [95,100] | ... | [90,100]    |
| B  | [85,98]  | [800,1000]      | (0.5,1.0) | (0.2,0.5) | (10,30)  | [1.2,1.5]  | (5,10)   | [80,95]  | ... | [80,90]     |
| C  | [70,85]  | [500,800]       | (1.0,2.0) | (0.5,1.0) | (30,50)  | [1.0,1.2]  | (10,15)  | [60,80]  | ... | [60,80]     |
| D  | [50,70]  | [200,500]       | (2.0,3.5) | (1.0,3.0) | (50,70)  | [0.3,1.0]  | (15,25)  | [40,60]  | ... | [50,60]     |
| E  | [0,50]   | [0,200]         | (3.5,5.0) | (3.0,5.0) | (70,100) | [0,0.3]    | (25,100) | [0,40]   | ... | [0,50]      |

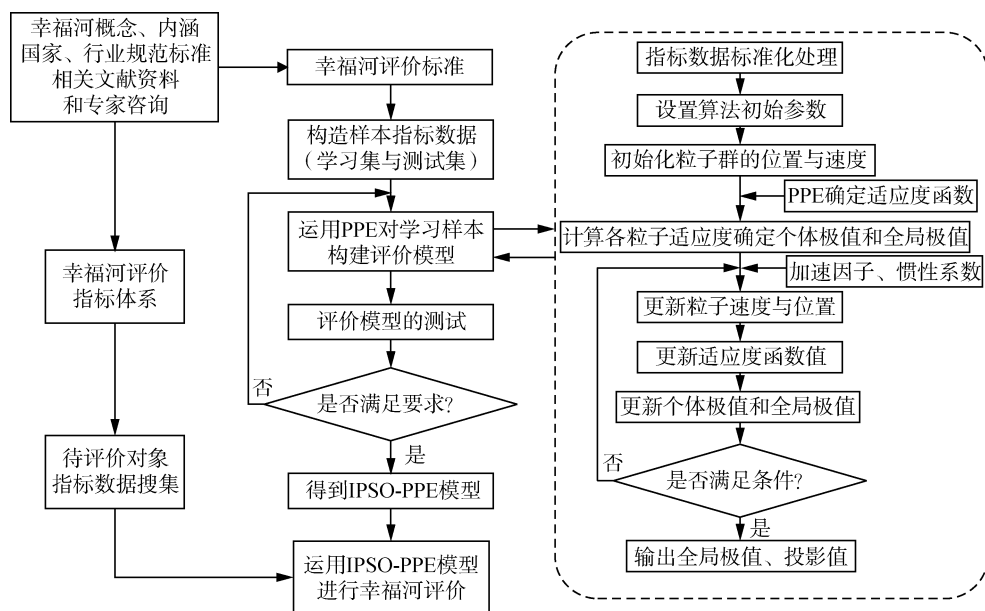


图 2 基于 IPSO-PPE 的幸福河评价流程

Fig. 2 Flow chart of Happy River evaluation based on IPSO-PPE

式中:  $A_{ij}$  为指标标准值;  $A_{j\max}$  为第  $j$  个指标的最大值;  $A_{j\min}$  为第  $j$  个指标的最小值。

**步骤 2** 将  $A_{ij}^*$  的  $p$  维数据投影到  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_p)$  上, 得到投影方向上的投影值  $Z_i$  :

$$Z_i = \sum_{j=1}^p a_j A_{ij} \quad (3)$$

**步骤 3** 构建投影指标函数:

$$Q(\mathbf{a}) = S(\mathbf{a})D(\mathbf{a}) \quad (4)$$

其中  $S(\mathbf{a}) = [\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}_i)^2 / n]^{1/2}$

$$D(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (R - r_{ij}) f(R - r_{ij})$$

$$r_{ij} = |Z_i - Z_j| \quad R = 0.1S(\mathbf{a})$$

式中:  $\bar{Z}_i$  为投影值的平均值;  $r_{ij}$  为样本距离;  $R$  为密度窗宽;  $f(R - r_{ij})$  为单位阶跃函数, 当  $R > r_{ij}$  时,  $f(R - r_{ij}) = 1$ ; 当  $R \leq r_{ij}$  时,  $f(R - r_{ij}) = 0$ 。

**步骤 4** 优化投影指标函数:

$$\max Q(\mathbf{a}) = S(\mathbf{a})D(\mathbf{a}) \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^p a_j^2 = 1 \quad (6)$$

### 2.3.2 PPE 模型投影方向的优化

基于改进的粒子群算法(improved particle swarm optimization, IPSO)解决 PPE 模型的复杂非线性优化问题。速度和位置更新公式见式(7)和式(8), 其中采用系数法改进惯性权重  $w$  和加速因子动态调整法改进学习因子  $c_1, c_2$ , 见式(9)和式(10)<sup>[20-21]</sup>。

$$V_{id(k+1)} = wV_{idk} + c_1 r_1 (P_{idk} - X_{idk}) + c_2 r_2 (G_{idk} - X_{idk})$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, D) \quad (7)$$

$$X_{id(k+1)} = X_{idk} + V_{id(k+1)} \quad (8)$$

$$w_{k+1} = \eta w_k \quad (9)$$

$$\begin{cases} c_1 = 2.5 + 2(k/T)^2 - 4k/T \\ c_2 = 3 - c_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $D$  为搜索空间的维数;  $m$  为种群规模;  $k$  为当前迭代次数;  $P_{idk}$  为个体极值;  $G_{idk}$  为全局极值;  $c_1$  为自我学习因子;  $c_2$  为社会学习因子;  $r_1$  和  $r_2$  为均匀分布于  $[0, 1]$  之间的随机数;  $\eta$  为惯性权重的衰减系数;  $T$  为最大迭代次数。

## 3 实例应用

### 3.1 研究区概况及数据资料

以黄河甘肃段为例, 进行幸福河评价的实例分析。黄河发源于青海, 成河于甘南玛曲, 全长约 5464 km, 是中国的第二大河流; 黄河流域西界巴颜喀拉山、北抵阴山、南至秦岭、东注渤海, 流域面积约 79.5 万  $\text{km}^2$ , 流域内人口密集、资源丰富、水利枢纽众多, 包括多个具有水源涵养、水土保持、碳汇与碳

储存、防风固沙、生物多样性保护等多种功能的重要生态功能区, 在中国政治、经济、文化发展和生态文明建设的进程中处于非常重要的地位。把黄河建设成为造福人民的幸福河, 解决流域生态系统退化、环境污染、水资源分布不均以及自然灾害突发等问题, 对推动流域生态保护和高质量发展具有重要的作用。黄河甘肃段长 900 多 km, 分为两段, 上段流经甘南藏族自治州, 下段流经临夏回族自治州、兰州市和白银市。甘肃是黄河流域重要的水源涵养区和补给区, 60% 以上的水来自兰州以上的河段。近年来, 黄河甘肃段生态环境恶化、汛情突发, 直接影响沿岸群众生产生活, 给人民生命财产安全造成威胁。改善甘肃省黄河干流的水情水势, 建设幸福黄河, 保障沿黄地区社会经济健康发展极其重要。

基于图 1 建立的幸福河指标体系, 依据甘肃省具体情况, 选取 23 个核心指标和 19 个可选指标, 数据来源于 2010—2018 年甘肃省水资源统计公报、甘肃省河流泥沙公报、甘肃省水利发展公报、甘肃水土保持公报、中国水旱灾害公报、中国水土保持公报、黄河水资源公报以及甘肃省发展年鉴。

### 3.2 基于 IPSO-PPE 的幸福河等级评价

构建科学合理的样本数据是 IPSO-PPE 评价模型准确预测评价幸福河等级的前提, 所以获取指标体系的样本数据是进行评价的关键环节。本文在表 2 划分幸福河指标的 5 个等级中随机各抽取 5 组数据, 20 组学习样本和 5 组测试样本, 作为 IPSO-PPE 评价模型的输入值, 每组指标数据对应的河流幸福等级指数则为 IPSO-PPE 评价模型的输出值。然后基于 Matlab 软件实现河流幸福等级指数的测算, IPSO 优化过程中, 惯性权重  $w$  为 0.729, 惯性权重的衰减系数  $\eta$  为 0.99, 进化最大迭代次数  $T$  为 1000, 群体规模  $N$  为 100, 个体速度限制为  $[-0.5, 0.5]$ , 个体初始速度为 0, 预测结果如图 3 所示。

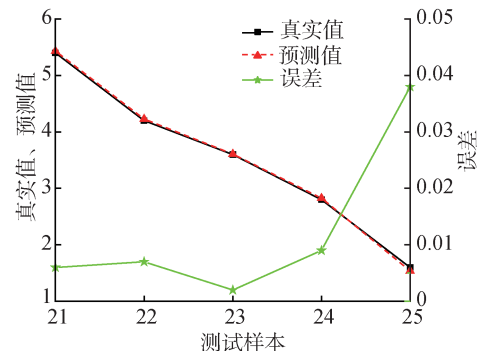


图 3 预测结果

Fig. 3 Prediction results

### 3.3 黄河甘肃段幸福河评价

以甘肃省 2010—2018 年的幸福河指标数据为

输入值,运用建立的 IPSO-PPE 模型进行幸福程度测算,得到 2010—2018 年黄河甘肃段的幸福河评价等级指数,如图 4 所示。由图 4 可见,除 2015 年外,2010—2018 年黄河甘肃段的幸福河评价等级指数整体呈增长趋势,从 2010 年 E 等级(不幸福)上升到 2018 年 B 等级(幸福指数较高),表明 2010—2018 年黄河甘肃段的河流幸福程度明显提升,尤其是 2018 年幸福河等级指数达到 4.6042。黄河甘肃段幸福河等级指数虽呈上升趋势,但整体幸福河等级指数不高,分析其主要原因是由于甘肃地处黄土高原区,水土流失严重,治理率偏低,流域水患灾害严重,河流生态基流满足程度不高,且水资源缺乏,分布不均。为进一步提升河流幸福等级指数,增加流域人民幸福感,政府应加强流域治理和投资力度,开展流域综合治理和节水监督工作,推进生态工程构建黄河流域生态保护屏障,采取修建梯田、建设淤地坝、营造水保林等生态修复措施提高水土流失治理率,以此降低流域水环境的负面影响。

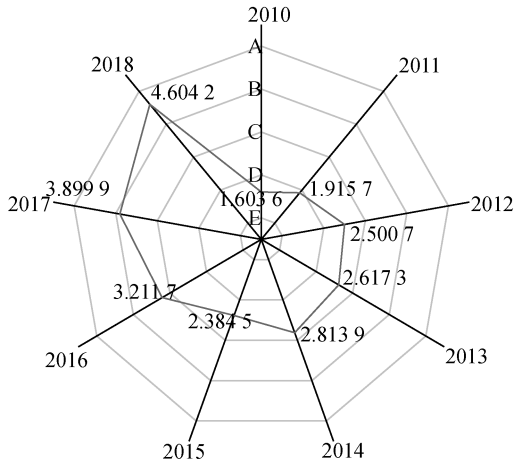


图 4 2010—2018 年黄河甘肃段幸福河评价结果

Fig. 4 Happy River evaluation results in Gansu section of the Yellow River from 2010 to 2018

基于传统的多目标决策 GRA-TOPSIS 法,构建幸福河评价模型与 IPSO-PPE 模型进行对比。GRA-TOPSIS 法根据求得的各评价对象的相对贴近度  $N_i$  判定河流幸福状态,其中  $N_i$  大于 0.8 为 A 等级(幸福), $(0.6, 0.8]$  为 B 等级(幸福指数较高), $(0.4, 0.6]$  为 C 等级(幸福指数较低), $(0.2, 0.4]$  为 D 等级(幸福指数低),小于或等于 0.2 为 E 等级(不幸福)<sup>[22]</sup>。IPSO-PPE 模型与 GRA-TOPSIS 法评价结果对比如表 4 所示,可见,IPSO-PPE 模型和 GRA-TOPSIS 法的综合评价结果吻合率达到 88.9%,即运用 IPSO-PPE 模型进行幸福河评价可行,评价结果相对可靠。IPSO-PPE 幸福河评价模型与传统的评价方法相比,简化了指标体系的赋权步骤,评价结果准确性相对较高,并且可以有效反映幸福河等级与

评价指标之间的非线性映射关系。

表 4 IPSO-PPE 与 GRA-TOPSIS 法的评价结果对比

Table 4 Comparison of evaluation results between IPSO-PPE and GRA-TOPSIS

| 年份   | IPSO-PPE |       | GRA-TOPSIS |       |
|------|----------|-------|------------|-------|
|      | 评价等级指数   | 幸福河等级 | $N_i$      | 幸福河等级 |
| 2010 | 1.6036   | E     | 0.2150     | E     |
| 2011 | 1.9157   | E     | 0.2409     | E     |
| 2012 | 2.5007   | D     | 0.3231     | D     |
| 2013 | 2.6173   | D     | 0.3100     | D     |
| 2014 | 2.8139   | D     | 0.3317     | D     |
| 2015 | 2.3845   | D     | 0.3144     | D     |
| 2016 | 3.2117   | C     | 0.3845     | D     |
| 2017 | 3.8999   | C     | 0.4564     | C     |
| 2018 | 4.6042   | B     | 0.6396     | B     |

按照黄河甘肃段整体的幸福河等级评价模型构造原理,构建各需求层级的幸福河等级 IPSO-PPE 评价模型,将 2010—2018 年的各需求层级的指标值作为模型的输入值,计算得到 2010—2018 年各需求层级的幸福河等级指数,如图 5 所示。由图 5 可见,2010—2018 年各需求层级幸福河等级指数的变化趋势虽有波动,但整体呈现增长的趋势。其中,生存需求层级的幸福河等级指数在 2016 年以前均低于 3.0,主要是由于水土流失严重、干旱指数和流量变异程度大,导致水域安全运行指数较低,加之洪涝灾害严重、工业用水大、农田灌溉水有效利用系数和水资源利用率较低,使得生存需求层次的幸福河等级指数不高。生态需求层级的幸福河等级指数前期波动较大,2015 年出现最低值,处于不幸福状态,河流生态系统衰退,水土流失严重;2016 年开始,生态需求层次的幸福河等级指数开始明显提升,到 2018 年已达到较幸福状态。发展需求层级的幸福河等级指数呈现逐年增长趋势,主要是因为甘肃省 2010—2018 年人均 GDP 和河流绿色生态产业占 GDP 比例的持续上涨,促使人水和谐度和公众对河流的幸福满意度上升。实际上,发展需求层级的幸福河等级指数会受到生存和生态需求层级幸福河等级指数的影响,即表明生存和生态

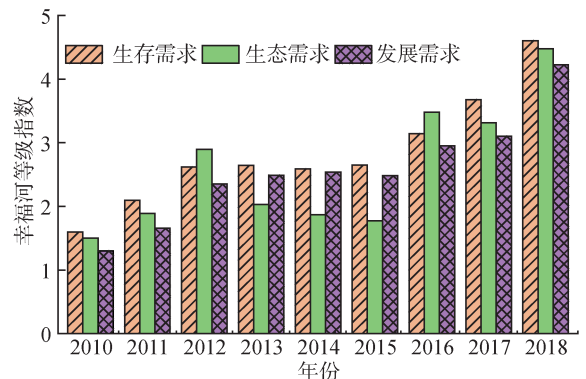


图 5 2010—2018 年黄河甘肃段各层次幸福河等级指数

Fig. 5 Grade index of Happy River at all levels in Gansu section of the Yellow River from 2010 to 2018

需求层级对提升河流幸福等级指数具有重要的促进作用。

### 3.4 指标敏感性分析

以2018年为例,利用单因素轮换 OAT(one-at-a-time)法<sup>[23]</sup>计算各准则层幸福等级指数的绝对平均变化率(mean absolute change rate,MACR),以此分析和验证单个指标变化率对准则层幸福等级指数的敏感性和影响程度。本文选取指标值变化率的范围为 $[-30\%,30\%]$ ,变化率增量为10%,各准则层幸福

等级指数的 MACR 值如图 6 所示。以图 6 (a)水域安全运行指标为例可以看出,随着各指标值变化率的增大,MACR 值呈线性增大趋势,其中 MACR 值的斜率代表准则层水域安全运行指标对幸福河等级指数的敏感程度,斜率越大,敏感性越大,即水域安全运行的敏感性指标是水源涵养功能指数  $H_6$ 。通过对指标的敏感性分析,可以识别影响幸福河评价的主要因素,有助于决策者对建设幸福河方向的进一步掌握,为促进流域生态保护和高质量发展提供理论依据。

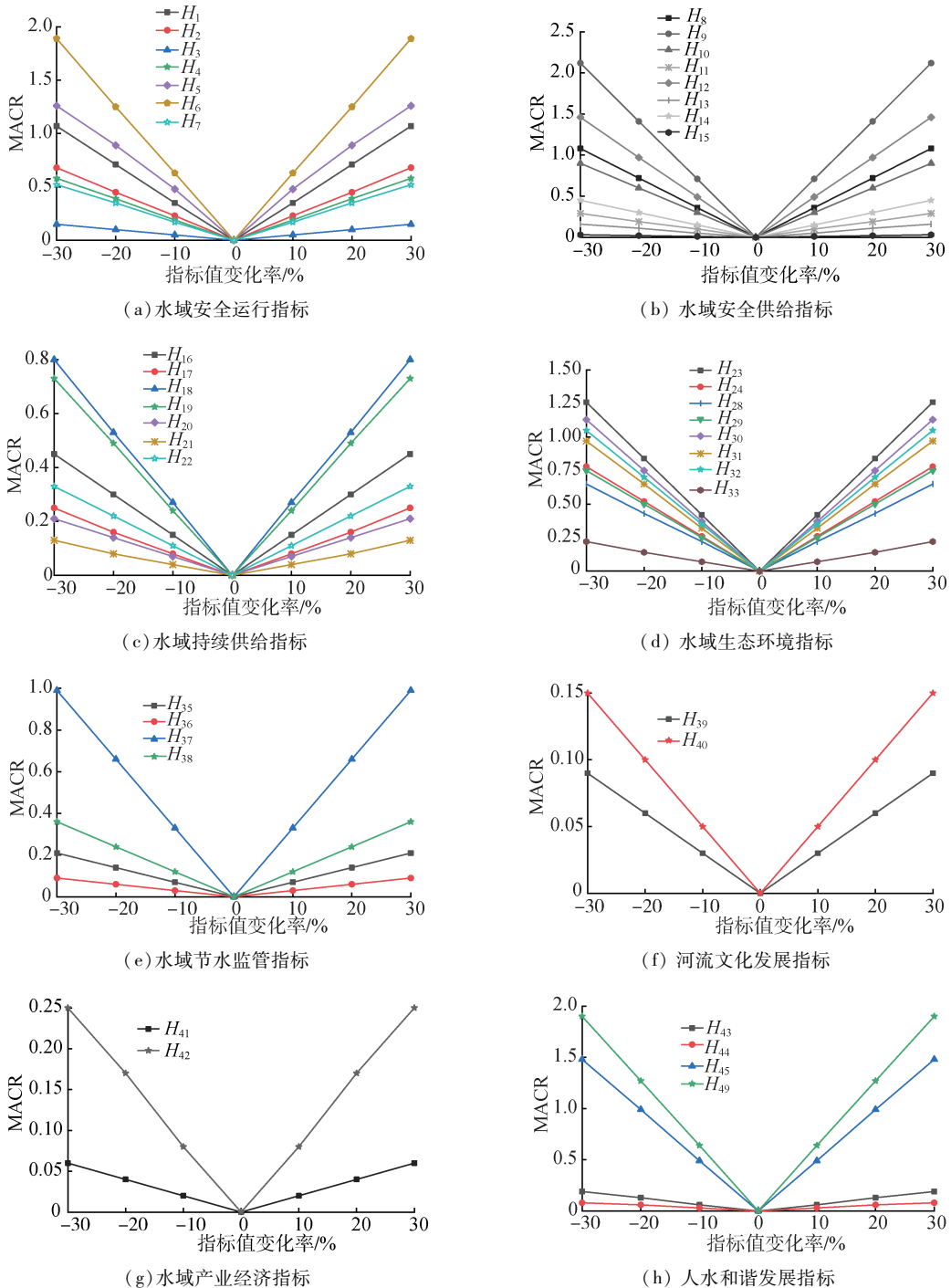


图 6 评价指标敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of evaluation indexes

## 4 结 论

a. 针对建设幸福河的河流治理目标,引入 ERG 理论,提出一种基于 ERG 需求模型的幸福河评价体系。利用投影寻踪模型构造出幸福河评价指标值与幸福河等级指数之间的非线性关系,建立基于 IPSO-PPE 的幸福河等级评价模型,实现对幸福河的定量评价。

b. 运用 Matlab 软件完成 IPSO-PPE 幸福河等级模型的构建,得到黄河甘肃段 2010—2018 年的幸福河等级,评价结果与传统的 GRA-TOPSIS 法比较,吻合率达 88.9%,表明 IPSO-PPE 模型评价幸福河可行,评价结果较合理可靠。

c. 黄河甘肃段幸福河等级指数虽呈上升趋势,但整体幸福河等级指数不高,主要是由于甘肃地处黄土高原区,水土流失严重、治理率偏低、流域水患灾害严重、河流生态基流满足程度不高,且水资源缺乏、分布不均所致。生态层级是制约黄河甘肃段整体幸福河等级指数提升的主要准则层,其中生存和生态需求影响发展层次促进幸福河等级指数的提升。以 OAT 法剖析各准则层的指标敏感性,有效识别出各准则层的敏感性因素。

### 参考文献:

- [1] 张晶,董哲仁,孙东亚,等. 基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 883-892. (ZHANG Jing, DONG Zheren, SUN Dongya, et al. Complete river health assessment index system based on eco-regional method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 883-892. (in Chinese))
- [2] 杨文慧,杨宇. 河流健康概念及诊断指标体系的构建[J]. 水资源保护, 2006, 22(6): 28-30. (YANG Wenhui, YANG Yu. Concept and assessment indicator system of river health [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(6): 28-30. (in Chinese))
- [3] CHISOLA M N, VAN DER LAAN M, KEITH L B. A landscape hydrology approach to inform sustainable water resource management under a changing environment: a case study for the Kaleya River Catchment, Zambia[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 32:100762.
- [4] KOUNDOURI P, KER RAULT P, PERGAMALIS V, et al. Development of an integrated methodology for the sustainable environmental and socio-economic management of river ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2016, 540:90-100.
- [5] XUE Chenyang, SHAO Chaofeng, CHEN Sihan. SDGs-

based river health assessment for small- and medium-sized watersheds[J]. Sustainability, 2020, 12(5): 12051846.

- [6] 杨开忠,董亚宁. 黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策:基于“要素-空间-时间”三维分析框架[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1038-1047. (YANG Kaizhong, DONG Yaning. Research on restricting factors and countermeasures of ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin: analysis based on the multi-dimensional framework of “element-space-time” [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1038-1047. (in Chinese))
- [7] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 中国水利, 2019(20): 1-3. (XI Jinping. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. China Water Resources, 2019(20): 1-3. (in Chinese))
- [8] 赵建军. 建设幸福河湖:实现人水和谐共生[J]. 中国水利, 2020(6): 11-12. (ZHAO Jianjun. Building happy river to achieve harmony between people and water [J]. China Water Resources, 2020(6): 11-12. (in Chinese))
- [9] 吕彩霞,韦凤年. 深挖节水潜力共筑幸福江河:访中国工程院院士王浩[J]. 中国水利, 2020(6): 1-4. (LYU Caixia, WEI Fengnian. Taping water-saving potential to build happy river together: an interview with Wang Hao, academician of Chinese Academy of Engineering [J]. China Water Resources, 2020(6): 1-4. (in Chinese))
- [10] 陈茂山,王建平,乔根平. 关于“幸福河”内涵及评价指标体系的认识与思考[J]. 水利发展研究, 2020, 20(1): 3-5. (CHEN Maoshan, WANG Jianping, QIAO Genping. Understanding and thinking on the connotation and evaluation index system of “Happy River” [J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(1): 3-5. (in Chinese))
- [11] 唐克旺. 对“幸福河”概念及评价方法的思考[J]. 中国水利, 2020(6): 15-16. (TANG Kewang. Studies on concept and evaluation methods of “Happy River” [J]. China Water Resources, 2020(6): 15-16. (in Chinese))
- [12] 韩宇平,夏帆. 基于需求层次论的幸福河评价[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(4): 1-7. (HAN Yuping, XIA Fan. Evaluation of Happy River based on demand level theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 1-7. (in Chinese))
- [13] 左其亭,郝明辉,姜龙,等. 幸福河评价体系及其应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 45-58. (ZUO Qiting, HAO Minghui, JIANG Long, et al. Happy River evaluation system and its application [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 45-58. (in Chinese))
- [14] 南思宁,王俊红,廖麒豪. 基于 ERG 理论的高校学报



- 青年编辑职业发展需求探究[J]. 编辑学报, 2019, 31(5): 574-577. (NAN Sining, WANG Junhong, LIAO Qihao. Research on the career development needs of young editors of university journals based on ERG theory [J]. Acta Editologica, 2019, 31(5): 574-577. (in Chinese))
- [15] 曹娟, 安芹, 陈浩. ERG 理论视角下老年人心理需求的质性研究[J]. 中国临床心理学杂志, 2015, 23(2): 343-345. (CAO Juan, AN Qin, CHEN Hao. A qualitative research of the psychological need of the elderly in ERG theory perspective [J]. Chinese Journal of Clinical Psychology, 2015, 23(2): 343-345. (in Chinese))
- [16] 王鹏全, 吴元梅, 张丽娟, 等. 湟水干流西宁段河流健康评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 9-15. (WANG Pengquan, WU Yuanmei, ZHANG Lijuan, et al. River health assessment model for Xining section in main stream of Huangshui River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 9-15. (in Chinese))
- [17] 幸福河研究课题组. 幸福河内涵要义及指标体系探析[J]. 中国水利, 2020(23): 1-4. (Research group of the Happy River. Analysis of the connotation and index system for the Happy River [J]. China Water Resources, 2020(23): 1-4. (in Chinese))
- [18] 姜秋香, 付强, 王子龙. 基于粒子群优化投影寻踪模型的区域土地资源承载力综合评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 319-324. (JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong. Comprehensive evaluation of regional land resources carrying capacity based on projection pursuit model optimized by particle swarm optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(11): 319-324. (in Chinese))
- [19] JIN Juliang, ZHANG Yu, ZHANG Libing. Flood disaster loss evaluation model based on projection pursuit [J]. Nature and Science, 2003, 1(1): 82-85.
- [20] 白栩嘉, 苏敏杰. 基于改进 PSO-PP 模型的区域水资源利用效率评价[J]. 人民长江, 2016, 47(23): 38-43. (BAI Xujia, SU Minjie. Evaluation of regional water resource utilization efficiency based on improved PSO-PP model [J]. Yangtze River, 2016, 47(23): 38-43. (in Chinese))
- [21] CHEN Haitao, CHEN Xiaonan, QIU Lin, et al. Multi-objective ecological operation of reservoir in Luanhe River based on improved particle swarm optimization [J]. Nature Environment & Pollution Technology, 2020, 19(1): 113-121.
- [22] GONG Li, WANG Hong, JIN Chunling, et al. Type drive analysis of urban water security factors [J]. Journal of Information Processing Systems, 2020, 16(4): 784-794.
- [23] 苏辉东, 贾仰文, 牛存稳, 等. 河流健康评价指标与权重分配的统计分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 138-144. (SU Huidong, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Statistical analysis of river health assessment indicators and weight distribution [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 138-144. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-02-08 编辑: 王芳)

(上接第 16 页)

- [20] GAO C, XU Y P, ZHU Q, et al. Stochastic generation of daily rainfall events: a single-site rainfall model with Copula-based joint simulation of rainfall characteristics and classification and simulation of rainfall patterns [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 41-58.
- [21] SADEGH M, RAGNO E, AGHAKOUCHAK A. Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework [J]. Water Resources Research, 2017, 53(6): 5166-5183.
- [22] SADEGH M, MOFTAKHARI H, GUPTA H V, et al. Multihazard scenarios for analysis of compound extreme events [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(11): 5470-5480.
- [23] 李雨欣, 王瑛, 马庆媛, 等. 基于 DTW 与 K-means 算法的河北场雨及雨型分区特征研究 [J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(5): 860-868. (LI Yuxin, WANG Ying, MA Qingyuan, et al. Research on the characteristics of rainfall events and rain pattern zoning in Hebei based on data mining technology [J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(5): 860-868. (in Chinese))
- [24] HUFF F A. Time distribution of rainfall in heavy storms [J]. Water Resources Research, 1967, 3(4): 1007-1019.
- [25] 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征 [J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 617-624. (YIN Shuiqing, WANG Yang, XIE Yun, et al. Characteristics of rainfall process in China [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 617-624. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-01-05 编辑: 俞云利)