

# 南方红壤区自然灾害刚弹韧性社会评估 ——以福建省长汀县为例

胡康<sup>1</sup>, 岳辉<sup>2</sup>, 梁裕宁<sup>1</sup>, 吴丽君<sup>1</sup>, 朱萱<sup>1</sup>, 钟子豪<sup>1</sup>, 丁国昌<sup>1</sup>

(1.福建农林大学 园林学院 国家林业与草原局生态景观草工程技术研究中心, 福建 福州 350002; 2.长汀县水土保持事业局, 福建 长汀 366300)

**摘要:** [目的] 探索建设更加强健、有效的自然灾害刚弹韧性社会途径,为南方红壤区防范化解重大自然灾害风险提供科学参考。[方法] 以南方红壤区典型受灾区福建省长汀县为例,从刚性抵御、弹性管控、韧性恢复 3 个维度构建了指标体系,利用熵权 TOPSIS 模型和耦合协调度模型定量评价了 2006—2019 年长汀县的自然灾害刚弹韧性社会综合水平及一级指标间的耦合协调性,并进行障碍度因子分析。[结果] ①长汀县的自然灾害刚弹韧性社会水平经历了由缓慢下降到显著增长的演化过程,在 2006—2019 年增长了 0.461 6,总体呈现显著增长趋势。②长汀县自然灾害刚弹韧性社会的刚性抵御水平、弹性管控水平和韧性恢复水平总体呈现显著增长趋势,仅韧性恢复指数在 2006—2010 年呈明显下降趋势,由 0.402 0 下降至 0.280 9。③在各项评价指标中,灾害监测能力、治安管理水平、第三产业比重、碳储存能力的下降以及水源涵养功能的减退是限制长汀县自然灾害刚弹韧性社会发展的关键因素。[结论] 从刚性抵御、弹性管控、韧性恢复 3 个维度对南方红壤区进行评估能较为有效、准确地反映该地区的自然灾害刚弹韧性社会综合水平。同时,应补齐发展短板,避免自然灾害刚性韧性社会出现衰退。

**关键词:** 刚性抵御; 弹性管控; 韧性恢复; 自然灾害刚弹韧性社会; 福建省长汀县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0272-09

中图分类号: X43

**文献参数:** 胡康, 岳辉, 梁裕宁, 等. 南方红壤区自然灾害刚弹韧性社会评估[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 272-280. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230215.001; Hu Kang, Yue Hui, Liang Yuning, et al. Assessment of rigid-elastic-resilient society responses to natural disasters in red soil area of South China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 272-280.

## Assessment of Rigid-Elastic-Resilient Society Responses to Natural Disasters in Red Soil Area of South China —A Case Study at Changting County, Fujian Province

Hu Kang<sup>1</sup>, Yue Hui<sup>2</sup>, Liang Yuning<sup>1</sup>, Wu Lijun<sup>1</sup>, Zhu Xuan<sup>1</sup>, Zhong Zihao<sup>1</sup>, Ding Guochang<sup>1</sup>

(1.College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Ecological Landscape Grass Engineering Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2.Changting County Water and Soil Conservation Bureau, Changting, Fujian 366399, China)

**Abstract:** [Objective] The method for building a society having robust and effective responses to natural disasters was determined in order to provide a scientific reference for preventing and reducing risks from major natural disasters in the red soil area of South China. [Methods] Changting County, Fujian Province was used as a typical disaster area in the red soil area of South China. An index system was constructed from three dimensions that included rigid resistance, elastic control, and resilient recovery. The entropy weight TOPSIS model and the coupling coordination model were used to quantitatively evaluate the comprehensive level and the coupling and coordination between the first level of rigid-elastic-resilient society responses to natural disasters in Changting County from 2006 to 2019. An obstacle factor analysis was conducted. [Results] ① The level of rigid-elastic-resilient society responses to natural disasters in Changting County

收稿日期: 2022-05-23

修回日期: 2022-07-28

资助项目: 福建省水利厅项目“乡村水环境与生态景观规划设计模式及评价指标研究”(KLh20015A)

第一作者: 胡康(1997—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为园林植物与应用。Email: 2516875863@qq.com。

通信作者: 丁国昌(1970—), 男(汉族), 福建省长汀县人, 博士, 研究员, 主要从事园林植物与应用研究。Email: fjdgc@fafu.edu.cn。

evolved from a slow decline to a significant increase, with an increase of 0.4616 from 2006 to 2019, showing a significant growth trend overall. ② The rigid resistance level, elastic control level, and resilience recovery level of the rigid-elastic-resilient society responses to natural disasters in Changting County generally showed a significant growth trend. Only the resilience recovery index significantly decreased from 0.402 0 to 0.280 9 from 2006 to 2010. ③ Among various evaluation indicators, the decline of disaster monitoring capability, public security management level, proportion of tertiary industry, carbon storage capability, and water conservation function were the key factors restricting the development of the rigid-elastic-resilience society responses to natural disasters in Changting County. [Conclusion] The red soil area of South China was evaluated from three dimensions including rigid resistance, elastic control, and resilient recovery. These three dimensions effectively and accurately reflected the comprehensive level of rigid, elastic, and resilient society responses to natural disasters in the region. At the same time, the weak links in development should be strengthened to avoid the decline of rigid-elastic-resilient society responses to natural disasters.

**Keywords: rigid resistance; elastic control; resilient recovery; rigid-elastic-resilient society responses to natural disasters; Changting County Fujian Province**

南方红壤区是中国自然灾害的重灾区,因地理条件、气候变化和人类过度开发等原因引发的暴雨、洪水、崩岗、水土流失等自然灾害失为严重<sup>[1-2]</sup>。因此,开展有效的评估方法,探索建设更加有效的自然灾害应对途径具有重要意义。

针对自然灾害风险防控,国内外出台了大量的政策来应对自然灾害风险,如“全球环境变化人文因素计划(IHDP)”<sup>[3]</sup>和“韧性城市”<sup>[4]</sup>建设。综合风险防范是 IHDP 的核心研究计划之一,其趋向是人类社会必须学会与风险共存<sup>[5]</sup>,而韧性城市研究则主要集中于城市灾害恢复力<sup>[6]</sup>和城市灾害风险评估<sup>[7]</sup>等。近年来,学者们又提出了很多新的理念来应对自然灾害风险,吴绍洪等<sup>[8]</sup>构建了“自然灾害韧性社会”的理论范式,认为自然灾害韧性社会是人类客观的承灾体韧性基础与主观的管控相结合,体现自然与社会综合应对自然灾害风险的能力。但是,社会在抵御灾害时的对策应该是多样的,该研究仅考虑到社会在应对自然灾害时的韧性与弹性,把坚固的工程、建筑物与基础设施设防的高标准归为韧性的范畴,忽略了刚性在城市社会系统防灾减灾中的作用。在此基础上,郭小东等<sup>[9]</sup>在选取城市防灾减灾对策时,考虑到了刚性在城市防灾减灾中的作用,采用刚性、弹性和韧性相结合的手段,来实现灾害对城市系统的“低影响”和“低冲击”。该研究分析了城市社会系统灾害应对的刚性、弹性与韧性策略特征并提出相应的防灾减灾策略,在宏观层面可以说已经非常详尽,但却并未建立城市社会系统在应对灾害时与刚性、弹性、韧性相统一的评价指标体系和定量表征方法,而基于刚性抵御、弹性管控和韧性恢复建立自然灾害刚弹性社会并对其综合水平进行评估,对于社会防范化解重大自然灾害风险具有重要意义。因此,如何在微观层面探

索建设刚性、弹性和韧性相结合的自然灾害刚弹性社会途径还有待研究。

福建省长汀县曾是中国南方红壤区水土流失最为严重的地区之一<sup>[10-11]</sup>。受特殊地理条件和极端气候影响,最重要的是人类长期不合理的开发利用,致使山体植被受到严重破坏,应对重大自然灾害的刚性、弹性、韧性效果差,使该地区成为暴雨、洪涝、水土流失、崩岗等自然灾害的多发区。但经过多年的刚性抵御、弹性管控、韧性恢复相结合的治理措施,特别是 2012 年以来的新一轮水土流失治理,长汀县在自然灾害治理方面已经取得了令人满意的成效(图 1),成为了中国南方红壤区水土流失治理的典范<sup>[12]</sup>。因此,本文以长汀县为例,在基于刚性抵御、弹性管控、韧性恢复的自然灾害刚弹性社会的基础上,构建自然灾害刚弹性社会评价指标体系和定量表征方法,对其自然灾害刚弹性社会水平及关键障碍因子进行评估和探析,以期为该县水土流失区防范化解重大自然灾害风险提供可能的方法参考,也为其他南方红壤地区提供借鉴。

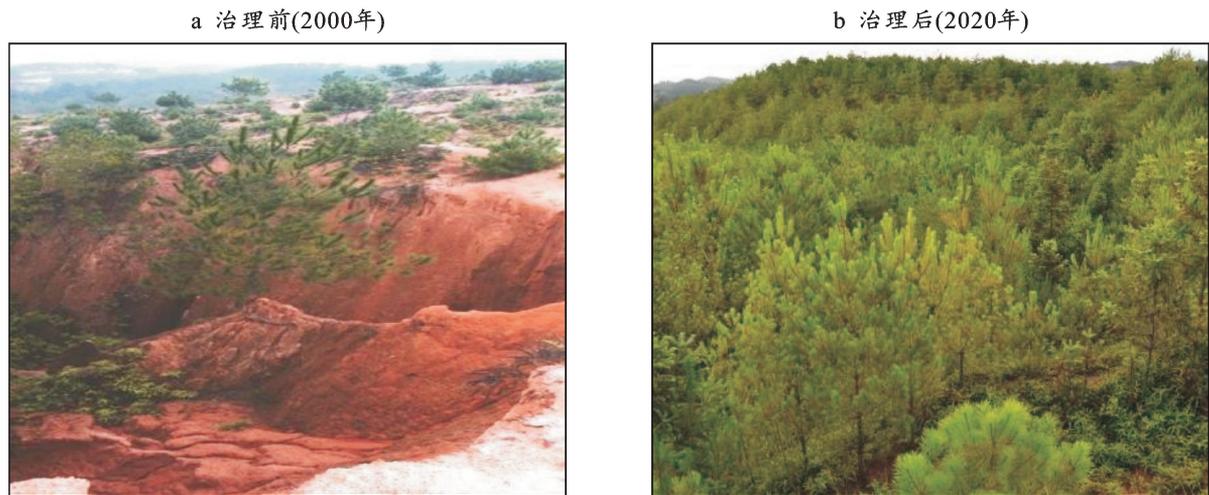
## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

长汀县(116°00'45"—116°39'20" E, 25°18'40"—26°02'05" N)位于福建省龙岩市西部山区,西与江西交接,南邻广东,总面积 3 099.5 km<sup>2</sup>。区域内属亚热带海洋性季风气候,四季分明,多年平均气温 19.3 ℃,气候温和,降水主要集中在夏季,占全年的一半以上,降雨强度大,易出现暴雨洪涝等气象灾害。且境内多为山地丘陵,地带性土壤为红壤,易受雨水和风力侵蚀。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但组成林分基

本是马尾松人工林,结构简单。这些条件结合在一起共同决定了长汀县生态环境的脆弱性,使其成为历史上水土流失时间长,覆盖范围广,受灾十分严重的地

区之一。政府从 1983 年开始就对长汀县各水土流失地区进行了阶段性的连续治理,迄今为止,长汀县的生态和环境得到了有效改善。



注:图片由长汀县水土保持事业局提供。

图 1 长汀县三洲镇水土流失治理前(2000 年)原貌和治理后(2020 年)景象

Fig.1 Original appearance before (2000) and the scenery after (2020) soil erosion control in Sanzhou Town, Changting County

## 1.2 自然灾害刚弹性社会的构建与评估思路

自然灾害刚弹性社会主要由 3 个方面构成:①物质客观的承灾刚性基础,主要包括各种防灾基础设施、防灾工程等;②人类主观的弹性管控,主要包括各种应对自然灾害的技术与制度等;③人类社会与自然环境共同作用下的韧性恢复,主要包括灾后的社会重建、经济复苏和生态恢复等。即社会在抵御自然灾害的过程中,各种刚性的防灾基础设施、防灾工程等是抵御自然灾害的第一道防线,是整个过程的基础;而人类主观的弹性管控则是依靠一些灵活的弹性对策来减轻灾害对城市的“冲击”,是防灾的关键环节;灾后的韧性恢复是社会系统抵御自然灾害的第二道防线,取决于系统在灾后的恢复和适应能力,是社会灾后功能持续的重要保障。因此,本文在遵循系统性、代表性和数据可获取性原则的基础上,从刚性抵御、弹性管控、韧性恢复 3 个维度构建了南方红壤区自然灾害刚弹性社会指标体系(表 1),并明确其基础要素:工程设施、科学技术、政策规范、社会关系、经济发展、生态环境等,选取了 3 个一级指标,10 个二级指标和 31 个三级指标。

首先基于熵权 TOPSIS 法对 2006, 2010, 2015, 2019 年 4 个时期长汀县的自然灾害刚弹性社会综合水平进行评估,得出长汀县的自然灾害刚弹性社会时间序列特征,并对评估结果进行分析;其次运用耦合协调度模型测度刚性抵御、弹性管控、韧性恢复

3 个一级指标间的耦合协调性,来量化分析各指标间的相互作用、相互影响的程度大小;最后利用障碍度模型得出限制长汀县的自然灾害刚弹性社会综合水平提升的障碍因素。

## 1.3 评价方法与数据来源

1.3.1 数据来源 本文数据的主要来源:其中植被覆盖度的提取基于各年份 MODIS-NDVI 数据,采用像元二分模型、转移矩阵等方法<sup>[13]</sup>计算得出;水源涵养、土壤保持和碳储总量则基于生态系统服务综合评价模型(InVEST)<sup>[14]</sup>计算得出;其他指标数据来源于《长汀县统计年鉴》、长汀县人民政府网站(<http://www.changting.gov.cn>)以及长汀县水土保持事业局提供的《长汀县 1983—2021 年水土流失治理情况一览表》等相关数据。

1.3.2 熵权 TOPSIS 法 熵权 TOPSIS 法<sup>[15-16]</sup>是结合了熵权法和 TOPSIS 法来进行综合评价的研究方法,避免了人为主观因素的干扰,被广泛运用于各类综合评价研究。本文利用熵权 TOPSIS 法对各类指标进行权重计算和分析。计算步骤如下:

(1) 构建原始指标矩阵数据。假设有  $m$  个年份,  $n$  项测评指标,建立原始指标矩阵为:

$$X = \{x_{ij}\}_{m \times n} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (1)$$

式中: $x_{ij}$  指第  $i$  个年份的第  $j$  项测评指标;在本文中  $m, n$  分别为 4, 31。

(2) 应用“min-max 标准化”对指标体系中各评

价指标进行标准化处理。由于文中指标涉及到正向型指标和逆向型指标,标准化处理的计算公式如下:

对于正向型指标:

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

对于逆向型指标:

$$Y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (3)$$

式中: $Y_{ij}$ 为标准化后的指标值; $x_{ij}$ 为某测评指标原始数据。

表 1 长汀县自然灾害刚弹韧性社会综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of rigid-elastic-resilient society of natural disasters in Changting County

一级指标	二级指标	三级指标	属性	权重
刚性抵御	工程设施	V <sub>1</sub> 公路网密度/(km·km <sup>-2</sup> )	正向	0.032 2
		V <sub>2</sub> 排洪沟、引水渠总长度/km	正向	0.032 3
		V <sub>3</sub> 塘坝(拦沙坝、陂头)总数量/座	正向	0.032 2
		V <sub>4</sub> 护岸护坡总长度/km	正向	0.033 6
		V <sub>5</sub> 蓄水池总数量/口	正向	0.032 1
	医疗设施	V <sub>6</sub> 医院数量/个	正向	0.033 7
		V <sub>7</sub> 已设置医疗点村数/个	正向	0.033 8
	生态建设	V <sub>8</sub> 当年植树造林面积/hm <sup>2</sup>	正向	0.032 7
		V <sub>9</sub> 生态林草/hm <sup>2</sup>	正向	0.033 2
弹性管控	应急防备	V <sub>10</sub> 应急演练总次数/次	正向	0.032 9
		V <sub>11</sub> 应急预案总数量/个	正向	0.032 1
		V <sub>12</sub> 平均每千人拥有床位数量(张/千人)	正向	0.033 1
		V <sub>13</sub> 平均每千人拥有医护人员数量(人/千人)	正向	0.033 4
	灾害监测	V <sub>14</sub> 水土流失监测站及站点/个	正向	0.032 9
		V <sub>15</sub> 监测时间分辨率/a	逆向	0.030 5
	预警响应	V <sub>16</sub> 广播覆盖率/%	正向	0.033 9
V <sub>17</sub> 电视覆盖率/%	正向	0.031 7		
韧性恢复	经济复苏	V <sub>18</sub> 人均 GDP/元	正向	0.032 3
		V <sub>19</sub> 第三产业比重/%	正向	0.030 9
		V <sub>20</sub> 农村居民人均可支配收入/元	正向	0.032 4
		V <sub>21</sub> 城镇居民人均可支配收入/元	正向	0.032 4
	社会稳定	V <sub>22</sub> 市政供给能力/万元	正向	0.032 4
		V <sub>23</sub> 刑事案件发案率/%	逆向	0.030 5
		V <sub>24</sub> 城镇登记失业率/%	逆向	0.030 9
	生态恢复	V <sub>25</sub> 植被覆盖度/%	正向	0.031 9
		V <sub>26</sub> 水源涵养/mm	正向	0.029 1
		V <sub>27</sub> 土壤保持/(t·hm <sup>-2</sup> )	逆向	0.033 0
		V <sub>28</sub> 碳储总量/t	正向	0.031 9
灾后治理	V <sub>29</sub> 水土流失治理投入/10 <sup>4</sup> 元	正向	0.033 6	
	V <sub>30</sub> 水土流失治理面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	正向	0.030 9	
	V <sub>31</sub> 崩岗治理总数/条	正向	0.031 5	

注:在计算土壤保持的结果时,由于南方红壤区年降雨量较大的原因会导致计算的结果比实际结果偏大,因此选取实际土壤侵蚀量来代替土壤保持以减小误差。

(3) 计算  $j$  项指标下第  $i$  年占该指标的比重,公式如下:

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \quad (4)$$

计算各指标熵值:

$$E_j = \left( -\frac{1}{\ln n} \right) \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

计算熵值冗余度  $D_j$ , 再在公式(7)的支持下得到权重  $W_j$ 。

$$D_j = 1 - E_j \quad (6)$$

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad (7)$$

(4) 根据权重规范化矩阵计算自然灾害刚弹性社会的综合水平。

$$S = \{C_{ij}\}_{m \times n}, C_{ij} = W_j \times Y_{ij} \quad (8)$$

计算各评价指标的正理想解  $S_j^+$ , 负理想解  $S_j^-$ :

$$S_j^+ = \max(C_{1j}, C_{2j}, C_{3j} \dots C_{ij}) \quad (9)$$

$$S_j^- = \min(C_{1j}, C_{2j}, C_{3j} \dots C_{ij})$$

计算各评价指标与正理想解  $S_j^+$  和负理想解  $S_j^-$  欧氏距离  $D_i^+$  和  $D_i^-$ :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (C_{ij} - S_j^+)^2} \quad (10)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (C_{ij} - S_j^-)^2}$$

计算贴近度  $C_i$ :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

式中:  $C_i$  代表第  $i$  年长汀县的自然灾害刚弹性社会综合水平,  $0 \leq C_i \leq 1$ ,  $C_i$  值越大, 说明长汀县的自然灾害刚弹性社会综合水平越高。同理, 可计算得出 3 个一级指标的自然灾害刚弹性社会指数。

1.3.3 耦合协调度模型 自然灾害刚弹性社会是由多个一级指标耦合作用的复合系统, 引入物理学中的耦合协调度模型来量化刚性抵御、弹性管控、韧性恢复间的相互作用、相互影响的程度大小, 计算公式如下:

$$C = \frac{3 \times \sqrt[3]{C_1 C_2 C_3}}{C_1 + C_2 + C_3} \quad (12)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (13)$$

$$T = aC_1 + bC_2 + cC_3 \quad (14)$$

式中:  $C_1, C_2, C_3$  分别代表刚性抵御、弹性管控、韧性恢复 3 个一级指标的自然灾害刚弹性社会指数;  $a, b, c$  分别代表刚性抵御、弹性管控、韧性恢复 3 个一级指标的权重系数;  $C$  为耦合度;  $D$  为耦合协调度;  $T$  为发展度。根据相关研究<sup>[17]</sup>, 将耦合协调度  $D$  划分为失调和协调阶段, 其中失调阶段划分为: 严重失调 ( $0 < D \leq 0.3$ ), 初级失调 ( $0.3 < D \leq 0.5$ ); 协调阶段划分为: 初级协调 ( $0.5 < D \leq 0.8$ ), 高级协调 ( $0.8 < D \leq 1$ )。

1.3.4 障碍度函数模型 为厘清各个指标对自然灾害刚弹性社会的阻碍程度, 明确限制长汀县自然灾害刚弹性社会综合水平提升的障碍因素。本文引入障碍度函数模型<sup>[18]</sup> 计算各类指标的障碍程度。计算公式如下:

$$Q_{ij} = \frac{\omega_j (1 - Y_{ij})}{\sum_{j=1}^{31} \omega_j (1 - Y_{ij})} \quad (15)$$

式中:  $Q_{ij}$  代表第  $i$  年第  $j$  项指标的障碍度;  $W_j$  表示第  $j$  项指标的权重。同理, 可计算得出 3 个一级指标的障碍度。

## 2 结果与分析

### 2.1 自然灾害刚弹性社会综合水平时间序列特征

从表 2 可以看出, 在 2006—2019 年长汀县自然灾害刚弹性社会综合水平经历了由缓慢下降到显著增长的过程。2006 年长汀县的自然灾害刚弹性社会综合水平为 0.312 0, 2010 年略微下降至 0.239 5, 然后又显著增长至 2015 年的 0.516 8, 2019 年的 0.773 6, 其综合水平在 2010 年以后得到显著提升。研究结果有效印证了 2012 年来长汀县在自然灾害治理方面所取得的成效, 通过不断地加强基础设施建设、完善应急管控制度以及妥善处理灾后的经济、社会和生态的恢复发展问题, 使社会和自然抵御自然灾害的能力大大提升, 加强了社会系统的稳定性, 进而提升了自然灾害刚弹性社会的综合水平。

表 2 长汀县自然灾害刚弹性社会综合水平及一级指标评估结果

Table 2 Evaluation results of comprehensive level and its first-level indicators of rigid-elastic-resilient society of natural disasters in Changting County

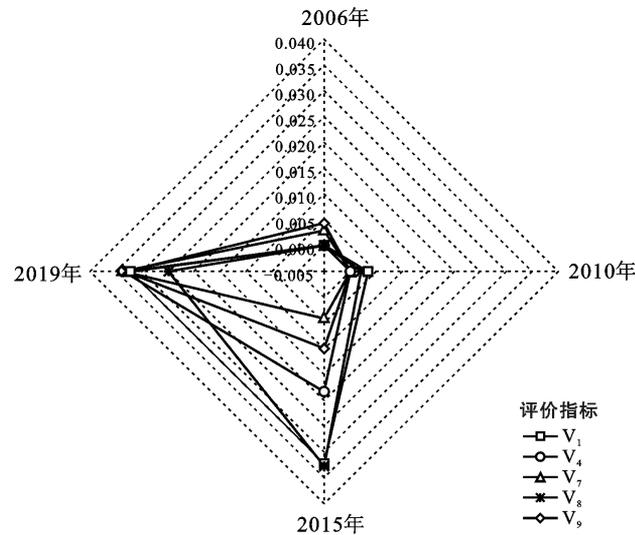
评价指标	2006 年	2010 年	2015 年	2019 年
刚性抵御指数	0.051 7	0.084 6	0.619 4	0.924 7
弹性管控指数	0.277 3	0.276 4	0.395 8	0.723 3
韧性恢复指数	0.402 0	0.280 9	0.512 4	0.750 3
刚弹性社会综合水平	0.312 0	0.239 5	0.516 8	0.773 6

### 2.2 各级指标评估结果与分析

由表 2 可以看出, 自然灾害刚弹性社会的 3 个一级指标指数在 2006—2019 年总体均呈现显著上升趋势, 其变化趋势相似, 但阶段略有不同。其中自然灾害刚性抵御指数呈现阶段且加速上升趋势, 在 2006—2010 年阶段, 刚性抵御指数缓慢上升, 2010 年比 2006 年增加了 0.032 9; 而在 2010—2019 年处于显著上升阶段, 由 2010 年的 0.084 6 增长至 2019 年的 0.924 7, 增加了 0.840 1。自然灾害弹性管控指数的变化规律与自然灾害刚性抵御指数相似, 在 2006—2010 年阶段, 弹性管控指数基本不变; 在 2010—2019 年处于显著上升阶段, 2019 年比 2010 年增加了 0.446 9。而自然灾害韧性恢复指数则呈现先下降后增长的趋势, 在 2006—2010 年阶段, 韧性恢复指数呈现下降趋势, 由 0.402 0 下降至 0.280 9, 下降了 0.121 1; 而在

2010—2019 年处于显著上升阶段,由 0.280 9 增长至 0.750 3,增加了 0.469 4。这得益于长汀县 2012 年以来加大了在刚性防灾设施、人力防灾管控和灾后韧性恢复方面的持续投入与建设,当地的自然灾害刚性抵御指数、弹性管控指数、韧性恢复指数得到显著增长,进而提升了长汀县自然灾害刚弹韧性社会的综合水平。且从整体来看,长汀县自然灾害弹性管控水平和韧性恢复水平稍微滞后于刚性抵御水平,增强当地的自然灾害弹性管控能力和灾后韧性恢复能力是今后提升自然灾害刚弹韧性社会综合水平的关键所在。

对各三级指标评估结果进行分析。由图 2 可以看出,刚性抵御的 9 个三级指标指数总体呈现显著上升趋势。在 2006—2019 年长汀县公路网密度增长了 108.2%,排洪沟和引水渠总长度增长了 114.2%,塘坝总数量增长了 168.4%,护岸护坡总长度增加了 118.99 km,蓄水池总数量增加了 305 口,医院增加了 2 个,已设置医疗点村数增加了 84 个,年植树造林面积和年生态林草面积增加了 8 046.6 hm<sup>2</sup> 和 2 882.9 hm<sup>2</sup>,以上指标的增长均有助于提升长汀县自然灾害刚弹韧性社会的刚性抵御指数和综合水平。



注:由于图 2—4 中部分指标结果数值过于接近,为使图表更加清晰直观,各图中结果过于接近的指标仅选取一个作为代表绘制于图中。图 2 中 V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>, V<sub>5</sub> 用 V<sub>1</sub> 代表, V<sub>6</sub> 用 V<sub>4</sub> 代表;图 3 中 V<sub>11</sub> 用 V<sub>10</sub> 代表, V<sub>12</sub> 用 V<sub>13</sub> 代表;图 4 中 V<sub>20</sub>, V<sub>21</sub>, V<sub>22</sub> 用 V<sub>18</sub> 代表, V<sub>23</sub> 用 V<sub>19</sub> 代表, V<sub>31</sub> 用 V<sub>27</sub> 代表。

图 2 长汀县自然灾害刚弹韧性社会刚性抵御及其构成要素指数演化雷达图

Fig.2 Evolvement radar chart of rigid resistance and its components of rigid-elastic-resilient society of natural disasters in Changting County

同时,从图 3 可以看出,在弹性管控的 8 个三级指标中,除水土流失监测站及站点指数呈现显著下降趋势外,其他各指标指数均呈现显著上升趋势,有助

于提升长汀县自然灾害刚弹韧性社会的综合水平。其中水土流失监测站及站点由 2006 年的 4 个下降至 2010 年以后的 1 个,而应急演练总次数在 2006—2019 年增加了 11 次,应急预案总数量增加了 80 个,平均每千人拥有床位数量由 2006 年的 1.73 张/千人增加到 2019 年的 5.68 张/千人,平均每千人拥有医护人员数量由 2006 年的 2.10 人/千人增加到 2019 年的 5.75 人/千人,监测时间分辨率由 2006 年的 9 a 减少到 2019 年的 5 a,广播覆盖率和电视覆盖率在 2006—2019 年仅提升了 0.1%和 0.6%。

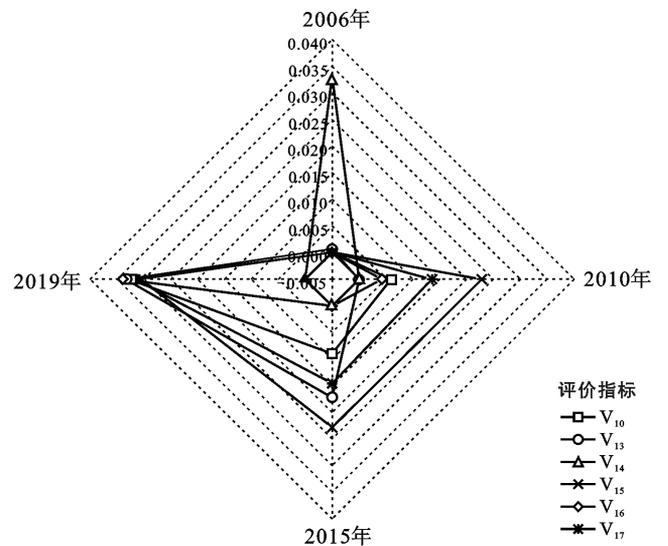


图 3 长汀县自然灾害刚弹韧性社会弹性管控及其构成要素指数演化雷达图

Fig.3 Evolvement radar chart of elastic control and its components of rigid-elastic-resilient society of natural disasters in Changting County

如图 4 所示,在韧性恢复的 14 个三级指标中,第三产业比重、刑事案件发案率、水源涵养和碳储总量的指标指数呈现显著下降趋势,其中第三产业比重在 2006—2019 年减少了 1.2%,刑事案件发案率由 2006 年的 17.9%上升到 2010 年的 42.5%和 2015 年的 48.5%,水源涵养量由 2006 年的 176.4 mm 下降到 2019 年的 142.6 mm,碳储总量减少了 5 161 t,这些指标的变化均在一定程度上制约了长汀县自然灾害刚弹韧性社会的发展。而其他各指标指数均呈现上升趋势,以人均 GDP、植被覆盖度和水土流失治理投入为例,人均 GDP 由 2006 年的 10 844 元显著增长至 2019 年的 72 985 元,植被覆盖度由 2006 年的 74.47% 增长至 2019 年的 79.32%,水土流失治理投入由 2006 年的 1.25×10<sup>7</sup> 元增加到 2019 年的 9.00×10<sup>7</sup> 元。

总体而言,在长汀县自然灾害刚弹韧性社会的 31 个三级指标中,除各级环境监测站及站点、第三产

业比重、刑事案件发案率、水源涵养和碳储总量的指标指数呈现显著下降趋势外,其他指标指数均呈现上

升趋势,有助于提升长汀县自然灾害刚弹性社会的综合水平。

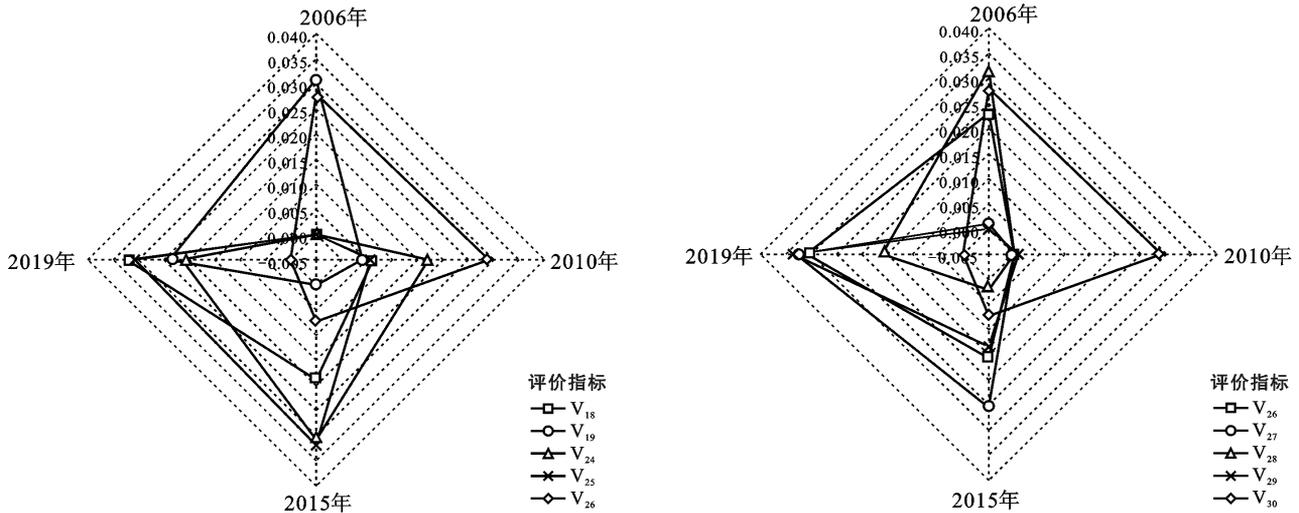


图 4 长汀县自然灾害刚弹性社会韧性恢复及其构成要素指数演化雷达图  
Fig.4 Evolutionment radar chart of resilient recovery and its components of rigid-elastic-resilient society of natural disasters in Changting County

### 2.3 耦合协调性综合分析

由图 5 可知,长汀县自然灾害刚弹性社会刚性抵御、弹性管控和韧性恢复间处于高度耦合状态。在 2006—2019 年阶段,耦合度呈现逐年缓慢增长趋势,其指数由 2006 年的 0.735 9 增长至 2019 年的 0.994,增长了 0.258 1,3 个一级指标间的耦合性处于较高水平。耦合协调度则呈现先缓慢下降,后显著增长的趋势。耦合协调度指数由 2006 年的 0.448 9 下降至 2010 年的 0.447 1,又显著增长至 2019 年的 0.884 9,在 2006—2019 年增长了 0.436 0。耦合协调度也由 2006 年的初级失调阶段过渡到 2019 年的高级协调阶段。总体而言,长汀县自然灾害刚弹性社会 3 个一级指标间的耦合协调性处于逐渐加强趋势,刚性抵御、弹性管控和韧性恢复向着更加健康、协调、可持续的方向均衡发展。

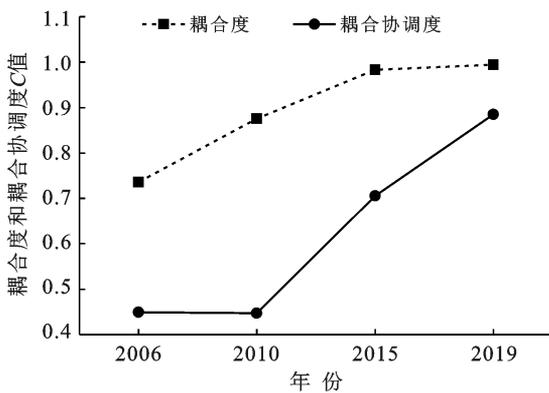


图 5 长汀县自然灾害刚弹性社会耦合协调性  
Fig.5 Coupling coordination of rigid-elastic-resilient society of natural disasters in Changting County

### 2.4 指标障碍度评价

通过公式(15)计算得到长汀县 2006, 2010, 2015, 2019 年自然灾害刚弹性社会 31 个评价指标的障碍度。为了明确各个指标障碍度对长汀县自然灾害刚弹性社会的作用,将 31 个评价指标选取的 4 个年份障碍度进行降序排列,选取各个年份障碍度排名前八的评价指标进行统计分析,结果见表 3。

在 2006—2019 年阶段,从长汀县自然灾害刚弹性社会指标层障碍度分析表中以出现频率次数 2 为基准点,筛选出护岸护坡总长度、医院数量、植树造林面积、生态林草、应急演练总次数、平均每千人拥有医护人员数量、水土流失监测站及站点、广播覆盖率、第三产业比重、刑事案件发案率、水源涵养、碳储总量和水土流失治理投入是限制长汀县自然灾害刚弹性社会综合水平提升的主要障碍因素。对各障碍因子的年份进一步分析,发现护岸护坡总长度、医院数量、生态林草、应急演练总次数、平均每千人拥有医护人员数量、广播覆盖率和水土流失治理投入是前中限制长汀县自然灾害刚弹性社会综合水平提升的主要障碍因素,但近年来得到有效改善,各指标障碍度显著降低,对长汀县自然灾害刚弹性社会的障碍程度明显减弱。而水土流失监测站及站点、第三产业比重、刑事案件发案率、水源涵养、碳储总量和当年植树造林面积则成为近年来限制长汀县自然灾害刚弹性社会综合水平提升的主要障碍因素。同时,通过对比一级指标在各年份的障碍度情况,发现韧性恢复的障碍度要远高于刚性抵御和弹性管控的障碍度,表明韧性恢复仍是目前限制长汀县自然灾害刚弹性社会综合水平提升的主导因素。

表 3 长汀县自然灾害刚弹韧性社会指标层障碍度分析

Table 3 Obstacle degree analysis of index level of rigid-elastic-resilient society of natural disasters in Changting County

年份	类型	指标排序							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2006	障碍度/%	4.167 9	4.140 5	4.132 1	4.128 4	4.072 4	4.045 2	4.023 5	4.019 0
	障碍因子	V <sub>16</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>29</sub>	V <sub>12</sub>	V <sub>10</sub>	V <sub>13</sub>	V <sub>8</sub>
2010	障碍度/%	4.080 2	4.068 2	4.060 0	4.039 9	4.004 3	3.984 6	3.977 3	3.950 4
	障碍因子	V <sub>7</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>13</sub>	V <sub>9</sub>	V <sub>27</sub>	V <sub>14</sub>	V <sub>29</sub>
2015	障碍度/%	7.133 7	6.928 4	6.509 9	6.423 5	6.283 7	5.035 4	4.878 6	4.571 1
	障碍因子	V <sub>16</sub>	V <sub>14</sub>	V <sub>19</sub>	V <sub>23</sub>	V <sub>28</sub>	V <sub>10</sub>	V <sub>9</sub>	V <sub>26</sub>
2019	障碍度/%	30.771 1	27.149 2	14.955 1	8.853 0	7.324 9	6.546 2	3.334 4	1.066 1
	障碍因子	V <sub>14</sub>	V <sub>26</sub>	V <sub>28</sub>	V <sub>24</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>19</sub>	V <sub>23</sub>	V <sub>25</sub>

### 3 讨论

本文从刚性抵御、弹性管控、韧性恢复 3 个维度构建了指标体系,利用熵权 TOPSIS 模型和耦合协调度模型评价了 2006—2019 年长汀县的自然灾害刚弹韧性社会综合水平及一级指标间的耦合协调性,并进行障碍度因子分析。但由于研究区域、年份、方法以及指标体系的不同,使得评估结果与前人的研究存在一定的差异。

(1) 指标体系构建。本文采用刚性、弹性和韧性相结合的手段,从刚性抵御、弹性管控和韧性恢复 3 个维度构建指标体系并对其综合水平进行评估。从长汀县自然灾害刚弹韧性社会一级指标的耦合性分析的结果来看,刚性抵御、弹性管控和韧性恢复间处于高度耦合的状态,该评估结果能较为有效、准确地反映地区的自然灾害刚弹韧性社会综合水平。而纵观前人研究,已有研究主要从韧性<sup>[19-20]</sup>、韧弹性<sup>[8,21]</sup>的角度对自然灾害风险进行评估,忽略了刚性在抵御自然灾害时的重要作用,具有较大的局限性。同时,以往的研究者在选取生态环境相关指标时,多选取绿地面积增长率<sup>[8]</sup>、建成区绿地的比率<sup>[18]</sup>、人均公园绿地面积<sup>[20]</sup>、植被比例<sup>[22]</sup>等少数与生态环境相关度不高的指标,并未体现人类社会和生态环境共同应对自然灾害风险的能力。因此,本文在选取生态环境相关指标时,引入植被覆盖度、水源涵养、土壤保持、碳储总量等相关度较高的指标,以求作出更为有效、准确的评价,体现社会与自然共同应对自然灾害风险的综合能力。

(2) 自然灾害刚弹韧性社会变化趋势。常言<sup>[12]</sup>对长汀县近 40 a 水土流失治理情况做出研究,表明长汀县近年来在水土流失治理方面已经取得了令人满意的成效,尤其是经过 2012 年以来新一轮的水土流失治理,成为了中国南方红壤区水土流失治理的典

范。由此也有效印证了本文的评估结果:长汀县自然灾害刚弹韧性社会的综合水平在 2006—2019 年总体呈现显著上升趋势,尤其是在 2010—2019 年阶段,其综合水平就增长了 0.720 9。对比前人研究,何敏<sup>[20]</sup>基于多种重大自然灾害风险视角的中国韧性城市评估研究结果表明,中国城市的韧性指数呈现波动上升趋势,与本文的研究结果基本一致。近年来,全国大部分地区的社会和经济正在快速发展,生态环境显著改善,这在一定程度上也加强了各地区对自然灾害的防范和抵御能力,从而提升了地区的自然灾害刚弹韧性社会综合水平。

(3) 限制因素。对各三级指标的障碍度及自然灾害刚弹韧性评估结果进行对比分析,发现灾害监测能力、治安管理水平、第三产业比重、碳储存能力下降以及水源涵养功能的减退是限制长汀县自然灾害刚弹韧性社会发展的关键因素。灾害监测能力的下降原因在于长汀县的 3 个水土流失监测站点因河床下切和水位下降,水流进不到观测井,在 2010 年被撤销,导致对自然灾害的监测能力显著下降;治安管理水平、第三产业比重和碳储存能力的下降则可能是因为社会与经济的过快发展,使长汀县出现了部分生态环境衰退、经济发展不平衡和社会治安更加复杂等问题,进而降低了系统抵御自然灾害的能力;而水源涵养功能的减退原因在于长汀县近年来年降雨量的减少,使得水源涵养量下降,降低了生态系统抵御自然灾害的能力。值得注意的是,虽然当年植树造林面积的障碍度在 2006 年和 2019 年较大,且相较于 2015,2019 年的植树造林面积减少了 2 538 hm<sup>2</sup>,但是对比 2006 年和 2010 年,还是呈现出显著增长趋势。仅凭 2019 年 1 a 不利的评估结果,并不能准确的判断出该指标未来的发展趋势,所以本文不将其作为长汀县自然灾害刚弹韧性社会的限制因素。以上 5 项指标均在一定程度上限制了长汀县自然灾害刚弹韧性社会

的发展,但总体而言,长汀县自然灾害刚韧性社会的综合水平在 2006—2019 年总体还是呈现显著上升趋势。其原因在于长汀县自然灾害刚韧性社会的大部分指标指数在 2006—2019 年总体均呈现显著上升趋势,仅水土流失监测站及站点、刑事案件发案率等少数指标指数呈现下降趋势,这类指标只能在较小程度上影响长汀县自然灾害刚韧性社会的发展。而通过对比一级指标在各年份的障碍度情况,可以发现韧性恢复仍是目前限制长汀县自然灾害刚韧性社会综合水平提升的主导因素。因此,解决好灾后的韧性恢复问题是今后推动长汀县自然灾害刚韧性社会综合水平进一步提升的关键所在。

## 4 结论

随着社会和经济的发展,在 2006—2019 年长汀县自然灾害刚韧性社会的综合水平总体呈现显著上升趋势。但社会的过快发展也使长汀县出现了部分生态环境衰退、经济发展不平衡、社会治安更加复杂等问题,灾害监测能力、治安管理水平、第三产业比重、碳储存能力的下降以及水源涵养功能的减退成为限制长汀县自然灾害刚韧性社会发展的关键因素。因此,为使长汀县乃至整个南方红壤区自然灾害刚韧性社会整体向着更加健康、协调、可持续发展的方向发展,还是应补齐发展短板,避免自然灾害刚韧性社会出现衰退。

### [参 考 文 献]

- [1] 聂小飞,郑海金,涂安国,等.南方红壤区长期水土流失综合治理显著减少河流输沙:以鄱阳湖流域赣江上游平江为例[J].湖泊科学,2021,33(3):935-946.
- [2] 分区考察组.分区考察成果及防治对策(分区五):南方红壤区[J].中国水利,2009(7):35-39.
- [3] 熊平生,谢世友.中国全球变化研究优势领域及进展[J].地理与地理信息科学,2008,24(3):86-89.
- [4] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review [J]. Landscape and Urban Planning, 2016,147:38-49.
- [5] 刘燕华,葛全胜,张雪芹.关于中国全球环境变化人文因素研究发展方向的思考[J].地球科学进展,2004,19(6):889-895.
- [6] Siebeneck L, Arlikatti S, Andrew S A. Using provincial baseline indicators to model geographic variations of disaster resilience in Thailand [J]. Natural Hazards, 2015, 79(2):955-975.
- [7] Zhai Guofang, Li Shasha, Chen Jing. Reducing urban disaster risk by improving resilience in China from a planning perspective [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2015,21(5):1206-1217.
- [8] 吴绍洪,高江波,韦炳干,等.自然灾害韧性社会的理论范式[J].地理学报,2021,76(5):1136-1147.
- [9] 郭小东,费智涛,王志涛.城市灾害应对的刚性、弹性与韧性[J].城乡规划,2021(3):35-42.
- [10] 王培俊,刘旗,孙煌,等.南方红壤水土流失区生态系统服务价值时空变化研究[J].农业机械学报,2021,52(5):219-228.
- [11] 陈国光,刘红樱,陈进全,等.福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策[J].水文地质工程地质,2020,47(6):26-35.
- [12] 常言.既要金山银山 更要绿水青山:长汀县持续推进水土流失治理与生态文明建设[J].福建党史月刊,2020(2):14-18.
- [13] 刘明霞,刘友存,陈明,等.2000—2018 年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J].水土保持通报,2020,40(5):284-290.
- [14] 杨君,周鹏全,袁淑君,等.基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J].水土保持通报,2022,42(1):267-272.
- [15] 杨帆,陈梓萌,巩世彬.基于 AHP-熵权 TOPSIS 模型的辽宁省各城市土地承载力评价[J].水土保持通报,2022,42(1):144-149.
- [16] 刘志有,曲秀武,魏冉,等.生态文明视角下的伊犁河谷绿洲土地生态安全评价及障碍因子诊断[J].水土保持通报,2022,42(1):137-143.
- [17] 张志琛,林樱子,彭翀.长江经济带城市群社会韧性评估与提升策略[C]//面向高质量发展的空间治理:2020 中国城市规划年会论文集(01 城市安全与防灾规划). 2021:393-402.
- [18] 柳梦琪,曾忠平.基于熵权 TOPSIS 法的武汉市土地利用多功能性评价[J].水土保持通报,2021,41(2):314-321.
- [19] 张庆霞.城市洪涝灾害治理的社会韧性研究[D].甘肃兰州:兰州大学,2021.
- [20] 何敏.基于多灾种重大灾害风险视角的城市韧性评估研究[D].上海:华东师范大学,2021.
- [21] 温家洪,颜建平,王慧敏,等.韧性视角下的城市综合巨灾风险管理[J].城市问题,2019(10):76-82.
- [22] 贺一雄,赵咏梅,赵翠薇.乌蒙山区洪涝灾害风险评估:以贵州省毕节市为例[J].贵州科学,2021,39(4):53-60.