

# 基于适应性循环的丹江口库区生态风险评价

张玉娇, 曾杰, 陈万旭, 黄成

(中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430078)

**摘要:**库区是流域水系的重要组成部分,厘清库区经济社会发展过程中的生态环境效应和综合生态风险,对库区生态风险适应与缓解的决策制定具有重要意义。现有研究忽视了库区生态系统的自组织动态演化过程,有必要进一步考虑库区生态系统与社会系统的时空交互过程,对库区生态风险进行更为综合性和针对性的评价,弥补库区生态风险量化评价研究空缺。基于此,以丹江口库区为例,综合考虑库区生态环境、景观结构及人类活动等要素,构建基于适应性循环理论框架的“潜力—连通度—韧性”三维综合评价指标体系,选取 1990—2018 年 7 个年份的数据,对研究区 7 个县(市、区)的生态风险适应性循环周期进行刻画。结果表明:(1)丹江口库区整体生态风险水平呈波动状下降趋势,生态风险变化趋势存在地域差异,淅川县、茅箭区、张湾区为生态风险上升地区;(2)适应性循环的阶段特征能够为判断库区生态风险现状提供依据,适应性循环释放阶段、重组阶段及僵化阶段表现出生态系统风险上升的趋势。修正后的适应性循环模型对系统僵化风险的指示作用更加明显,2015 年以来,丹江口库区社会—生态系统处于重要的转折阶段,有效防止生态风险的进一步扩大是当前库区生态系统管理的关键所在,对于维持库区社会—生态系统的可持续性至关重要。

**关键词:**生态风险评价; 社会—生态系统; 适应性循环; 丹江口库区

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0349-12

## Assessment on Ecological Risk of Danjiangkou Reservoir Area Based on Adaptive Cycle

ZHANG Yujiao, ZENG Jie, CHEN Wanxu, HUANG Cheng

(School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

**Abstract:** The reservoir area is an important part of the river basin and water system. It is of great significance for the decision making of ecological risk adaptation and mitigation to clarify the eco-environmental effects and comprehensive ecological risks in the process of socio-economic development of the reservoir area. The study of self-organization dynamic evolution process of the ecosystems in the reservoir areas has been ignored in the existing researches, it is therefore necessary to further consider the spatiotemporal interaction process between the ecosystem and the socio-economic system in the reservoir area, and to make a more comprehensive and targeted assessment on the ecological risk to make up for the lack of quantitative evaluation of ecological risk in reservoir area. To this end, this study attempted to take Danjiangkou Reservoir area as the study case to characterize the cycle of ecological risk adaptability in seven counties in the Danjiangkou Reservoir area based on the theoretical framework of potential-connectivity-resilience, which comprehensively considered factors such as the ecological environment, landscape structure and human activities in the reservoir area from 1990 to 2018. The results showed that: (1) the overall ecological risk level in Danjiangkou Reservoir showed a fluctuating downward trend, and there were regional differences in the variation trend of ecological risk; Xichuan County, Maojian District, and Zhangwan District were the regions with increasing ecological risk; (2) the stage of the adaptive cycle could provide bases for judging the current ecological risk

收稿日期:2020-12-18

修回日期:2021-02-27

**资助项目:**国家自然科学基金项目“微观尺度下城镇空间扩张对生态系统服务的影响”(41701629);国家自然科学基金项目“农村居民点居业功能协同演化机理研究”(42001231);国家自然科学基金项目“长江中游城市群城镇化对生态系统健康驱动机制差异性研究”(42001187);教育部人文社会科学研究青年基金项目“宅基地“三权分置”对农业转移人口市民化意愿的影响机制及调控策略研究”(19YJCZH224);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“库区景观生态风险识别与预警”(CUGW170206)

**第一作者:**张玉娇(1995—),女,山东青州人,在读硕士生,研究方向为景观生态与生态系统服务。E-mail:zhangyujiao957@163.com

**通信作者:**曾杰(1985—),男,湖北钟祥人,研究生导师,博士,主要从事土地利用与生态系统服务、国土空间规划研究。E-mail:zengjie@cug.edu.cn

situation in the reservoir area; the phases of release, reorganization, and fossilization of the adaptive cycle showed an increasing trend of ecological risk. The modified adaptive cycle model has a more obvious indicator effect on the risk of system fossilization. Since 2015, the socio-ecosystem of Danjiangkou Reservoir area has been at an important transition stage. Effective prevention of further aggravation of ecological risks is the key to the current ecosystem management of the reservoir area, which is crucial for maintaining the sustainability of the socio-ecosystem of the reservoir area.

**Keywords:** assessment on ecological risk; socio-ecological system; adaptive cycle; Danjiangkou Reservoir area

生态系统能够为人类社会提供重要的物质基础和生态服务<sup>[1]</sup>,维持其结构与功能的稳定是人类社会发展的重要条件<sup>[2]</sup>。生态系统面临的风险包括生态系统结构和功能受到损失的可能性及严重程度,具有不确定性、危害性、复杂性、客观性及动态性<sup>[3]</sup>,其发展过程伴随着人类活动范围的扩大和程度的增加以及人与环境间新矛盾的产生。生态风险评价是对生态系统风险的定性描述或客观量化,能够为生态风险管理提供科学依据和技术支持,对加强生态系统管理、保障区域生态安全具有重要意义<sup>[4-5]</sup>,已成为健康管理必不可少的一部分<sup>[6]</sup>。

社会—生态系统是人类社会与自然界高度关联的复杂适应系统<sup>[7-8]</sup>。其相关理论广泛适用于研究不同尺度系统的时空动态变化,是当前可持续发展和全球变化领域研究的热点与核心<sup>[9-10]</sup>。适应性循环理论是对社会—生态系统运行机制的描述,其将生态系统的演替理论从线性思维中解放出来,借助“潜力—连通度—韧性”3个维度,将生态系统演化的开发、保护、释放、更新4个环节衔接成闭合的动态循环,用于解释复杂生态系统应对干扰和变化反馈的动力机制<sup>[11-12]</sup>。该理论突破了生态风险评价视角的局限性,可通过构建较为综合的指标体系展现不同时空维度的多种社会与生态功能<sup>[13]</sup>。将社会—生态系统的适应性循环过程进行量化,助推了生态系统中看似复杂并相互联系的要素动态规律分析。前人基于适应性循环理论探讨了城市<sup>[13]</sup>、旅游地<sup>[14]</sup>、黄土高原半干旱山区等<sup>[15]</sup>典型区域的生态风险动态特征。但遗憾的是,基于适应性循环的库区生态风险定量化评价还十分欠缺,缺乏有效的定量化模型。

库区是流域水系的重要组成部分,也是保障社会系统水源供给的人类工程。20世纪90年代后我国经济发展成就瞩目,在快速城镇化和土地利用转换背景下<sup>[16]</sup>,库区生态系统结构和功能发生改变,生态环境问题逐渐浮现<sup>[17]</sup>,生态安全问题不容忽视。库区所处环境存在有别于天然水域生态系统的特殊性,即库区生态系统存在更多的人类活动。其系统内部人工景观与自然景观在空间上复杂镶嵌,社会系统与生态系统在功能上交流密切,属于典型的社会—生态系统。社会—生态系统适应性循环理论的快速发展,为

认识和理解库区生态风险的综合性和动态演化提供了新的思路。与生态安全需求相比,库区经济发展需求同样不容忽视,单一的保护政策并不适用于库区生态系统。因此,厘清库区经济社会发展过程中的生态环境效应和综合生态风险,对库区生态风险适应与缓解的决策制定具有重要意义。通过对已有研究成果的梳理发现,库区作为重要的生态系统类型其重要性尚未被充分认识。现有以库区为研究区的生态风险评价研究中,水库水化学污染评价占据主流位置,而涉及系统整体的多要素综合评价十分欠缺。支撑库区可持续发展必须做到库区综合生态风险的有效识别和科学评估,然而已有评价方法没有充分考虑库区生态系统的独特性,不仅忽视了库区生态系统的自组织动态演化过程,也难以体现库区生态系统与社会系统之间的复杂交互关联特征,尚不足以系统全面地揭示库区生态风险的自适应时空变化规律<sup>[18]</sup>,有必要进一步考虑库区生态系统与社会系统的时空交互过程,对库区生态风险进行更为综合性和针对性的评价。因此,有必要以适应性循环为切入点,进一步开展生态风险评价和变化研究,突出生态风险在库区发展过程中的系统性和动态性,从而为更系统全面地理解库区生态风险的适应性变化和机理,为防治生态风险、提升库区生态安全水平提供科学保障。

基于此,本文通过借助GIS空间分析,将适应性循环理论应用于库区生态风险评价指标构建以及库区生态风险时空格局动态变化分析中,探测丹江口库区生态风险在自然环境和人类活动双重作用下的演变规律,弥补库区生态风险定量化评价研究空缺,并通过库区适应性循环过程与格局的刻画,为分析库区生态风险变化趋势、生态风险隐患预警提供新的角度,以期为合理进行水源保护区土地可持续开发及制定水源区生态安全保护调控措施提供科学依据。

## 1 研究区与数据来源

丹江口水库由1973年建成的丹江口大坝下闸蓄水后形成,横跨湖北、河南两省,包含汉江库区和丹江库区两部分。作为国家重要战略性工程“南水北调”中线的水源地,丹江口水库为沿线十几座大中城市提供生产生活 and 工农业用水,重点解决河南、河北、北

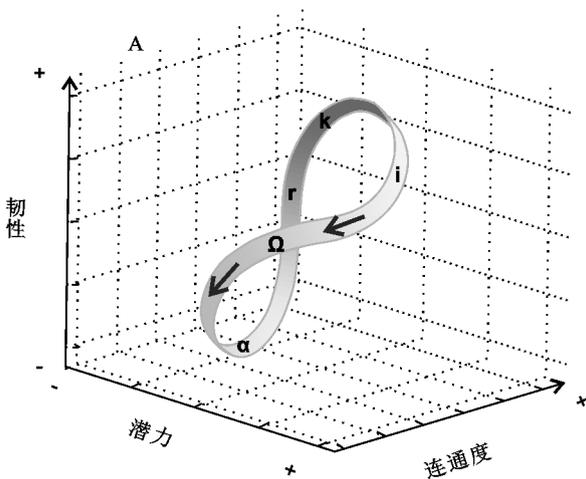
京、天津 4 省市的水资源短缺问题,供水范围总面积 15.5 万  $\text{km}^2$ 。截至 2020 年 6 月 3 日,南水北调中线一期工程已经安全输水 2 000 d,累计向北输水 300 亿  $\text{m}^3$ ,极大促进了我国水资源配置优化和区域协调发展,具备重大经济意义和生态意义。考虑到数据涵盖范围和数据的可获得性,本研究以丹江口水库主体和汇水河流所在周边地市湖北省丹江口市、郧阳区、郧西县、张湾区、茅箭区,以及河南省淅川县、西峡县为研究区域,其中,丹江口水库大坝位于丹江口市境内,南水北调中线工程渠首位于淅川县境内,为南水北调中线工程的核心水源区、坝区。

研究数据中,土地利用 1 km 精度栅格数据和归一化植被指数数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心<sup>[19]</sup>,高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),人口数据和 GDP 数据来源于《中国人口统计年鉴》、《南阳经济统计年鉴》、《河南农村统计年鉴》、《河南调查年鉴》、《南阳统计年鉴》、《河南统计年鉴》、《湖北统计年鉴》、《十堰统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》及《河南改革开放 30 年 1978—2008》等,数据处理工具涉及 ArcGIS 10.2, Fragstates 4.2, Origin 2018, CorelDRAW 等软件。研究中个别缺失年份数据采用相邻年份插值法补齐。

## 2 研究方法

### 2.1 适应性循环模型修正

#### 2.1.1 适应性循环模型 社会—生态系统适应性循



环理论有别于传统的生态系统演化理论,传统的生态系统演化理论认为生态系统的发展在时间上呈现二维线性发展特点,仅存在发展和退化两种状态,而在适应性循环理论中,社会—生态系统存在生长、守恒、释放和重组 4 种状态并形成循环(图 1A),且在“潜力—连通度—韧性”3 个维度上呈现动态发展特点。适应性循环各个阶段“潜力—连通度—韧性”的不同组合特点,是判断社会—生态系统所处阶段的重要标准。生长阶段,系统具有最大的成长速率,系统内部潜能快速增长,推动系统进入守恒阶段。守恒阶段的系统具有较高的连接度和充足的资本,表现出缓慢增长的稳定状态,但在稳定发展模式的控制下,系统表现出对某些资本的强大控制力,使系统出现连接过度 and 运行僵硬现象,系统韧性开始下降,一旦强干扰来临,系统将不可避免地发生意外,进入释放阶段。在释放阶段,系统会突然发生变化,失去积累和控制的资源,严密的组织结构也会丧失,系统开始变得混乱无序,系统的多样性开始显现,这为系统的重组再生创造了无限可能,因此该阶段也被称为“创造性的毁灭”<sup>[20]</sup>,是更新阶段的来源<sup>[21]</sup>。受强干扰影响的释放阶段通常持续时间短暂,例如某些灾害事件往往是瞬间发生,因此很难在评价中明确分离;而受持续弱干扰影响,如政策调整、大型工程等,释放阶段则会在循环中有所体现。系统进入重组阶段后进行系统内资本和要素联系的重组,有可能进入相同的循环,也有可能进入新的循环,此时各维度组合特点往往杂乱无序,直至重新进入稳定的生长阶段。

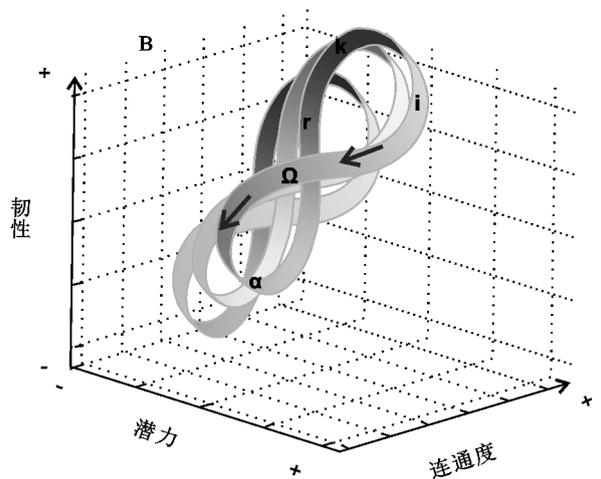


图 1 A 适应性循环模型 B 扰沌模型

2.1.2 扰沌模型 Holling 基于层次结构提出扰沌模型,用于描述复杂适应性系统的进化本质<sup>[22]</sup>。扰沌模型和适应性循环模型紧密关联,它们共同决定了整个系统的行为方式<sup>[23]</sup>。扰沌模型是指不同层级社会—生态系统适应性循环的不同阶段间存在各种联

系,即嵌套的自适应周期(图 1B)<sup>[24-25]</sup>。两类联系比较关键:一是向上跃迁,低层次小系统不断学习,联系到能容纳和运作更多资本的高层次大系统,成功避免系统僵化带来的崩溃风险;二是向下跃迁,高层次系统运行陷入僵化,通过缓慢释放资本或变化资本利用

方式,对过去成功经验进行记忆和保护,回到能够快速运行的低层次小系统。由于系统按自适应循环发展的层级关系不可预测,故极可能在重复循环和跨层级系统跃迁中自由转换<sup>[26-27]</sup>。

**2.1.3 模型修正** Holling 提出的适应性循环模型与扰沌模型普遍适用于社会—生态系统演化过程的定性分析,但仍存在一些局限性。原模型中,系统进入守恒阶段后,系统处于相对的高潜力高连通度高韧性状态,发展模式稳定,发展速度降低,在资本高度冗余、系统运行不力的状态下,系统韧性达到顶峰,并逐渐开始下降。为了进一步体现系统守恒阶段韧性变化的特征,本研究以系统韧性的峰值为界线将原模型守恒阶段划分为守恒阶段和僵化阶段,在僵化阶段中系统表现出韧性下降的缓慢发展状态,此时系统的发展模式相对固化,风险逐渐上升。与原模型相比,修正后的适应性循环模型被划分成生长(r)、守恒(K)、僵化(i)、释放( $\Omega$ )、重组( $\alpha$ )5个阶段,其中,生长阶段、释放阶段和重组阶段特点与原模型一致,守恒阶段仅表示系统在资本富足状态下的缓慢甚至停滞增长状态,而僵化阶段能为系统演化提出警示,一旦系统处于僵化阶段,则应引起管理者的重视,进一步探究僵化出现的原因,及时规避风险或抵抗干扰。

## 2.2 库区生态风险评价框架与指标体系构建

**2.2.1 评价指标集** 为正确评价库区生态风险状况,必须在明确每个维度意义的基础上,选择能够反映每个维度内系统各要素复杂关联的指标,构建相对完整的生态风险评价模型。借鉴已有的相关成果,以科学性为原则,在保证方法可操作性和数据可得性的基础上,结合库区的特点,构建基于适应性循环的理论研究框架涉及的“潜力—连通度—韧性”三维度综合评价指标体系。模型综合考虑库区生态环境、景观结构及人类活动等要素,能较好评价在自然环境和人类活动的干扰下库区生态风险的演变规律,并预测系统生态风险未来演变趋势。模型中潜力代表库区自身的属性和本底条件,能够为未来系统发展提供方向,主要从要素积累的层面选取评价指标<sup>[18,27-28]</sup>;连通度指库区感知系统内外变化的灵敏度,指标旨在体现系统内部、各要素间或系统与外界沟通的数量和频率<sup>[18,29]</sup>;韧性指库区面对干扰的缓冲能力,主要从系统可能或正在面临的风险角度选取指标<sup>[28,30]</sup>。

人类活动加速被认为是与社会生态系统发展过程中影响地球生态系统的最主要的外部因素。经济、社会和生态特征的整合方式对系统的动态和变化具有极其重要的作用<sup>[31]</sup>。在以往的生态风险评价研究中,人类活动被普遍认作负面影响因素,但从适应性

循环和环境保护政策措施来看,人类活动的正面影响已不容忽视,其可被认为是“具有创造力的干扰因子”,是社会—生态系统演化的重要驱动力,能推动系统适应性循环由低效率向高效率转变。因此,只有将不同类型的人类活动纳入到生态风险评价中,才能更为全面地提供社会—生态系统整体的生态风险信息。

基于上述理论基础,从库区社会—生态系统的要素与主要功能层面,在“潜力—连通度—韧性”3个维度下共筛选了10个生态风险评价指标。其中,库区社会—生态系统要素积累涉及生物量积累,资本积累等方面,选取归一化植被指数、城镇化率及地均GDP共3个指标;系统连通度涉及系统内人类活动、水体及土地要素间联系,选取景观破碎度、建设用地和水体面积加权平均邻近系数及系统内各地类间平均邻近指数作为评价指标;韧性指标涉及系统可能遭遇的干扰,考虑到景观格局合理性及稳定性等风险,共选取香农多样性指数、景观结构稳定性指数、土地利用合理性指数及建设用地和耕地占用生态用地面积4项指标。各指标计算方式如下:

(1) 归一化植被指数可表现植被的空间分布状况,用以指示生物量的积累程度。区别于绿地面积,NDVI还能反映植被生长状况和生态系统健康程度。归一化植被指数取值范围介于-1到1之间,负值表示地面覆盖为水、雪等,0表示有岩石或裸土等,正值表示有植被覆盖<sup>[32]</sup>。该值越大,系统潜力越大,系统面临生态风险越小。(2) 城镇化率是城镇化的度量指标,用以衡量社会系统经济发展水平。该值越大,系统潜力越大,系统面临生态风险越小。(3) 地均GDP表示1 km<sup>2</sup>土地创造的GDP,能有效反映土地的使用效率。该值越大,系统潜力越大,系统面临生态风险越小。(4) 景观破碎度指在自然或人为干扰作用下,景观由单一、均质和连续的整体趋向于复杂、异质和不连续的斑块镶嵌体的过程,此值越大,表明景观单元内部稳定性越低,系统连通度越低生态风险越大<sup>[33]</sup>。(5) 建设用地和水体面积加权平均邻近系数用于描述城市开发对水体的干扰,这种干扰被认为会随距离增大而逐渐衰减。该值越大,表明系统连通度越低,生态风险越大。(6) 平均邻近指数(MPI)能够度量同类型斑块间的临近程度,MPI值越大,表明同类型斑块间邻近度高<sup>[32]</sup>,系统连通度越高,系统面临生态风险越小。(7) 香农多样性指数可指示景观类型的多样性,景观类型越丰富,系统整体因某种景观受到干扰而发生崩溃的可能性越低,系统韧性越

大,系统面临风险越小<sup>[32]</sup>。(8)景观结构稳定性指数用以表述土地利用景观状态的稳定程度,该指数与景观类型受到干扰后的稳定性呈正相关<sup>[34]</sup>。

$$e = |1.5 - E| \quad (1)$$

式中: $E$ 为景观分维数,其值介于<sup>[1-2]</sup>,且 $E$ 值越大,结构越复杂;但 $E$ 值越接近1.5时景观结构越不稳定; $e$ 为景观结构稳定性指数,值越大,景观结构越稳定,系统韧性越大,系统面临风险越小。

(9)土地利用相对合理指数是从水土保持角度出发,分析不同土地利用方式受坡度的影响<sup>[35]</sup>。现有研究覆盖区域涉及黄土高原地区和三峡库区,本文借鉴前人成果,考虑丹江口库区实际情况做出适当调

整。其计算方法为<sup>[36-37]</sup>:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ji} \times R_{ji})}{n} \quad (2)$$

式中: $r$ 为土地利用相对合理指数; $L_{ji}$ 表示在坡度段 $j$ 第 $i$ 种土地利用类型所占百分比; $R_{ji}$ 表示第 $j$ 坡度段对第 $i$ 种土地利用的适宜程度,其值在0~1之间,1表示最适宜;0表示不适宜(表1); $m$ 为土地利用类型总数目; $n$ 表示坡度的分级数。 $r$ 值越大表示土地利用方式越合理,其值为1时,表示土地利用结构最佳。土地利用相对合理指数越大,系统韧性越大,系统面临风险越小。

表 1 不同利用方式对坡度的适应性评价

地类 坡度分级	水田	旱地	有林地	灌木 林地	疏林地	其他 林地	高覆盖度 草地	中覆盖度 草地	低覆盖度 草地	水域	建设 用地	未利 用地
0~5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
5~15	0.25	0.7	1	1	0.7	0.8	1	1	0.9	0.25	0.75	0.25
15~25	0.1	0.3	1	1	0.4	0.5	1	0.9	0.8	0	0.25	0
25~35	0	0.1	1	1	0.3	0.25	1	0.8	0.7	0	0	0
>35	0	0	1	1	0.2	0.2	1	0.7	0.5	0	0	0

注:表中数据基于不同土地类型水土流失难易程度设定,例如研究区未利用地中包含二级地类均为地表裸露的土地,无植被覆盖,极易造成水土流失,因此其在各坡度适宜性均最低。

(10)建设用地 & 耕地占用生态用地面积用以指示在人类活动的影响下生态用地景观格局受

干扰的程度。该值越大,系统韧性越小,系统面临风险越大。

表 2 基于适应性循环理论库区生态风险评价指标体系

维度层	指标层	指标性质	权重 1	指标性质	权重 2	指标释义与影响性质
潜力	归一化植被指数	-	0.310	+	0.396	衡量系统内生物量积累
	城镇化率(%)	-	0.351	+	0.291	衡量系统经济发展水平
	地均 GDP	-	0.340	+	0.313	衡量系统土地使用效率
连通度	景观破碎度	+	0.212	-	0.251	衡量系统在人类活动干扰下景观被分割的破碎程度
	建设用地 & 水体面积加权平均邻近系数	+	0.458	-	0.464	衡量人类活动对水体的影响程度
	平均临近指数	-	0.330	+	0.285	衡量系统内各类用地的连通度
韧性	香浓多样性指数	-	0.197	+	0.227	衡量系统景观元素类型的多样化程度
	景观结构稳定性指数	-	0.213	+	0.235	衡量土地利用景观格局的稳定程度
	土地利用合理性指数	-	0.206	+	0.183	衡量系统土地利用的适宜程度
	建设用地 & 耕地占用生态用地面积	+	0.384	-	0.355	衡量系统受人类活动影响生态用地损失程度

2.2.2 标准化处理 对  $a$  个样本、 $b$  个指标的数据进行标准化处理,则  $x_{ij}$  为第  $i$  个样本的第  $j$  个指标的数值( $i=1, \dots, a; j=1, \dots, b$ );根据指标性质,进行异质指标同质化,正向指标按公式(3)计算,负向指标按公式(4)计算。

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{aj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{aj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{aj}\}} \quad (3)$$

$$x_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{aj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{aj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{aj}\}} \quad (4)$$

2.2.3 计算指标综合值 采用熵权法确定权重(表2)。熵权法是一种客观赋权法,仅依据数据本身的离散性确定权重,排除了决策者主观判断造成的误差。因生态风险与潜力、连通度、韧性的指标性质相反,对异质指标同质化后不同的两组标准化数据分别进行权重计算,得到用于计算生态风险值的权重 1 和用于计算“潜力—连通度—韧性”三维坐标值的权重 2。

根据公式(5)计算指标综合值(表3)。

$$D_{ij} = d \times x_{ij} \quad (5)$$

式中: $D_{ij}$ 指第*i*个区域的第*j*个指标的综合值; $x_{ij}$ 为第*i*个区域的第*j*个指标标准化后的指标值; $d$ 为指标权重。

### 3 结果与分析

#### 3.1 丹江口库区生态风险时空变化过程

丹江口库区整体生态风险水平呈现波动下降趋势(表3),且生态风险变化趋势存在地域差异。对源数据按上述指标处理方式分别进行处理,可以发现,1990—1995年库区生态风险不断上升,1995—2015

年库区风险水平持续下降,2015—2018年有所回升。丹江口市、淅川县、郧西县、郧阳区生态风险变化趋势相似,以2015年为节点,1995—2015年生态风险持续下降,2015年后生态风险明显回升;西峡县1995—2000年生态风险有微小幅度的上升,1995—2015年持续下降,2015年后明显回升,与库区整体生态风险呈现相同变化趋势;茅箭区1995—2000年生态风险显著下降,1995—2010年持续上升,2010—2015年下降,但随后再次上升。研究时段内淅川县、茅箭区、张湾区为生态风险上升地区。

表3 研究区各市区县生态风险值

研究区域	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年
库区	1.675	1.776	1.572	1.451	1.386	1.232	1.492
丹江口市	1.577	1.511	1.527	1.514	1.438	1.359	1.404
淅川县	1.510	1.456	1.426	1.424	1.286	1.241	1.537
郧西县	1.525	1.494	1.504	1.499	1.436	1.337	1.514
郧阳区	1.548	1.544	1.507	1.477	1.395	1.367	1.501
西峡县	1.527	1.564	1.539	1.443	1.419	1.211	1.527
茅箭区	1.464	1.331	1.424	1.444	1.557	1.457	1.549
张湾区	1.416	1.476	1.475	1.487	1.540	1.480	1.526

研究区各县(市、区)生态风险值时空变化特征明显。利用自然断点法对研究时段内研究区生态风险值进行分级,结果见图2。库区主体位于丹江口市和淅川县,其中丹江口市生态风险值在研究时段内持续降低,淅川县生态风险值1990—2015年持续下降,2015—2018年大幅回升;水库主要干流流经郧西县和郧阳区,两地均经历生态风险值先下降后上升的变化趋势;水库干流次一级支流经过西峡县、张湾区和

茅箭区,张湾区和茅箭区为十堰市城区,随着城市化进程的快速推进,该地区生态风险水平呈现波动上升趋势,1990—2015年西峡县生态风险值达到研究时段内峰值,而后快速下降,2015—2018年再次上升。可以看出,2015年前研究区内除城区外生态风险值普遍降低,生态状况向好发展,2015—2018年除丹江口市外均出现生态风险的回升,丹江口库区生态风险形势不容乐观。

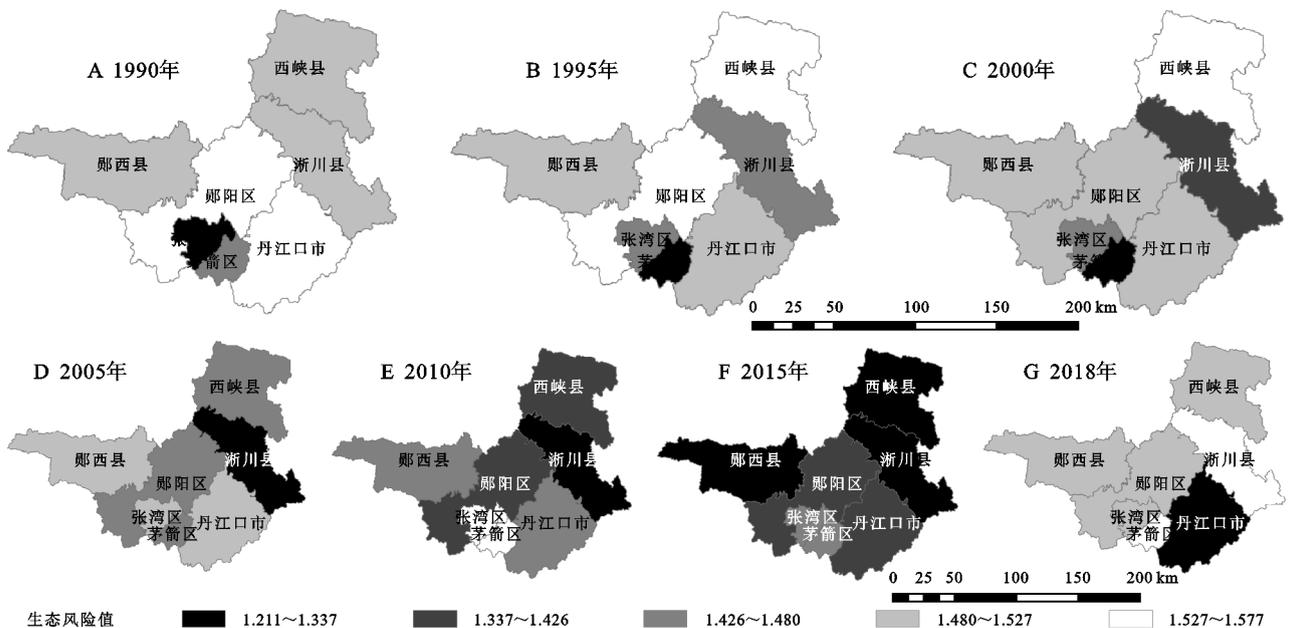


图2 1995—2018年丹江口库区生态风险分级

#### 3.2 丹江口库区生态风险适应性过程与格局

生态风险值在宏观上简洁明了的展现出一个地

区整体的风险水平,但仅借助单一的风险指示难以做

出具有针对性生态风险管理决策,且难以预测区域内未来生态风险发展的可能性。因此,本研究进一步探测了研究区生态风险在不同维度的表征(表 4)。

研究时段内,库区潜力水平呈明显上升趋势,2005 年之前,库区潜力增长缓慢;2005 年后,潜力快速增长,其中 2010—2015 年增长最为迅速。研究时段中,地均 GDP 指标所指示的库区土地使用效率对库区潜力变化趋势有明显影响,归一化植被指数指示的自然要素积累则在 2010 年后对库区潜力的快速增长起到明显的积极作用,2015 年后,城镇化率的下降打破库区潜力快速增长的势头,使潜力增长幅度明显放缓。连通度方面,库区在 1990—2000 年经历大幅

下降后又快速回升,2000—2015 年呈现缓慢下降趋势,2015 年后再次大幅度下降。对连通度指标进行单独分析后发现,人类活动对水体的影响程度变化极大影响了研究时段内库区连通度的变化,在连通度的两次剧烈变化阶段均有体现。1990—1995 年,库区的韧性略有下降,而 1995—2015 年则呈阶梯状增长,并在 2015 年达到峰值后迅速下降。其中,1990—2015 年和 2005—2000 年为稳定增长期,2000—2005 年和 2010—2015 年为快速增长期。1995 年前后,土地的不合理利用对库区韧性造成了明显影响,2000—2005 年、2015—2018 年,人类活动造成的生态用地损失程度使库区韧性变化趋势发生明显波动。

表 4 研究区各市区县生态风险三维评估体系计算结果

地区	维度	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
丹江口库区	潜力	1.000	1.141	1.108	1.145	1.314	1.691	1.910
	连通度	1.836	1.442	1.938	1.875	1.849	1.695	1.252
	韧性	1.124	1.061	1.187	1.561	1.585	1.845	1.458
丹江口市	潜力	1.000	1.208	1.157	1.188	1.384	1.784	1.883
	连通度	1.618	1.610	1.730	1.578	1.559	1.336	1.582
	韧性	1.352	1.296	1.251	1.445	1.458	1.689	1.587
淅川县	潜力	1.080	1.123	1.156	1.225	1.594	1.763	1.983
	连通度	1.474	1.700	1.758	1.729	1.735	1.668	1.333
	韧性	1.784	1.649	1.626	1.669	1.701	1.746	1.279
郧西县	潜力	1.005	1.036	1.115	1.140	1.381	1.693	1.790
	连通度	1.926	1.925	1.901	1.861	1.719	1.508	1.307
	韧性	1.334	1.400	1.291	1.319	1.395	1.626	1.584
郧阳区	潜力	1.003	1.056	1.094	1.159	1.350	1.651	1.823
	连通度	1.629	1.616	1.568	1.560	1.529	1.153	1.629
	韧性	1.499	1.446	1.596	1.597	1.662	1.990	1.348
西峡县	潜力	1.009	1.012	1.042	1.211	1.278	1.774	1.999
	连通度	1.828	1.631	1.631	1.719	1.714	1.843	1.000
	韧性	1.437	1.527	1.553	1.588	1.595	1.629	1.537
茅箭区	潜力	1.170	1.550	1.227	1.189	1.049	1.622	1.802
	连通度	2.000	1.942	1.942	1.829	1.681	1.371	1.000
	韧性	1.176	1.256	1.261	1.356	1.417	1.529	1.752
张湾区	潜力	1.242	1.174	1.145	1.174	1.040	1.686	1.732
	连通度	1.776	1.611	1.611	1.499	1.492	1.167	1.470
	韧性	1.449	1.550	1.557	1.601	1.620	1.670	1.544

县(市、区)层面,各区域潜力变化趋势与库区整体变化趋势大致相符,呈现波动或稳定上升趋势,受地均 GDP 波动的影响,茅箭区 1990—2000 年潜力经历了明显的升高和回落,2005—2015 年,茅箭区、张湾区受城镇化率下降和归一化植被指数上升共同影响,潜力出现明显转折;多数市区县连通度经历了加速下降过程,丹江口市、郧阳区和张湾区连通度于 2015 年呈现大幅回升,各用地类型之间的连通度明显升高;2015 年前各市区县韧性水平呈现阶段性缓慢增长,2015 年后仅茅箭区维持增长趋势,郧阳区和淅川县韧性快速下降,其余区

域缓慢下降,通过分析单个韧性指标,推测郧阳区和淅川县 2015 年后建设用地侵占生态用地增加,景观结构稳定性和土地利用合理性同时受到影响致使韧性大幅降低,系统抵御风险能力受到影响。

3.2.1 丹江口库区整体生态风险适应性过程 将库区三维生态风险值对应到三维空间坐标中,能够清晰展示出 7 个年份生态风险值的空间变化轨迹(图 3A),根据点与点之间“潜力”、“连通度”、“韧性”3 个维度的变化关系,能够将各时间段对应到适应性循环周期的各个阶段(图 3B)。1990—1995 年潜力、韧性小幅度变化,连通度

大幅下降,系统处于僵化阶段,经历长期僵化后,库区生态风险达到峰值;1995—2000年,库区各项数据都发生明显变化,连通度、韧性明显上升,借助之前积累的资本和要素,系统发生调整,向下跃迁至新的循环;2000—2015年系统潜力、韧性继续快速增长,但连通度缓慢下降,对应模型的守恒阶段,系统发展稳定,生态风险缓慢下降;2015—2018年潜力增长幅度减小,连通度、韧性大幅度降低,对应模型僵化阶段,是一个危险的信号。可以看到适应性循环的阶段特征与库区生态风险评价匹配度高,1995—2015年库区发

生跃迁后进入守恒阶段,生态风险降低;1990—1995年、2015—2018年两个释放危险信号的阶段,生态风险水平呈现上升趋势。丹江口库区发生低位跃迁后,进入高资源、高消耗的系统状态,虽然暂时缓解了系统风险,但不可避免再次进入僵化阶段,此时若是系统再次选择向下跃迁,则会再次依靠资源消耗维持系统稳定,若放任系统自由发展,则很可能使系统崩溃于未知风险,只有进一步深入研究丹江口库区社会—生态系统发展过程中的影响因子并做出正确决策,才能保证系统进入良性发展状态。

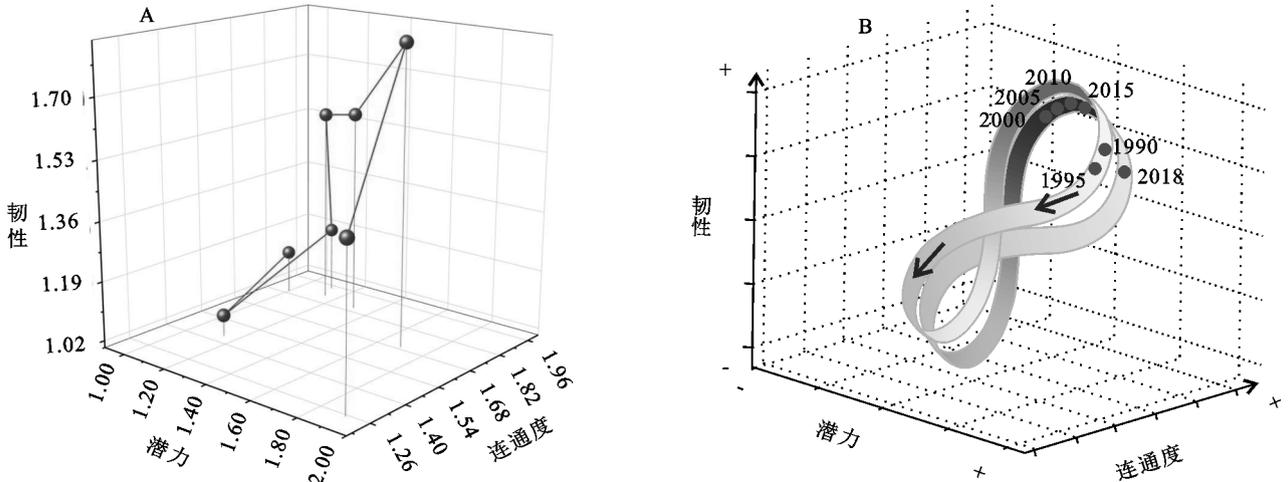


图3 丹江口库区三维生态风险值与生态风险适应性循环模型图

3.2.2 库区各县(市、区)生态风险水平适应性变化过程 通过对计算结果的分析,可以发现生态风险的变化特点与适应性循环不同阶段特征一定程度上相对应(表3,表5)。其中,当系统处于生长阶段时,因内部各要素向相对协调的状态发展,系统生态风险值呈下降趋势;当系统处于释放阶段、重组阶段时,系统

风险上升;当系统处于守恒阶段时,系统风险值表现相对恒定;在僵化阶段,因系统连通度和韧性下降产生系统僵化,也会表现出生态系统风险上升的趋势。可见,借助适应性循环周期特点对不同时期的生态风险特征进行分析一定程度上具备合理性,能够为判断库区生态风险现状提供依据。

表5 研究区各市区县适应性模型所处阶段

地区	阶段			
丹江口市	1990—1995年僵化阶段	1995—2000年低位跃迁	2000—2015年僵化阶段	2015—2018年高位跃迁
淅川县	1990—1995年重组阶段	1995—2000年生长阶段	2000—2015年守恒阶段	2015—2018年僵化阶段
郧西县	1990—1995年生长阶段	1995—2015年守恒阶段	2015—2018年僵化阶段	
郧阳区	1990—2010年守恒阶段	2010—2015年高位跃迁	2015—2018年重组阶段	
西峡县	1990—1995年高位跃迁	1995—2015年守恒阶段	2015—2018年僵化阶段	
茅箭区	1990—1995年守恒阶段	1995—2010年低位跃迁	2010—2018年僵化阶段	
张湾区	1990—2010年守恒阶段	2010—2015年高位跃迁	2015—2018年重组阶段	

通过分析研究区生态风险三维评价结果(表4)的适应性周期变化特点,可见7个县(市、区)中,除淅川县和郧西县外均发生过不同程度的“跃迁”现象(图4)。其中丹江口市经历了两次跃迁,状态变化十分活跃。根据2015—2018年数据分析,丹江口市已率先求变,向上跃迁至新的循环,郧阳区、张湾区进入重组阶段,3个地区系统内部呈现高熵的特征,无序状态

下的消耗可能会给系统资源带来压力,增加系统内部风险产生的可能性;其余地区均处于僵化阶段,该阶段系统内充足的资源和有序的消耗会增加系统陷入固定发展模式的可能性,消极求变将带来两种后果,一是资源耗尽,该系统面临崩溃,二是遭遇干扰,系统经历资本的释放重组或发生跃迁,此时未来发展方向将不能确定。

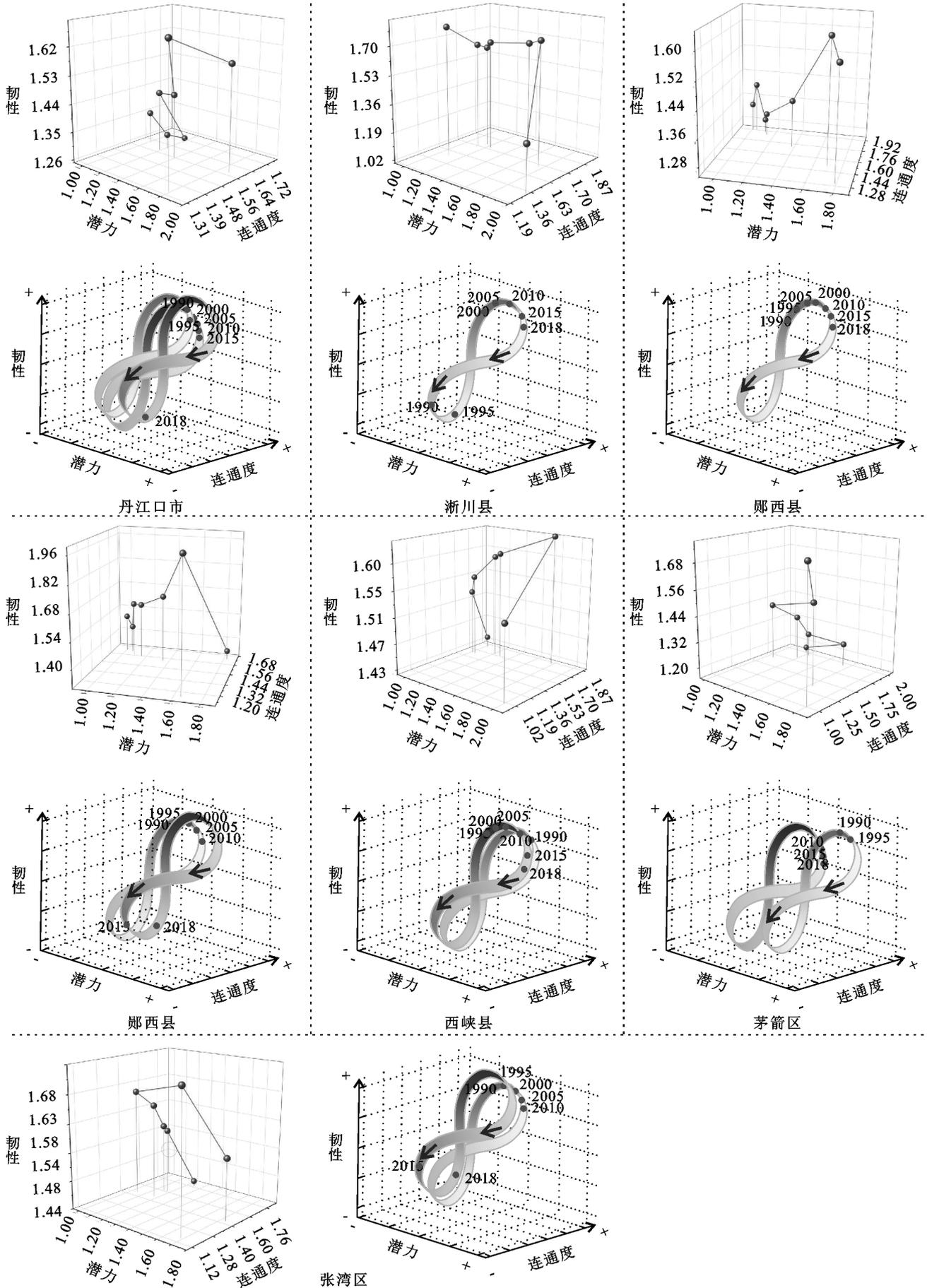


图 4 1990—2018 年研究区各市区县适应性循环模型变化过程

3.2.3 库区各市区县生态风险水平适应性空间格局  
研究期内,研究区各县(市、区)所处适应性循环阶段不尽相同,库区内部变化趋势及变化速率存在明显差异。各地区所处适应性循环阶段与生态风险高值区分布存在一定相关性(图5)。

1990年,丹江口市处于僵化阶段,呈现明显的高风险特点;至1995年,西峡县发生系统跃迁,系统状

态不稳定,鄢阳区由于系统长期处于守恒阶段,面临系统僵化,风险上升;1995—2015年,生态风险空间变化相对平稳,其中人类活动较为集中的城市地区,如茅箭区、张湾区、鄢阳区适应性阶段变化较为明显;至2018年,淅川县和西峡县经历长期的守恒阶段后进入僵化阶段,成为明显的风险高值区,生态风险后续发展趋势亟待重视。

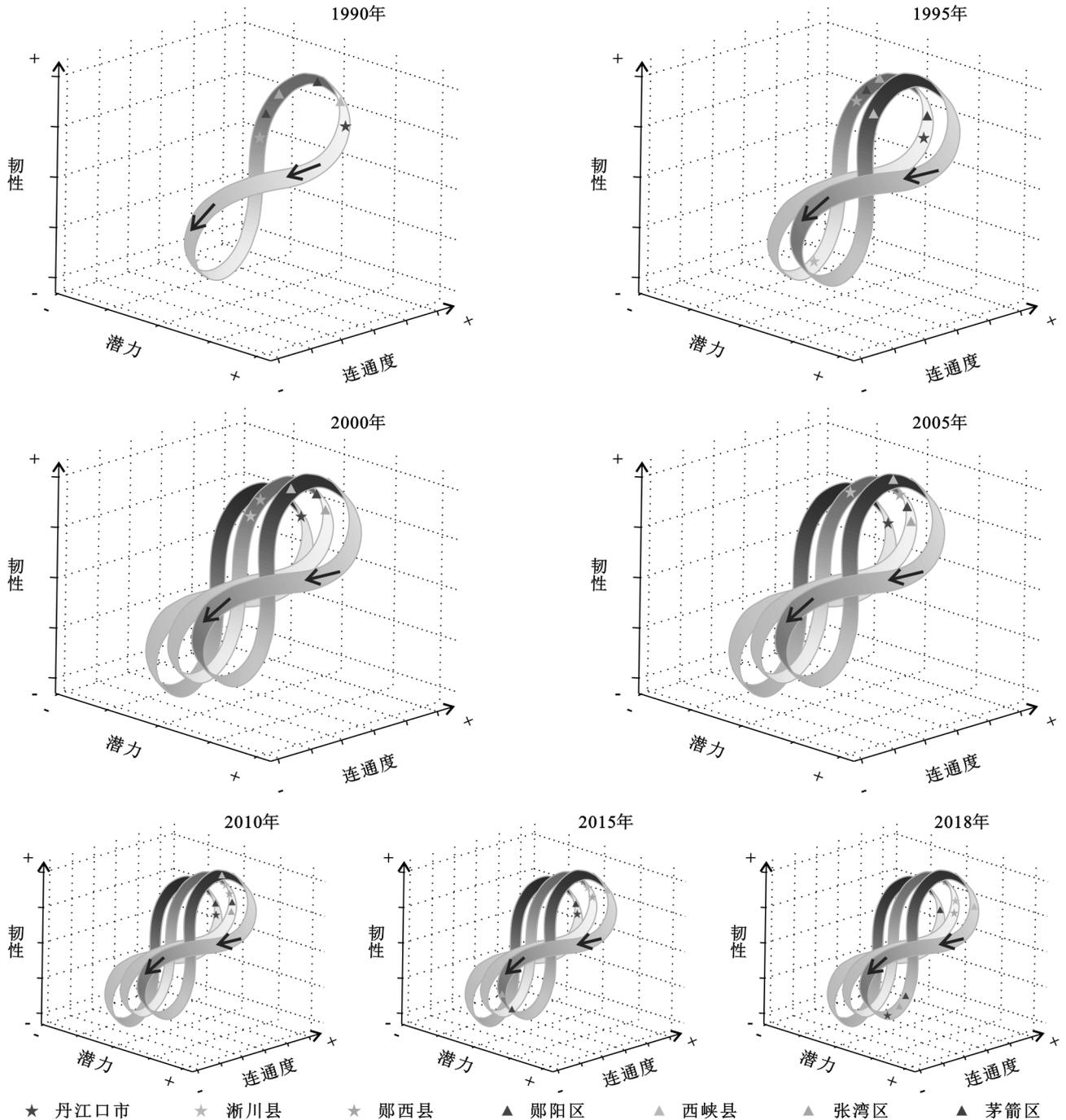


图5 1990—2018年研究区各市区县适应性循环模型空间格局

研究表明风险变化趋势与重要人类活动存在明显相关性。有必要进一步明确丹江口库区整体性风险的影响机制,以便管理者及时发现应对突发或慢发

性生态风险。库区作为典型的社会—生态系统,动态性和复杂性是系统发展的重要特点。为了最大程度上发现并化解风险,保证库区综合效应最大化,客观

上要求管理者能够掌握这种复杂变化规律、升级更新管理理念和知识,以达成复杂系统下库区可持续发展的新目标<sup>[38]</sup>。针对系统不确定性的“适应性管理”是一个很好的解决思路<sup>[39]</sup>。

## 4 结论

(1) 库区生态风险评价。基于适应性循环理论框架的“潜力—连通度—韧性”三维综合生态风险评价指标体系及其修正模型,适用于系统、动态的评价在自然环境和人类活动的干扰下库区生态风险的演变规律,弥补了库区生态风险定量化评价研究的空缺。1990年以来,丹江口库区整体生态状况经历重要的转折期后长时间向好发展,但近年来生态风险水平有所回升。1995年以来,丹江口库区社会—生态系统进入缓慢发展的选择期,说明丹江口库区生态环境面临系统内部自发性的潜在风险,若未来系统资本持续积累,潜力上升,长期发展将带来系统僵化,连通度降低,韧性减弱,风险上升。能否成功实现适应性循环的“反抗”,使系统迁跃至更高层级的循环中,解决生态风险上升问题,阻止系统进入持续僵化的发展路径,成为库区生态风险管理工作的重中之重。

(2) 库区适应性循环过程与格局刻画。修正后的适应性循环模型对系统僵化风险的指示作用更加明显,为库区生态风险变化趋势分析、生态风险隐患预警提供了新的角度,有助于深入挖掘库区生态风险变化的影响因子。库区生态风险适应性循环空间格局有助于明确一段时期内库区生态风险管理的重点区域。从空间上看,2015—2018年丹江口库区大部分地区进入生态风险高危阶段,根据适应性循环发展规律,处于僵化阶段的淅川县、郧西县、西峡县和茅箭区应受到重点关注,需密切关注系统内部要素间联系,引导系统向上跃迁至新的循环。此外,随着城镇化水平升高茅箭区和张湾区两个中心市区人类活动痕迹更加明显,生态风险变化趋势不容乐观。

(3) 目前研究尚存在不足。受数据可得性限制,目前评价指标体系构建对数据空间可视化的考虑不足。现今空间数据越来越丰富,不同空间尺度的生态风险评价成为主流,但目前空间数据的可获得性仍存在巨大局限,仅有极少统计数据脱离行政统计单元实现空间化,极大地局限了评价指标的选择。此外,社会—生态系统在运行过程中,除内部要素间相互联系外,系统与外部的联系同样不可忽视,因此有必要完善评价体系对系统内部要素间相互作用的表征,补充系统动态发

展中外部因素对系统稳态影响程度的有效度量,并将该评价方法运用到多个空间尺度进行对比研究。

### 参考文献:

- [1] 彭建,王仰麟,吴健生,等.区域生态系统健康评价:研究方法与发展[J].生态学报,2007,27(11):4877-4885.
- [2] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.
- [3] 石洪华.典型城市生态风险评价与管理对策研究[D].山东青岛:中国海洋大学,2008.
- [4] 王慧芳,饶晓明,肖毅,等.基于多风险源胁迫的西南地区生态风险评价[J].生态学报,2018,38(24):8992-9000.
- [5] 曾建军,邹明亮,郭建军,等.生态风险评价研究进展综述[J].环境监测管理与技术,2017,29(1):1-5,10.
- [6] Chen C M, Liu M C. Ecological risk assessment on a cadmium contaminated soil landfill—a preliminary evaluation based on toxicity tests on local species and site-specific information[J]. the Science of the Total Environment, 2006,359(1/3):120-129.
- [7] Cumming G S, Barnes G, Perz S G, et al. An Exploratory Framework for the Empirical Measurement of Resilience[J]. Ecosystems, 2005,8(8):975-987.
- [8] Glaser M, Diele K. Asymmetric outcomes: assessing central aspects of the biological, economic and social sustainability of a mangrove crab fishery, *Ucides cordatus* (Ocypodidae), in North Brazil[J]. Ecological Economics, 2004,49(3):361-373.
- [9] 马学成,巩杰,柳冬青,等.社会生态系统研究态势:文献计量分析视角[J].地球科学进展,2018,33(4):435-444.
- [10] 孙晶,王俊,杨新军.社会—生态系统恢复力研究综述[J].生态学报,2007,27(12):5371-5381.
- [11] Holling C S. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems[J]. Ecosystems, 2001,4(5):390-405.
- [12] Chapman A, Darby S. Evaluating sustainable adaptation strategies for vulnerable mega-deltas using system dynamics modelling: Rice agriculture in the Mekong Delta's An Giang Province, Vietnam[J]. Science of the Total Environment, 2016,559(2):326-338.
- [13] 刘焱序,王仰麟,彭建,等.基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J].地理学报,2015,70(7):1052-1067.
- [14] 顾寒月,王群,杨万明.旅游地适应性循环模型修正及实证研究:以大别山区金寨县为例[J].旅游学刊,2020,35(6):125-134.
- [15] 张向龙,杨新军,王俊,等.基于恢复力定量测度的社会—生态系统适应性循环研究:以榆中县北部山区为例[J].西

- 北大学学报:自然科学版,2013,43(6):952-956.
- [16] 陈万旭,刘志玲,李江风,等.长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究[J].生态学报,2020,40(15):5137-5150.
- [17] 陈万旭,李江风,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].地理研究,2019,38(9):2173-2187.
- [18] Luo F H, Liu Y X, Peng J, et al. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180:125-134.
- [19] 徐新良.中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集.中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>),2018. DOI:10.12078/2018060601.
- [20] 范冬萍,何德贵.基于CAS理论的社会生态系统适应性治理进路分析[J].学术研究,2018(12):6-11,177.
- [21] 莫悠,范建红.恢复力视角下乡村文化遗产演变机制与保护策略研究:以广州莲溪村为例[J].中国文化遗产,2018(6):74-80.
- [22] 余中元,李波,张新时.社会生态系统及脆弱性驱动机制分析[J].生态学报,2014,34(7):1870-1879.
- [23] 陈娅玲.陕西秦岭地区旅游社会—生态系统脆弱性评价及适应性管理对策研究[D].西安:西北大学,2013.
- [24] 王琦妍.社会—生态系统概念性框架研究综述[J].中国人口·资源与环境,2011,21(S1):440-443.
- [25] Beisner B E, Haydon D T, Cuddington K. Alternative stable states in ecology[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003,1(7):376-382.
- [26] 赵直.天池博格达自然保护区社会—生态系统适应性循环机制及调控对策研究[D].西安:西北大学,2014.
- [27] Sundstrom S M, Allen C R. The adaptive cycle: More than a metaphor[J]. *Ecological Complexity*, 2019,39:100767.
- [28] Zwick M, Hughes J. Formalizing the panarchy adaptive cycle with the cusp catastrophe[C]//Proceedings of the 2017 International Conference of The Computational Social Science Society of the Americas. 2017: 1-5.
- [29] Bradtmoeller M, Grimm S, Riel-Salvatore J. Resilience theory in archaeological practice-An annotated review [J]. *Quaternary International*, 2017,446:3-16.
- [30] Wilcox B A, Alonso A A, Nicole D P, et al. Operationalizing one health employing social-ecological systems theory: lessons from the greater mekong sub-region[J]. *Frontiers in Public Health*, 2019,85(7):1-12.
- [31] Xu L, Marinova D, Guo X. Resilience thinking: a renewed system approach for sustainability science[J]. *Sustainability Science*, 2015,10(1):123-138.
- [32] 周启刚,张晓媛,王兆林.基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J].农业工程学报,2014,30(23):289-297.
- [33] 刘春艳,张科,刘吉平.1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018,38(11):3729-3740.
- [34] 简卿,张立强,张蓬涛,等.基于显隐性分析的青龙满族自治县景观生态风险评价空间分异研究[J].水土保持研究,2018,25(6):228-235.
- [35] 陈利顶,傅伯杰,王军.黄土丘陵区典型小流域土地利用变化研究:以陕西延安地区大南沟流域为例[J].地理科学,2001,21(1):46-51.
- [36] 李潇然,李阳兵,韩芳芳.基于土地利用的三峡库区生态屏障带生态风险评价[J].水土保持通报,2015,35(4):188-194,2.
- [37] 赵岩洁,李阳兵,邵景安.基于土地利用变化的三峡库区小流域生态风险评价:以草堂溪为例[J].自然资源学报,2013,28(6):944-956.
- [38] 袁超,陈永柏.三峡水库生态调度的适应性管理研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(3):269-275.
- [39] 姜仁贵.变化环境下水资源适应性管理模式研究[D].西安:西安理工大学,2013.