

引用格式: 曹艺凡, 杨春, 王旭. 重庆市乡村生态系统健康时空格局演化及规划调控研究[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 902-918.

CAO Yifan, YANG Chun, WANG Xu. Spatial-temporal evolution of rural ecosystem health in Chongqing, China and associated planning regulation [J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 902-918.

# 重庆市乡村生态系统健康时空格局演化及规划调控研究

曹艺凡<sup>1</sup>, 杨春<sup>2</sup>, 王旭<sup>2</sup>

(1. 重庆建筑科技职业学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400030)

**摘要:** 乡村生态系统健康是衡量乡村各组成要素及系统受损程度或稳定状态的有效度量指标,体现了以“人”为核心和以“资源、环境、经济和社会”为基础的乡村各系统间相互影响与作用的互动制衡关系,是乡村可持续发展的基本保障。当前区域生态系统健康评价多侧重于生态系统的自然状态或外部干扰的单一测量,缺乏对社会-经济复合维度的人类生态学关注。本研究从社会-经济-自然复合生态系统角度构建了整合生态完整性的乡村生态系统健康评价框架,并结合可持续发展 SDGs17 目标提出一套接轨国际的乡村生态系统健康评价指标,以重庆市为例,定量揭示重庆市 36 区县 2000—2018 年时空分异特征。结果表明:(1)重庆市乡村生态系统健康在 2000—2018 年呈现“先平缓波动增长,后快速上升”的两阶段时序演化特征,综合水平维持在 0.275~0.874。乡村社会子系统和乡村资源子系统对综合水平贡献率最大,分别为 30.51% 和 27.36%;(2)2018 年重庆市 36 区县乡村生态系统健康总体呈现“一核两翼”的空间分异特征,由渝东北、渝西片区向主城片区、渝东南片区逐渐增强;(3)根据主导要素法将重庆市乡村生态系统健康空间类型划分为疾病、不健康、亚健康和健康四大类九中类,并按照“分级分类-重点分析-因地制宜-短板补齐”原则针对渝东北、渝东南、渝西和主城区制定了差异化规划调控建议。本研究丰富了区域生态系统健康评价知识体系,也为重庆及其他类似地区乡村可持续发展和生态环境保护提供了参考。

**关键词:** 乡村生态系统健康;时空格局;规划调控;重庆市

**中图分类号:** F301

**文献标志码:** A

中国乡村发展正处于关键的转型期。一方面,城乡要素流动极大地改善了乡村经济和社会状况,使得部分乡村地区正面临土地非粮化等过度人为干预现象<sup>[1]</sup>,乡村生态系统呈现出典型的农业和人工生态系统复合特征;另一方面,受城市土地扩张侵占、污染排放和生态负荷胁迫等外部干扰影响,乡村生态系统内在结构和功能呈现出失衡或疾病状态<sup>[2]</sup>。聚焦乡村生态系统健康研究将有助于正确引导乡村资源利用、生态环境保护与修复,促进乡村农业与社会经济可持续发展。

生态系统健康研究作为一门新兴的学科,近几

十年来在地理学、生态学和城市规划研究中得到了广泛讨论,并成为环境管理、空间规划和生态修复等实践工程追求的最终目标<sup>[3]</sup>。随着 20 世纪中后期生态学的迅速发展,生态系统健康研究广泛借用了土地健康的思想,强调生态系统对外部干扰的恢复力和稳定性<sup>[4]</sup>,并注重生态系统对人类的服务支持功能,认为生态系统作为一种具有抗干扰能力的有机体,具有满足人类社会合理需求的能力和生态系统自我维持和更新两方面的基本能力,例如提供食物、饮用水、清洁空气和回收废物的能力<sup>[5-7]</sup>。目前,生态系统健康评价的研究主要集中在森林、河

收稿日期(Received date): 2021-05-22; 改回日期(Accepted date): 2022-11-08

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(51878084); 重庆市研究生科研创新项目(CYB19052)。[National Natural Science Foundation of China (51878084); Chongqing University Graduate Student Research Innovation Project (CYB19052)]

作者简介(Biography): 曹艺凡(1985-),女,重庆人,硕士,副教授,主要研究方向:乡村装配式民居设计研究。[CAO Yifan (1985-), female, born in Chongqing, M. Sc., associate professor, research on rural dwellings prefabricated design] E-mail: 541876355@qq.com

流、矿区以及城市地区,侧重于评价方法在特殊生态系统领域的应用和完善,其评价方法可以归纳为三类:(1)围绕活力-组织-弹性(Vigour-Organization-Resilience, VOR)评估框架,利用功能指示性指标诊断自然生态系统的受灾症状及其健康状况,强调单一维度的自然生态系统评价,但忽视对社会和经济系统的整体性考虑<sup>[8-10]</sup>;(2)围绕生态系统与人类活动的相互作用因果关系来揭示内在演变机制,包含压力-状态-响应模型(Pressure-State-Response model, PSR)、驱动力-状态-响应模型(Driving-State-Response model, DSR)以及驱动力-压力-状态-影响-响应模型(Driving-Pressure-State-Impact-Response model, DPSIR)等<sup>[11-14]</sup>方法,同样侧重于自然生态系统的单维度评价,忽视对生态系统整体性的有效度量;(3)从生态系统整体性角度,开始关注社会-经济-自然复合生态系统评估,例如 REHI 指数方法<sup>[15-16]</sup>。当前有关生态系统健康的评价方法大多强调单一的自然生态系统健康状态或自组织动态过程,以自然生态系统为核心,缺乏从社会和经济复合视角认识生态系统整体性内涵,未考虑人类社会和经济活动与自然生态系统的动态耦合关系过程。

乡村生态系统涵盖了典型自然生态系统和高度人工化的社会-经济系统复合特征,是人类与外部资源、环境、社会和经济之间的物质、能量、信息流动所形成的综合表现,其中资源和环境子系统直接决定自然资本投入,而社会和经济子系统是影响乡村生产关系和物质财富积累的外在驱动因素(图1)。因此,生态系统健康作为乡村资源、环境、社会和经济所体现的稳定状态度量,可以理解为在相对特定的乡村地域时空范围内不同子系统间及与人相互影响与作用的关系总和,不仅具备满足人类合理需求的物质和能量供应能力,同时具有一定的稳定性、自我调节和对胁迫受损的恢复能力<sup>[2,17-18]</sup>。当前有关乡村生态系统健康评价的研究主要运用区域生态系统健康评价知识,聚焦单一的乡村自然生态系统健康状态,忽视对乡村社会和经济子系统的整体性考虑,尤其是针对我国西南地区经济欠发达的山地乡村应用较少<sup>[19-24]</sup>。评价指标方面缺乏相应的针对性和普适性参考,尤其是地理生态环境特殊与人地耦合关系冲突尖锐的山地乡村区域,与山地乡村生态系统健康评价相关的经济和社会可持续发展目标考量不足,多基于以往构建的区域自然生态系统健

康评价成果,与经济和社会可持续发展目标相关的参考指标脱节,部分偏离了可持续发展方向。

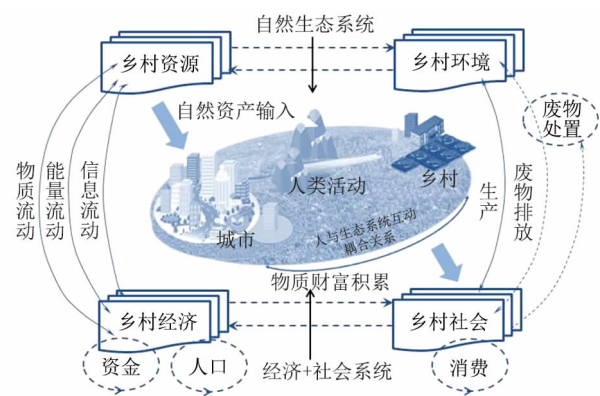


图1 乡村生态系统健康内涵构解图<sup>[42]</sup>

Fig. 1 Connotation interpretation of rural ecosystem health<sup>[42]</sup>

本研究基于社会-经济-自然复合生态系统理论,从生态系统整体性视角建立乡村生态系统评价框架和方法,创新性将可持续发展目标(Sustainable Development Goals 17, SDGs17)融入山地乡村生态系统健康指标体系,并以山地城市重庆市为案例,探讨了其2000—2018年的乡村生态系统健康时序演化规律和空间分异特征,并根据评价结果提出有针对性的差异化规划调控建议。研究成果丰富和拓展了区域生态系统健康评价的知识体系,为重庆乡村生态环境保护与修复提供了政策实施建议,也为重庆及其他类似地区乡村可持续发展和生态环境保护提供了参考。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

重庆市(28°10'N~32°13'N, 105°11'E~110°11'E)地处川东平行岭谷,海拔高差高达2700 m,以丘陵、山地为主,总面积8.24万km<sup>2</sup>,共辖38个区县,位于长江经济带、一带一路、三峡库区以及西部大开发战略的交汇点,是西部山地生态环境脆弱与地形地貌特征显著的直辖市(图2)。研究选取重庆市作为实证案例主要基于以下三点:(1)自开始实施“城乡融合发展实验区”战略以来,乡村农业、旅游业以及人居环境得到显著提升,乡村发展模式与建设经验在西南山地地区具有较为典型的地域特征;(2)随着重庆市近年“支农惠农”政策实施,乡村社会和经

济快速发展的同时,乡村生态系统状况及其格局也发生了巨大变化,部分乡村地区正面临农业面源污染、耕地非自然压缩和生态环境质量退化等问题;(3)受地形地貌、自然条件、交通区位、发展战略及政策规制的影响,部分偏远欠发达的生态敏感与脆弱地区仍面临发展与保护难题。

本研究以重庆市乡村生态系统为研究对象,以 2000—2018 年重庆市 36 区县为研究时段,建立乡村生态系统健康评价指标体系和评价模型,定量测度其时空变化特征,依据划分的健康空间类型提出差异化调控策略,为我国山地乡村生态系统可持续发展提供实践示范。

1.2 数据来源

生态系统健康的评价尺度主要以特定的地域范围或统一行政边界为空间单元,县级行政单元是我国社会经济活动中最完整的各类数据统计、资料汇总的最小行政单元,以县域行政尺度作为空间单元有利于收集翔实数据<sup>[15]</sup>。本研究以重庆市域为例,

选取 36 个区县行政管理与数据统计单元(重庆市共有 38 个区县,因渝中区、江北区已实现城镇化 100%,故本次评价范围选取 36 个独立行政单元),考虑到数据样本的可用性和准确性,研究从时空维度分别获取了 2000—2018 年的时序分析数据,以及 2018 年 36 区县的空间数据。时空数据主要包括矢量空间数据、土地利用数据、自然、社会和经济统计数据,其中行政区划界线(1:5 万)和重庆市地形图(1:50 万)主要以地理信息中心导出的《重庆 1:5 万地形图(2018)》为基础;土地利用变化(LUCC)数据来源于 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像,参照现有的土地利用/土地覆盖分类体系,将土地利用类型划分为 6 个一级类,25 个二级分类;乡村资源、环境、社会、经济数据主要来自源于《重庆统计年鉴》(2000—2018)、《重庆国民经济和社会发展统计公报》(2000—2018)、《重庆环境统计年报》(2000—2018)、《2016 年第三次全国农业普查》(重庆)<sup>[25-28]</sup>、重庆市人民政府网站、重庆市气象监测

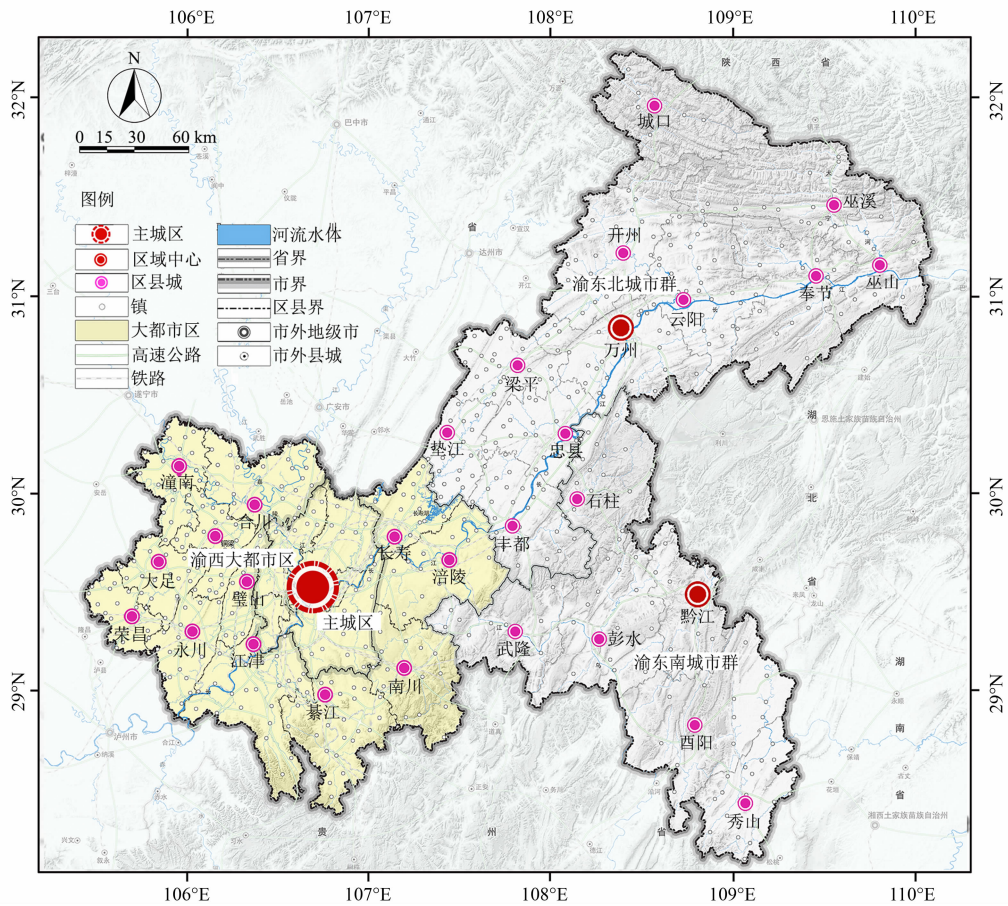


图 2 研究区概况

Fig. 2 Overview of research area



网站、重庆市农业委员会网站等,借助 SPSS21 和地理信息系统软件 ArcGIS 10.2 进行数据预处理。

## 2 研究方法

### 2.1 乡村生态系统健康评估框架与指标体系构建

乡村生态系统健康取决于乡村社会、经济和自然子系统的稳定状况,其中乡村自然生态系统包括乡村资源子系统和环境子系统两部分,通过信息、能量和物质流动过程将乡村自然资本转化为经济和物质财富积累,然后投入社会子系统发展<sup>[15,25]</sup>。本研究从乡村资源、环境、经济和社会四个方面选取了乡村生态系统健康的评价指标维度,并进一步强调可持续发展理念在山地乡村生态系统健康评价中的重要性,将可持续发展目标(SDGs17)融入指标体系构建中,建立了包含人均耕地面积、陡坡( $>25^\circ$ )耕地比重、人均水资源拥有量、森林覆盖率、空气质量达标率等 29 个指标在内的三级评价指标体系(表 1)。

#### 2.1.1 乡村资源子系统

乡村资源子系统作为乡村生产和生活的重要物质载体,是衡量某一区域或地区生态系统健康的物质性重要表征,对应可持续发展目标中的“零饥饿、水下生物、陆地生物”目标,旨在强调乡村生态系统满足人类活动合理需求和自我维持、更新的稳定能力,取决于乡村自然资源、耕地资源、农业生产能力、水资源和森林资源的禀赋能力和潜力条件等。本研究选取人均耕地面积、陡坡耕地比重( $>25^\circ$ )、人均有效灌溉面积、人均农作物播种面积、人均水资源拥有量、森林覆盖率和生物多样性指数等七项指标表征乡村资源子系统健康状况。其中,均耕地面积、陡坡耕地比重( $>25^\circ$ )、人均有效灌溉面积和人均农作物播种面积 4 个指标强调土地资源的适耕潜力和农产品生产能力,直接决定山地乡村生态系统的农业物资生产和供给能力;人均水资源拥有量、森林覆盖率和生物多样性指数是衡量乡村生态系统自我维持和更新功能的可持续性指标,反映乡村自然森林资源、水资源和生物资源禀赋。

#### 2.1.2 乡村环境子系统

乡村环境子系统是维持稳定生态环境、农业生产系统免受“失调症状”和处理外部胁迫状态的重要综合表征,对应可持续发展目标中的“清洁饮水和卫生设施、负责任消费和生产、气候行动”目标,

旨在强调乡村生态系统自我维持和更新的稳定能力,取决于乡村遭受灾害侵扰和农业生产干扰等条件。本研究选取酸雨频率、自然灾害直接经济损失程度、水土流失面积比重、农作物受灾面积比重、乡村水质达标率、空气质量达标率、农业化肥使用强度和农业化学农药使用强度等八项指标表征乡村环境子系统健康状况。其中酸雨频率、自然灾害直接经济损失程度、水土流失面积比重、农作物受灾面积比重表征乡村灾害侵扰程度,反映了乡村环境质量状况的破坏程度;农业化肥使用强度和农业化学农药使用强度表征对人类农业生产活动的干扰以及清洁生产技术的使用,这些指标属于负面指标;水质达标率<sup>[30]</sup>和优质天数比例<sup>[31]</sup>反映了乡村水和空气质量状况。

#### 2.1.3 乡村经济子系统

乡村经济子系统代表了乡村自然资本投入所带来的人工物质财富积累,对应可持续发展目标中的“无贫穷、零饥饿、经济适用的清洁能源、体面工作和经济增长、产业创新和基础设施”目标,旨在强调乡村生态系统满足人类合理需求的能力,取决于乡村经济发展水平、农业生产水平、生产活动强度、产业结构和人均经济水平条件。本研究选取一产产值年增长率、人均农林牧渔业总产值、单位面积粮食产量、单位国内生产总值综合能耗、乡村居民人均可支配收入和非农产业比重六个指标表征乡村经济子系统健康状况。其中,一产产值年增长率、人均农林牧渔业总产值和单位面积粮食产量反映乡村农业生产能力,均为正指标,指标越大,乡村农业生产能力越好;单位 GDP 综合能耗表征区域从事经济生产活动强度指标,负向指标,指标越大,说明乡村生态负荷越高;乡村居民人均可支配收入和非农产业比重代表人均可支配收入水平和农业经济结构,前者属于正向指标,指标越大,说明乡村经济水平越高,后者是负向指标,指标越大表明农业产业的主导地位越弱,经济生产活动对乡村生态系统干扰越大。

#### 2.1.4 乡村社会子系统

乡村社会子系统是乡村自然资本投入给乡村居民带来福祉的最终目标,取决于乡村经济财富水平和人工资本的积累,代表乡村居民的生产生活状况,对应可持续发展目标中的“无贫穷、体面工作和经济增长、产业创新和基础设施、减少不平等、持续城市和社区”目标,强调乡村物质建设水平和居民生

表 1 乡村生态系统健康指标体系  
Tab. 1 Indicator system of rural ecosystem health

目标层	子系统层	代码	指标层	指标计算公式	单位	正负影响
乡村生态系统健康 (R)	乡村资源子系统健康 (R1)	R11	人均耕地面积	总耕地面积/乡村总人口①	m <sup>2</sup>	+
		R12	陡坡 (>25°) 耕地比重	大于 25°以上耕地面积/总耕地面积	%	-
		R13	人均有效灌溉面积	有效灌溉面积/乡村总人口②	m <sup>2</sup>	+
		R14	人均农作物播种面积	农作物播种面积/乡村总人口③	m <sup>2</sup>	+
		R15	人均水资源拥有量	水资源总量/乡村总人口	m <sup>3</sup>	+
		R16	森林覆盖率	森林面积/土地总面积	%	+
		R17	生物多样性指数	表征生态系统群落稳定状态, 计算参照④	%	+
	乡村环境子系统健康 (R2)	R21	酸雨频率	酸雨次数/年天数	%	-
		R22	自然灾害直接经济损失程度	洪涝、旱灾等自然灾害造成的直接经济损失/当年 GDP 经济总量	%	-
		R23	水土流失面积比重	当年水土流失面积/总面积	%	-
		R24	农作物受灾面积比重	受各类自然灾害造成的农作物损失面积/总播种⑤	%	-
		R25	乡村饮用水源水质达标率	饮用水源水质达标所占百分比	%	+
		R26	空气质量达标率	空气质量优良天数/年天数	%	+
		R27	化学化肥使用强度	化肥施用量/耕地面积⑥	kg/ha	-
		R28	化学农药使用强度	农药使用量/耕地面积⑦	kg/ha	-
	乡村经济子系统健康 (R3)	R31	一产产值年增长率	一产年产值增加率	%	
		R32	人均农林牧渔总产值	农林牧渔业总产值/乡村总人口	元	+
		R33	单位面积粮食产量	指农业生产经营者日历年度内生产的全部粮食数量/耕地面积	t/ha	+
		R34	单位国内生产总值综合能耗	能源消费总量/国内生产总值	吨标准煤/元	-
		R35	乡村居民人均可支配收入	按人口平均的纯收入水平, 反映农村居民的平均收入水平	元	+
		R36	非农产业比重	二、三产产值/GDP 总产值	%	+
	乡村社会子系统健康 (R4)	R41	乡村恩格尔系数	乡村居民食品烟酒支出总额/消费性支出总额	%	-
		R42	乡村劳动人口就业率	为取得劳动报酬或经营收入而从事社会劳动的乡村人员/乡村总人口	%	+
		R43	城乡居民养老保险覆盖率	当年参加城乡居民养老保险人数/总人数	%	+
		R44	普通中学在校学生专职教师占有率	普通中学专职教师数/在校学生人数	%	+
		R45	城乡居民每万人拥有床位数	城乡卫生机构床位数/万人	床	+
		R46	一般公共预算人均支出	指政府提供给乡村的基本公共管理与服务支出费用/总人口	元	+
		R47	乡村人均用电消耗强度	乡村耗电量/乡村人口	kWh	-
		R48	乡村人均房屋面积	乡村住宅面积/乡村人口	m <sup>2</sup>	+

注:① 耕地面积数据由重庆市三调数据提供整理,因渝中区和江北区城镇化率实现 100%,耕地统计面积包括 36 个行政区县。  
② 耕地灌溉面积等于灌溉工程或设备已经配套,能够进行正常灌溉的水田和水浇地面积之和,反映耕地适宜耕作情况。  
③ 农作物播种面积指农业生产经营者应在日历年度内收获农作物在全部土地(耕地或非耕地)上的播种或移植面积,反映乡村农作物生产情况。  
④ 参照文献[15]和[32]生物多样性指数计算办法,采用植物丰富度、自然保护区面积占比、野生动物丰富度三项指标计算,部分数据源自参考文献[33]及重庆大学和西南大学共同承担的“重庆市生物多样性评价”项目。  
⑤ 年农作物受灾面积数据来自参考文献[34]。  
⑥ 化学化肥使用强度指本年内实际用于农业生产的化肥数量,包括氮肥、磷肥,钾肥和复合肥。化肥施用量要求按折纯量计算数量。折纯法化肥施用量是把氮肥、磷肥和钾肥分别按含氮、含五氧化二磷、含氧化钾的百分之一百成份折算后的数量。复合肥按其所含主要成分折算,公式为:折纯量=实物量×某种化肥有效含量的百分比。研究根据统计年鉴获取到的化肥施用量数据除以耕地面积计算。  
⑦ 研究根据统计年鉴获取到的农药施用量数据除以耕地面积计算。

产生活条件。本研究从乡村居民生活状况、消费、教育、卫生保健等选取乡村居民恩格尔系数、乡村劳动人口就业率、城乡居民养老保险覆盖率、普通中学在校学生专职教师占有率、城乡居民每万人拥有床位数、一般公共预算人均支出、乡村人均用电消耗强度和乡村人均自有住房面积八项指标表征乡村社会子

系统健康状况。其中,乡村居民恩格尔系数为负指标,指标越小,说明乡村社会发展水平越高;乡村劳动人口就业率、城乡居民养老保险覆盖率、普通中学在校学生专职教师占有率、城乡居民每万人拥有床位数全面反映乡村就业、养老、教育和医疗服务水平,指标越大表明乡村社会发展越好;一般公共预算人均支出、乡村人均用电消耗强度和乡村人均自有住房面积代表乡村基础设施建设条件和生活水平,指标越大说明乡村物质建设条件越好。

## 2.2 模型方法

### 2.2.1 指标标准化处理

乡村生态系统健康评价包含 29 个指标,各指标的数值单位和意义不同。因此,需要对原始数据进行标准化,消除单位和维度的影响,得到 0 ~ 1 的无量纲结果,指标标准化处理分为正向指标和负向指标,正向指标表征数值越大乡村生态系统健康指数越好,而负向指标数值越大说明乡村生态系统健康指数越低。数据归一化计算公式如下:

$$\text{正向指标} \quad Y_{ij(+)} = \frac{X_{ij} - \min X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (1)$$

$$\text{负向指标} \quad Y_{ij(-)} = \frac{\max X_{ij} - X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (2)$$

式中,  $X_{ij}$  和  $Y_{ij(+)}$  (或  $Y_{ij(-)}$ ) 分别为乡村生态系统  $i$  中的第  $j$  个指标原始值和标准化值;  $\max X_i$  和  $\min X_i$  分别为乡村生态系统的同类指标的最大值和最小值。

### 2.2.2 熵值法计算指标权重

运用指标体系法评价乡村生态系统健康的关键是科学确定指标权重,常用的评价方法包含熵值法、主成分分析法和层次分析法等<sup>[35]</sup>。其中,熵权法是为避免人为因素造成的偏差而从热力学推导出的一种指标权重计算新加权方法,它根据观测值或统计数据所提供的信息对指标的相对重要性进行排序,指标信息熵越小,说明信息无序程度越低,提供的有用信息越多,指标的权重越大<sup>[36]</sup>。目前,熵值法已被广泛应用于环境科学、城市规划和管理科学评价中,本研究采用熵值法计算乡村生态系统健康评价的指标权重,利用 Matlab 计算各指标的权重系数(表 1)。具体计算步骤如下:

(1) 计算乡村生态系统  $i$  中第  $j$  指标的占比:

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

(2) 计算  $j$  指标的熵值大小:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \log P_{ij} \quad (4)$$

式中,  $k > 0$ ,  $k = 1/\ln n$ , 常数  $k$  与统计样本数量  $n$  有关;  $P_{ij}$  是  $j$  指标的比例系数,其中  $e_j \geq 0$ 。

(3) 计算  $j$  项指标差异性系数  $g_i$ ,  $g_i$  越大,对评价的影响越大,熵值越小:

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

(4) 计算  $j$  指标权重大小:

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1, (0 \leq W_j \leq 1)$$

### 2.2.3 乡村生态系统健康综合水平计算模型

根据各子系统标准化值  $Y_{ij}$  和指标权重  $W_j$ , 采用加权方法计算乡村生态系统健康综合水平  $R$ :

$$\begin{aligned} R_1 &= \sum_{j=1}^n Y_{ij} W_j \\ R_2 &= \sum_{j=1}^n Y_{ij} W_j \\ R_3 &= \sum_{j=1}^n Y_{ij} W_j \end{aligned} \quad (7)$$

$$R_4 = \sum_{j=1}^n Y_{ij} W_j$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

式中,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  分别为四个子系统的加权计算综合水平。

## 2.3 乡村生态系统健康空间类型划分标准

乡村生态系统健康空间类型划分及其标准设定属于一个相对概念,目前尚无统一和普遍接受的标准。本研究划分乡村生态系统健康空间类型的目的在于精准识别空间薄弱地区,据此探索适宜的规划调控方法。为了合理判断乡村生态系统所属何种健康空间类型,首先利用 HC (分层聚类分析) 计算乡村生态系统健康综合水平的相似欧氏距离,将其划分为疾病类型、不健康类型、亚健康类型和健康类型四种初级分类,然后利用主导要素法,参照王成<sup>[2]</sup>和李平星<sup>[37]</sup>建构的空间类型分类体系,根据各区县子系统主导要素数量划分为 12 种次级分类。具体划定标准及方法如下(图 3)。

首先,利用欧氏距离计算乡村生态系统健康综合水平的相似系数,将乡村生态系统健康综合水平划分为疾病类型、不健康类型、亚健康类型和健康类型四种初级分类,计算公式为:

$$F_{mp} = \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q (R_m - R_p)^2} \quad (8)$$

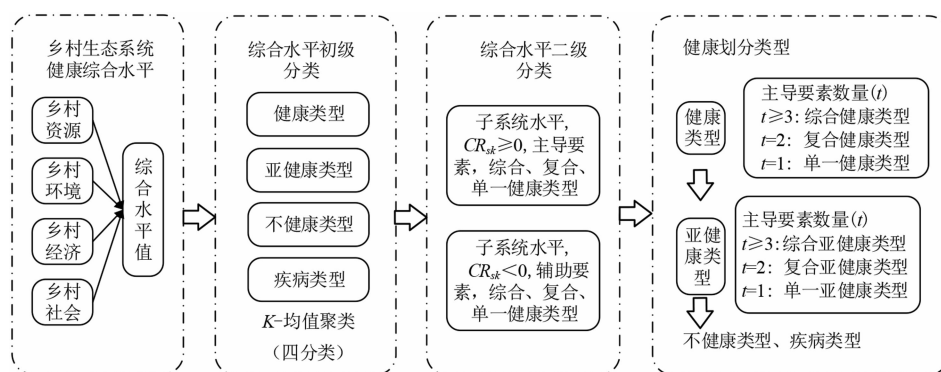


图3 乡村生态系统健康类型划分方法与流程

Fig. 3 Methods and processes for classifying rural ecosystem health types

式中,  $F_{mp}$  是  $m$  和  $p$  区县乡村生态系统健康综合水平的欧氏距离相似系数;  $R_m$  和  $R_p$  是  $m$  和  $p$  区县的乡村生态系统健康综合水平值;  $q$  是重庆市区县数量,  $q = 36$ 。其综合健康水平的划分标准为疾病类型、不健康类型、亚健康类型、健康类型。

然后,根据子系统主导要素(辅助要素)数量划分次级分类:

$$CR_{sk} = R_{sk} - \overline{R_k} \quad (9)$$

式中,  $CR_{sk}$  为  $s$  区县第  $k$  子系统综合健康得分与其平均值的差值(即离均差);  $R_{sk}$  为  $s$  区县第  $k$  子系统综合健康水平值;  $s$  为案例研究区包含的 36 个区县;  $k$  为乡村资源子系统健康、乡村环境子系统健康、乡村经济子系统健康和乡村社会子系统健康;  $\overline{R_k}$  为第  $k$  子系统综合健康水平平均值。若  $CR_{sk} > 0$ , 则表明  $k$  子系统为  $s$  区县乡村生态系健康的主导要素; 若  $CR_{sk} \leq 0$ , 则确定  $k$  子系统为  $s$  区县乡村生态系健康的辅助要素。

健康类型的次级分类依据如下标准划分:

(1) 当  $CR_{sk} > 0$  的主导要素数量  $t \geq 3$ , 将乡村生态系统健康类型定义为综合健康类型, 说明  $s$  区县生态系统健康评价中至少有三个子系统属于主导要素, 分别包括资源-环境-社会综合健康类型、资源-环境-经济综合健康类型、资源-经济-社会综合健康类型、环境-经济-社会综合健康类型和资源-环境-经济-社会综合健康类型五类;

(2) 当  $CR_{sk} > 0$  的主导要素数量  $t = 2$ , 将乡村生态系统健康类型定义为复合健康类型, 说明  $s$  区县生态系统健康评价中有两个子系统属于主导要素, 依据主导要素类型分别包括资源-环境复合健康类型、资源-经济复合健康类型、资源-社会复合健康类

型、环境-经济复合健康类型、环境-社会复合健康类型和经济-社会复合健康类型六类;

(3) 当  $CR_{sk} > 0$  的主导要素数量  $t = 1$ , 将乡村生态系统健康类型定义为单一健康类型, 说明  $s$  区县生态系统健康评价中有一个子系统属于主导要素, 依据主导要素类型分别包括资源单一健康类型、环境单一健康类型、经济单一健康类型和社会单一健康类型四类;

(4) 亚健康、不健康和疾病的划分依据按照健康类型依次进行, 其中不健康和疾病根据辅助要素数量来确定。

### 3 结果与分析

#### 3.1 乡村资源、环境、社会和经济子系统指标权重

考虑到历史数据的时序特征及其整体空间差异影响, 本研究选取 2018 年 29 个指标的空间数据进行熵值分析。结果表明四个子系统权重存在显著差异, 由大到小依次为乡村社会子系统 (30.51%)、乡村资源子系统 (27.36%)、乡村经济子系统 (22.29%)、乡村环境子系统 (19.84%), 其中乡村社会和资源子系统占比超过 57.87% 以上, 表明重庆市当前乡村社会和资源子系统对其健康综合水平的贡献程度最大。从具体指标差异来看, 贡献水平最大的前 5 项指标分别为人均农林牧业渔业总产值 (6.02%)、乡村居民人均可支配收入 (5.86%)、人均有效灌溉面积 (5.73%)、乡村劳动人口就业率 (5.03%)、农村恩格尔系数 (4.89%), 不难发现重庆市乡村生态系统健康明显受乡村社会经济发展水平和乡村资源禀赋制约影响。

### 3.2 重庆市 2000—2018 年乡村生态系统健康综合指数时序演化规律

图 4 揭示了重庆市 2000—2018 年乡村生态系统健康综合水平及其四个子系统得分情况。从综合水平得分来看,总体呈上升趋势,具有较为明显的“先平缓波动增长,后快速上升”的演化规律,可归为 2 个时序演化阶段:(1)2000—2009 年为平缓波动增长阶段,乡村生态系统健康综合水平从 0.275 缓慢增加到 0.361,乡村资源和乡村环境子系统曲线下降,乡村社会和经济子系统曲线上升。可以看出这一阶段重庆市乡村生态系统健康受乡村农业耕种资源负效应干扰明显,同时乡村经济得到了快速发展,乡村社会发展明显滞后于乡村经济和物质财富积累。(2)2010—2018 年为快速上升阶段,乡村生态系统健康综合得分从 0.361 上升到 0.874,增幅达到 142.11%,四个子系统综合得分也呈现一致的上升趋势。其中乡村社会子系统增长对综合健康水平影响最明显,说明得益于前一阶段乡村资源和环境的投入,极大促进了乡村经济和物质财富积累,乡村社会条件得到飞跃式发展。这与近年来重庆市开

始贯彻实施严格耕地保护制度、乡村农业面源污染治理、乡村退耕还林、乡村生态绿色农业发展以及城乡综合配套改革发展等促农发展战略密切相关,乡村社会 and 经济发展较上一阶段得到明显加强,前一阶段的资源和环境负效应也在较短时间内得到改善,全面促进了乡村生态系统健康。

从四个子系统的贡献程度和时序变化趋势来看,乡村社会子系统和乡村资源子系统对综合水平贡献程度最大,2009 年以前乡村资源子系统贡献程度最大,之后逐渐被社会和经济子系统超越。2000—2018 年社会和经济子系统一直保持较为明显的线型增长态势,分别从 0.027、0.028 增长到 0.223、0.296,乡村资源子系统和乡村环境子系统呈现先降低后上升的演化态势,分别在 2009 年到达谷值(0.075、0.069),之后开始上升。其中乡村资源子系统曲线在 0.075~0.189 之间波动,在 2009 年之后保持较为明显的增长趋势,而乡村环境子系统曲线在 0.069~0.166 之间变化,在 2009 年以后也呈现较为稳定增长趋势。从系统演化稳定状态和背后驱动因素来看,乡村资源子系统与环境子系统的

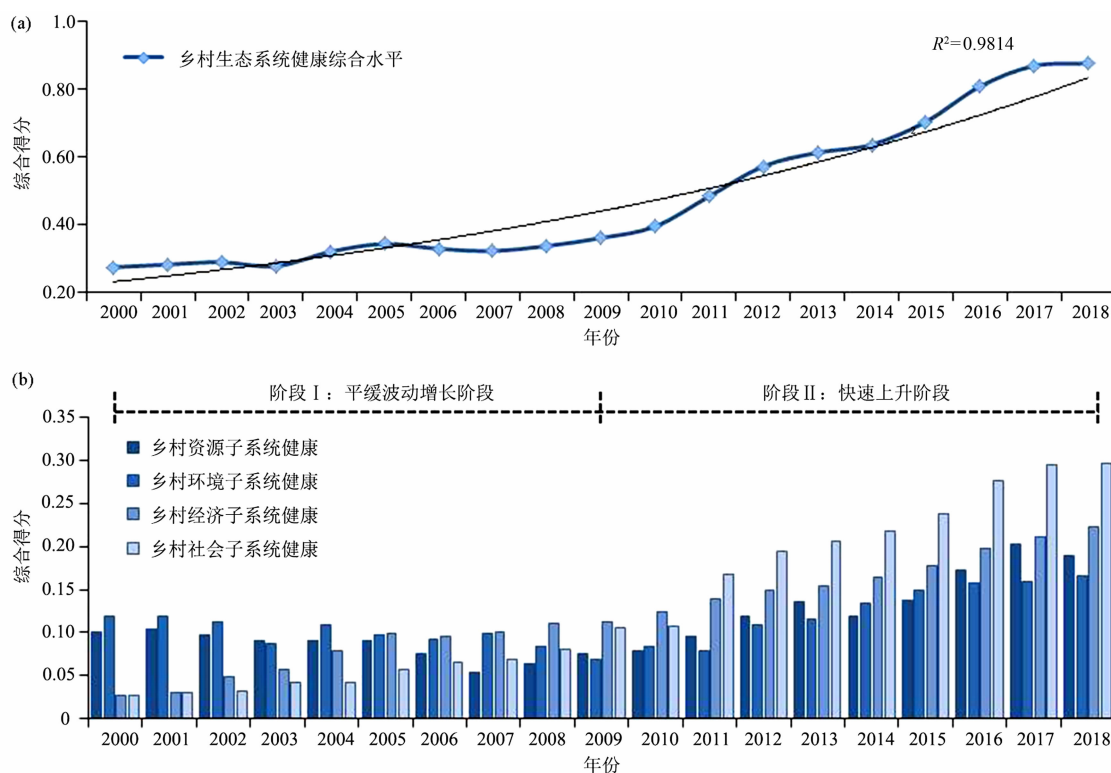


图 4 重庆市 2000—2018 年乡村生态系统健康时序演化图:(a)乡村生态系统健康综合水平;(b)四个子系统健康水平

Fig. 4 Temporal evolution of rural ecosystem health of Chongqing from 2000 to 2018:

(a) rural ecosystem health comprehensive level;(b) four subsystems health level



演化趋势稳定性不高,变化波动明显,乡村经济子系统和乡村社会子系统最为稳定,一直保持增长态势。这一阶段乡村社会子系统发展滞后于乡村经济子系统,表明乡村经济发展首先得益于自然资本投入呈现明显的增加趋势,直接体现为乡村物质财富积累和经济发展水平提升,然后再投入乡村社会子系统发展。

### 3.3 重庆市 36 区县乡村生态系统健康指数空间分异差异

图 5 揭示了渝东北、渝东南、渝西和主城区 36 个区县乡村生态系统健康及其子系统的空间分布情况。首先从整体空间分布特征来看,重庆市乡村生态系统健康状况由渝东南和主城片区向渝西和渝东北片区逐渐减弱,呈“一核两翼”的分化趋势,具有“渝东南高、主城中部突出、渝西平稳、渝东北塌陷”的空间格局特征。位于主城 9 区和渝东南西部的经济发展水平和城镇化率较高的区县,乡村生态系统健康综合水平最好,万州区、开州区、奉节县和巫山等渝东北多山喀斯特地貌和水土流失地区的乡村生态系统健康综合水平最低,农业耕种条件较好和经济发展水平中等的渝西区县,乡村生态系统健康综合水平次之。不难看出,乡村生态系统健康综合水平与乡村自然资源禀赋条件、地区经济水平、城镇化率和农业耕种水平具有明显的相关关系。

其次,从各区县空间分布差异来看(图 5),由大到小依次为渝东南地区、主城区、渝西地区、渝东北,其中巴南综合指数最高(0.718),依次分别为武隆(0.712)、璧山(0.703)、南岸(0.669)、彭水(0.663)、城口(0.659),云阳(0.533)、梁平(0.552)和开州(0.561)最低。主城区、渝东南片区的乡村生态系统健康综合水平与地区经济水平和乡村资源禀赋条件具有较为明显的空间对应关系,乡村资源禀赋优越、生态环境质量较好以及经济水平中等的渝东南片区,以及经济发展水平最好的主城区乡村生态系统健康综合水平较高,渝西片区次之,渝东北片区最低。研究结论表明:(1)主城区周边和渝西地区的乡村得益于城乡要素流动影响,随着城乡融合发展使得这部分地区的乡村经济和社会发展水平明显优于其他地区,加之有限的农业耕种资源也促使这些乡村地区更多依赖于城市服务业发展特色乡村旅游和近郊都市农业。与此同时,城镇化的乡村反哺直接促进了乡村社会综合水平发展,极

大改善了乡村地区的居民就业、医疗、养老和教育覆盖;(2)渝东南片区主要得益于优越的乡村自然资源禀赋和生态环境条件,促进了乡村旅游业和乡村产业发展,其综合水平也明显高于其他地区;(3)渝东北片区由于山地地形制约使得农业耕种资源匮乏,坡耕地( $>25^\circ$ )占比面积较大,人均耕地面积、人均有效灌溉面积和农业播种面积小,加之地处三峡库区水土流失和喀斯特地貌区域,乡村自然灾害频发,特别是巫山、奉节、云阳、开州和万州等地区,呈典型的“大农村、小城市”发展特征,乡村经济和

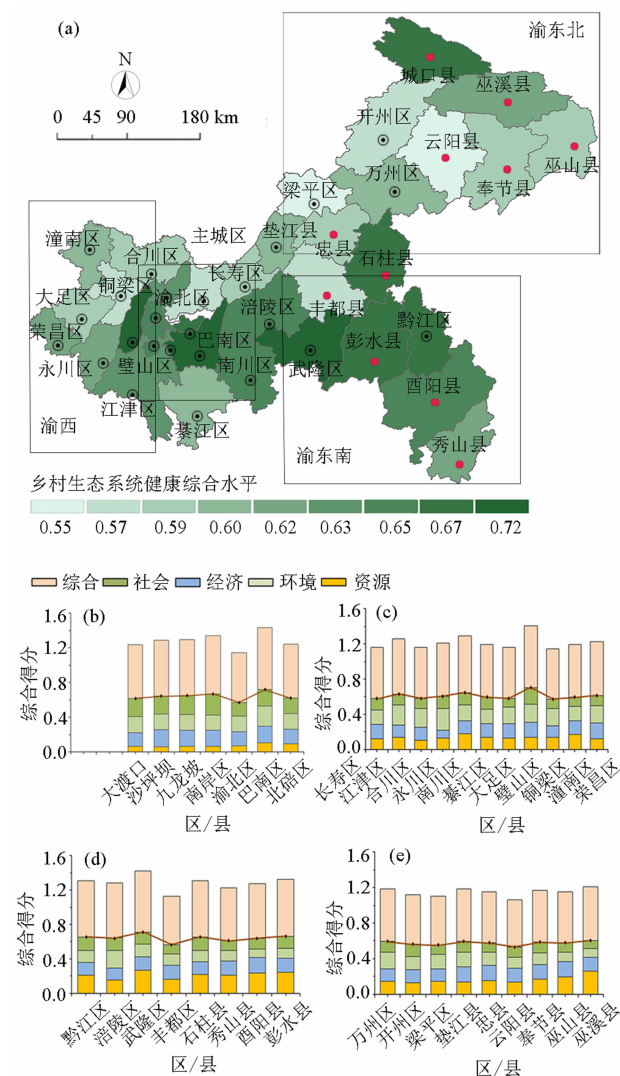


图 5 重庆市 2018 年 36 区县乡村生态系统综合健康水平空间分布:(a)重庆市;(b)主城区;(c)渝西片区;(d)渝东南片区;(e)渝东北片区

Fig. 5 Spatial distribution of rural ecosystem health comprehensive level of 36 districts and counties of Chongqing in 2018; (a) Chongqing municipality; (b) metropolitan areas; (c) Western Chongqing; (d) Southeast Chongqing; (e) Northeast Chongqing

社会发展受限,整体健康综合水平最低。

最后,从四个子系统空间分布差异来看(图6),乡村资源子系统健康水平呈现明显的中西低、东北和东南高的“一级两翼”分化趋势,主城和渝西发达片区的乡村资源子系统健康水平最低。受长期城乡发展“重大轻小、重城轻乡”影响,这些区在经济发展和城镇化驱动下建设用地扩张明显,人均适耕农用地下降、乡村农业灌溉面积和乡村生物多样资源被侵占挤压,而渝东北和渝东南地区由于城镇化和经济发展的人为干扰影响较小,乡村资源子系统健康水平趋于稳定。同时,乡村

环境子系统健康水平空间分布趋于不稳定状态,总体水平不高(0.095~0.196),邻近主城的渝西片区由于地处西南丘陵山区,乡村适耕农用地缺乏,乡村农业生产主要依靠农药、化肥投入促进农产品产量,致使农业面源污染较为严峻,其乡村环境子系统健康水平较低,万州、梁平和开州等渝东北片区由于频发的乡村自然灾害使得其环境子系统健康水平也较低。此外,乡村经济与乡村社会子系统健康水平具有明显的空间协同对应关系,渝西和主城区片区的乡村社会子系统健康水平最高,呈现明显的“中西高、两翼低”的空间分布

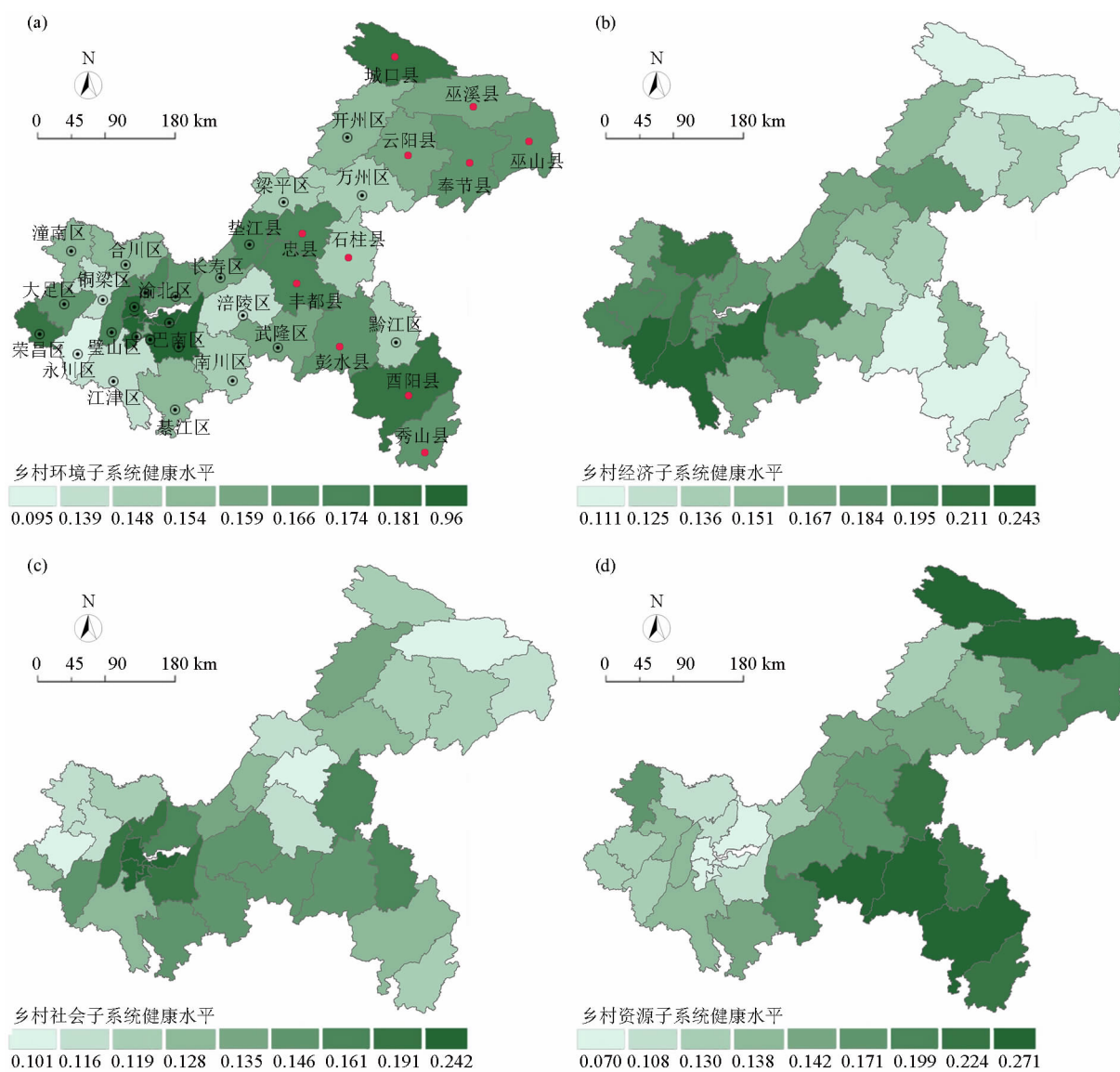


图6 重庆市2018年36区县乡村四个子系统健康水平空间分布:

(a)环境子系统;(b)经济子系统;(c)社会子系统;(d)资源子系统

Fig. 6 Spatial distribution of four subsystems health level of 36 districts and counties of Chongqing in 2018:

(a) environmental subsystem; (b) economic subsystem; (c) social subsystem; (d) resource subsystem

特征。

### 3.4 乡村生态系统健康类型划分

为进一步揭示乡村生态系统健康的类型差异与空间分布特征(图7),本研究将重庆市36区县健康空间类型综合叠加归纳为四大类九中类。从划分类型结果来看具有明显的空间临近效应,即相邻地区的空间类型相似程度较高。其中:

(1)健康类型包括综合健康和复合健康两种类型,空间单元占比19.44%,包括黔江、南岸、巴南、璧山、武隆、石柱和彭水等七个区县,分布在渝西、主城和渝东南三大片区,其中渝西片区和主城区以综合健康类型为主,渝东南片区以资源-社会复合健康类型为主。

(2)亚健康类型包括综合亚健康、复合亚健康和单一亚健康三种类型,空间占比单元超过36.11%,包括涪陵、大渡口、沙坪坝、九龙坡、北碚、江津、永川、南川、綦江、荣昌、巫溪、秀山和酉阳等13个区县,主要分布在渝西和主城两大片区,其中渝西片区以经济单一亚健康、社会单一亚健康、资源单一亚健康、环境-经济复合亚健康和经济-社会复合亚健康为主,主城区以经济-社会复合亚健康和综合亚健康类型为主。

(3)不健康类型包括综合不健康、复合不健康和单一不健康三种类型,空间单元占比超过38.89%,包括万州、渝北、长寿、合川、大足、铜梁、潼南、开州、城口、丰都、垫江、忠县、奉节和巫山等14个区县,是重庆市乡村生态系统健康的主要类型,主要分布于渝西和渝东北片区,呈现“局部凸显、渝东北多、渝西少”的空间分布特征,以经济-社会复合不健康、环境-社会复合不健康、单一经济、单一资源和综合不健康类型为主。

(4)疾病类型主要为综合疾病类型为主,空间单元占比5.56%,包括梁平和云阳两个区县,以综合疾病类型为主。

### 3.5 差异化规划调控建议

研究表明重庆市乡村生态系统健康综合水平及其健康空间类型呈现明显的时空格局差异,存在诸如农业面源污染、耕地侵占与退化和乡村环境质量退化等诸多现实问题,严重制约乡村社会经济可持续发展。如何根据现状困境制定相应的规划调控建议成为缓解乡村生态系统问题的重点难题,尤其是在当前生态文明主导的国土空间规划顶层设计阶段,科学制定乡村发展战略成为下一阶段乡村振兴的关键。本研究根据乡村生态系统健康空间类型划

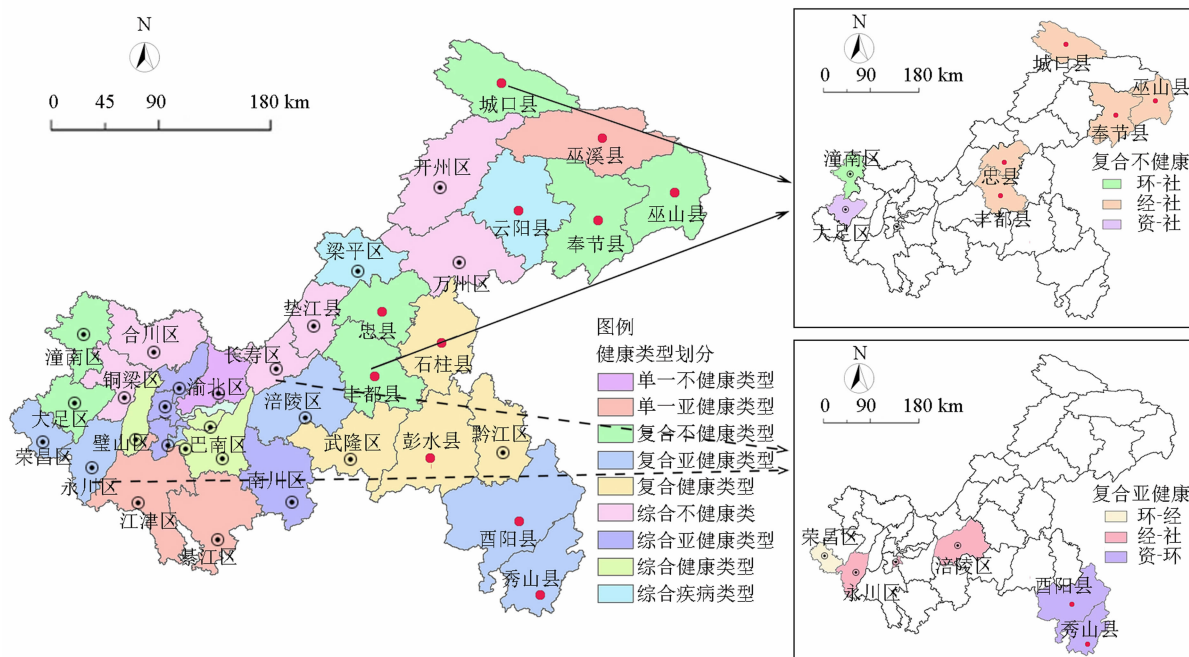


图7 重庆市乡村生态系统健康空间类型分布:

(a) 乡村生态系统健康空间类型分布; (b) 复合不健康空间类型分布; (c) 复合亚健康空间类型分布

Fig. 7 Spatial distribution of rural ecosystem health type of Chongqing: (a) spatial distribution of rural ecosystem health type;

(b) spatial distribution of compound unhealthy type; (c) spatial distribution of compound sub-health type



分结果,遵循“分级分类-重点分析-因地制宜-短板补齐”原则,分级测度重庆市乡村生态系统健康综合水平及其子系统健康水平,分类识别乡村生态系统健康空间类型,针对地区差异条件因地制宜制定规划建议,对渝东北、渝东南、渝西及主城片区疾病和不健康类型地区进行短板补齐,引导乡村生态系统健康发展。

渝东北和渝西片区的梁平、云阳、万州、渝北、长寿、合川、大足、铜梁、潼南、开州、城口、丰都、垫江、忠县、奉节和巫山等14个区县是重庆市乡村生态系统健康状况较差地区。造成该地区乡村生态系统健康综合水平低的主要原因:一方面是城镇化发展和城镇建设用地扩张对乡村耕地、环境和自然资源带来胁迫压力,造成乡村生态系统损害;另一方面渝东北属于喀斯特、荒漠化、 $25^{\circ}$ 以上坡耕地和水土流失严重的生态环境脆弱和敏感地区,乡村资源和环境禀赋较差,社会经济制约瓶颈大。对此,未来的规划调控重点应集中在耕地严格保护、农业生态化发展、生态环境治理、生态修复,以“建设用地集约利用、生态环境防治、灾害防治和乡村社会经济改善”为突破口,推进渝西片区的乡村环境和资源保护,促进渝东北经济欠发达地区产业振兴发展与脱贫攻坚。重点推进以下三个方面:(1)降低渝西片区乡村农业活动的过度化干预,以绿色生态发展为基础纲领,积极推进长寿、合川、大足、铜梁、潼南等地生态种植、健康养殖,转变以往传统依赖化肥农药增产的农业耕种思维,引导农业增量向增质转变,调整农业化肥使用结构,研发推广农业生态调控、农业物理防治、农业生物防治等新兴耕种技术,精准实施农业绿色行动;(2)立足梁平、云阳、万州、开州、城口、丰都、垫江、忠县、奉节和巫山等喀斯特、荒漠化、 $25^{\circ}$ 以上坡耕地等山地发展实情,因地制宜、因地量产实施耕地轮休制度,划定 $25^{\circ}$ 以上不适宜耕种的坡耕地,重视巫山、奉节等巴东组碎裂岩自然灾害防治,重点治理万州、云阳等水土流失,分类实施大巴山区生态修复与库区支流水源治理;(3)改善渝东北高山欠发达地区乡村生活条件,拓宽农林牧渔业产值提升渠道,培育新型农业大户、专业合作社、小微农场等农民增收主体,建立农户利益分配机制,提高农民经济收入,改善乡村社会与经济条件。

涪陵、江津、永川、南川、綦江、荣昌、巫溪、秀山、酉阳和主城区的大渡口、沙坪坝、九龙坡、北碚等区

县是重庆市乡村生态系统健康状况较好的地区,该地区的规划调控重点应集中在乡村耕地保护、农业生产能力提升、乡村经济增收,以“保耕促产、农业增效提质和农业现代化发展”为突破口,夯实渝西片区粮食主产区及现代化农业生产功能区,推动乡村农业稳定健康发展,稳固重庆市粮食安全生产重任,促进片区农业增产增收。重点包括以下两个方面:(1)稳固推进涪陵、江津、南川、綦江、酉阳等区县耕地保护,巩固粮食作物生产优势,保障重庆市粮食安全底线,同时协调大渡口、沙坪坝、九龙坡、北碚等粮食与经济作物生产,合理布局农业经济作物与粮食耕种用地,在确保粮食安全和农民受益的同时实现农业效益增产;(2)借助国土空间规划积极开展双评价工作,明确国土空间承载能力与城镇、农业和生态适宜程度,优化三生空间格局,科学划定永久基本农田、生态红线和城镇开发边界三条控制线,确保乡村耕地、基本农田、生态红线以及四山管制线等刚性约束底线,统筹片区土地潜力资源,严控主城区建设用地增长规模,促进城镇建设用地集约高效利用,降低对大渡口、沙坪坝、九龙坡、北碚等乡村地区的自然资源和农业侵占挤压。

渝东南和主城地区的黔江、南岸、巴南、璧山、武隆、石柱和彭水等是目前重庆市乡村生态系统健康状况最好的地区,主要得益于武陵山优越自然地理条件以及主城区经济和社会要素支撑,使得该地区的乡村资源、经济和社会发展具有明显优势。规划调控重点应集中在耕地保耕促产和产业融合发展,以“耕地提质、农旅融合发展”为突破口,稳步提升渝东南山区农业耕种条件,推动区域“农业+文旅”产业联动发展,改善渝东南经济欠发达地区乡村社会经济条件,促进区域产业振兴发展。重点推进以下两个方面:(1)积极推进现代化农业和农业水利设施建设,充分利用区县农业耕种优势,推广适用于丘陵地区的新型小微农业机械耕种,实现农业机械化生产,打造数字农业农村、智慧农业、大田园等现代农业机械化示范专业基地。同时,积极推进农业水利设施建设,开展农田水源、灌溉水渠等农业工程建设,以农业产业需要为导向,推进大中型农业灌区改造,提高农业综合生产能力;(2)依托武陵山自然资源和生态环境特色,整合片区自然和文化资源,打造武陵山民俗农业休闲聚集区,积极推进单一型农业产业结构向综合型农旅融合产业结构转变。



## 4 讨论

乡村生态系统健康是乡村生产、生活、生态空间所体现的稳定状态度量,体现了乡村社会-经济-自然复合系统间的互动制衡关系,可用于表征乡村生态系统变化和可持续发展趋势<sup>[5,38]</sup>。OSTROM 等人指出生态系统是由人类社会、经济活动与自然条件组成的复合生态系统,体现了人类系统与生态系统耦合的可持续发展内涵和不可分割的整体性联系,包括人类、资源、环境、社会和经济五个组成部分<sup>[39-41]</sup>。因此,对乡村生态系统健康的评价应从整体性视角去客观认识乡村生态系统健康内涵,将乡村生态系统视为不同子系统与人相互关联的关系总和,在自然生态子系统基础上纳入社会和经济子系统评价维度。正如刘豫等人指出乡村生态系统健康的评价关键在于从生态系统整体性视角体现以“人”为核心的和以“资源、环境、经济和社会”为基础的乡村各子系统间的互动制衡关系,避免仅从失调综合诊断和系统功能指示来评价单一自然生态子系统的运行状态及其功能<sup>[42]</sup>。为此,本研究认为从生态系统整体性视角解读山地乡村生态系统健康内涵,建立一套适用于山地乡村生态系统健康的科学定量评价体系,揭示其时空格局、演化特征及其影响因素,成为解决山地城镇化进程中乡村生态保护与发展协调的重点基础性工作,尤其是针对我国西南山地乡村的复杂自然生态系统特征和社会经济欠发达实情。

本研究拓宽了区域生态系统健康评价研究的讨论地域范畴和学科研究范式知识,为山地乡村生态系统健康量化研究提供了有参考价值的评价方法、指标体系与空间类型划分依据。与传统针对单一区域自然生态系统的 VOR/PSR 等评价方法相比,本研究从乡村社会-经济-自然复合生态系统整体性角度提出的评估框架更能契合重庆市的实际发展情况,将研究对象聚焦在地理生态环境特殊和人地耦合关系冲突尖锐的山地乡村区域,即注重了乡村自然生态子系统的健康状况,也全面评估了乡村社会和经济子系统健康综合水平。同时,本研究创新性将可持续 SDGs17 参考标准融入乡村生态系统健康评价指标,很好契合了国际参考标准与评价接轨。

研究发现重庆市乡村生态系统健康演化具有明

显的阶段发展特征和空间分异差异,乡村社会和资源子系统影响最显著,与针对平原发达地区的研究结论具有一定的异同之处<sup>[43]</sup>:(1)相同之处在于乡村社会经济发展水平是影响乡村生态系统健康的核心指标,这与当前重庆乡村发展所处实际情况基本相符,由于近年来大力实施乡村振兴和城乡融合配套改革实验举措,乡村社会经济发展得到了显著改善;(2)相对于平原乡村地区,山地乡村面临更加突出的资源禀赋差异制约影响,在交通、对外要素流动和地理农业区位制约下,山地乡村经济和社会发展更需要依赖自身自然资源禀赋条件,通过自然资源的不断投入来实现经济和物质财富积累,然后促进乡村社会子系统发展。重庆市采取的一系列政策引导实践经验表明,有针对性的差异化规划调控能明显促进乡村生态系统健康发展,例如主体功能区划、乡村土地交易制度和“地票”交易模式、耕地保护与提质行动、乡村农业面源污染治理、乡村生态绿色农业发展等<sup>[35]</sup>。这些实践经验可以很好地为其他山地地区提供经验参考,通过制定差异化的规划调控能明显提高山地乡村生态系统健康状况。

此外,本文限于有限的认知及数据的可获取性,乡村社会子系统健康的评价指标选取涉及乡村居民生活状况、消费、教育、卫生保健等内容,对乡村文化方面的指标考虑不足,山地乡村生态系统健康的评价指标体系仍有待进一步完善优化。研究仅以区县面板为空间统计尺度,缺乏对镇、乡、村以及农户等不同尺度下的差异化、关联性和级联效应探讨,这些都将是下一步研究的工作重点。

## 5 结论

(1)重庆市乡村生态系统健康综合水平呈现“先平缓波动增长,后快速上升”的演化趋势,表现为 2000—2009 年平缓波动增长阶段和 2010—2018 年快速上升两阶段时序演化特征,乡村生态系统健康综合水平从 0.275 缓慢波动增加到 0.361,再快速上升到 0.874,增幅达到 217.82%。其中,四个子系统综合得分也呈现一致的上升趋势,乡村社会子系统和乡村资源子系统对健康综合水平影响最明显。

(2)重庆市乡村生态系统健康空间分异显著。2018 年重庆市 36 区县乡村生态系统健康状况总体由渝东北和渝西片区向主城和渝东南片区逐渐增

强,呈“一核两翼”的分化趋势,具有“渝东南高、主城中部突出、渝西平稳、渝东北塌陷”的空间格局特征,由大到小依次为渝东南地区、主城区、渝西地区、渝东北。其中,乡村资源系统健康水平呈现明显的中西低、东北和东南高的“一级两翼”分化趋势;乡村环境系统健康水平空间分布趋于不稳定状态,总体水平不高(0.095~0.196);乡村经济与乡村社会子系统健康水平具有明显的空间协同对应关系,即乡村经济发达的渝西和主城地区乡村社会健康水平最高,呈现明显的“中西高,两翼低”的空间分布特征。

(3)根据评价结果将重庆市乡村生态系统健康空间类型划分为疾病、不健康、亚健康和健康四大类九中类。遵循“分级分类-重点分析-因地制宜-短板补齐”原则,对不同片区进行差异化规划调控,建议如下:健康水平最好的渝东南区,以“耕地提质、农旅融合发展”为突破口;健康水平较好的渝西片区及主城四区以“保耕促产、农业增效提质和农业现代化发展”为突破口;健康水平差的渝东北及部分渝西地区,以“建设用地集约利用、生态环境防治、灾害防治和乡村社会经济改善”为突破口。

## 参考文献(References)

- [1] 龙花楼. 论土地整治与乡村空间重构[J]. 地理学报, 2013, **68**(8):1019-1028. [LONG Hualou. Land consolidation and rural spatial restructuring [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, **68**(8): 1019-1028]
- [2] 王成,何焱洲. 重庆市乡村生产空间系统脆弱性时空分异与差异化调控[J]. 地理学报, 2020, **75**(8):1680-1698. [WANG Cheng, HE Yanzhou. Spatio-temporal differentiation and differentiated regulation of the vulnerability of rural production space system in Chongqing [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(8): 1680-1698] DOI: 10.11821/dlxb202008009
- [3] COSTANZA R, MAGEAU M. What is a healthy ecosystem? [J]. Aquatic Ecology, 1999, **33**(1):105-115.
- [4] 李强,李武艳,赵烨,等. 农村生态系统健康的基本内涵及评价体系探索[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4):1604-1608. [LI Qiang, LI Wuyan, ZHAO Ye, et al. Exploration on the basic connotation and evaluation system of rural ecosystem health [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(4):1604-1608] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2009.04.047
- [5] RAPPORT D J, COSTANZA R, MCMICHAEL A J. Assessing ecosystem health [J]. Trends in Ecology and Evolution, 1998, **13**(10):397-402.
- [6] ODUM E P, FINN J T, FRANZ E H. Perturbation theory and the subsidy-stress gradient [J]. Bioscience, 1979, **29**(6):349-352.
- [7] MAGEAU M T, COSTANZA R, ULANOWICZ R E. The development and initial testing of a quantitative assessment of ecosystem health [J]. Ecosystem Health, 1995, **1**(4):201-213.
- [8] PAN Zhenzhen, HE Jianhua, LIU Dianfeng, et al. Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the middle reaches of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **774**:144837. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.114837
- [9] COSTANZA R. Ecosystem health and ecological engineering [J]. Ecological Engineering, 2012, **45**:24-29. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.03.023
- [10] LI Weijie, WANG Yong, XIE Shiyu, et al. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **791**:148311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148311
- [11] NERI A C, DUPIN P, SANCHEZ L E. A pressure-state-response approach to cumulative impact assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **126**:288-298. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.134
- [12] STYERS D M, CHAPPELKA A H, MARZEN L J, et al. Developing a land-cover classification to select indicators of forest ecosystem health in a rapidly urbanizing landscape [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, **94**(3):158-165. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2009.09.006
- [13] NIEKERK L V, ADAMS J B, BATE G C, et al. Country-wide assessment of estuary health: An approach for integrating pressures and ecosystem response in a data limited environment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, **130**:239-251. DOI: 10.1016/j.ecss.2013.05.006
- [14] 叶春,李春华,王秋光,等. 大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子—以太湖为例[J]. 生态学报, 2012, **32**(12):3681-3690. [YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al. Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: A case study of Lake Taihu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(12):3681-3690] DOI: 10.5846/stxb201201180111
- [15] MENG Lingran, HUANG Jiu, DONG Jihong. Assessment of rural ecosystem health and type classification in Jiangsu province, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **615**:1218-1228. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.312
- [16] ZHAO Run, SHAO Chaofeng, HE Rong. Spatiotemporal evolution of ecosystem health of China's provinces based on SDGs [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**:10569. DOI: 10.3390/ijerph182010569
- [17] RAPPORT D J, COSTANZA R, MCMICHAEL A J. Assessing ecosystem health [J]. Trends in Ecology and Evolution, 1999, **13**(10):397-402.
- [18] 周秋文,苏维词,张婕,等. 农村聚落生态系统健康评价初探

- [J]. 水土保持研究, 2009, **16**(5): 121 - 126. [ZHOU Qiuwen, SU Weici, ZHANG Jie, et al. Preliminary research on ecosystem health assessment of the rural habitat [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, **16**(5): 121 - 126]
- [19] 祁帆, 李晴新, 朱琳. 海洋生态系统健康评价研究进展[J]. 海洋通报, 2007, **26**(3): 97 - 104. [QI Fan, LI Qingxin, ZHU Lin. Assessment method of marine ecosystem health [J]. Marine Science Bulletin, 2007, **26**(3): 97 - 104]
- [20] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍, 等. 湖泊生态系统健康定量评价方法[J]. 生态学报, 2005, **25**(6): 1466 - 1473. [ZHAO Zhenyan, XU Fuli, ZHAN Wei, et al. A quantitative method for assessing lake ecosystem health [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(6): 1466 - 1473]
- [21] 王立新, 刘钟龄, 刘华民, 等. 内蒙古典型草原生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 544 - 550. [WANG Lixin, LIU Zhongling, LIU Huamin, et al. Assessment of typical steppe ecosystem health in Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(2): 544 - 550]
- [22] 蒋卫国, 李京, 李加洪, 等. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 408 - 414. [JIANG Weiguo, LI Jing, LI Jiahong, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the Liaohe River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(3): 408 - 414]
- [23] 谢花林, 李波, 王传胜, 等. 西部地区农业生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2005, **25**(11): 3028 - 3036. [XIE Hualin, LI Bo, WANG Chuansheng, et al. Agroecosystem health assessment in western China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(11): 3028 - 3036]
- [24] MOONEN A C, BARBERI P. Functional biodiversity: An agroecosystem approach [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, **127**: 7 - 21. DOI: 10.1016/j.agee.2008.02.013
- [25] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴(2000—2018)[EB/OL]. [2022 - 05 - 15]. [http://tjj.cq.gov.cn/zwgk\\_233/tjnj/](http://tjj.cq.gov.cn/zwgk_233/tjnj/) [Chongqing Municipal Bureau of Statistics. Chongqing statistical yearbook (2000—2018) [EB/OL]. [2022 - 05 - 15]. [http://tjj.cq.gov.cn/zwgk\\_233/tjnj/](http://tjj.cq.gov.cn/zwgk_233/tjnj/)]
- [26] 重庆市统计局. 重庆国民经济和社会发展统计公报(2000—2018)[EB/OL]. [2022 - 03 - 18]. [http://tjj.cq.gov.cn/zwgk\\_233/fdzdgknr/tjxx/sjzl\\_55471/tjgb\\_55472/](http://tjj.cq.gov.cn/zwgk_233/fdzdgknr/tjxx/sjzl_55471/tjgb_55472/) [Chongqing Municipal Bureau of Statistics. Chongqing statistical bulletin of national economic and social development (2000—2018) [EB/OL]. [2022 - 05 - 20]. [http://tjj.cq.gov.cn/zwgk\\_233/fdzdgknr/tjxx/sjzl\\_55471/tjgb\\_55472/](http://tjj.cq.gov.cn/zwgk_233/fdzdgknr/tjxx/sjzl_55471/tjgb_55472/)]
- [27] 重庆市生态环境局. 重庆环境统计年报(2000—2018)[EB/OL]. [2022 - 01 - 24]. [https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk\\_249/zfxgkz/fdzdgknr/hjtj/](https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/zfxgkz/fdzdgknr/hjtj/) [Chongqing Municipal Bureau of Ecological Environment. Chongqing environmental statistics annual report(2000—2018) [EB/OL]. [2022 - 01 - 24]. [https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk\\_249/zfxgkz/fdzdgknr/hjtj/](https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/zfxgkz/fdzdgknr/hjtj/)]
- [28] 重庆市统计局. 重庆市第三次全国农业普查(2016)[EB/OL]. [2022 - 05 - 11]. [https://epaper.cqrb.cn/cqrb/2018-01/25/020/content\\_192807.htm](https://epaper.cqrb.cn/cqrb/2018-01/25/020/content_192807.htm) [Chongqing Municipal Bureau of Statistics. The third national agricultural census report of Chongqing (2016) [EB/OL]. [2022 - 05 - 11]. [https://epaper.cqrb.cn/cqrb/2018-01/25/020/content\\_192807.htm](https://epaper.cqrb.cn/cqrb/2018-01/25/020/content_192807.htm)]
- [29] 章家恩, 骆世明. 农业生态系统健康的基本内涵及其评价指标[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(8): 1473 - 1476. [ZHANG Jia'en, LUO Shiming. A discussion on basic content and evaluation index system of agroecosystem health [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(8): 1473 - 1476] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2004.0310
- [30] GB3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2002. [GB3838-2002. Environmental quality standards for surface water [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2002]
- [31] GB3095-2012. 环境空气质量标准[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2012. [GB3095-2012. Ambient air quality standards [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2012]
- [32] HJ623-2011. 区域生物多样性评价标准[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2011. [HJ623-2011. Standard for the assessment of regional biodiversity [S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2011]
- [33] 李咏红, 香宝, 袁兴中, 等. 成渝经济区生物多样性空间分异特征[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(10): 1148 - 1154. [LI Yonghong, XIANG Bao, YUAN Xingzhong, et al. Characteristics of biodiversity spatial differentiation in the Chengdu-Chongqing economic zone [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(10): 1148 - 1154] DOI: 10.13198/j.res.2012.10.75.liyh.001
- [34] 重庆市生态环境局. 2018 年重庆市生态环境状况公报[EB/OL]. [2022 - 03 - 25]. [http://sthjj.cq.gov.cn/hjzl\\_249/](http://sthjj.cq.gov.cn/hjzl_249/) [Chongqing Municipal Bureau of Ecological Environment. Chongqing ecological environment statistics bulletin in 2018 [EB/OL]. [2022 - 03 - 25]. [http://sthjj.cq.gov.cn/hjzl\\_249/](http://sthjj.cq.gov.cn/hjzl_249/)]
- [35] 曾卫, 杨春, 周瀚韬. 地质生态环境与城市化关联性研究——以重庆市为例[J]. 山地学报, 2018, **36**(5): 679 - 692. [ZENG Wei, YANG Chun, ZHOU Hantao. Associative analysis of geo-ecological environment and urbanization: A case study of Chongqing, China [J]. Mountain Research, 2018, **36**(5): 679 - 692] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000364
- [36] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. 地理科学, 2013, **33**(11): 1323 - 1329. [WANG Fuxi, MAO Aihua, LI Helong, et al. Quality measurement and regional difference of urbanization in Shandong province based on the entropy method [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(11): 1323 - 1329] DOI: 10.

- 13249/j.cnki.sgs.2013.11.006
- [37] 李平星, 陈雯, 孙伟. 经济发达地区乡村地域多功能空间分异及影响因素——以江苏省为例[J]. 地理学报, 2014, **69**(6): 797 – 807. [LI Pingxing, CHEN Wen, SUN Wei. Spatial differentiation and influencing factors of rural territorial multifunctions in developed regions: A case study of Jiangsu province [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, **69**(6): 797 – 807] DOI: 10.11821/dlxb201406007
- [38] LACKEY R T. Values, policy, and ecosystem health [J]. Bioscience, 2001, **51**(6): 437 – 443.
- [39] OSTROM E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems [J]. Science, 2009, **325** (5939): 419 – 422. DOI: 10.1126/science.1172133
- [40] 王如松, 欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 337 – 345. [WANG Rusong, OUYANG Zhiyun. Social-economic-natural complex ecosystem and sustainability [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 337 – 345] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 3045.2012.03.012
- [41] PARTELOW S. Coevolving Ostrom's social-ecological systems (SES) framework and sustainability science: Four key co-benefits [J]. Sustainability Science, 2016, **11**: 399 – 410. DOI: 10.1007/s11625 – 015 – 1351 – 3
- [42] LIU Yu, YANG Chun, TAN Shaohua, et al. An approach to assess spatio-temporal heterogeneity of rural ecosystem health: A case study in Chongqing mountainous area, China [J]. Ecological Indicators, 2022, **136**: 108644. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108644
- [43] YANG Chun, ZENG Wei, YANG Xin. Coupling coordination evaluation and sustainable development pattern of geo-ecological environment and urbanization in Chongqing municipality, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, **61**: 102271. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102271

## Spatial-Temporal Evolution of Rural Ecosystem Health in Chongqing, China and Associated Planning Regulation

CAO Yifan<sup>1</sup>, YANG Chun<sup>2</sup>, WANG Xu<sup>2</sup>

(1. Chongqing College of Architecture and Technology, Chongqing 400030, China;

2. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Rural ecosystem health (REH) serves as a system of quality metrics to be used to assess the damage degree or stability state of a rural ecosystem as well as its components. REH are usually specialized by the subject area, in which the interactive checks and mutual balances of each ecosystem component, related to the close connections between resources, environment, economy, society, and people, govern a sustainable development of a rural community. On a regional scale, past ecosystem health assessments were performed mainly on a single ecosystem indicator in a natural state or under external disturbances, but did not involve in human ecology from economic-social composite dimension. In this study, an improved rural ecosystem health assessment framework was constructed by inclusion of ecological integration in all aspects of social, economy, nature. It introduced a system of quality metrics of REH in terms of international standards SDGs17 to quantitatively assess spatio-temporal heterogeneity of 36 districts and counties of Chongqing, China from 2000 to 2018. The results show that: (1) The rural ecosystem health of Chongqing showed a two-stage sequential evolution of “slowly grew at first, then rapidly rose”, and varied between 0.275 and 0.874 from 2000 to 2018. Among them, the rural social subsystem (30.51%) and the rural resource subsystem (27.36%) contributed the most to the comprehensive level. (2) In 2018, the rural ecosystem health of 36 districts and counties of Chongqing generally presented a spatial heterogeneity of “one core and two wings”, which gradually strengthened from northeastern and western Chongqing to metropolitan areas and southeastern Chongqing. (3) The spatial types of rural ecosystem health of Chongqing



were divided into four levels and nine sub-levels categories including disease, unhealthy, sub-healthy and healthy according to the dominant factor method, and different planning and regulation proposals were then formulated for northeastern Chongqing, southeastern Chongqing, western Chongqing, and metropolitan areas on principle of making classification and grading, conducting key analysis, selecting adapting measures for the local conditions, and making up for shortcomings. The results provide a meaningful reference for sustainable development of rural areas in Chongqing and other similar cities, and can be applied to eco-environmental protection and restoration.

**Key words:** rural ecosystem health; spatiotemporal pattern; planning regulation; Chongqing

---

## 径深崩岗——广东德庆县官圩镇的典型崩岗

(岳梦,刘希林,中山大学地理科学与规划学院)

崩岗侵蚀是华南严重的土壤侵蚀类型,产生的泥沙淤积危害土地资源、水库、道路、村落和生命财产安全。崩岗泥砂流是崩岗流域内主要的侵蚀和搬运营力,由泥砂流导致的泥沙淤积对当地的生产、生活和生态造成威胁。然而,泥砂流的发生具有突发性,这给泥砂流的现场观测和采样造成困难。

径深崩岗位于广东德庆县官圩镇五福村,是发育形态完整的典型崩岗,雨季常有泥砂流发生。通过野外观测、采样和室内分析得到径深崩岗的泥砂流的流体特性、流动特性和输沙特征,对认知泥砂流在崩岗侵蚀输沙中的作用具有重要意义,可为华南地区的崩岗侵蚀治理提供科学依据,有利于减轻由崩岗侵蚀造成的生态环境问题。

详见本期《崩岗泥砂流流体和流动特性及其输沙研究——以广东德庆县径深崩岗为例》一文。