

刘孝富, 蒋卫国, 李京, 等. 生态系统恢复力研究进展及其在防灾减灾中的应用前景[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 154 - 159. [LIU Xiaofu, JIANG Weiguo, LI Jing, et al. Research advances in ecosystem resilience and its application prospect in disaster prevention and reduction[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 154 - 159. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.027.]

生态系统恢复力研究进展及其在 防灾减灾中的应用前景^{*}

刘孝富¹, 蒋卫国², 李京², 王文杰¹

(1. 中国环境科学研究院环境信息科学研究所, 北京 100012; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 恢复力被广泛应用于生态学、经济学、社会学、心理学等众多学科。在描述生态系统方面, 恢复力有两种相对清晰的描述性定义。一是 Holling 恢复力, 表示系统在不发生状态转一下吸收的最大干扰量; 二是 Pimm 恢复力, 表示系统受干扰后恢复至扰动前的速率和时间。生态系统恢复力既可以表示恢复现状, 又可以预测恢复趋势, 在防灾减灾方面发挥着重要作用。提升生态系统恢复力可减轻灾害发生风险, 开展生态系统恢复力评估可提高灾后重建的科学性。进一步探索灾害驱动下的生态恢复力定义, 建立灾害生态恢复力评价指标体系以及构建生态恢复力“绝对值”评价方法是未来研究的重点方向。

关键词: 灾害; 生态系统; 恢复力; 研究进展; 应用前景

中图分类号: X171.4; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)02-0154-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.027

“恢复力”一词源于英文 resilience, 在国内也将其翻译成“弹性力”、“韧性”等, 最初是一个物理学的概念, 表示物体在压力释放后的回弹性。国内大多数学者将其翻译为“恢复力”, 因这一翻译可以在跨学科间通用。自 1970 年代, 从物理学引进到系统科学以来, 恢复力得到前所未有的发展, 广泛应用于多个学科^[1], 并已逐渐从单纯的术语转变为一种思维范式和世界观, 在应对气候变化、防灾减灾, 推动世界可持续发展等方面发挥着越来越重要的作用。国际社会也越来越重视恢复力理论、方法和实践应用的发展。例如, 2012 年在中国济南召开的世界自然保护大会就以“自然的恢复力”为主题; 2014 年在澳大利亚布里斯班召开的第 9 次 G20 峰会以“全球经济恢复力”为主题; 2015 年在英国曼彻斯特召开的第六届世界生态恢复大会, 以“通向恢复力的生态系统”为主题。

恢复力(resilience)与不同的研究对象、不同的应用领域结合产生不同的恢复力的概念, 如生态恢复力(ecological resilience 或 ecosystem resilience)^[2]、工程恢复力(engineering resilience)^[3]、社区恢复力(community resilience)^[4-7]、经济恢复力(economic resilience)^[8-9]、灾害恢复力(disaster resilience)^[10-12]、空间恢复力(spatial resilience)^[13-15]等。近年来, 随着一些重大灾害事件的发生, 人类逐渐思考生态与灾害的关系, 灾害可

以导致生态破坏, 生态破坏亦可加剧灾难的发生。2010-2011 连续两年的国际减灾日都将“建设具有恢复力的城市: 让我们的城市做好准备”(Making Cities Resilient: “My city is getting ready”)作为主题; 2014 年又提出了“恢复力就是生命”(Resilience is for life)的主题, 可以看到如何充分认识生态恢复力, 提高防灾减灾水平是人类正在探寻的重要议题。本文针对生态恢复力的概念、评价方法、存在问题进行探讨, 阐述生态恢复力的研究方向及其在灾害防治的应用前景, 为在灾害视角下充分理解生态恢复力, 发挥其作用提供一些思路。

1 恢复力的发展历程

恢复力发展经历了理论研究、方法探索和实践应用 3 个阶段(图 1)。1970-1990 年代中期, 是恢复力的理论探索阶段。这一阶段重点探讨了恢复力的概念内涵和理论模型。1990 年代中期至 2005 年左右为恢复力的方法探索阶段。这一阶段研究者们探讨了恢复力的影响因素, 并开始尝试生态恢复力的定量评估。2005 年至今为恢复力研究的实践应用阶段。这一阶段全球的政治活动(如千年生态系统评估报告、斯特恩报告、IPCC 评估

* 收稿日期: 2017-08-01 修回日期: 2017-10-10

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项(2011467026)

第一作者简介: 刘孝富(1983), 男, 四川大竹人, 高级工程师, 研究方向为生态影响评价, 遥感与 GIS 应用等。

E-mail: liuxf@craes.org.cn

报告、国际气候变化会议和谈判等)促使恢复力研究出现的井喷式的增长^[16], 恢复力开始用于解决实际问题, 如应对气候变化、防灾减灾、城市规划、和脆弱性等^[17]。

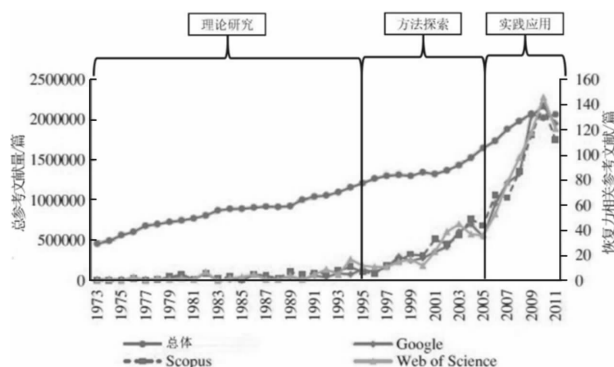


图1 恢复力研究文献统计与阶段划分
(参考: Xu and Marinova (2013)^[16])

2 生态系统恢复力的概念和内涵

尽管恢复力(resilience)作为多学科的共同术语, 成为了一个边界对象(boundary object)^[18-19], 定义被逐渐稀释^[18], 使其成了一个符号, 一种思维方式或世界观^[20]; 但在生态系统领域, 恢复力具有两种基本的、相对清晰的、描述性的定义。一个是生态恢复力(ecological resilience), 由Holling首先提出的, 也称之为Holling恢复力; 另一个是工程恢复力(engineering resilience), 由Pimm首先提出, 也称之为Pimm恢复力^[21-23]。生态恢复力(ecological resilience)或Holling恢复力指系统在不发生状态转移, 或结构、功能、负反馈不发生变化前提下, 能够吸收干扰的度量^[2,20,24-25]。Holling恢复力强调系统存在多个稳定态^[26-27](也称平衡态^[19], 也称之为“引域”(basin of attraction)^[18,28], 稳定态相互之间可以发生转移。1999年, 随着“恢复力联盟(Resilience Alliance)”成立, 生态恢复力的概念被进一步明确为三个属性, 一是系统维持在同一引域下(或维持相同功能和结构)而能够承受的改变量; 二是系统自组织能力的度量; 三是系统学习与适应能力的度量^[29-30]。工程恢复力(engineering resilience)或Pimm恢复力指系统遭受扰动后恢复到原有稳定态的速率或时间^[3]。Pimm恢复力强调系统处于单一稳定态(或平衡态), 重点关注系统在受干扰后逐渐接近平衡态的速度和时间, 而Holling恢复力关注逐渐远离平衡态的最大幅度, 当干扰超过某个阈值, 系统状态发生改变或者转移。尽管许多研究者随后都对生态系统恢复力的概念进行了阐述, 但其核心思想仍然保持着Holling和Pimm两种最基本的定义^[18]。

恢复力要注意与其它术语区别, 以免相互混淆。恢复力(resilience)即表示恢复的现状也表示恢复的潜力。恢复率(recovery rate)表示恢复的程度占受损程度的百分比; 或恢复过程的现状值与未

受灾前状态值的百分比。在一定条件下, 恢复力与恢复率成正比关系。抵抗力(Resistance)表示在恢复过程中所受到的阻碍, 在一定程度上, 恢复力与抵抗力呈反比关系。适应力(Adaptability)表示恢复过程中适应新环境的能力, 但并不代表能恢复到干扰前的状态。

3 生态系统恢复力的评价

3.1 恢复力的难衡量性

恢复力的衡量是困难的^[3, 21,23,31], 其定性研究文献较多, 而定量评估研究文献较少也侧面印证了这一结论^[32]。一些文献中提到了理论上的衡量方法, 例如考虑吸收干扰的稳定阈宽度、潜力、熵、转移可能性等方面开展评估, 但仍然缺乏实证证据^[21]。一些学者认为, 恢复力的评估要求干扰停止或消失, 这对于持续性的或者蔓延性的干扰而言是很难定量评价的^[31]。三个方面可综合解释恢复力衡量的困难性: 一是恢复力定义尚未统一, 精确定义和诠释恢复力概念较难^[29,33]; 二是不同定义中的定性指标筛选和衡量较难^[12]; 三是生态系统的复杂性增加了恢复力的定量评估难度。

3.2 恢复力评价的前提条件

要使恢复力可衡量和具有可操作性, 必须明确“在什么条件下(to what)和处于什么状态的系统(of what)的恢复力”^[29]。“to - what”就要明确干扰体制, 例如干扰的类型、频率和强度, “of - what”部分说明特定的状态是有恢复力的。

恢复力不能直接衡量, 必须通过一些具有替代性概念(surrogate^[34]、proxy^[19])”来间接评价^[3,20,35], 如植被覆盖度^[36-37]、关键物种多样性^[38]等。筛选替代性概念首先要定义问题, 生态系统在哪些方面是有恢复力的? 或者管理者希望哪些变化能有复原? 其次, 辨识反馈循环过程, 哪些生态变量或参数在发生改变, 驱动因子是什么? 再次, 设计系统模型, 找出因果变量之间的联系; 最后综合识别恢复力的代表性概念^[27]。

生态恢复力的两个独立的定义(Holling恢复力和Pimm恢复力), 分别包含了抵抗力(resistance: 衡量生态系统没有发生功能性改变而吸收的干扰度和复原力(recovery: 衡量返回到原始功能的速度)两个关键过程, 他们机制性不同, 需要不同的衡量, 但是很多生态系统研究中没有被区分开^[39]。

3.3 Holling恢复力评价

Holling恢复力的广义定义, 决定了其概念较难用指标来诠释。一是很难定义什么是干扰^[40], 二是构建干扰与响应参数之间的关系存在困难^[41-43], 三是定义系统的多个稳定状态, 识别发生状态转移的条件也存在诸多困难。Holling恢复力认为外部条件使系统存在相互交替的稳定态, 如降水、放牧压力和火灾等因素, 决定了热带草原全部为草本, 或者局部兼有木本; 营养负荷的改变决定了潜水湖可在有水生植物的清水湖和无

水生植物的浑浊湖两种状态下相互交替^[18]。

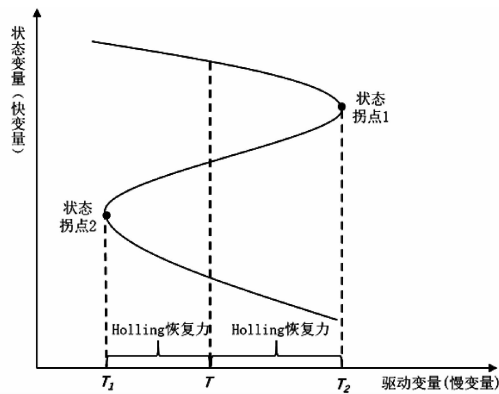


图2 系统状态转移模型

注：T1 和 T2 表示系统发生状态转移时驱动变量的阈值，T 表示驱动变量现状值，阈值与现状值之差表示 Holling 恢复力

当状态变量(快变量)对驱动变量(慢变量)发生响应时，系统通过背向褶皱曲线体现出交替的引域(图2)。慢变量决定系统所处的稳定位置^[44]。恢复力可以用状态变量(快变量)发生改变或转移时驱动变量(慢变量)的现状值与阈值(如图2中的T1和T2)之差来表示^[19]。慢变量的现状值测算较易，而阈值测算较难。统计慢变量远离且返回特定值的次数以及计算快变量在特定值上下的标准差^[45]等方法可以用来识别阈值^[19]，但这些方法还没有得到广泛验证^[46]。也有研究者认为系统的临界阈值可以通过“临界减速”的现象来识别^[41]。临界减速判断标准为增强的变量和增强的自相关性^[42-43, 47-48]。Holling 恢复力需与特定的干扰联系起来，识别干扰会对哪些参数产生影响，构建响应关系，识别临界减速的特征，并将其与临界阈值连接起来，这些决定了 Holling 恢复力评估的难度，使其更多停留在理论层面，实践验证较少。

3.4 Pimm 恢复力评价

Pimm 恢复力与 Holling 恢复力相比更易评价，也更具有可操作性^[21-22, 49]。Pimm 恢复力的评估不需要考虑干扰，只需明确生态系统中哪些有代表性属性是具有恢复力的。一方面通过构建“增强”恢复力的指标体系评估恢复力，另一方面可以通过系统干扰前后、受干扰与未受干扰等对比评价恢复力^[49]。

模糊评价法是应用最广的恢复力评价方法。在生态系统属性特征现状评估的基础上，通过构建指标体系并获取权重，采用加权叠加方式求得恢复力综合指数，广泛应用于植被^[50-51]、湿地^[51-54]的恢复力评价。Bisson 等以土壤类型、火灾前植被覆盖度、坡度、坡向和地质5个参数构建了植被恢复力指数^[50]。高江波等以样方调查为基础，以植被覆盖度、物种多样性和群落生物量建立了生态系统恢复力评价模型，对比分析了50个样点的恢复力^[55]。战金艳等从生境条件和生态存储两方面遴选出26个指标，建立了森林生态系统恢复力评价指标体系^[32]。Robert 基于水文、土壤、历史条件、植被覆盖、临近植被类型和土地利用建立了基于GIS的湿地恢复潜力评价模型^[51-54]。模糊评价法简单易行，但其评价过程依赖于经验

知识，结果的可靠性验证也存在难度。此外，模糊评价法的结果是无量纲的，适用于不同区域间恢复力的相对比较，或者恢复时间、速度快慢的定性评价。

直接对比法也是生态恢复力评价的方法之一。对比系统干扰前后、受干扰与未受干扰的系统参数，不仅可以了解恢复进展，也可以评估和预测未来恢复潜力。Mauro 采用多时相的 MODIS 数据，绘制了植被指数随时间动态图，通过对比火灾前后数据了解恢复时间；同时通过燃烧迹地与未燃烧参考地的对比，分析了燃烧迹地的恢复情况和恢复力^[56]。直接对比法相对简单，但评价的结果也不能代表系统恢复的准确时间，同样是恢复力的相对评价。

4 生态恢复力在防灾减灾中的作用

4.1 提升生态系统恢复力可减轻灾害发生风险

灾害具有突发性特征，但灾害的发生(如崩塌、滑坡、泥石流)也可能与长期的生态破坏相关。如2010年发生的舟曲泥石流与生态退化密切相关。据调查，多年的超限采伐导致舟曲乃至整个白龙江流域森林覆盖率明显下降，森林灌丛化、草地裸土化(图3、图4)，近60%耕地为坡度 $\geq 25^\circ$ 耕地，工程防护措施缺乏，松散堆积物的累积和降水调蓄功能下降(图5)，加剧了泥石流的发生频率和发生强度水土流失严重^[57-58]。自然的长期退化使得生态系统的状态发生转移，从“具有恢复力”变成“不具有恢复力”，“免疫力”丧失使其不具备抵抗外力干扰的能力，一场极端降水导致了灾难性的后果。如果决策者和管理者能充分考虑生态的退化，就能提前预知，并采取果断措施逐步恢复受损的生态系统，提升生态恢复力，降低灾难发生的概率或者减轻灾难的影响。



图3 白龙江流域三眼峪沟退化的稀疏灌丛



图4 白龙江河岸植被及崩塌景观

表 1 生态恢复力评价方法对比

方法	难易程度 (五★表示最难)	理论框架	应用尺度	可操作性	结果属性	客观性
阈值法	★★★★★	Holling 恢复力	系统/区域尺度	弱	绝对值	较强
模糊评价法	★	Pimm 恢复力	各尺度	强	相对值	较差
维持性拟合法	★★★	Pimm 恢复力	系统/区域尺度	较强	相对值	较强
对比法	★★	Pimm 恢复力	各尺度	强	相对值	一般



图 5 白龙江流域三眼峪沟坡积物



图 7 龙溪河流域泥石流沟

4.2 开展生态系统恢复力评估可提高灾后重建的科学性

灾害的特点是突发性、瞬时性、破坏性,灾害既可以因生态退化能产生,又可瞬间产生严重的生态破坏(如地震)。人类对于灾后的恢复重建,往往关注基础设施的恢复以及社会经济的复苏,而忽视生态的恢复。盲目重建可能导致灾害悲剧再次发生。例如都江堰龙溪河流域,在汶川地震中损失惨重。地震后两年,沿河两岸重新建起了居民区,也恢复了农家游。然而,2010年8月,暴雨袭击引发了大规模的泥石流将房屋冲毁殆尽(图6、图7),并造成了大量的人员伤亡。这是因未考虑生态恢复力而在灾后盲目选址重建的典型案列。据李京忠等的分析表明,龙溪河流域的NDVI年均值在2007–2010年间逐渐降低,由最初的0.81降至0.35^[59],加之流域的相对高程达到2440m^[60],受破坏的生态系统在短期内难以恢复,沿河岸重建受损房屋具有较高的灾害风险。在灾后恢复重建过程中,若能开展生态恢复力评估,预测生态恢复时间,对于灾后重建选址以及制定有针对性的防灾减灾措施具有重要意义。



图 6 龙溪河上游植被受损与被冲毁的民宅

5 生态系统恢复力在灾害中的应用展望

5.1 开展灾害驱动下的生态系统恢复力自定义
当前,针对灾后的生态恢复研究以恢复效果

定性描述为主,缺乏未来恢复趋势的预测^[61]。尽管生态恢复力已有描述性定义,但尚缺乏灾害驱动下的,具备可操作性的生态系统恢复力定义,无法对灾后生态系统演替做出预测。针对灾害特点,开展生态恢复力可操作性定义,对于丰富恢复力内涵具有理论意义,同时在防灾减灾方面也具有实践作用。针对汶川地震灾区,已有学者根据评估的需求将生态恢复力定义为震后受损生态系统的植被覆盖度稳定达到或超过震前水平的时间^[49]。“受损生态系统”体现了灾害的破坏性;“植被覆盖度”体现了恢复力的代表性;“稳定达到”,体现了灾后植被演替的“偶然性”和“必然性”;“时间”体现了恢复力的可操作性。

5.2 构建灾害生态恢复评价指标体系

在分析现有生态恢复评价指标的基础上,结合灾害生态恢复力的定义,构建灾害生态恢复评价指标体系。现阶段的生态恢复研究主要围绕生态系统结构构建指标,如动植物物种丰富度、植被结构指标包括植被覆盖、密度、高度、枯枝落叶结构、生物量等,土壤氮含量、土壤有机质含量、土壤有机碳等等^[62–65],这些指标仅能代表生态系统的结构,但结构的恢复并不代表生态系统的整体恢复,相反生态功能的恢复决定着生态系统整体的恢复进度。因此,指标体系应包括结构和功能两大指标,以全面反映生态系统的恢复力,尤其要重点关注与灾害密切相关的生态功能指标,如水土保持功能、水源涵养功能。水源涵养功能的恢复,可提高降雨的拦截率,使地表径流更加舒缓;而水土保持功能的恢复,可减小土壤的流失率,进一步降低地质灾害的发生率。

5.3 开展生态系统恢复力的“绝对值”评价方法研究不足

Holling 恢复力框架下的阈值法,尚停留在理论层面。Pimm 恢复力框架下的模糊评价法因其流程简单、参数易获取等特征,是当前恢复力研究的主要方法,但模糊评价法依赖研究者的经验判断,主观性较强,具有很强的局限性。当前的维持性拟合法也只适用于系统和区域层次,不适用

于单个“像元”或“斑块”。无论是模糊评价法、维持性拟合法、还是对比法，其评价结果都是无量纲的，计算数值代表了生态恢复的好与坏、快与慢，而不能精确获取恢复的时间或速率。开展生态恢复力“绝对值”评价方法研究，对于进一步提升恢复力的可操作性和应用性具有重要意义。

参考文献:

- [1] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social – ecological systems analyses [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253 – 267.
- [2] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annu Rev Ecol Syst* 4: 1 – 23 [J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1973, 4(2): 1 – 23.
- [3] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems [J]. *Nature*, 1984, 307(5949): 321 – 326.
- [4] Brown D, Kulig J. The concept of resiliency: Theoretical lessons from community research [J]. *Health & Canadian Society*, 1996, 4: 29 – 52.
- [5] Adger W N. Social and ecological resilience: are they related? [J]. *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347 – 364.
- [6] Rose A. Economic resilience to natural and man – made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions [J]. *Environmental Hazards*, 2007, 7(4): 383 – 398.
- [7] Tobin G A. Sustainability and community resilience: the holy grail of hazards planning? [J]. *Environmental Hazards*, 1999, 1(1): 13 – 25.
- [8] Östh J, Reggiani A, Galiazzi G. Spatial economic resilience and accessibility: A joint perspective [J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2014, 49: 148 – 159.
- [9] Derissen S, Quaas M F, Baumgärtner S. The relationship between resilience and sustainability of ecological – economic systems [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(6): 1121 – 1128.
- [10] Cutter S L, Burton C G, Emrich C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions [J]. *Journal of Homeland Security & Emergency Management*, 2010, 7(1): 1271 – 1283.
- [11] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place – based model for understanding community resilience to natural disasters [J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 598 – 606.
- [12] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J, et al. Spatial and temporal quantification of resilience at the community scale [J]. *Applied Geography*, 2013, 42(8): 95 – 107.
- [13] Nyström M, Folke C. Spatial resilience of coral reefs [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 406 – 417.
- [14] Cumming G S. Spatial resilience: integrating landscape ecology, resilience, and sustainability [J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(7): 899 – 909.
- [15] Cumming G S. *Spatial resilience in social – ecological systems* [M]. Springer Netherlands, 2011.
- [16] XU L, Marinova D. Resilience thinking: a bibliometric analysis of socio – ecological research [J]. *Scientometrics*, 2013, 96(3): 911 – 927.
- [17] Béné C, Wood R G, Newsham A, et al. Resilience: New Utopia or New Tyranny? Reflection about the Potentials and Limits of the Concept of Resilience in Relation to Vulnerability Reduction Programmes [J]. *IDS Working Papers*, 2012, 2012(405): 1 – 61.
- [18] Brand F S, Jax K. Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object [J]. *Ecology & Society*, 2007, 12: 181 – 194.
- [19] Brand F. Critical natural capital revisited: Ecological resilience and sustainable development [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 605 – 612.
- [20] Walker B, Salt D. *Resilience thinking* [M]. Washington DC: Island Press, 2006.
- [21] Reggiani A, Graaff T D, Nijkamp P. Resilience: An evolutionary approach to spatial economic systems [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2002, 2(2): 211 – 229.
- [22] Ebisudani m, Tokai A. Resilience: Ecological and engineering perspectives present status and future consideration referring on two case studies in U. S [C]. *Kyoto University: Proceedings of the The Society for Risk Analysis Japan*, 2014 [C].
- [23] Reggiani A, Graaff T D, Nijkamp P. Resilience: An evolutionary approach to spatial economic systems [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2002, 2(2): 211 – 229.
- [24] Holling C S. Engineering resilience versus ecological resilience [M]// *Engineering Within Ecological Constraints*. Washington DC: National Academy of Sciences, 1996.
- [25] Holling C S, Carl F, Lance G, et al. Final report of the project: Resilience of ecosystems, economic systems and institutions [R]. The John D and Catherine T Macarthur Foundation, 2000. 4 – 12.
- [26] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems [J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 591 – 6.
- [27] Bennett E M, Cumming G S, Peterson G D. A systems model approach to determining resilience surrogates for case studies [J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 945 – 957.
- [28] Scheffer M, Carpenter S R. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(12): 648 – 656.
- [29] Carpenter S, Walker B, Anderies J M, et al. From metaphor to measurement: resilience of what to what? [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(8): 765 – 781.
- [30] Walker B, Carpenter S R, Anderies J M, et al. Resilience management in social – ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach [J]. *Ecology & Society*, 2002, 6(1): 840 – 842.
- [31] Lake P S. Resistance, Resilience and restoration [J]. *Ecological Management & Restoration*, 2013, 14(1): 20 – 24.
- [32] 战金艳, 闫海明, 邓祥征, 等. 森林生态系统恢复力评价——以江西省莲花县为例 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1304 – 1315.
- [33] Karr J R, Thomas T. Economics, ecology, and environmental quality [J]. *Ecological Applications*, 1996, 6(1): 31 – 32.
- [34] Berkes F, Seixas C S. Building Resilience in Lagoon Social – Ecological Systems: A Local – Level Perspective [J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 967 – 974.
- [35] Carpenter S R, Westley F, Turner M G. Surrogates for resilience of social – ecological systems [J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 941 – 944.
- [36] Simonello T, Lanfredi M, Liberti M, et al. Estimation of vegetation cover resilience from satellite time series [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2008, 5(1): 1053 – 1064.
- [37] Harris A, Carr A S, Dash J. Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2014, 28(1): 131 – 139.
- [38] 王立新, 刘华民, 吴璇, 等. 基于活力和恢复力的典型草原健康评价和群落退化分级研究 [J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(12): 22 – 26.
- [39] Sterk M, Gort G, Klimkowska A, et al. Assess ecosystem resilience: Linking response and effect traits to environmental variability [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 30(0): 21 – 27.
- [40] Hofmann M. Resilience. A formal approach to an ambiguous concept [J], 2007.
- [41] Wissel C. A universal law of the characteristic return time near thresholds [J]. *Oecologia*, 1984, 65(1): 101 – 107.
- [42] Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. Early – warning signs for critical transitions [J]. *Nature*, 2009, 461(7260): 53 – 59.
- [43] Dakos V, Nes E H V, Donangelo R, et al. Spatial correlation as leading indicator of catastrophic shifts [J]. *Theoretical Ecology*, 2010, 3(3): 163 – 174.
- [44] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, Adaptability and Transformability in Social – ecological Systems [J]. *Ecology & Society*, 2004, 9(2): 3438 – 3447.
- [45] Carpenter S R, Brock W A. Rising variance: a leading indicator of ecological transition. [J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(3):

- 311–8.
- [46] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 303–314.
- [47] Dakos V, van Nes E H, D'Odorico P, et al. Robustness of variance and autocorrelation as indicators of critical slowing down. [J]. Ecology, 2012, 93(2): 264–271.
- [48] Boden S, Kahle H P, Wilpert K V, et al. Resilience of Norway spruce (Picea abies, (L.) Karst) growth to changing climatic conditions in Southwest Germany[J]. Forest Ecology & Management, 2014, 315(315): 12–21.
- [49] LIU X F, JIANG W G, LI J, et al. Evaluation of the Vegetation Coverage Resilience in Areas Damaged by the Wenchuan Earthquake Based on MODIS – EVI Data [J]. Sensors, 2017, 17(2): 259.
- [50] Bisson M, Fornaciai A, Coli A, et al. The Vegetation Resilience After Fire (VRAF) index: Development, implementation and an illustration from central Italy[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2008, 10(3): 312–329.
- [51] Van Lonkhuyzen R A, Lagory K E, Kuiper J A. Modeling the suitability of potential wetland mitigation sites with a geographic information system [J]. Environmental Management, 2004, 33(3): 368–375.
- [52] 胡文秋. 基于 RS 和 GIS 的退化湿地生态系统恢复力研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013.
- [53] 张丽, 闫旭飞, 寇晓军. 北京湿地恢复潜力分析——基于 GIS 潜在湿地恢复潜力值模型[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(4): 388–391.
- [54] White D, Fennessy S. Modeling the suitability of wetland restoration potential at the watershed scale[J]. Ecological Engineering, 2005, 24(4): 359–377.
- [55] 高江波, 赵志强, 李双成. 基于地理信息系统的青藏铁路穿越区生态系统恢复力评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2473–2479.
- [56] Newman T J, Toroczkai Z. Diffusive persistence and the ‘sign – time’ distribution[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1998, 58(3): R2685–R2688.
- [57] Lanfredi M, Simoniello T, Macchiato M. Temporal persistence in vegetation cover changes observed from satellite: Development of an estimation procedure in the test site of the Mediterranean Italy [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(4): 565–576.
- [58] Simoniello T, Lanfredi M, Liberti M, et al. Estimation of vegetation cover resilience from satellite time series[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2008, 5(1): 1053–1064.
- [59] Rosa Coppola, Vincenzo Cuomo, Mariagrazia D'emilio, et al. Terrestrial vegetation cover activity as a problem of fluctuating surfaces[J]. International Journal of Modern Physics B, 2012, 23(28/29): 5444–5452.
- [60] Mauro B D, Fava F, Busetto L, et al. Evaluation of vegetation post – fire resilience in the Alpine region using descriptors derived from MODIS spectral index time series [C]// European Geoscience Union. 2013: 4221.
- [61] 颜长珍, 沈渭寿, 宋翔, 等. 生态环境变化对舟曲“8·8”特大山洪泥石流发生的影响分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 258–262.
- [62] 郭慧芳. 浅谈舟曲县生态环境状况及保护治理建议[J]. 农业与技术, 2015, 35(23): 67–69.
- [63] 李京忠, 曹明明, 邱海军, 等. 汶川地震区灾后植被恢复时空过程及特征——以都江堰龙溪河流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3479–3486.
- [64] 陈莉. 小流域尺度泥石流灾害风险分析[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- [65] 刘孝富, 王文杰, 李京, 等. 灾后生态恢复评价研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 527–536.
- [66] 於方, 周昊, 许申来. 生态恢复的环境效应评价研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 374–379.
- [67] 张斌, 张清明. 国内生态恢复效益评价研究简评[J]. 中国水土保持, 2009(6): 8–9.
- [68] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 等. 退化森林生态系统恢复评价研究综述[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3297–3303.
- [69] 吴丹丹, 蔡运龙. 中国生态恢复效果评价研究综述[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 622–628.

Research Advances in Ecosystem Resilience and its Application Prospect in Disaster Prevention and Reduction

LIU Xiaofu¹, JIANG Weiguo², LI Jing² and WANG Wenjie¹

(1. Institute of Environmental Information, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China ; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Resilience was widely used in ecology, economics, sociology, psychology etc. There were two relatively clear definitions of resilience in describing ecosystems. The Holling resilience, indicated the ability of a system to absorb interference without system transitions or qualitative changes; while Pimm resilience was defined as the system recovery speed and as the time required to recover to the original state after interference. Ecosystem resilience could be applied to demonstrate the current state of ecological recovery and to predict the ecological evolution in the future. It played an important role in disaster prevention and reduction. Strengthening the ecosystem resilience can reduce the risk of disaster, and the evaluation of ecosystem resilience can make post-disaster reconstruction more scientific. Three aspects are the directions of ecosystem resilience in future research: the scientific definition of ecosystem resilience driven by disaster, the evaluation indicators of disaster ecosystem resilience and the method for “absolute value” assessment of ecosystem resilience.

Key words: disaster; ecosystem; resilience; advance; prospect