

社会—生态系统综合风险防范的凝聚力模式

史培军^{1,2,3}, 汪 明^{1,3}, 胡小兵^{1,3}, 叶 涛^{1,3}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;
3. 民政部—教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 在综合风险防范“凝聚力”概念的基础上, 从社会—生态系统综合风险防范的“凝聚力”基本原理、凝聚力形成中的协同效能、凝聚力实现手段、凝聚力优化对提高系统抗打击能力的作用等方面系统研究了“凝聚力”的科学内涵, 并初步建立了“凝聚力”的模式, 以期完善现有综合风险防范理论体系。结果表明: 协同宽容、协同约束、协同放大和协同分散四个基本原理阐述了社会—生态系统综合风险凝聚力在协同运作上的四种表现, 同时也是凝聚力在“凝心”和“聚力”具体问题上的4种优化目标的阐释; 凝聚力模式将四个协同原理及其优化目标转化为社会认知普及化、成本分摊合理化、组合优化智能化、费用效益最大化等一系列手段, 实现了社会—生态系统综合风险防范产生的共识最高化、成本最低化、福利最大化以及风险最小化; 运用复杂系统建模和仿真的方法, 通过设计社会—生态系统结构和功能的表达, 验证了随着系统凝聚力的提高, 系统抵抗局部和全局打击的能力均得以增强, 而且, 可通过优化社会—生态系统中节点的结构和功能, 以达到提升系统凝聚力的目的; 凝聚力模式补充了灾害系统中脆弱性、恢复性、适应性等概念在阐释社会—生态系统综合风险防范问题上存在的缺陷。

关键词: 社会—生态系统; 风险防范; 凝聚力模式; 协同效能; 综合
DOI: 10.11821/dlxz201406012

1 引言

为了加深理解人类社会对地球系统的影响、以及应对人类面临的与日俱增的各类风险, 我们发现, “综合”一词愈来愈被不同的科学领域所使用, 如“天—地—人”系统的“综合”、社会—生态系统的“综合”、区域与全球经济发展的“综合”、防灾减灾与可持续发展的“综合”、防范风险对策中“科学—技术—管理”的“综合”, 等等。毋庸置疑, “综合”一词的使用, 不仅强调“综合”理解地球系统的复杂性, 而且更加强调从“综合”的视野寻找提高资源利用的效率和效益及防范风险的对策, 即什么样的“综合”可以提高我们认识地球系统复杂性的能力? 如何“综合”就可以明显提高资源利用的效率和效益? 为什么“综合”就可以提高人类防范社会—生态系统风险的水平?

近十年来, 学术界开始关注“社会—生态系统”和“人地复合系统”的复杂性、异质性、动态性^[1-2]和高度关联性^[3-4], 并探讨这些特征对系统可持续性造成的挑战。在全球变化科学领域, IHDP率先提出了综合风险防范(Integrated Risk Governance, IRG)的科学计划^[5-6], 指出“社会—生态系统”的风险研究需从多尺度、多维度、多利益相关者角度开展

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2014-03-09

基金项目: 国家重大科学研究计划(973)(2012CB955404); 国家自然科学基金创新研究群体项目(41321001)[Foundation: Funding from the National Basic Research Program (973), No.2012CB955404; National Natural Science Foundation Innovative Research Group Project, No.41321001]

作者简介: 史培军(1959-), 男, 陕西靖边人, 教授, 中国地理学会副理事长(S110001103M), 主要研究方向为环境演变与自然灾害。E-mail: spj@bnu.edu.cn

综合的研究,这种综合超越了原有的“多灾种—灾害链”的研究以及单一尺度下的成本效益和成本分摊的研究^[6],而强调致灾因子、孕灾环境和承灾体的一体化^[7],危险性、敏感性(稳定性)和暴露性的一体化^[8],脆弱性、恢复性和适应性的一体化^[9],地方性、区域性和全球性的一体化^[10],这样反映在防范风险、应对灾害的主体身上,强调的是上下左右协同的运作机制,以及系统结构和功能的多目标优化。然而,如何实现这一目标,如何从科学严谨的角度阐释“综合”,这就需要提出新的模式。

2 凝聚力的提出

“社会—生态系统”(传统意义上也被称为“复合人—地系统”、“人与自然复合系统”^[11])是地理学以及可持续发展科学的重要研究对象。社会生态系统被定义为社会子系统(人类子系统)、生态子系统(自然子系统)以及二者的交互作用构成的集合^[11](Gallopin, 2001),并被认为是可持续发展科学最理想的研究单元^[12]。灾害与风险系统是典型的社会—生态系统(SES)(以下简称“系统”)^[13],亦是风险防范研究的对象,包括社会子系统、经济子系统、制度子系统和生态子系统,各子系统相互关联,且紧密互动^[6]。我们曾专门撰文讨论区域灾害系统的结构体系与功能体系^[7-10, 13]。灾害系统的结构体系阐述了系统要素的构成,即孕灾环境、致灾因子、承灾体与灾情。其中,孕灾环境是区域灾害发生的综合地球表层环境,对应着社会—生态系统的全部,而致灾因子与承灾体均是其子集。致灾因子是孕灾环境中不稳定的、可在一定扰动条件下突破阈值并对承灾体形成潜在威胁的自然要素^[14]。扰动可以是内源性的,也可以是外源性的,或是内外互动性的^[14-17]。承灾体是致灾因子影响和打击的对象。灾情是打击和破坏的结果。灾害系统的功能体系阐明了灾害风险形成的过程,即灾害风险的大小由孕灾环境的不稳定性、致灾因子危险性以及承灾体脆弱性(广义)共同决定(图1)。由于孕灾环境不稳定性与致灾因子危险性在很大程度上由社会—生态系统中生态子系统的内在属性决定,即综合地球表层环境中的物理、化学、生物与人文过程决定,综合风险防范的核心问题在于如何有效提升孕灾环境的稳定性并降低承灾体子系统的脆弱性(广义)。

近年来,若干重要概念被用于描述社会—生态系统的可持续能力,包括脆弱性(Vulnerability)、恢复性(Resilience)与适应性(Adaptation)。这些概念之间彼此交叉,在不同具体的研究领域具有不同的侧重与界定^[18]。脆弱性最早源自经济学、人类学、心理学等多个学科,而人文地理学家则构建了针对环境变化的脆弱性^[19],以及针对灾害与风险的脆弱性理论^[21-22]。恢复性最早源自生态学领域^[20],曾被一些学者定义为系统应对外部压力与

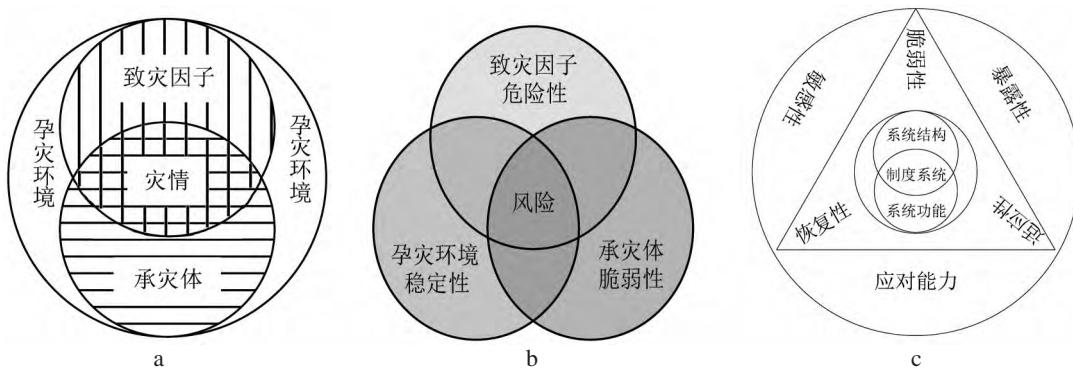


图1 区域灾害系统的结构体系(a)、功能体系(b)与承灾体脆弱性的内涵与外延(c)

Fig. 1 Regional disaster system architecture (left), functional system (middle) and exposure vulnerability connotation and denotation (right)

扰动的能力^[23], 因而也被认为与脆弱性是同一事物的两个方面^[25], 并在一些文献中被等价地使用^[29]。然而, 从系统科学角度理解的恢复性是重点表达系统从动态变化中(特别是在受到扰动和外部压力后)在一定吸引域内维持或“恢复”其结构和行动的能力^[26-27], 与脆弱性有着重要的区分。适应性表达系统针对外部环境特征的演变(如变化的条件、压力、致灾因子、风险或机遇)进行自我学习、调整与演化的能力^[28], 最早源自上世纪初的人类学研究, 而在近年来气候变化与应对领域成为了研究热点^[29]。

与此同时, 灾害风险以及全球变化风险领域的研究进展丰富了承灾体脆弱性的内涵与外延。用于描述承灾体内在属性的指标, 在狭义的脆弱性(表达系统丧失结构和功能的能力, 可用承灾体在不同致灾因子强度条件下的损失程度计量)的基础上增加了恢复性(表达系统从其动态变化中恢复的能力, 可用承灾体在遭受打击后恢复的速度与程度计量)与适应性(表达系统针对外部环境特征进行自我学习、调整与演化的能力)。

然而, 这三者之间到底是怎样的关系在当前的研究中仍然存在许多争论。系统的脆弱性、恢复性和适应性表达的是同一概念的不同方面, 还是存在互相包含的关系^[11]? 全球变化研究领域倾向于将恢复性的概念广义化, 即恢复性包含了系统应对和承受打击的能力(脆弱性)以及从打击中恢复的能力, 并特别强调系统恢复性的动态特征。在区域灾害系统研究中, 我们更倾向于将脆弱性的概念广义化, 即承灾体的广义脆弱性包含了狭义脆弱性、恢复性与适应性三者, 其中既包含系统的动力特征, 也伴随着系统的非动力特征(图1)。

敏感性、暴露性与应对能力分别是承灾体广义脆弱性在孕灾环境、致灾因子与承灾体三个方面的外延。承灾体对应某一特殊种类的致灾因子的敏感性受到局地孕灾环境特征的显著影响, 也就是通常所说的局地孕灾环境对灾情产生的放大/缩小作用。暴露性是孕灾环境中的扰动形成的致灾因子在承灾体子系统表面的投影, 承灾体对致灾因子的暴露是损失形成的前提。承灾体的敏感性与暴露性通常被用于结构化的定量评估狭义脆弱性; 敏感性与应对能力能够很好地表达承灾体子系统从扰动中恢复的能力, 即恢复性。应对是一种承灾体在灾害发生时采取的短期与临时性的系统功能改变。应对能力与适应性的关系相对较为复杂。承灾体对致灾因子的应对往往通过改变系统的暴露性实现, 而同时也会影响扰动本身, 如强度(Intensity)和作用时长(Duration)等属性。以洪水为例, 洪水来临时临时垒堤坝、转移安置群众等应对措施可以降低财产的暴露性, 但这是暂时的。一旦洪水超越这种临时设防能力, 措施失效, 被人为增高水位的洪水将更加具有破坏性, 而堤坝周边的承灾体的敏感性(如房屋抵抗洪水冲击与长时间浸泡的能力)却并未改变。应对是承灾体子系统针对外部扰动的及时性反馈, 而当这种反馈得以不断重复并被系统学习从而导致长期性的结构与功能变化时, 就形成了适应。仍以洪水为例, 将临时性增高堤坝改为永久性增高, 将转移安置更改为洪泛区退出, 应对措施就变成了适应措施。应对能力(Coping capacity)与适应能力本身存在一定的差别, 此处仅强调二者在时间尺度上的区分: 即长时间尺度的应对能力可被视作适应能力。

承灾体广义脆弱性的内涵与外延决定了主动防范风险需要在多个维度有效减轻系统脆弱性, 而减轻的能力决定于构成系统的经济、社会与制度子系统的要素, 要素之间、要素与子系统之间以及子系统的关系(系统结构), 以及由这种结构所实现的系统功能。其核心是制度系统对系统结构和功能的设计, 决定着承灾体系统的内涵(脆弱性、恢复性、适应性)和外延(敏感性、暴露性和应对能力), 这样构成了系统应对由孕灾环境和致灾因子交互作用而产生的灾害事件以及风险的整体能力。

在澄清以上诸多概念后, 一个极为重要的问题由此提出: 承灾体子系统的结构与功能应如何设计, 实现经济、社会、制度等子系统内要素之间的协同运作, 从而有效地改变脆弱性、恢复性、适应性, 降低敏感性、暴露性并提升应对能力, 进而有效地防范风险? 如

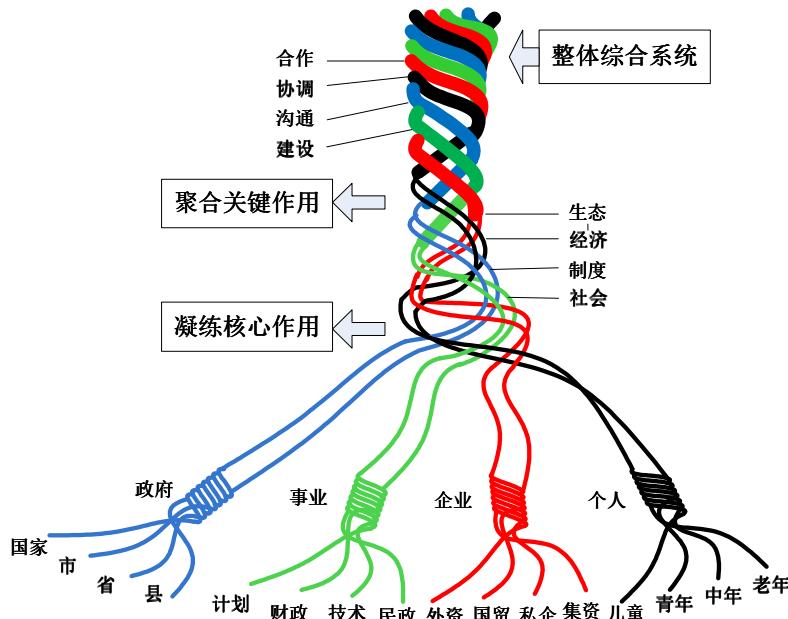
图2 社会—生态系统综合风险防范凝聚力概念模型^[31]

Fig. 2 Conceptual consilience mode of integrated risk governance for social-ecological systems

何评价系统的此类结构与功能调整与优化并降低脆弱性(广义)的能力?我们发现,目前仍然缺乏一种概念或模式来阐释这种效果或能力。应该有另一驱动力(因素)来决定整个系统是否能有效和有序地进行协同运作、实现防范风险的目标。为此我们提出,这种促使系统协同运作的驱动力为系统的“凝聚力”^[31],其英文为“Consilience”。Consilience一词最早出现于1847年Whewell W所著的The Philosophy of the Inductive Sciences^[32]一书中,尝试用Consilience来阐释科学理论构建的基础:预测、解释和各领域的统一化,强调的是综合的过程。在1998年由E.O.Wilson所著的Consilience: The Unity of Knowledge^[33]一书中,更为清晰地用Consilience一词解释知识的一体化。系统的“凝聚力”表达了系统中的各子系统、各要素、各行为主体达成共识(即“凝心”)和形成合力(即“聚力”)的能力,“凝聚力”的大小是针对凝心和聚力的过程而言,即该过程产生的效果、效率和效益。

“凝聚力”是对系统“凝心”和“聚力”能力的一种测量和表达,也是系统内在的状态属性,它与系统的“结构和功能”有关。“凝聚力”概念中“凝心”指的是系统中各相应单元达成共识的过程,而“聚力”指的是各单元形成合力的过程,达成共识和形成合力均是针对系统综合防御风险、抵抗外在打击(渐发和突发型)而言。

凝聚力的概念模型如图2所示。政府、事业、企业和个人4个均为防范风险的主体,各自在自己的维度上需进行单主体的综合,然后4个主体进一步综合,作用于社会子系统、经济子系统、生态子系统和制度子系统上,这些子系统进一步综合,形成合作、协作、沟通和共建这样一种凝聚后的综合系统,才能更好地协同运作。

3 凝聚力基本原理

凝聚力概念本质是“综合”,具体表现为系统协同运作的能力或协同性,凝聚力也是系统的一种内在属性。系统的其他属性,如脆弱性、恢复性等在提出之初,为了更好地加以解释,并与不同领域的概念进行结合,它们的概念描述往往借助力学的问题表达方式进行。本文提出凝聚力4个基本原理,借用结构工程和力学中的相应表述方法,对凝聚力原



图3 协同宽容原理示意图

Fig. 3 Collaborative tolerance schematic

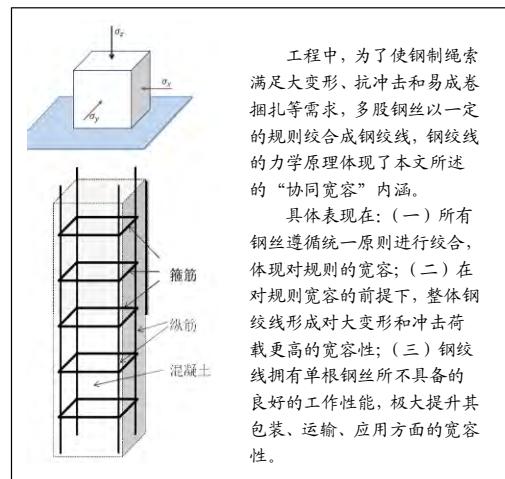


图4 协同约束原理示意图

Fig. 4 Collaborative constraint schematic

理进行阐释。

(1) 协同宽容原理

系统面临风险时,各响应单元必须产生有别于常态时的宽容性,这种宽容性使得系统作为应对风险的整体,获得比常态时更高的抗性和恢复性。如图3所示,当多股钢绞线拧在一起时,不仅使得工作性能提升,而且比单根使用获得了更多的延展性,从而整体上能够容忍更大变形,且获得更强的抗冲击能力。当“社会—生态系统”向灾害状态转入时,各个响应单元需合理地提高宽容性,容许常态时所不能接受的运作规则和合作方式,这样,才能围绕系统整体的优化目标,在灾害“转入”时能产生更高的设防能力和调整空间;同样,在灾害“转出”时,对资源分配原则、成本效益目标和区域平衡方式等的协同宽容,能让系统整体上能更有效应对灾情,并快速得以恢复。协同宽容的原理还体现在各子系统和响应主体对灾害风险“转入”和“转出”模式^[6]转换所需的宽容度,这样实现系统整体在防范风险上效率和效益的双重优化。协同宽容原理对应凝聚力中的“凝心”,它也是在系统防范风险中实现结构和功能优化的前提。

(2) 协同约束原理

由于系统应对风险的总体资源有限,每个响应单元都不可能任意地使用资源而达到局部效果的最优。从系统的角度,为了达到有限资源条件下的整体最优,往往需要对局部的单元进行资源或行为的约束,在一定的协同配置下,这种约束会对系统整体产生更为优化的风险防御能力。如图4所示,柱体由于在与竖直方向垂直的平面上进行了有效约束,使得柱体的极限承载能力得以提升。这种约束可以很容易拓展到社会—生态系统的响应单元中。当防范风险成为系统整体的目标时,单元的行为和资源在抵御风险时需进行必要的调整(约束),经济子系统和社会子系统的一些短期目标和资源需求进行必要的约束,以缓解对生态子系统的压力。这种约束虽然会抑制一些短期或局部的发展,但是从整体系统地角度而言,其可持续发展的能力得以提升,从长期角度来看,反而会促进经济等其它子系统地长足发展。协同约束原理强调约束措施的实现,而这种调整是系统达成“共识”的结果。所以,协同约束原理也对应凝聚力中的“凝心”。

(3) 协同放大原理

当响应单元间产生合力,那么共同应对风险时形成协同放大的效果。如图5所示,当构件间产生足够的摩擦力,组合后的结构的承载能力得以极大提升,而提升的效果成 n^2 倍数增加,达到“1+1>2”的放大效果。系统通过协同性的设计和优化,能极大提升系统整

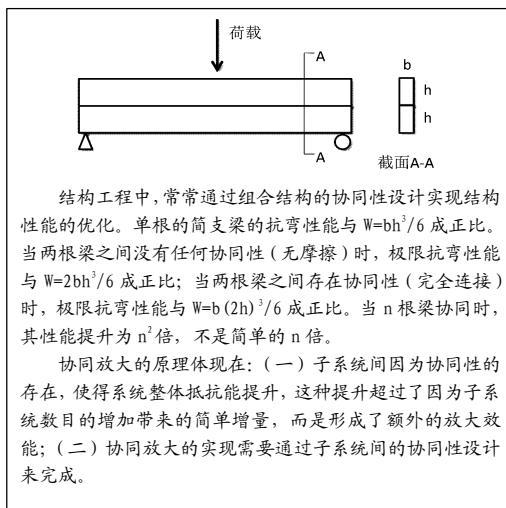


图 5 协同放大的示意图

Fig. 5 Collaborative amplification schematic

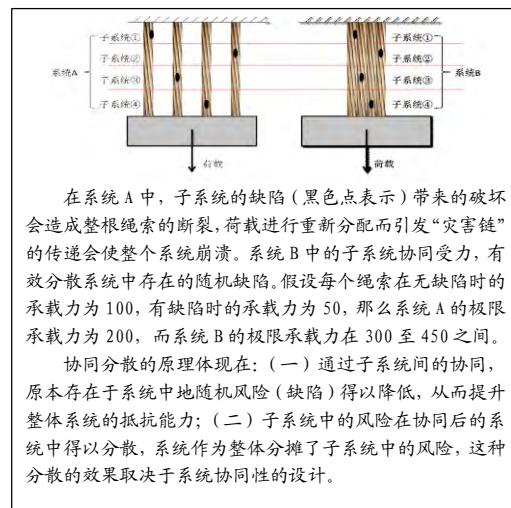


图 6 协同分散的示意图

Fig. 6 Collaborative diversification schematic

体防范风险的能力，体现各单元间通过协同机制而形成相互促进效果，从而使整体的效益得以放大，各单元间在资源配置上的协同可促进系统整体资源利用效率的提升，各单元在结构与功能优化的过程中，通过协同设计增强相互间的正向耦合作用（如绿色经济上的投入对经济增长和生态服务能力两方面都能产生正向作用），使有限的资源能在多个功能实现下达成协同增强的效果，这样能放大系统整体应对灾害风险以及从灾害事件中恢复的能力。协同放大的原理对应凝聚力中的“聚力”。

(4) 协同分散原理

由于复杂系统中各单元间存在着一定的联通性^[3]，某一子系统中的缺陷可能会形成引发系统性的风险而导致系统崩溃，协同分散的目的是将这种局部的缺陷放到整个系统中来评估，从系统的角度来转移和分摊它带来的风险。风险分散的本质就是通过时间的长度和空间的广度来化解风险在某一特定时空的聚集，而协同分散原理在此基础上增加风险在各系统单元中的分散，具体体现在系统设计时避免风险在各系统单元间的传递和扩散，同时形成系统单元间的协同力，对局部的风险源加以有效控制。所有的响应单元都存在着缺陷或薄弱点，在应对风险和外在打击时，如果每个单元都单独应对，那么，每个单元中潜在的缺陷就会暴露，一旦破坏，有可能形成系统的链式破坏反应。如图 6 所示，当系统 B 的四个单元形成合力，那么在不同的截断下，某一单元中存在的缺陷会被其它没有缺陷的单元共同分担，这样，从系统整体的角度来说，系统中可能的缺陷带来的风险被有效分散了，从而使其抵御风险的能力得以提升。协同分散原理也对应凝聚力中的“聚力”。

4 凝聚力形成中的协同效能

上述凝聚力 4 个基本原理均提及“协同”。那么，应用到系统风险防范中，“宽容”、“约束”、“放大”和“分散”均对应的“协同”效能是什么呢？

“协同宽容”原理强调系统通过协同运作，形成系统整体共识的统一，共识的形成快慢好坏，应对是否得力，是否把可能的资源都用在刀刃上，决定着防范风险具体政策和措施实行的效率和效果，即“人心齐泰山移”，“民齐者强”。协同宽容的目的是整体的共识最高。

“协同约束”原理强调通过系统的协同运作，在约束一些子系统的资源、资本和行为时，使得系统整体抵抗风险的能力增强。虽然约束的内容往往是具体的资金、资本等，但是约束的前提是各子系统或行为主体对实施约束的认知和接受程度。所以，从制度设计的角度，更多反映出的是共识的问题。协同约束的目的是系统整体防范风险目标实现的条件下所需的成本或费用最低，即“舍卒保车”，“上下同欲者胜”。例如，巨灾之后的恢复重建，虽然从各行业和地区的角度有着各自的期望和目标，但是，为了实现灾区整体的目标，各行业和地区必须在各方面做出必要的约束。

“协同放大”原理强调通过系统的协同运作，使得系统抵抗外在打击的能力增强，并且产生“1+1>2”的效果。从宏观角度来讲，协同放大的目的是使得系统中整体社会福利(Social Welfare)的最大化。例如，在农业风险防范中，政府、保险企业和农户的协同运作，通过政策性推动、财政资金补贴、农户的广泛参与以及保险资本杠杆效应，最终实现农户风险保障的极大提升，这是协同运作而产生的社会福利的放大效果，即“众人拾柴火焰高”。

“协同分散”原理强调通过系统的协同运作，使得系统成为一个协作的整体后，原本各子系统所面临的风险在这个整体面前得以有效分散，使整体风险降低。协同分散的目的是使得系统整体的风险最小化。例如，在防范气候变化引致的环境风险时，各行业均面临着未来气候变化可能产生的不良影响，如农业、能源产业、供水业、健康服务业等各自风险的规模和特征差异明显，那么，当各行业协同运作共同防范风险，使得各自的风险在时间和空间上得以分散。同时，行业间的资源、资本和技术的连通与共享，可以使得原本在某一行业凸现的风险得以减缓，但更重要的是作为协作整体风险的降低，即“一根筷子轻折断，十双筷子抱成团”。

凝聚力理论的4个协同原理，是针对社会—生态系统综合风险防范而提出，具有一定的普适性，是对生态系统中的“共存”、制度系统中的“共识”、社会系统中的“共生”、以及经济系统中的“共赢”的阐释，但更加强调“共存、共识、共生、共赢”这些结果产生的过程，即“凝心”和“聚力”形成的过程。这里需要强调的是：协同的目的是为了提升系统的凝聚力，以有效防范风险，然而，协同的过程中各子系统或响应单元需要一定程度上进行结构和功能的调整，这种调整可能会在局部产生新的风险因素，进而在高度关联和紧密互动的社会—生态系统中得以“传递、累积和放大”，最终可能引起系统性的灾难；这种过程往往会有潜在、渐变和长期性的，在短时间难以显现，所以更需要关注这种协同过程中的新风险因素，以提升系统的可持续能力。

5 凝聚力模式

依据以上基本原理，本文提出了社会—生态系统综合风险防范的凝聚力模式，如图7所示。围绕社会—生态系统综合风险防范的目标，应用系统协同宽容、协同约束、协同放大和协同分散原理，通过社会认知普及化、成本分摊合理化、组合优化智能化、费用效益最大化等一系列手段，实现系统综合风险防范形成共识的最高化、成本最低化，以及福利最大化、风险最小化。这一过程的完成，必须通过系统结构和功能的改变，并采取相应的适应措施来实现，而这些措施得益于制度结构和功能的调整。凝聚力是评价社会—生态系统综合风险防范的基本变量，凝聚力的最大化提升是综合风险防范、协同运作以及系统结构和功能优化的目标，而制度设计是实现这一过程和完成这一目标的核心。

在此模式中，从协同的目标到产出并非单一的过程，以制度设计为核心产出的综合风险防范，需要不断再回到提升社会—生态系统凝聚力的目标上，构建再调整与优化的流程，以评价整体和局部的协同效能和效果、关注制度调整后可能产生的新的风险因素及其

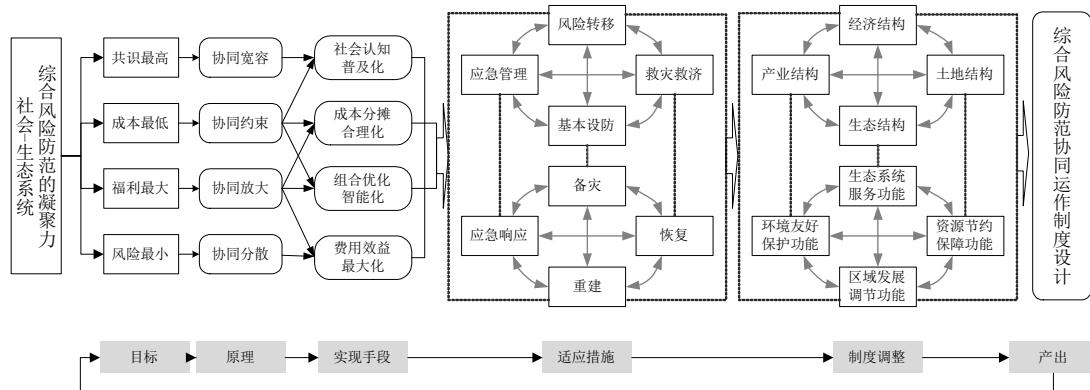


图7 社会—生态系统综合风险防范的凝聚力模式

Fig. 7 Consilience mode of integrated risk governance for social-ecological systems

对调整与优化后的社会—生态系统的影响。这一循环模式强调的是社会—生态系统动态的自我完善和演化，以更好适应自然、人文等因素的变化，特别是这一过程中不断涌现的传统的和新兴的风险因素，尤其是各种突发的或渐发的极端事件。

6 凝聚力优化对提高系统抗打击能力的作用

受社会—生态系统中“凝心聚力”现象的启发，我们运用复杂系统网络的研究方法建立了系统凝聚力的定量化表达，提出了网络系统凝聚力的概念，用以综合考虑网络拓扑结构和结点功能对系统抵抗干扰（灾害）能力的非动力学特性和贡献^①。该研究中关于凝聚力的理论和仿真研究表明，凝聚力是一种更普遍化意义的联结度（联结度概念是现有的复杂网络系统理论体系的基石^[34-35]），是和联结度一样具有基础性和普适性的网络属性。该研究在提出凝聚力概念的基础上，又从“凝心”和“聚力”两个方面，进一步扩展了邻域凝聚系数、全局凝聚系数和凝聚聚合系数等一系列全新的、重要的复杂网络系统属性，开发了凝聚度选择联结和凝聚度优化等一套网络系统模型，从而形成了一个以凝聚度概念为基础的、研究诸如社会—生态系统这样的复杂网络系统的全新的、有效的理论体系雏形。

该研究中的凝聚力理论源于社会—生态系统中的“凝心与聚力”现象，本节将凝聚力理论应用到社会—生态系统中，通过计算机仿真实验，来研究凝聚力对提高系统抗打击能力的效果，以期回答“当诸如社会—生态系统这样的复杂网络系统的凝聚力增强时，是否能更好地抵御外来打击所造成的灾害风险”这一重要问题。本节中将用到该研究中的大量概念和模型，由于篇幅所限，相关细节在文中不再赘述，这里仅作简要论述。

假设一个网络系统，有 N_v 个结点和 N_e 条链接。每个结点都有自己的结点功能。各结点的功能可以不同，但所有结点功能都是要为同一特定的系统功能服务。结点间的功能会通过网络拓扑结构而相互影响。就服务于同一特定的系统功能而言，当两个结点连接到一起时，它们的结点功能可能相互促进提升，也可能相互干扰掣肘。所以，引入一个“功能相位”的概念。每个结点都有各自的功能相位，记结点 i 的功能相位为 θ_i , $\theta_i \in \Omega_\theta$, $i = 1, \dots, N_v$, Ω_θ 是功能相位的取值范围。功能相位可代表的实际物理意义非常广泛，例如：信号的同步程度、设备的兼容性、合作意愿、社会价值、个人态度、文化差异，等等，这些实际因素在各自的网络系统中，对决定系统的整体性能，都起着至关重要的作用。

^① 胡小兵, 史培军, 汪明 等. “凝聚力: 描述社会—生态系统抗干扰能力的一种新特性”. 中国科学: 信息科学, 已录用待刊中, 2014.

然后引入一个相位差函数:对相互连接的两个结点*i*和*j*,函数 $f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j)$ 将根据它们的功能相位 θ_i 和 θ_j 来计算它们互补或干扰的程度。虽然相位差函数 $f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j)$ 的具体形式可以视问题而定,但应该满足以下几个条件:①对取值范围 Ω_θ 里的任意两个相位值 θ_i 和 θ_j ,总有 $-1 \leq f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j) \leq 1$;②当 $\theta_i = \theta_j$ 时,有 $f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j) = 1$;③ $f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j)$ 是关于 $\theta_i = \theta_j$ 对称的;④存在一个 $\Delta\theta > 0$,对任何满足 $|\theta_i - \theta_j| \leq \Delta\theta$ 的 θ_i 和 θ_j , $|f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j)|$ 是 $|\theta_i - \theta_j|$ 的非增函数。在本节中,将用余弦函数“cos”来定义相位差函数 $f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j)$ 。

基于上述准备,网络系统中结点*i*的凝聚度就可以定义如下:

$$c_{CD,i} = \sum_{j=1}^{k_i} f_{\text{d}\theta}(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

式中: k_i 是结点*i*的联结度。由(式1)可知,如果一个结点连接到越多的具有越相似功能相位的其它结点,则其凝聚度就越大。因为 $-1 \leq f_{\text{d}\theta}(\theta_i, \theta_j) \leq 1$,所以 $-k_i \leq c_{CD,i} \leq k_i$ 。当结点*i*与其所连接的 k_i 个结点具有完全相同的功能相位时,其凝聚度就等于其联结度。所以,凝聚度可以看作是一种被普遍化了的联结度,然而却包含了联结度所无法表述的意义。换而言之,联结度只是凝聚度的一种特例。显然,联结度 k_i 大并不意味着凝聚度 $c_{CD,i}$ 就大。如果与结点*i*相连的所有结点在功能上都是与结点*i*完全相冲突的,那么联结度 k_i 越大,只会导致凝聚度越小,传统的结点联结度 k_i 是无法区分上述的不同情形。凝聚度 $c_{CD,i}$ 是一个全新的描述网络系统抵抗外来打击的能力的重要特性。下面用仿真实验来进一步证明凝聚度的意义。

为研究系统抵抗外来打击的能力,需要定义在外来打击下,网络系统结点间的相互作用。本研究中,定义了两类系统结点间的相互作用:相互救助模式和相互替代模式。在相互救助模式下,当一个结点受到外来打击时,其原有功能将全部丧失,这时和其连接的其他未受打击的结点会向其输送资源已帮助其恢复部分功能,其他未受打击的结点在输送资源的同时,自身的原有功能将会相应衰减。在相互替代模式下,当一个结点受到外来打击时,其原有功能将也会全部丧失,这时和其连接的其他未受打击的结点不会帮助其恢复功能,而是会相应提高自身功能,以便弥补系统因受外来打击而丧失的部分功能。无论是相互救助模式还是相互替代模式,施援结点所给与受灾结点的援助量,都需要乘以两结点间的相位差函数值,才能转换成受灾结点实际接收到的援助(对于两个相互冲突的结点,受灾结点实际接收到的将是来自施援结点的干扰或破坏)。受打击结点的比例由RofF表示,体现了外来打击的强度。比如,RofF = 0.5表示外来打击直接使50%的结点丧失原有功能。

首先研究各类网络系统抗打击能力的差异。为此,我们构造了六类网络系统。其中两类是基于传统联结度的网络模型,分别是随机连接网络模型^[36](简称NDRC)和选择性连接网络模型^[37](简称NDPA)。另外4类系统,都是研究中提出的凝聚度网络模型,分别为基于结点间功能相位差的网络模型(简称CDPD),凝聚度选择性连接网络模型(简称CDPA),凝聚度全局优化网络模型(简称CDGO)和凝聚度局部优化网络模型(简称CDLO)。关于这些网络模型的细节,读者可参考相应文献^①。简单地说,模型NDRC和NDPA没有考虑凝聚度,所生成的网络平均凝聚度基本为零。而模型CDPD、CDPA、CDGO和CDLO都进行了凝聚度设计,因而它们所生成的网络系统的平均凝聚度都比较大。只是它们各自的设计方法不一样,其中模型CDGO和CDLO的平均凝聚度总体来说比CDPD和CDPA还要大。实验中,每类网络模型各生成100个网络系统。每个网络系统的结点总数为100,结点间联结总数为400。然后,对各个网络系统分别在相互救助模式和相互替代模式下施以不同程度的外来打击,并观察记录系统受打击后的结点总体功能水平。相关仿真实验的平均结果如图8和图9所示。可见,不论在相互救助模式下,还是在相互替代模式下,不论在何种外来打击的强度下,凝聚度网络模型的抗打击能力都比传统

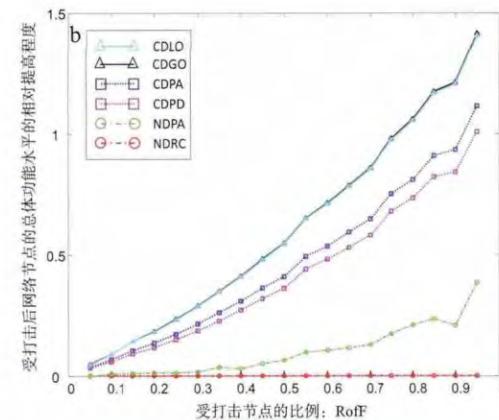
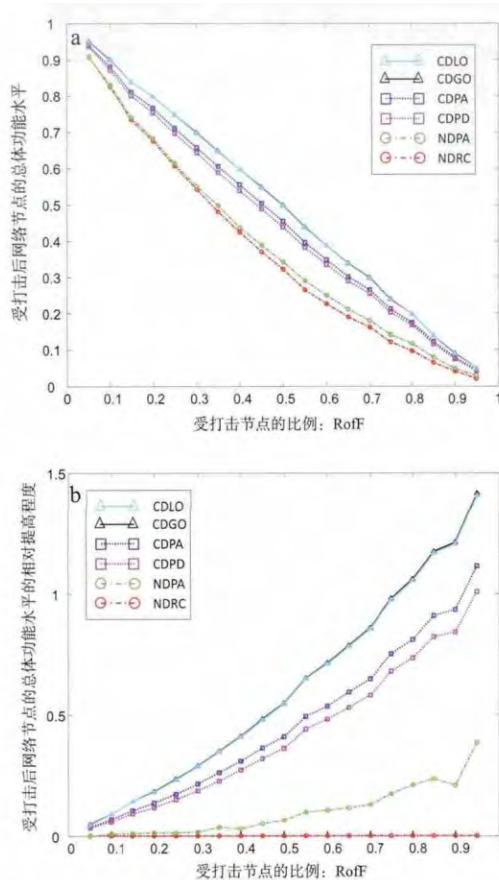


图8 相互救助模式下，各类网络模型的系统抗打击能力 (a. 各类网络模型的抗打击能力; b. 凝聚力网络模型提高系统抗打击能力的程度)

Fig. 8 The anti-strike capacity of various network models under the mutual aid mode (a. The anti-strike capacity of various network models; b. Consilience network model to improve the anti-strike capacity of system)

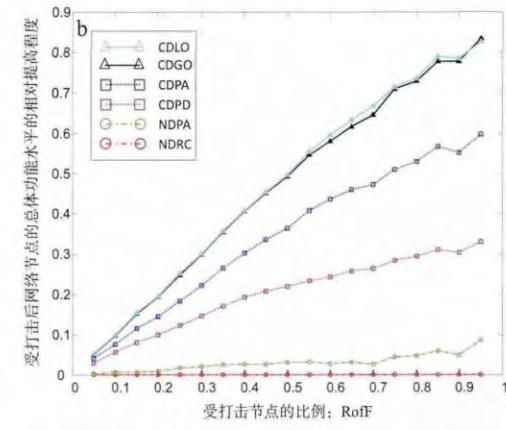
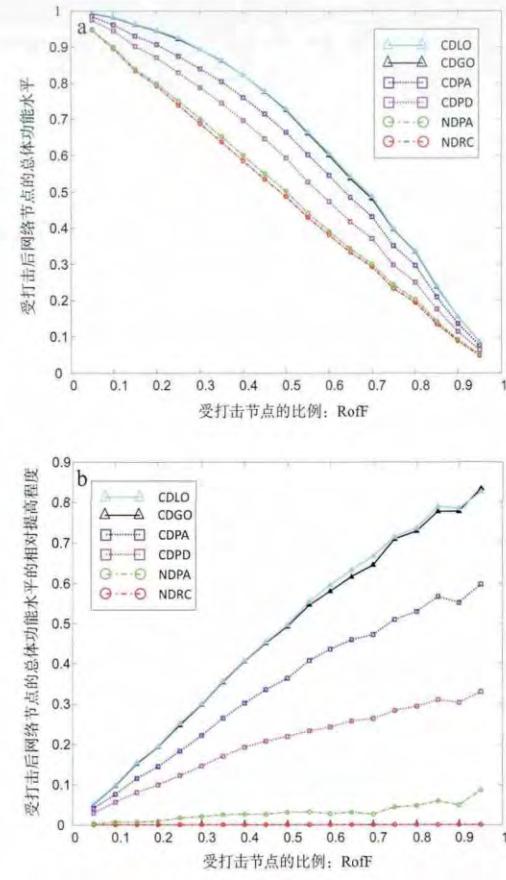


图9 相互替代模式下，各类网络模型的系统抗打击能力 (a. 各类网络模型的抗打击能力; b. 凝聚力网络模型提高系统抗打击能力的程度)

Fig. 9 The anti-strike capacity of various network models under the replacement mode (a. The anti-strike capacity of various network models; b. Consilience network model to improve the anti-strike capacity of system)

联结度网络模型好，其中凝聚度优化模型CDGO和CDLO的抗打击能力是最好的。同时，从图8和图9还可以看出，不论在相互救助模式下，还是在相互替代模式下，在外来打击的强度越强的情况下，凝聚度网络模型相对于传统联结度网络模型而言，提高系统抗打击能力的效果就越明显，其中凝聚度优化模型CDGO和CDLO对提高系统抗打击能力的程度是最高的。

接下来进一步研究，在凝聚度局部优化网络模型CDLO中，不同的优化设计程度对系统抗打击能力的影响。这里优化设计程度是由按凝聚力优化的结点的比例来表示的。该比例为0表示没有进行凝聚力优化设计，和传统联结度网络模型完全没有区别；该比例为1表示所有结点都进行了凝聚力优化设计。所以，该比例越接近于1，则表示用CDLO生成的网络系统的凝聚度越高。对按不同优化设计程度生成的网络系统，再施加以不同程度的外来打击。然后，比较研究各网络系统受打击后的总体功能水平。仿真结果如图10和图11所示。

显而易见，不论在相互救助模式下，还是在相互替代模式下，不论在何种外来打击的

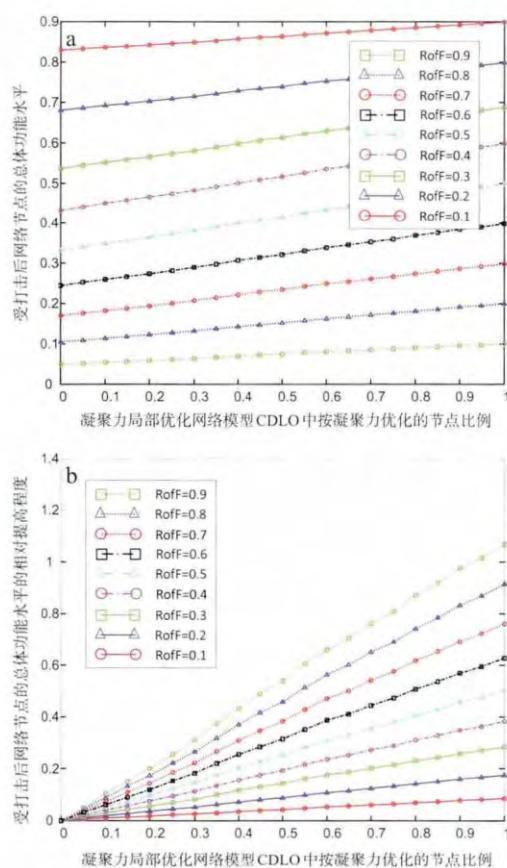


图10 相互救助模式下,凝聚力优化设计对提高系统抗打击能力的影响 (a. 受打击后网络结点的总体功能水平; b. 总体功能水平的相对提高程度)

Fig. 10 Consilience system optimization design to improve the anti-strike capacity of system under the mutual aid mode (a. Overall node functioning level after strike; b. Relative improvement in overall node functioning level)

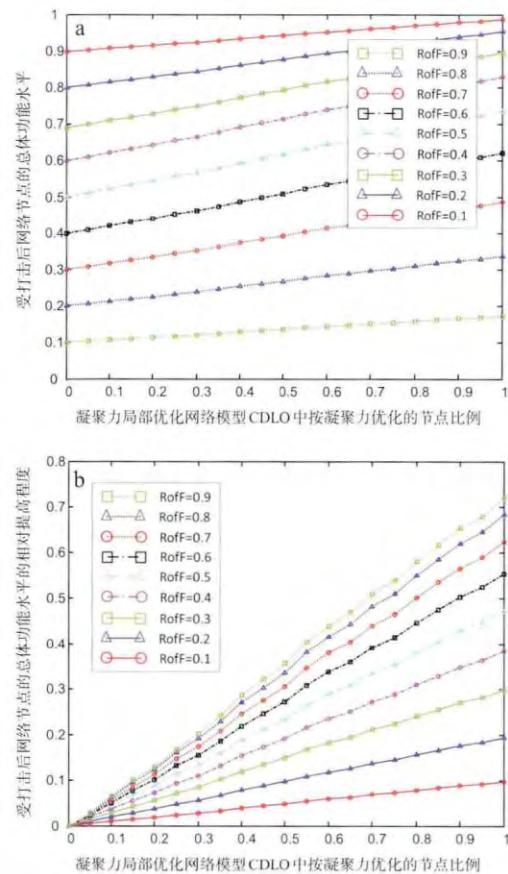


图10 相互救助模式下,凝聚力优化设计对提高系统抗打击能力的影响 (a. 受打击后网络结点的总体功能水平; b. 总体功能水平的相对提高程度)

Fig. 11 Consilience system optimization design to improve the anti-strike capacity of system under the replacement mode (a. Overall node functioning level after strike; b. Relative improvement in overall node functioning level)

强度下,随着优化设计程度的提高,所生成的网络系统的抗打击能力也得到稳步提高。图10和图11更表明,凝聚力优化设计对提高系统抵抗高强度外来打击的能力尤其重要,因为对提高系统抗打击能力的程度是最显著的(例如,在相互救助模式下,当90%的结点都直接受到外来打击时,凝聚力优化设计可以将系统总体功能水平在传统联结度网络模型的基础上提高1倍以上),这就客观解释了社会—生态系统的抵御应对巨灾更需要整合资源,突出优势,形成凝聚力。

需要强调指出的是,虽然本节仿真实验中使用的是抽象的网络系统,但很容易将其对应或扩展到实际物理系统。例如,具有不同功能相位的结点反映了社会—生态系统的个体多样性。在结点功能相位给定的前提下,不同的网络模型生成的系统具有不同的网络凝聚度,这就说明,即使在个体多样性相同的条件下,应用不同的机制和体制来设计或调整社会—生态系统的结构与功能,最终所达到的系统抗干扰能力是大不相同的。至此,通过本节的仿真实验研究,可以看出,一个社会—生态系统如果达到较高“凝心聚力”状态与特性,就能具有较强的综合风险防范的能力。

7 结论与讨论

传统的灾害风险理论中，缺乏一种表达系统通过自身结构和功能的调整以有效防范风险的能力，这种调整是个动态的过程，与传统理论中的脆弱性、恢复性、适应性等紧密相连。本文提出了凝聚力的原理，用以阐释社会—生态系统综合防范风险时形成共识和产生聚力的过程，以及达到“凝心”和“聚力”目标的能力。凝聚力模式的提出，进一步揭示了促使社会—生态系统有效和有序协同运作的驱动力。协同宽容、协同约束、协同放大和协同分散4个基本原理揭示了系统凝聚力在协同运作上的4种表现，同时也是凝聚力在“凝心”和“聚力”具体问题上的4种优化目标的阐释。综合风险防范理论体系强调了以制度设计为核心的系统结构与功能的优化，凝聚力模式将4个协同原理及其优化目标转化为社会认知普及化、成本分摊合理化、组合优化智能化、费用效益最大化等一系列手段，以实现综合风险防范产生的共识最高化、成本最低化、福利最大化以及风险最小化。这一过程的完成，必须通过社会—生态系统结构和功能的改变从而采取相应的适应措施，这些措施得益于制度结构和功能调整的保障，也得益于该模式中强调的从“目标”到“产出”再到“目标”的循环调整与优化过程。

本文运用复杂系统建模和仿真的方法，通过设计网络系统结构和功能的表达，验证了随着系统凝聚力的提高，系统抵抗局部和全局打击的能力均得以增强，而且，可通过优化社会—生态系统系统中节点的结构和功能，从而达到提升社会—生态系统综合风险防范凝聚力的目的。

社会—生态系统凝聚力是复杂系统自身的一种属性，它阐释的是社会—生态系统进行协同运作的能力，在灾害风险系统中，表现出的是系统综合风险防范的能力，强调的是综合的过程及效果。社会—生态系统凝聚力的最大化提升是综合风险防范、协同运作以及社会—生态系统结构和功能优化的目标，而制度设计是实现这一过程和达成多目标优化的核心。凝聚力模式的提出，为社会—生态系统综合风险防范中的“综合”与“协同”寻找出一种可量化的途径和一种进行复杂问题探究的新思路。

参考文献 (References)

- [1] Liu J, Dietz T, Carpenter S R et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317: 1513-1516.
- [2] Elinor Ostrom. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(419), doi: 10.1126/science.1172133.
- [3] Young O R, Berkhout F, Gallopin G et al. The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 304-316.
- [4] Helbing D. Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 2013, 497: 51-59.
- [5] Shi Peijun, Li Ning, Ye Qian et al. Research on global environment change and integrated disaster risk governance. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 428-435. [史培军, 李宁, 叶谦等. 全球环境变化与综合灾害风险防范研究. 地球科学进展, 2009, 24(4): 428-435.]
- [6] Shi Peijun, Carlo Jaeger. Integrated Risk Governance: IHDP- Integrated Risk Governance Project Series. Beijing: Beijing Normal University Press, 2012. [史培军, 耶格·卡罗. 综合风险防范: IHDP综合风险防范核心科学计划与综合巨灾风险防范研究. 北京: 北京师范大学出版社, 2012.]
- [7] Shi Peijun. Theory and practice of disaster research. *Journal of Nanjing University*, 1991(Special Issue): 37-42. [史培军. 灾害研究的理论与实践. 南京大学学报, 1991(专刊): 37-42.]
- [8] Shi Peijun. Disaster system research theory and practice in a second time. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(4): 6-17. [史培军. 再论灾害研究的理论与实践. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.]
- [9] Shi Peijun. Disaster system research theory and practice in a third time. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(3): 1-9. [史培军. 三论灾害系统研究的理论与实践. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.]
- [10] Shi Peijun. Disaster system research theory and practice in a fourth time. *Journal of Natural Disasters*, 2005, (6): 1-

7. [史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7.]
- [11] Gallopín G C, Funtowicz S, O' Connor M et al. Science for the 21st century: From social contract to the scientific core. International Social Science Journal, 2001, 168: 219-229.
- [12] Gallopín G C. Human dimensions of global change: Linking the global and the local processes. International Social Science Journal, 1991, 130: 707-718.
- [13] Shi Peijun. Disaster system research theory and practice in a fifth time. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 1-9. [史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 1-9.]
- [14] Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14), 8074-8079.
- [15] Oran R Young. Institutional dynamics: Resilience, vulnerability and adaptation in environmental and resource regimes, Global Environmental Change, 2010, 20(3): 378-385..
- [16] Kasperson J X, Kasperson R E, Turner II B L et al. Vulnerability to global environmental change//Kasperson, J X, Kasperson R E. Social Contours of Risk. Vol. II. London: Earthscan, 2005: 245-285.
- [17] van der Leeuw S E. 'Vulnerability' and the integrated study of socio-natural phenomena. IHDP Update 2/01, art. 2 [online]. URL: http://www.ihdp.uni-bonn.de/html/publications/update/IHDPUpdate01_02.html, 2001.
- [18] Marco A Janssen, Elinor Ostrom, Resilience, vulnerability, and adaptation: A cross-cutting theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, Global Environmental Change, 2006, 16(3): 237-239.
- [19] Adger W N. Vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 268-281.
- [20] Gilberto C Gallopín, Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 293-303.
- [21] Burton I, Kates R W, White G F. The Environment as Hazard. New York: Guilford, 1978.
- [22] Blaikie P, Cannon T, Davis I et al. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. London: Routledge, 1994.
- [23] Adger W N. Social and ecological resilience: are they related? Progress in Human Geography, 2000, 24(3): 347-364.
- [24] Adger W N, Hughes T P, Folke C et al. Social-ecological resilience to coastal disasters. Science, 2005, 309 (5737): 1036-1039.
- [25] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T et al. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. Report for the Swedish Environmental Advisory Council 2002: 1. Ministry of the Environment, Stockholm, Sweden, 2002.
- [26] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems. Nature, 1984, 307(26): 321-326.
- [27] Holling C S. Engineering resilience versus ecological resilience//Schulze P C. Engineering within Ecological Constraints. National Academy Press, Washington, DC, 1996: 31-43.
- [28] Barry Smit, Johanna Wandel. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16 (3): 282-292.
- [29] Adger W N, Arnell N W, Tompkins E L. Adapting to climate change: Perspectives across scales. Global Environmental Change, 2005, 15(2): 75-76.
- [30] Shi Peijun, Wang Jing'ai, Chen Jing et al. The Future of Human-Environment Interaction Research in Geography: Lessons from the 6th Open Meeting of IHDP. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(2): 115-126. [史培军, 王静爱, 陈婧等. 当代地理学之人地相互作用研究的趋向: 全球变化人类行为计划 (IHDP) 第六届开放会议透视. 地理学报, 2006, 61(2): 115-126.]
- [31] Shi Peijun, Ye Qian, Han Guoyi et al. Living with global climate diversity: Suggestions on international governance for coping with climate change risk.. International Journal of Disaster Risk Science, 2012, 3(4): 177-183.
- [32] Whewell W. The Philosophy of the Inductive Sciences. New York: Johnson Reprint Corp, 1847.
- [33] Wilson E O. Consilience: The Unity of Knowledge. Vintage Books USA, 1999.
- [34] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y et al. Complex networks: Structure and dynamics. Phys. Rep., 2006, 424: 175.
- [35] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, 2002, 74: 47.
- [36] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 1998, 393(440).
- [37] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999, 286(5439): 509-512.

Integrated risk governance consilience mode of social-ecological systems

SHI Peijun^{1, 2, 3}, WANG Ming^{1, 3}, HU Xiaobing^{1, 3}, YE Tao^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University,
Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University,
Beijing 100875, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education,
Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the concept of 'consilience' in integrated risk governance, this paper aims to develop scientific meanings of consilience in a systemic manner from the perspectives of fundamental principles, synergistic efficacy, operational means, and optimization process to improve a system's robustness to resist external disturbs. This paper proposed a new consilience mode for the purpose of complementing the existing theoretical system of integrated risk governance. The results presented in this paper show that the four proposed synergistic principles (tolerance, constraint, amplification and diversification) can well describe the characteristics of consilience in integrated risk governance of a socio-ecological system. The principles set four optimization goals in terms of 'consenting in minds' and 'gathering in force' in the consilience theory. The consilience mode demonstrates how the synergistic principles and their optimization goals are converted into a series of tasks including the popularization of social perception, the rationalization of cost allocation, the systemization of optimization and the maximization of cost benefit. With implementation of all these tasks, the consensus and social welfare can be maximized while the cost and risk can be minimized in the integrated risk governance of the socio-ecological system. The modeling and simulation results show that a complex network system's robustness can be improved with increased system consilience when facing local or global disturbs. Moreover, this kind of improvement can be achieved by optimizing the structure and function of nodes in a socio-ecological system. The consilience mode also complements current disaster system theory in which the concepts of vulnerability, resilience and adaptation may face limitation of addressing integrated risk governance problems in a socio-ecological system.

Key words: socio-ecological system; risk governance; consilience mode; synergistic efficacy; integration