

第 11 章

论人类-自然耦合系统*

摘 要

人类与自然持续的相互作用,导致人类-自然耦合系统(coupled human and natural systems, CHANS)的形成和发展。近期的研究揭示了 CHANS 在组织、空间和时间上耦合的复杂性。这些耦合趋向于从直接向间接作用、从近距离向远距离联系、从局部到全球以及从简单到复杂的模式和进程发展。弄清楚其复杂性,如相互影响和新质(emergent property),将会带来非同寻常的科学发现。同时,对建立有效的生态和社会经济可持续政策具有重要意义。真正融合不同学科以解决 CHANS 根本问题,并迎接社会前所未有的挑战的时机正趋于成熟。

11.1 前言

人类-自然耦合系统(CHANS)是人类与自然界组成成分相互作用的系统。虽然有史以来,人类一直与自然和环境相互作用,但是自工业革命以来,这些相互作用的范围和强度显著增加。从历史上看,尽管发生了一些大规模的人类迁徙和其他主要的人类活动,如贸易和战争,但大多数人类与自然的相互作用发生在局部范围。目前,区域性、洲际性和世界范围的人类与自然系统的相互作用因为人类活动的全球化而引起人们的特别关注。

虽然人们早已认识到人类与自然的相互作用(Marsh, 1864; Thmoas, 1956; Turner et al., 1990; McDonnell et al., 1993; Vitousek et al., 1997; Diamond, 1997; National Research Council, 1999; Odum, 1971; Ma & Wang, 1984),但是关于这些相互作用的复杂模式和进程却没有得到很好的描述,更不用说完全理解了

* © (2009) Royal Swedish Academy of Sciences, *AMBIO* 36:8 by Liu et al.

Reprinted by permission of Allen Press.

From [Jianguo Liu, Thomas Dietz, Stephen R. Carpenter, Carl Folke, Marina Alberti, Charles L. Redman, Stephen H. Schneider, Elinor Ostrom, Alice N. Pell, Jane Lubchenco, William W. Taylor, Zhiyun Ouyang, Peter Deadman, Timothy Kratz, and William Provencher. 2007. Coupled Human and Natural Systems. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. Volume 36, Issue 8. pp. 639-649].

(Liu et al., 2007; Schneider & Londer, 1984)。社会科学和自然科学的传统研究为目前对 CHANS 的研究奠定了基础。然而社会科学家往往侧重于人类相互作用,忽视环境背景的作用或认为环境影响是一个常量。而生态学家历来则侧重于没有受人类影响的环境,在这种环境中人类是一个外在因素并很难占主导地位。尽管单学科理论研究对促进人类和自然系统许多方面的单学科认识起着重要作用,但是在解释社会生态和人类环境之间的相互作用时(Low et al., 1999; Redman, 1999; Kinzig, 2001; Gunderson & Holling, 2001; Rosa & Dietz, 1998),这种分别研究人类和自然系统的方法很难奏效。

在逐渐增加的许许多多的跨学科研究项目中,人们已经认识到,必须形成一种新的综合性框架用于研究 CHANS 的重要性(表 11.1)。这些项目远远超出了一二十年前生态和社会科学研究的普遍认知。人类和自然已不再被看成是分离的,而被看做是连接的并且是在相互作用网中相互包含的实体。例如,千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, 2005)明确地综合了社会和生态系统,通过分析 24 个生态系统服务功能的全球现况、发展趋势和前景提出 70 多个政策手段,对全球的社会和生态问题进行了阐述。CHANS 的研究成果已在多家刊物发表,尤其是一些跨学科期刊(如人类环境杂志)(Chapin et al., 2006; Folke et al., 2002; Folke et al., 1997; Lebel, 2002)。

CHANS 科学借鉴并超越了先前的研究(如人类生态学、生态人类学和环境地理学)。首先,CHANS 侧重于研究联系人类和自然系统的模式和过程。其次,CHANS 的研究,如气候变化综合评估(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006),强调相互作用和反馈,即环境对人类的影响和人类对环境的影响。再次,CHANS 的研究理解人类和自然各尺度内及其各尺度之间的相互作用(如大尺度上的现象是局部的多种因素相互作用的结果,同时影响局部系统),这是一项重大的挑战。虽然以上三方面都展开了一些研究(Stern, 1993; Stern et al., 1992),但是 CHANS 提倡将各方面的研究加以整合。这种整合需要解决 CHANS 日益增加的复杂性,有助于防止由于全新和快速变化可能导致的各种严重后果。人类-自然耦合变化的规模、程度和速度在过去几十年来都是空前的。人类对自然的影响日益严重,很可能导致自然系统的退化和崩溃,反过来又将损害人类的适应和生存能力。因此,为认识人与自然相互作用的复杂性,建立一种着重于系统综合框架和整体研究的方法和模式是紧迫而值得优先考虑的事情(Liu et al., 2007; Stern et al., 1992; Michener et al., 2001; van der Leeuw & Redman, 2002; Costanza et al., 1993; Berkes & Folke, 1998)(表 11.1)。

本文综合介绍了 CHANS 复杂的组织耦合(组织级别间)、空间耦合(跨越空间)以及时间耦合(跨越时间)的主要特征。为阐述研究这些复杂特征的实际价值,我们讨论了它们对可持续环境及自然资源管理和治理的影响。为了引导今后的研究工作,本文还列举了 CHANS 研究中的几个主要机遇和挑战。由于篇

幅有限以及本文有些问题在相关文章中已经讨论,本文中一些讨论力求简明扼要。但是本文力图把所有相关的重要问题放在一起讨论,给读者提供一个关于 CHANS 的复杂性、意义和前景之间关系的全方位观点。

表 11.1 研究人类 - 自然耦合系统的代表性项目

项目名称	自然 - 人类耦合系统动态	Beijer 国际生态经济学研究所	恢复力联盟	政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	千年生态系统评估
重点关注	不同空间、时间和组织尺度人类和自然之间复杂的相互作用	生态经济学	为揭示可持续性原理而研究复杂适应系统的动态	通过对科学、技术和社会经济信息进行评估,理解气候变化及其影响,选择应对和缓解的策略	评估生态系统变化的状况和结果的国际项目,其目的是评估人类福利和对这些选择权变化的响应
主要资金来源	美国国家科学基金会	Kjell 和 Matra Beijer 基金	各种私人基金的资助	世界气象组织和联合国环境项目	多种来源
项目时间	2000 至今	1991 至今	1999 至今	1988 至今	2001—2005
信息来源	http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/fund-biocomplex.cfm	http://www.beijer.kva.se/	http://www.resilience.org	http://www.ipcc.ch/	http://www.MAweb.org

注:这个列表省略了许多对理解人类 - 自然耦合系统具有重大意义的局部、区域、国家和全球性的项目(如臭氧层空洞,格陵兰岛融化,墨西哥湾流中断,河流、冰、植物和动物生物物候学的世界性转变)。

11.2 组织耦合

11.2.1 相互影响和反馈

人类与自然的耦合可以看做相互嵌套的等级结构实体 (Gunderson & Holling, 2001; Allen & Starr, 1982)。在 CHANS 中,人类与自然跨越不同组织水平相互作用 (Pickett et al., 2005)。它们形成一个复杂的嵌入对方相互作用的网络。

人类依赖自然提供的一系列生态系统服务 (Daily, 1997; Odum, 1989), 其中包括饮用水、清新的空气、有营养的食品、原材料和药品。由于人类活动或不作

为,人类所依赖的自然界的许多方面和过程已经受到威胁或已经消失(Millennium Ecosystem Assessment,2005)。例如,人类已显著地改变了1/3~1/2的陆地表面(Vitousek et al.,1997)。人类可得到的一半以上的地表淡水已被利用(Postel et al.,1996),并且造成地下水的供应正日益不足。捕鱼对大型海洋鱼类的数量有着显著的影响(Myers & Worm,2003)。通过人类有意和无意的引入,入侵物种在数量上不断增加,空间上不断扩大。人类的活动(如土地、海水和淡水的利用)显著地改变了地表覆盖、生物地球化学和水文循环,甚至改变了气候系统(Vitousek et al.,1997;Intergovernmental Panel on Climate Change,2006;Millennium Ecosystem Assessment,2005;Foley et al.,2005)。现在人类影响极其普遍,以至于在很大程度上改变了许多其他物种进化的轨迹(Palumbi,2001)。即便已经明显缓解受人类影响的地区,如保护地(像自然保护区),也是人类决策的结果,并且受到人类干扰全球响应(如气候变化)的影响。经济发展为人类带来巨大的利益,在改善人类福祉的同时(Millennium Ecosystem Assessment,2005),由于不恰当活动获取的收益(如生态系统服务的低估和过度开采)也给人类增加了风险,并削弱了许多人类生存和发展所必需的生态系统服务(Daily,1997;Odum,1989)。为了降低某些生态系统服务的损失,人类曾试图用工程方法予以弥补(例如水产养殖或为湿地筑堤防),达到恢复失去的生态系统服务功能的目的(例如为了保持养分和水分而植树,增加本地树种覆盖率以抵御外来物种的入侵等(Prober et al.,2005))。然而,恢复生态系统服务的花费可能比在开始时进行预防的投入更大。

自然过程可以通过环境退化和灾害(如地震、洪水、火山、热浪、干旱、飓风、龙卷风、山体滑坡和疾病)毁灭人类系统(Dilley et al.,2005)(图11.1)。世界环

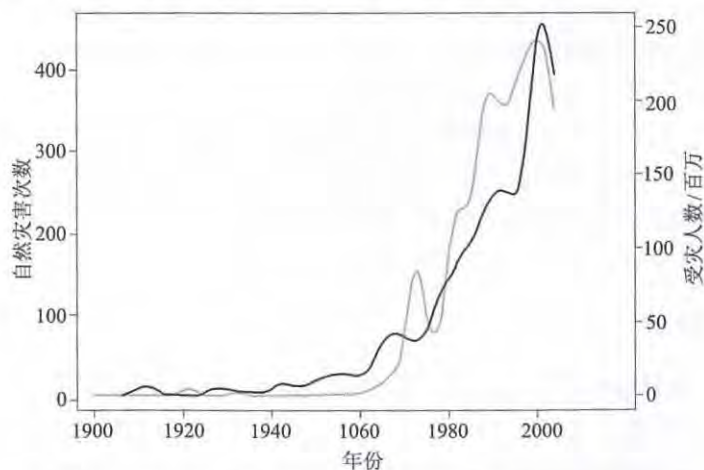


图 11.1 自然灾害的发生和受影响人的数量的变化(根据灾害流行病学研究中心数据修订)

境恶化比战争迫使更多的人跨越国界逃离,据估计在未来5年内环境难民可能达到五千万(United Nations University,2005)。通过社会冲突、经济损失、基础设施(如道路和建筑物)的破坏,灾害影响包括中断人们的工作和人们的生活规律并导致疾病和死亡蔓延。2005年在美国海湾地区的“卡特里娜”飓风造成1200多人死亡,所造成的损失多达两千多亿美元(Congleton,2006);1998年中国的洪水造成至少2000人死亡,受到影响的人数达2.4亿之多。这仅是最近的两个例子(Liu & Diamond,2005)。此外,人类与自然的相互作用在不同的社会群体中是不同的:老人、穷人和年幼群体往往更易受到自然灾害的影响。

人类影响自然格局和过程,同时又受自然的影响,这种反馈环是CHANS的重要特征(Berkes & Folke,1998;Cumming et al.,2006)。反馈环既有正的也有负的影响(Alberti et al.,2003),它可导致人和自然各组分及其相互作用变化速率的增加或降低(Liu et al.,2007)。例如,自工业革命以来,人类活动(如温室气体的排放)明显增加,通常以指数形式增长(Steffen et al.,2004)。反过来,这些活动对人类福祉的影响(如温室效应)也显著增加。

11.2.2 间接影响

由于人造产品(如电器、家具、塑料制品、飞机和汽车)的生产和使用,许多人与自然的相互作用是间接的。这些产品将人类与自然环境隔离,从而使人类似乎减少了对自然系统的依赖性。但实际上,所有的产品最初都源于自然。内涵能源(所有与产品生产相关的过程所消耗的总能源)的估算可以帮助对一些未被认识或被低估的人类与自然界的联系进行评估(Hall et al.,1986)。一般来说,制造产品所需的步骤与产品内涵能源有直接关系。例如,在107种建筑材料中(Victoria University of Wellington Centre for Building Performance Research,2005),内涵能源系数的差异达10000倍,其范围从小于0.1MJ/kg的天然材料(如原始岩体和沙子)到大于200MJ/kg的人造铝。

另外,生态系统中某些物种经过人类使用或改变后,其动态和服务功能可能改变,形成不同的间接影响类型。例如,阿拉斯加海獭(一种关键的捕食者)的灭绝引发沿海海洋生态系统的重组,其中包括依赖海藻森林栖息地的大多数物种减少(Estes & Palmisano,1974;Power et al.,1996)。

11.2.3 新质

人类和自然系统耦合表现出许多独特的新质。这种独特性质不属于人类或自然系统,而出现于它们之间的相互作用。举例来说,大熊猫栖息地的空间分布和生境质量是人类活动(如木材和薪材采伐)以及自然过程(如森林演替)相互作用的结果(Liu et al.,2001)。气候经济耦合模型研究表明折扣率是人类社会可持续发展方案中的关键因子,而在单独的气候或经济模型中这种特性不会出

现得如此明显 (Mastrandrea & Schneider, 2001)。

11.2.4 脆弱性

脆弱性是指由于内部和外部变量的变化,对 CHANS 可能造成损害的程度 (Chapin et al., 2003)。这些变量包括局部和区域因素,以及全球性影响 (如气候变化、贸易全球化、人口流动 (如旅游) 和传染病的传播) (Janssen & Ostrom, 2006)。它可能是由人类 (如传染病) 和自然 (如因洪水导致水位的上升) 和/或人与自然系统的相互影响 (如过度捕捞加上疾病以及飓风引起的不同珊瑚礁生态系统的崩溃 (Jackson & Sheldon, 1994)) 造成。最终整个 CHANS 对人类与自然系统的干扰和反馈可能变得非常脆弱 (Walker et al., 2002)。

11.2.5 阈值和恢复力

阈值是不同状态或体制之间转变的临界点 (Brock, 2006; Brock et al., 2005)。在达到生态变化的阈值前 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), 生态系统退化对人类的影响可能并不明显。恢复力是 CHANS 在受干扰后维持其自身结构和功能的能力 (Holling, 1973; Walker & Meyers, 2004; Walker et al., 2006) (图 11.2)。轻微的恢复力损失可为生态系统中难以或不可能恢复的突然

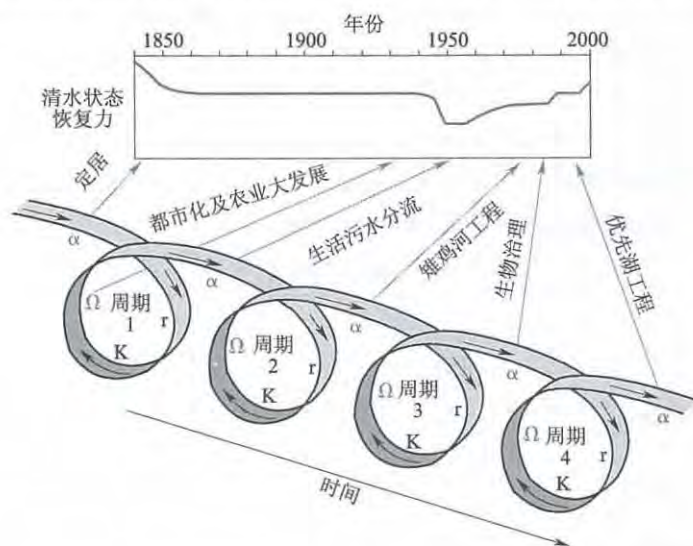


图 11.2 美国威斯康星州 Mendota 湖在管理和人类影响下,清水状态恢复力的 4 个周期

每个周期经历 4 个阶段:快速增长和开发阶段 (r)、保护阶段 (K)、崩溃或释放阶段 (Ω) 以及重建或重组阶段 (α) (Carpenter et al., 2003)

的、料想不到的和巨大的变化奠定基础 (Carpenter, 2003; Scheffer et al., 2001; Folke et al., 2004; Schneider, 2004)。最近的一项研究通过对 64 个案例的分析发现, 有近 40% 的体制改变是不可逆转的 (Walker & Meyers, 2004)。这些变化对 CHANS 有着重要的影响, 涉及世界各地的水、渔业、旱地农业、畜牧系统等 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)。由于日益重要但并未被完全理解的驱动力 (如政府政策 (Lambin et al., 2001)、气候变化和新技术 (如纳米技术、生物技术)) 之间的相互作用, 阈值和恢复力也面临着更大的不确定性。

11.3 空间耦合

11.3.1 跨越空间尺度的耦合

人类 - 自然耦合系统内部及相互之间的耦合跨越了从局部到全球的多重嵌套空间尺度。局部耦合受大尺度过程的影响, 而后者受更大尺度过程的影响, 最终受全球尺度过程的影响。全球耦合的产生一部分是受局部过程 (如温室气体排放、生物多样性丧失、森林采伐以及局部的过度捕捞) 相互作用和累积的影响, 这些局部过程在全球许多地方反复发生并给全球或区域系统造成压力 (如释放臭氧物质到大气层, 重金属污染物排入北美洲五大湖和海洋)。全球性或区域性的耦合的发生也因长距离的人类活动 (如国际贸易; 图 11.3) 和大规模的自然过程 (如飓风、海啸和污染物的大气运动)。人类活动的日益全球化与人们及其商品和服务的快速运作显示人类现在正处于区域和全球尺度上生态和社会经济系统崭新的共同进化的时代 (Holling, 1994)。

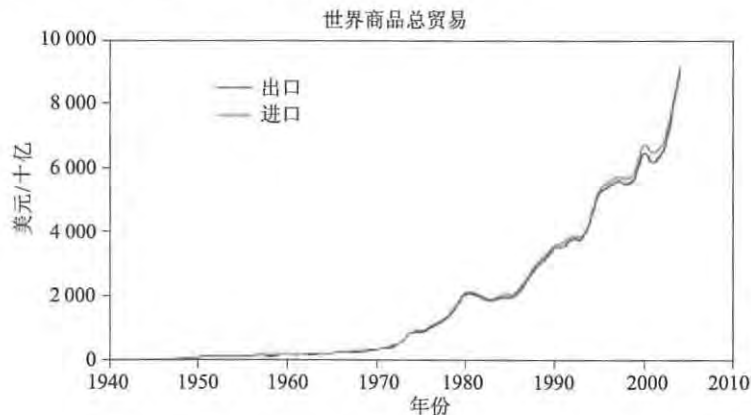


图 11.3 世界商品总贸易 (美元现价, 数据来源于世界贸易组织)

11.3.2 超越边界的耦合

通过贸易和动物迁移等过程,人与自然的相互作用已经超越政治或生态系统的边界。市场和政府所作出的决定可以影响其他地区的人和生态系统。人、物以及信息的全球性移动已经改变了相互作用的环境。物和人在各大陆间移动,外来入侵物种、害虫以及微生物也一样随之而移动。因此,一个地方的耦合也会蔓延到其他地方(Liu & Diamond,2005)。另外,城镇居民在从农村获得粮食的同时,是以农村土壤养分和水土流失为代价的(Foster,1999)。来自富国的气体排放使得气候变暖,从而增加穷国的疾病发病率和死亡率(Patz et al.,2005)。发展中国家向发达国家出口原材料和成品可能增加人类对环境的影响,从而使环境变得更加脆弱、造成社会动乱、使当地居民所必需的生态系统服务功能退化(Lebel,2002)。此外,在发展中国家,许多出口产品的生产造成大量的污染,也使工人面临极大风险(Liu & Diamond,2005)。因为出口的原料往往是低价格,所以从长远来看,得到的经济利益远远比不上对生态系统服务损失所付出的代价。而且,虽然发达国家二氧化碳人均排放量远远高于发展中国家,但是发展中国家产生的污染物(如二氧化碳及其他温室气体)也同样影响发达国家(Liu & Diamond,2005)。因为水文循环的变化,一个地区的食品生产也有可能影响另一个地区的食品生产(Gordon et al.,2005)。总之,在世界范围内,一个地区的人和自然系统对另一个地区的自然系统和人的影响普遍存在。

11.3.3 异质性

不同地区的人类与自然系统之间的耦合存在着一定的差异。这一点通过比较农村和城市可以得到验证。现在全球有大约一半的人生活在中国(图11.4)。城市居民消耗60%的水,同时排放78%的二氧化碳(O'Meara,1999)。虽然城市

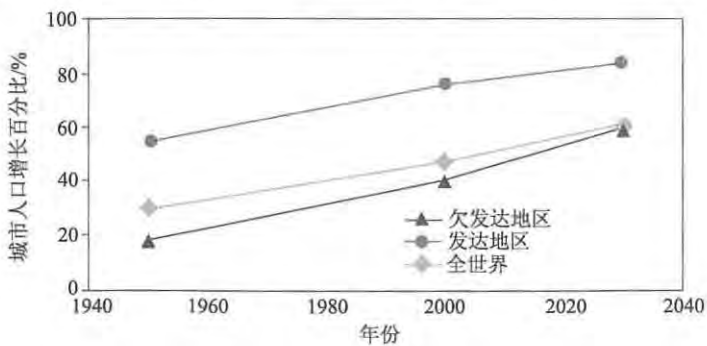


图 11.4 发达地区、欠发达地区和全世界城市人口增长百分比
(Hodgson,2005)

平均人口密度高于农村地区,但是城市平均家庭规模(家庭中的人口数)比农村低,并且规模较小的家庭人均资源利用效率也比规模较大的家庭低(Liu et al., 2003)。大部分城镇居民使用的食品、能源以及其他材料都来自别的地区(Folke et al., 1997)。例如,香港居民需要大约 2 000 倍于其城市建筑面积来提供生态系统产品和服务,以维持其当前的生活质量(Warren-Rhodes & Koenig, 2001)。

发达国家人类与自然耦合的相对作用比发展中国家较为间接,全球化的影响也较大。部分是因为发达国家城镇居民(近八成)要比发展中国家(约四成)的比例高(图 11.4)。此外,发达国家从发展中国家进口大量的原材料。例如,日本为保持自己的森林覆盖率(日本 64% 的陆地仍是森林),是世界上从热带国家进口木材最多的国家。

虽然 37% 的世界人口生活在 100km 海岸线范围内(Cohen et al., 1997)(是世界平均人口密度的两倍),但是与海洋系统相比,人类与陆地和淡水系统有着更直接的联系,因为几乎所有的人都生活在有淡水的陆地。可是人类对陆地和淡水系统的利用,也影响海洋生态系统(如污染物排到海洋系统)。例如,仅 2003 年,中国 867 个主要废水排放处中的 20 个从陆地向海洋排放了大约 8.8 亿 t 的污水(含 130 万 t 的污染物)(State Oceanic Administration of China, 2004),更不用提由非点源污染和土地利用变化所引起的水域污染。

11.4 时间耦合

近年来学者们认为人类已经进入“人类纪”,这个词强调生物圈过程中人的主导地位(Steffen et al., 2004)。20 世纪后半叶,环境变化的关键是人类驱动力变得更加强大,随着人类人口呈指数增长,家庭数量(基本的社会经济单元)比人口数量增长得更快(图 11.5)(Liu et al., 2003; Entwisle & Stern, 2005)。此外,

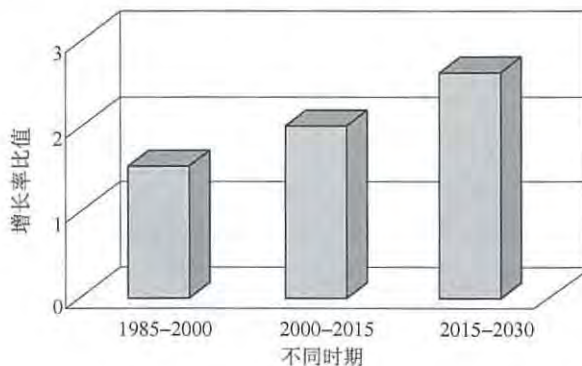


图 11.5 家庭数量增长率与人口数量增长率的比值(数据来源于联合国人类居住环境中心)

人类生产与消费的规模也比人口数量增长得快得多,特别是经济高速增长的国家,如中国和印度(Arrow et al.,2003)。

11.4.1 人类活动对自然系统的影响增大

过去50年,人类对生态系统的改变超过了以往的任何时期(Millennium Ecosystem Assessment,2005),使生态足迹迅速增加(Global Footprint Network,2005;York et al.,2003),预计2001年至2015年间这些影响每年将增长约2%(Dietz et al.,2007)。人类不停地使世界各地的景观和海景“单一化和同质化”。虽然有些案例中人类使景观更加异质化,并增加了生物多样性,但向与此相反的方向发展的趋势已经无法改变(Chapin et al.,2000)。例如,随着海岸水域早期生态系统的缓冲能力和恢复能力的退化,过度捕捞及其伴随的污染和栖息地破坏降低了生态系统的多样性,因而外部影响对生态系统所造成破坏的后果无法预测(Jackson et al.,2001)。全球气候变暖至少有部分原因是归咎于人类活动,使许多植物和动物成为“受害者”(Root et al.,2003;Root et al.,2005)。此外,随着人类逐渐适应已经退化的生态系统(Pauly,1995),对于生态系统状况的基准期望可能会逐渐降低。

尽管人类一直依赖自然系统,但是因为人口越来越多,而人均使用资源也在增多、对人类福利至关重要的一些生态系统服务功能却已退化,所以人类对自然系统依赖的风险日益增加(Millennium Ecosystem Assessment,2005)。此外,人类目前使用比以往更多的人造产品(包括至少1000万种化合物)(Kent & Williams,1994)。例如,在美国河流中,需要处方和不需要处方药品的化合物如类固醇、抗生素、激素和其他有效成分等人造化合物司空见惯(Kolpin et al.,2002)。

11.4.2 自然对人类的影响上升

自然系统的改变在许多地方也增加了人类的脆弱性,限制了人们谋生的方式(Kasperson et al.,1995;Allison & Hobbs,2004)。1900年以来发生自然灾害的次数以及受影响的总人数几乎呈指数增长(图11.1),这主要是因为人口密度增加,特别是易发生灾害的地区,如低海拔地区和沿海地区。过去30年,大西洋和太平洋的飓风强度增加,与人类活动致使海面变暖相一致(Webster et al.,2005;Emanuel,2005)。在中国西北地区,发生沙尘暴的频率不断增加,从公元300年到1949年每31年发生一次沙尘暴到1990年以后几乎平均每年发生一次沙尘暴(Liu & Diamond,2005)。由于自然灾害增加,用于突发事件和人道主义援助的社会成本和经济成本飞涨(Centre for Research on the Epidemiology of Disasters,2005)。

经济发展中的利润是以当今和将来生态系统提供服务的能力退化为代价的(Liu et al.,2007;Millennium Ecosystem Assessment,2005;Van der Leeuw,2000)。

例如,旱地生态系统的粮食生产使约 20 亿人由于水资源减少、土壤退化和气候变化而受到威胁(Millennium Ecosystem Assessment,2005)。希腊的安哥奈山谷已没有足够的水来继续灌溉约 40 年前种植的柑橘。部分山谷的地下水位每年下降 7 m,现在用水是从深达 400 m 的山谷边缘地下抽的。虽然目前尚不清楚经济活动的增加对环境的影响是否超过了对资源利用效率改善所带来的补偿作用,但世界各地生态系统退化对人类的影响成为实现千年发展目标(如减少贫困和人类发展)越来越大的障碍(Millennium Ecosystem Assessment,2005)。

11.4.3 遗产效应

遗产效应是人类 - 自然耦合系统过去的相互作用对当前和未来状况的累积和进化影响。遗产效应随着时间和强度而变,取决于各种因素,包括干扰(Thompson et al.,2002)、物理和生物条件(Richter & Richter,2000;Francis & Foster,2001)以及社会经济状况等。例如,先前土地利用的遗产效应对解释目前景观状况具有惊人的效果,从森林的年龄组成、面积大小和种群结构可以反映出人类的历史影响(Goodale & Aber,2001)。

11.4.4 时间滞后

人与自然的相互作用及其产生的生态和社会经济效应之间存在着一定的时间差。在某些情况下,人类和自然系统之间的联系显现缓慢,其变化不易被发觉。在另一些情况下,只因缺少了解系统正在改变的必要的研究和监测,或者人类可能没有察觉到它们之间的联系。例如,作为制冷剂、阻燃剂和清洁剂的碳氟化合物(CFCs)的传播导致平流层臭氧的损耗,增加了一些生态系统暴露在 UV-B 辐射下的时间。可是多年来,由于对 CFCs 不利影响知识的缺乏,没有做出限制其生产和使用的决定;实际上,在引进 CFCs 时,CFCs 被认为是公众健康的福音,因为它取代了危险的以氨为基础的制冷方法(Parson,2003)。人们通过很长时间才能看清楚气候变化引起格陵兰冰盖崩溃的相互联系(Rignot & Kanagaratnam,2006)。人类决策及其对环境的影响或环境变化及其对人类产生的后果的时间滞后性,使人们试图理解和管理人类和自然系统之间的相互作用的努力变得复杂。

11.4.5 尺度和速度的增加

过去人类与自然相互作用大多发生在局部地区,有少数例外如长距离的人类迁移等。但现在则越来越多地发生在区域、洲际和全球尺度。人类和自然系统之间的相互作用(如城市化)速度也在增加。例如,城市居民人口从 100 万增加到 800 万,伦敦用了 130 年(从 1801 年至 1930 年)(Demographia,2006),但墨西哥仅用了 30 年(从 1940 年至 1970 年),并只用了 26 年就再次翻番到 1 600 万人(从 1970 年至 1995 年)(United Nations Cyberschoolbus,2006;Brown et al.,

1998)。同时由于各种因素,如资源污染和短缺(如水),环境对城镇居民的影响也相应加剧。此外,新型疾病的出现和原有疾病(如肺结核)的重新出现也在加速。如 SARS 这样的疾病传播速度比以往的疾病传播更快,因为交通系统加速,病毒在几天之内几乎可到达地球的每个角落,而这一过程在一个世纪前可能需要数周、数月甚至数年时间(McMichael et al.,1999)。

11.4.6 间接影响不断升级

由于快速城市化及其他原因,人类和自然系统之间的间接相互作用更加普遍和突出。过去 50 年来,城市人口比例已从 30% 上升到 50% (图 11.4)。到 2030 年城镇居民人口比例预计超过 60% (图 11.4)。结果是更少的人直接与提供重要资源的生态系统打交道,而更多的人则消费远方制造和运输的加工产品。过去一个世纪人口增长 10 多倍,城市正日益成为自然资源消耗、大气和水污染、气候变化以及威胁生物多样性的主要推动力。未来 30 年预期净人口增长(约 20 亿人)将集中在城市,因此,这些城市作为环境点源污染和危害,对自然系统的影响将不断增加(UN Department of Economic and Social Affairs/Population Division,2004)。不过,目前尚不清楚如果增加的人口分散到农村地区,总的环境影响是多是少。

11.5 人类 - 自然耦合系统对于管理、治理以及政策的影响

人类 - 自然耦合系统向传统的自然资源与环境规划和管理理念与战略提出了挑战。大体上,当今大多数的政策都不可能实现可持续发展的目标(Millennium Ecosystem Assessment,2005)。一些新兴的政策,如在海洋以及海陆连接的生态系统中以生态系统为基础的管理,有朝着可持续方向发展的希望,但需要加以鼓励、实施、监督,而且在必要的时候进行修订(U. S. Commission on Ocean Policy,2004)。许多政策和管理措施的成功与失败取决于这些政策和措施考虑 CHANS 复杂性的程度。例如,由于没有考虑跨区域的影响,在上游流域进行森林采伐往往造成下游严重的水土流失和洪水(如 1998 年中国长江流域的巨大洪水)(Liu & Diamond,2005)。由于没有考虑到气候变化和极端天气预报具有不确定性,往往导致缺乏充分的准备和有效的应对措施(如“卡特里娜”飓风)。相反,蒙特利尔议定书是一个了不起的成功故事,部分是因为它认识到 CFCs 对臭氧层影响的时间滞后性,在 CFCs 对臭氧层及对人类和自然系统造成显著影响之前,展开全球性行动以防止臭氧层恶化(Schiermeier,2005)。这些经验表明自然资源的规划和管理应该考虑 CHANS 相互作用的特性。

首先,人类对自然系统的无视态度成为前进中的阻力。观念上,从“人定胜

天”到“人与自然共同协调进化”的转变有助于促进管理的改进 (Catton & Dunlap, 1980; Norgaard, 1994)。因此,不仅要重视对系统可能产生的直接后果而且也要重视对维持系统长期正常运作起至关重要作用的系统恢复力。规划和管理实施过程中应时刻考虑突显特性、相互影响、非线性及意外事件 (Gunderson et al., 1995; Berkes et al., 2003)。人类预测能力固有的局限性决定了必须将这种不可避免的不确定性纳入决策过程 (Berkes et al., 2003; Morgan & Henrion, 1990; Kinzig et al., 2003)。当不确定性无法减少时,决策模拟为明确分析未来的可能性提供了策略 (Peterson et al., 2003)。由于 CHANS 的内部动态和外部压力反应的变化是不可避免的,所以增强 CHANS 的适应性同时保留其关键的结构和功能是非常重要的 (Adger et al., 2005)。同时,可以使用更有效的技术提高系统的恢复力、降低脆弱性并尽量减少人类活动对自然系统的影响,使其低于系统阈值,以防止自然系统对人类系统产生伤害。人类与自然间接互动日益普遍 (如全球贸易),使得环境管理日益复杂。因此,政府的作用至关重要,政府应该在理解和管理 CHANS 过程中,精心制定法规、政策、激励机制和治理结构以激发多元化群体的参与。

CHANS 的有效管理不仅需要考虑所有主要的自然成分,而且要协调人类及它们之间的相互作用。因为人为干扰的规模过于庞大,许多情况下已造成了无法挽回的不可持续性。因此,虽然以往的发展具有一定的经济效益,但是这种传统的发展战略需要改变,并迫切需要将其改造成可持续的发展。在转向可持续发展的过渡期,那些尚未感受到发展成果的人,需要得到那些从发展中受益人的帮助 (以资源、信息和技术等形式),从而使整体资源利用效率和社会经济公平性得到提高。不和谐的人类活动导致“公共利益悲剧” (Ostrom, 1990),如由于管理者和渔民之间沟通的失败以及限制捕捞的努力脱节,使得密歇根湖大麻哈鱼数量急剧下降 (Dochoda & Jones, 2002)。幸运的是,发现问题后,管理机构及时将其独立运作模式调整到管理者和密歇根湖利益相关者综合参与的管理模式,以此在做出决策的过程建立共识 (Dochoda & Jones, 2002)。最终采用生态系统的管理方法 (如饲草基地)来控制大麻哈鱼存储率 (Knuth, 2002; Goddard, 2002),这种新方法似乎已经很成功,因为无论是鱼的数量还是健康状况都已得到改善。

其次,世界各地人们的联系更加紧密,当地的经济决策正日益受到地球另一端的状况和发展的影响 (如巴西的大豆出口到中国,中国的产品销往欧洲和北美)。相互作用的全球化、连通性和同步性,正通过决策、权力的下放和国际协议的紧密联系,改变着各级政府的角色和责任。金融自由化和自由贸易可能会削弱国家的权力 (Cohen, 2004; Sassan, 1996),加强跨国公司和国际机构 (如世界贸易组织)的权力,并在某些情况下也加强了地方政府和企业的权力。世界最大的 100 个经济实体中有 51 个是公司,而不是国家 (Anderson & Cavanagh, 2000),这对 CHANS 的调控和管理有深刻的影响。因为 CHANS 有非常具体的

背景和战略,它在一个地方可能成功,在另一个地方却可能失败。所以政策制定的本土化很重要,但也必须考虑当地 CHANS 对全球和区域动态产生的影响。在灾害频繁和人类处于风险的地区(如沿海地区),必须探索以前无法想象的策略(如离开海岸,以退还新奥尔良的部分地区于自然,放弃不可持续的农田),实施新的发展模式(如取消沿海发展的补贴)。

再次,CHANS 不断变化的性质意味着管理体系也应是动态的,但惯性往往支配着涉及自然资源管理诸多方面的社会、政治和经济结构(Gunderson et al., 1995)。在许多国家,目前仍生效的自然资源政策和法律(如矿业法及补贴、水法和公共土地租赁)多起源于传统的自然资源开发和掠夺模式(Andrews, 1999)。特殊利益集团即使引起环境恶化,也往往能够继续维持生产,并将环境恶化和对社会经济的危害后果转驾于他人。文化惯性也许让人很难认识到需要改变,但有时文化改变却相当快。因此,需要一定的均衡机制以确保机构和决策过程保持活力,但又不过分狂热(Berkes et al., 2003; Ostrom, 2005; Dietz et al., 2003)。时间滞后和遗产效应告诉我们,耐心和远见对环境恢复是必需的,同时也避免将来出现问题。我们不可能在一夜之间解决多年来 CHANS 中如美国佛罗里达州南部大沼泽地所产生的环境问题,但对未来影响的充分估计和预测(如蒙特利尔议定书)也是必不可少的。

尽管将 CHANS 研究的信息用于自然资源政策制定、治理和管理的重要性显而易见,但认识 CHANS 知识的不完善性和难于预见性也是至关重要的。对于内在不确定性及可能产生的消极后果和不断增加的不可预见性可以通过 3 种途径使其降至最小:一是保持在安全的范围内以避免不确定性(如计算渔业额度);二是附加保险因子作为抵御意外灾害的保障(如计算海洋保护区的面积要加上额外的缓冲区(Allison et al., 2003));三是加强适应机制。这些方法(Dietz et al., 2003; Folke et al., 2005; Daly & Cobb, 1989; Clark & Munn, 1986)都是有效地管理 CHANS(包括公共系统)必要的战略组成部分(Holling, 1995)。本着谦逊和不断学习的态度去分析和执行才能使决策和政策的实施成功(Gunderson & Holling, 2001; Campbell, 1969)。

11.6 挑战与机遇

把人类环境和社会生态系统当做 CHANS 或者 CHANS 的一部分进行研究和管理的需要正越来越多地被人们所认识。而这种认识却伴随着许多挑战与机遇。虽然人类是生态系统不可分割的组成部分(McDonnell & Pickett, 1993),但并未在生态学上得到充分体现(Hixon et al., 2002; Reznick et al., 2002; Robles & Desharnais, 2002)。而且,虽然整合人类和生态学研究的理论框架已经存在,但并未得到充分的量化研究和应用(Alberti et al., 2003; Richerson, 1977; Moran,

2006)。因此,关键是要重新审视(必要时进行修订)当前的生态学理论以体现生态系统与影响生态格局和过程的人类的耦合。同样,必须重新考虑(必要时进行改变)现有的社会经济学理论,以认识在社会经济格局和过程中起着越来越重要的自然系统。做出如此修订和迎接如下所述的挑战对于更好地了解 CHANS、执行政府的各项政策和管理项目,以确保社会经济和生态朝着健康的轨道发展至关重要。

11.6.1 跨尺度连接的人类-自然耦合系统

研究 CHANS 需要在组织、空间和时间各尺度间强调自然和人类系统等级耦合的新范式。这种方法并不像以前的全球建模模式(如世界动态(Forrester, 1971)、增长的极限(Meadows et al., 1972))一样简单地作大规模分析。相反地,它注重将局部系统套在区域和全球系统中,观察局部过程对全球过程的累积效应,强调在各个尺度上人类和自然系统耦合的差异,在大尺度过程中嵌入小尺度过程以及大尺度过程对小尺度过程的影响。特别是,研究 CHANS 的新方法综合了多种不同尺度的方法,不断评估小尺度现象如何嵌入大尺度过程,以及大尺度现象如何激发和影响小尺度 CHANS 的结构和功能(Gunderson & Holling, 2001; Costanza et al., 2001)。同时,应该理解即使是最具局部特点的景观、区域、国家内的人与自然的相互作用,与全球作用也是“不断的互为因果关系”,具有很强的相互依赖性(Vayda, 1988; Dietz & Rosa, 2002)。举例来说,一个社区对自然灾害的脆弱性不仅取决于当地的地形及其生存活动,而且取决于区域经济的状态、到达受灾地区的救援能力以及最终的全球气候变化。这种嵌套要求我们必须同时在多重组织和空间尺度上研究人类与自然系统的耦合。关于时间尺度也存在同样的问题,在几十年甚至几百年的时间尺度上,不但要了解人类与其所处环境每天的相互作用,而且还要了解人类与自然相互作用的缓慢过程和动态。

11.6.2 综合工具

在理解 CHANS 的结构、功能和动态方面,从数学和统计模型到计算机模拟模型、地理信息系统和遥感等工具都是有用的。具有综合多学科技术和数据的建模能力对认识 CHANS(如气候变化综合评估)具有特别的作用(Sokolov et al., 2005; Schneider, 1997; Parson & Fisher-Vanden, 1997; Rotmans, 1990; Morgan & Dowlatabadi, 1996)。这种综合建模方法的一个有趣的例子是基于动态要素的土地利用变化模型(Parker et al., 2003; An et al., 2005),它用一组不同的要素来代表不同的决策,结合一些其他的造模工具(如地理信息系统),来捕捉和模拟景观的社会经济和生物物理过程(Parker et al., 2003)。这些综合模型,包括气候变化的综合评估、基于动态要素的模型(agent-based model)和其他自下而上的逐级模型(bottom-up model)、面向格局模型(即用观察模式优化格局结构的模型,

pattern-oriented model) (Grimm et al., 2005), 都应进一步发展以更好地理解 CHANS 跨空间、时间和组织尺度的变化。从而, 对不同管理及政策方案的短期和长期后果做出预测或评估, 并提出能被实践检验的 CHANS 复杂性的相关假说。

我们知道, 长期数据对于 CHANS 研究特别重要, 因为单独靠一些阶段性的数据不可能实现人们对人类和自然系统互为因果关系的了解。直到最近, 对时间序列数据的搜集和观测才得到支持。但是, 大多数数据的收集和分析仍然是在局部尺度, 要么为人类系统, 要么为自然系统, 而不是在多尺度上同时兼顾人类与自然的系统。卫星影像在确定土地覆盖和土地利用变化以及人类的许多活动特征(如景观尺度上的住户位置)上起着关键作用(Liu et al., 2003; Fox et al., 2003; Moran & Ostrom, 2005)。随着正在进行的大型国际合作(全球地球观测系统)的开展, 已有的和新开发的卫星资源, 包括相关的硬件和软件, 正在组装与汇编以实现兼容。这一努力将有助于确保长期、可靠和高质量的数据, 它将开放和免费用于回答许多 CHANS 的问题, 如关于气候变化和地球脉搏的变化。然而, 我们也应该搜集相关的社会和经济观察资料, 使得遥感数据可以真正从跨学科的角度来理解 CHANS 的总体目标。

11.6.3 比较研究和项目组合

到目前为止, 很多 CHANS 研究是在特定地点充其量对几个少数地点进行比较。这样的研究是必要的, 但不足以了解 CHANS 如何作用。单个站点甚至是一小组站点都不能在生态系统、气候节律、政治和经济背景和文化上充分理解区域和全球上的差别。人类-自然耦合系统项目不仅必须包括站点特异性研究, 而且还必须利用已有的突发事件的数据, 有计划地进行跨站点的比较和宏观水平的分析。超越现有的 CHANS 项目也是必要的, 如美国国家科学基金会资助的自然-人类耦合系统动态研究(表 11.1), 用大量的资金和同步比较的项目开发出更大和更全面的研究项目组合, 建立起跨地方、区域、国家和国际水平的 CHANS 研究的全球合作平台。

11.6.4 人类-自然耦合系统所有相关领域合作

理解 CHANS 需要培养和支持有效的跨学科研究。研究人类-自然耦合系统的科学家面临艰巨的任务, 并且必须实现: 一多学科的、综合的、跨越多个尺度的数据搜集; 二不断创造新的分析方法以对新的动态的理解; 三加强对 CHANS 研究团队必不可少的沟通技巧。科学家单独研究的日子已经一去不复返, 研究者必须了解相互间不同学科的语言。这种理念已经作为美国国家科学基金会的研究生综合教育和研究培训计划得到进一步的发展和扩大。我们必须注重团队建设、培养具备领导才能的同时善于听取和理解多种不同意见、不同范式和不同学科背景和假设, 尤其是对社会科学和自然科学各方面培养的年轻学者和中年

学者更应如此。

尽管我们在交叉学科研究方面取得了一些显著的成绩,但是对交叉学科工作的前途并没有统一的认识,持续合作成功的障碍(如奖励制度、体制结构)仍然很大(Van der Leeuw & Redman, 2002; Redman et al., 2004; McMichael et al., 2003; Committee on Facilitating Interdisciplinary Research of National Academies, 2004)。值得庆幸的是,也有一些“现实世界”中的从业者们清楚地认识到,为了应对商业、城市等领域的挑战必须具有交叉学科的视野。许多资助机构也认识到交叉学科方法的价值,并拨出大量科研经费支持跨学科项目和多机构合作项目(表 11.1)。许多大学的高层管理者强烈主张交叉学科,但许多中层管理者,如系主任,因各种原因(如预算结构、大学系统内自我认同及在领域内的排名)倾向于保持现有单学科方式。值得注意的是,大学项目也是按照单个学科进行排名,并不存在相应的交叉学科如 CHANS 的排名,即使是对环境科学而言,也是如此。然而,追求学科交叉将持续升温,并将成为鉴别研究者本人、各部门和各高校的主要因素。虽然交叉学科研究这种结构性变化是一个较大的挑战,它同时要求体制和文化等各种变化,但是每个 CHANS 研究人员不仅可通过个人和小团队的研究项目还可借助大学及资助机构的大力支持而推动交叉学科向前发展。

11.6.5 超越象牙塔

人类-自然耦合系统的研究人员将通过 CHANS 的不断理解,提出解决社会实际问题(如联合国千年目标的减贫计划)的具体方案,对社会需要负责。许多研究问题必须重新阐述和回答,以增加对可持续生态和社会经济效益更“有用”的知识,并对其复杂性(如人类与环境如何相互作用产生突发事件及反馈(Berkes & Folke, 1998; Berkes et al., 2003))做出评估。例如,在城市化地区必须回答社会和生态格局及其过程如何发生、如何维持、如何演变(Alberti et al., 2003)以及如何进行可持续管理的问题。

研究人类-自然耦合系统的科学家也应该更直接有效地将 CHANS 的知识传播给社会各界,如私营企业、政界人士、管理者、媒体和大众(Lubchenco, 1998; Millennium Ecosystem Assessment, 2005)。虽然大多数中级甚至高级 CHANS 研究人员缺乏这样的沟通技巧,但他们可从各种培训项目(如阿尔多利奥波德领导计划(Aldo Leopold Leadership Program))中受益。此外,文献的发表(Stern & Fineberg, 1996; Dietz & Stern, 1998)为科学家和其他利益相关者之间的互动提供了另一种模式。

11.7 结语

人类-自然耦合系统正经历着前所未有的急速变化,并不断地在多尺度上

更紧密地相互耦合。解决 CHANS 日益增加的复杂性,不仅对科学家而言是空前的跨学科的挑战,而且对保护人类始终依赖的地球的未来也是至关重要的。在不同尺度上,进一步理解并量化 CHANS 需要更多的来自各相关学科的研究人员的共同努力。把综合研究获得的知识用于社会经济和环境决策过程,是实现高产、高效和可持续性 CHANS 必不可少的根本保证。

■ 主要参考文献

- Adger W N, Hughes P T, Folke C, Carpenter R S and Rockström J. 2005. Socioecological.
- Alberti M, Marzluff J, Shulenberg E, et al. 2003. Integrating humans into ecology: opportunities and challenges for urban ecology. *BioScience*, 53: 1169 – 1179.
- Aldo Leopold Leadership Program. <http://www.leopoldleadership.org/>.
- Allen T F H and Starr T B. 1982. *Hierarchy: Perspectives for ecological complexity*. Chicago: University of Chicago Press.
- Allison G W, Gaines S D, Lubchenco J, et al. 2003. Ensuring persistence of marine reserves: catastrophes require adopting an insurance factor. *Ecol. Appl.*, 13, S8 – S24.
- Allison H E and Hobbs R J. 2004. Resilience, adaptive capacity, and the "lock-in trap" of the Western Australian agricultural region. *Ecol. Soc.*, 9: 3.
- An L, Linderman M, Shortridge A, et al. 2005. An agent-based spatial model for cross-discipline and cross-scale integration: a case study of households, forests, and panda habitats. *Ann. Assoc. Am. Geographers*, 95: 54 – 79.
- Anderson S and Cavanagh J. 2000. Top 200: The Rise of Corporate Global Power. Institute for Policy Studies, Washington, D. C., 13. <http://www.ips-dc.org/reports/top200text.htm>.
- Andrews R N L. 1999. *Managing the Environment, Managing Ourselves: A History of American Environmental Policy*. New Haven, Connecticut: Yale University Press.
- Arrow K G., Dasgupta P, and Mäler K G. 2003. Evaluating projects and assessing sustainable development in imperfect economies. *Environ. Resource Econ.* 26, 647 – 685.
- Berkes F and Folke C. 1998. *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Berkes F, Colding J and Folke C. 2003. *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Books, San Francisco, 563.
- Brock W A. 2006. Tipping points, abrupt opinion changes, and punctuated policy changes. In: *Punctuated Equilibrium and the Dynamics of U. S. Environmental Policy. Abrupt Opinion Changes, and Punctuated Policy Change*. Repetto, R. (ed). New Haven, Connecticut: Yale University Press.
- Brock W A., Carpenter S R. and Scheffer M. 2005. Regime shifts, environmental signals, uncertainty and policy choice. In: *A Theoretical Framework for Analyzing Social-Eco-*

logical Systems. Norberg, J. and Cumming, G. (eds). New York: Columbia University Press, in press.

Brown L R, Gardner G and Halweil B. 1998. Beyond Malthus: Sixteen Dimensions of the Population Problem. Washington D C; Worldwatch Institute.

Campbell D T. 1969. Reforms as experiments. *Am. Psychol.*, 24, 409 – 429.

Carpenter S R. 2003. Regime Shifts in Lake Ecosystems: Pattern and Variation. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany, 199.

Catton W R J and Dunlap R E. 1980. A new ecological paradigm for post-exuberant sociology. *Am. Behav. Scientist*, 24, 15 – 47.

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. 2005. Emergency disasters data base. <http://www.em-dat.net/>.

Chapin F S III, Hoel M, Carpenter S R, et al. 2006. Building resilience and adaptation to manage Arctic change. *Ambio*, 35, 198 – 202.

Chapin F S III, Matson P A, McCarthy J, et al. 2003. Science and technology for sustainable development special feature: illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: three case studies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 100, 8080 – 8085.

Chapin F S, Zaveleta E S, Eviner V T, et al. 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405, 234 – 242.

Clark W C and Munn R E (eds). 1986. Sustainable development of the biosphere. Cambridge: Cambridge University Press.

Cohen B. 2004. Urban growth in developing countries: a review of current trends and a caution regarding existing forecasts. *World Dev.*, 32, 23 – 51.

Cohen J, Small C, Mellinger A, et al. 1997. Estimates of coastal populations. *Science*, 278, 1211 – 1212.

Committee on Facilitating Interdisciplinary Research of National Academies. 2004. Facilitating Interdisciplinary Research. Washington DC: The National Academies Press.

Congleton R D. 2006. The story of Katrina: New Orleans and the political economy of catastrophe. *Public Choice*, 127, 5 – 30.

Context and contemporary challenges of open vs. closed systems. *Ecology*, 83, 1490 – 1508.

Reznick D, Bryant M and Bashey F. 2002. R- and K-selection revisited: the role of population regulation in life-history evolution. *Ecology*, 83, 1509 – 1520.

Costanza R, Low B S, Ostrom E, et al. 2001. Institutions, Ecosystems, and Sustainability. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 270.

Costanza R, Waigner L, Folke C, et al. 1993. Modeling complex ecological economic systems: towards an evolutionary dynamic understanding of people and nature. *BioScience*, 43, 545 – 555.

Cumming G., Cumming D and Redman C. 2006. Scale mismatches in socialecological systems: causes, consequences, and solutions. *Ecol. Soc.* 11, 14.

- Daily G C. (ed). 1997. *Nature's Services: Social Dependence on Natural Ecosystems*. Washington D C: Island Press.
- Daly H E and Cobb J B Jr. 1989. *For the Common Good: Redirecting the Economy Toward Community, the Environment, and a Sustainable Future*. Boston: Beacon Press.
- Demographia. 2006. Greater London, inner London and outer London population and density history. <http://www.demographia.com/dm-lon31.htm>.
- Diamond J M. 1997. *Guns, germs and steel: the fates of human societies*. New York: Norton.
- Dietz T and Rosa E A. 2002. Human dimensions of global environmental change. In: *Handbook of Environmental Sociology*. Dunlap, E R and Michelson, W (eds). Westport, Connecticut: Greenwood Press.
- Dietz T and Stern P C. 1998. Science, values and biodiversity. *BioScience*, 48: 441 – 444.
- Carpenter S, Walker B, Anderies J M, et al. 2001. From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, 4: 765 – 781.
- Dietz T, Ostrom E and Stern P C. 2003. The struggle to govern the commons. *Science*, 302: 1907 – 1912.
- Dietz T, Rosa E A and York R. 2007. Driving the human ecological footprint. *Frontiers Ecol. Environ.*, 5: 13 – 18.
- Dilley M, Chen S R, Deichmann U, et al. 2005. *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis (Disaster Risk Management)*. World Bank, Washington DC.
- Dochoda M R and Jones M L. 2002. Managing Great Lakes fisheries under multiple and diverse authorities. In: *Sustaining North American Salmon: Perspectives Across Regions and Disciplines*. Lynch, K. D., et al. eds. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 241 – 242.
- Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436: 686 – 688.
- Entwisle B and Stern P, eds. 2005. *Population, Land Use, and Environment: Research Directions*. Washington D C: The National Academies Press.
- Estes J A and Palmisano J F. 1974. Sea otters: their role in structuring nearshore communities. *Science*, 185: 1058 – 1060.
- Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309: 570 – 574.
- Folke C, Carpenter S, Walker B, et al. 2004. Regime shifts, resilience and biodiversity in ecosystem management. *Annu. Rev. Ecol. System.*, 35: 557 – 581.
- Folke C, Carpenter S R, Elmqvist T, et al. 2002. Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. *Ambio*, 31: 437 – 440.
- Folke C, Hahn T, Olsson P, et al. 2005. Adaptive governance of socialecological systems. *Annu. Rev. Environ. Resourc.*, 30: 441 – 473.
- Folke C, Jansson A, Larsson J, et al. 1997. Ecosystem appropriation by cities. *Ambio*,

26;167 –172.

Forrester J W. 1971. *World Dynamics*. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen.

Foster J B. 1999. Marx's theory of metabolic rift: classical foundations for environmental sociology. *Am. J. Sociol.* ,105,366 –405.

Fox J, Mishra V, Rindfuss R, et al. 2003. *People and the Environment: Approaches for Linking Household and Community Surveys to Remote Sensing and GIS*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Francis D R and Foster D R. 2001. Response of small lake systems to changing land—use history in New England. *The Holocene*,11 :301 –312.

Global Footprint Network. 2005. <http://www.footprintnetwork.org/>.

Goddard C I. 2002. The future of Pacific salmon in the Great Lakes. In: *Sustaining North American Salmon: Perspectives Across Regions and Disciplines*. Lynch, K. D. , et al. eds. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 181 –194.

Goodale C and Aber J. 2001. The long-term effects of land-use history on nitrogen cycling in northern hardwood forests. *Ecol. Appl.* ,11 :253 –267.

Gordon L, Steffen W, Jönsson B, et al. 2005. Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* ,102:7612 –7617.

Grimm V, Revilla E, Berger U, et al. 2005. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. *Science*,310:987 –991.

Gunderson L H and Holling C S (eds) . 2001. *Panarchy: Understanding Transformation in Human and Natural Systems*. Washington D C: Island Press.

Rosa E A and Dietz T. 1998. Climate change and society: speculation, construction and scientific investigation. *Int. Sociol.* ,13:421 –455.

Gunderson L H, Holling C S and Light S S. 1995. *Barriers and Bridges to the Renewal of Ecosystems and Institutions*. New York: Columbia University Press.

Hall C, Cleveland C J and Kaufman R. 1986. *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*. New York: Wiley.

Hixon M A, Pacala S W and Sandin S A. 2002. Population regulation: historical.

Hodgson D. 2005. The urbanization of the world. <http://www.faculty.fairfield.edu/faculty/hodgson/Courses/so11/population/urbanization.htm>.

Holling C S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. System.* ,4:1 –23.

Holling C S. 1994. An ecologist's view of the Malthusian conflict. In: *Population, Economic Development, and the Environment*. Lindahl-Kiessling, K. and Landberg, H, eds. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 79 –103.

Holling C S. 1995. What barriers? What bridges? In: *Barriers and Bridges to the Renewal of Ecosystems and Institutions*. Gunderson, L. H. , et al. , eds. New York: Columbia University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. <http://www.ipcc.ch/>.

- Jackson J B C and Sheldon P R. 1994. Constancy and change of life in the sea. *Phil. Trans. R. Soc. London B Biol. Sci.* ,344:55 –60.
- Jackson J B C, Kirby X M, Berger H W, et al. 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*,293:629 –637.
- Janssen M and Ostrom E. 2006. Special issue on resilience, vulnerability, and adaptation: a cross-cutting theme of the human dimensions of global environmental change program. *Global Environmental Change*,16:237 –239.
- Kasperson J X, Kasperson R and Turner B. II 1995. *Regions at Risk: Comparisons of Threatened Environments*. New York: United Nations University Press.
- Kent and Williams G J. 1994. *Encyclopedia of Computer Science and Technology*. New York: Marcel Dekker.
- Kinzig A P. 2001. Bridging disciplinary divides to address environmental and intellectual challenges. *Ecosystems*,4:709 –715.
- Kinzig A P, Starrett D, Arrow K, et al. 2003. Coping with uncertainty: a call for a new science-policy forum. *Ambio*,32:330 –335.
- Knuth B A. 2002. The many faces of salmon: implications of stakeholder diversity in the Great Lakes. In: *Sustaining North American Salmon: Perspectives Across Regions and Disciplines*. Lynch K D, et al. (eds). American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 181 –194.
- Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, et al. 2002. Pharmaceuticals, hormones and other organic wastewater contaminants in U. S. streams 1999 –2000: a national reconnaissance. *Environ. Sci. Tech.* ,36:1202 –1211.
- Lambin E F, Turner B L II, Geist HJ, et al. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*,11:261 –269.
- Lebel L. 2002. Industrial transformation and shrimp aquaculture in Thailand and Vietnam: pathways to ecological, social, and economic sustainability? *Ambio*,31:311 –323.
- Liu J and Diamond J. 2005. China's environment in a globalizing world. *Nature*,435:1179 –1186.
- Liu J, An L, Batie S, Groop R, et al. 2003. Human impacts on land cover and panda habitat in Wolong Nature Reserve: linking ecological, socioeconomic, demographic, and behavioral data. In: *People and the Environment: Approaches for Linking Household and Community Surveys to Remote Sensing and GIS*. Fox, J., et al., eds. Boston: Kluwer Academic Publishers, 241 –263.
- Liu J, Daily G, Ehrlich P, et al. 2003. Effects of household dynamics on resource consumption and biodiversity. *Nature*,421:530 –533.
- Liu J, Linderman M, Ouyang Z, et al. 2001. Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. *Science*,292:98 –101.
- Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. 2007. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*,317:1513 –1516.

-
- Low B, Costanza R, Ostrom E. 1999. Human ecosystem interactions: a dynamic integrated model. *Ecol. Econ.*, 31: 227 – 242.
- Lubchenco J. 1998. Entering the century of the environment, a new social contract for science. *Science*, 279: 491 – 497.
- Ma S and Wang R. 1984. Social-economic-natural complex ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 4: 1 – 9.
- Marsh G P. 1864. *Man and Nature*. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 472.
- Mastrandrea M D and Schneider S H. 2001. Integrated assessment of abrupt climatic changes. *Climate Policy*, 1: 433 – 449.
- McDonnell M J and Pickett S T A. 1993. *Humans as Components of Ecosystems: The Ecology of Subtle Human Effects and Populated Areas*. New York: Springer-Verlag, 346.
- McMichael A, Bolin B, Costanza R, et al. 1999. Globalization and the sustainability of human health: an ecological perspective. *BioScience*, 49: 205 – 210.
- McMichael A J, Butler C D and Folke C. 2003. New visions for addressing sustainability. *Science*, 302: 1919 – 1920.
- Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. 1972. *The Limits to Growth*. Potomac Associates, New York, 386.
- Michener K W, Baerwald J T, Firth P, et al. 2001. Defining and unraveling biocomplexity. *BioScience*, 51: 1018 – 1023.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: policy responses*. Washington D C: Island Press, 654.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington D C: Island Press, 160.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Washington D C: Island Press, 498.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: opportunities and challenges for business and industry*. Washington D C: Island Press, 36.
- Moran E F. 2006. *People and nature: an introduction to human ecological relations*. Boston: Blackwell, 218.
- Moran E F and Ostrom E. 2005. *Seeing the forest and the trees. Human-environment interactions in forest ecosystems*. Cambridge: MIT Press, 456.
- Morgan G M and Henrion M. 1990. *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. New York: Cambridge University Press, 344.
- Morgan M G and Dowlatabadi H. 1996. Learning from integrated assessment of climate change. *Clim. Change*, 34: 337 – 368.
- Myers R and Worm B. 2003. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature*, 423: 280 – 283.
- National Research Council. 1999. *Our common journey*. Washington D C: National

Academy Press,384.

Norgaard R B. 1994. Development betrayed; the end of progress and a coevolutionary revisioning of the future. New York: Routledge,296.

O'Meara M. 1999. Reinventing cities for people and the planet. Worldwatch Paper No. 147. Washington D C: Worldwatch Institute,94.

Odum E P. 1989. Ecology and our endangered life-support systems. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates,301.

Odum H T. 1971. Environment, power and society. New York: Wiley Interscience,344.

Ostrom E. 1990. Governing the commons. Cambridge University Press, New York, 298 pp.

Ostrom E. 2005. Understanding institutional diversity. Princeton, New Jersey: Princeton University Press,376.

Palumbi S R. 2001. Humans as the world's greatest evolutionary force. Science,293: 1786 –1790.

Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. 2003. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. Ann. Assoc. Am. Geographers, 93:314 –337.

Parson E A. 2003. Protecting the ozone layer: science and strategy. Oxford: Oxford University Press,377.

Parson E A and Fisher-Vanden K. 1997. Integrated assessment models of global climate change. Annu. Rev. Energy Environ. ,22:589 –628.

Patz J, Campbell-Lendrum D, Holloway T, et al. 2005. Impact of regional climate change on human health. Nature,438:303 –310.

Pauly D. 1995. Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. Trends Ecol. Evol. ,10:430.

Peterson G D, Cumming G and Carpenter S. 2003. Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world. Conserv. Biol. ,17:358 –367.

Pickett S, Cadenasso M and Grove J. 2005. Biocomplexity in coupled natural-human systems: a multidimensional framework. Ecosystems,8:225 –232.

Postel S L, Daily G C and Ehrlich P R. 1996. Human appropriation of renewable fresh water. Science,271:785 –788.

Power M E, Tilman D, Estes J A, et al. 1996. Challenges in the quest for keystones. BioScience,46:609 –620.

Prober S, Thiele K, Lunt I, et al. 2005. Restoring ecological function in temperate grassy woodlands: manipulating soil nutrients, exotic annuals and native perennial grasses through carbon supplements and spring burns. J. Appl. Ecol. ,42:1073 –1085.

Redman C L. 1999. Human dimensions of ecosystem studies. Ecosystems,2:296 –298.

Redman C L, Grove M and Kuby L. 2004. Integrating social science into the long term

ecological research (Iter) network; social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. *Ecosystems*, 7:161 –171.

Resilience to coastal disasters. *Science*, 309:1036 –1039.

Richerson P J. 1977. Ecology and human ecology: a comparison of theories in the biological and social sciences. *Am. Ethnologist*, 4:1 –26.

Richter B D and Richter H E. 2000. Prescribing flood regimes to sustain riparian ecosystems along meandering rivers. *Conserv. Biol.*, 14:1467 –1478.

Rignot E and Kanagaratnam P. 2006. Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science*, 311:986 –990.

Robles C and Desharnais D. 2002. History and current development of a paradigm of predation in rocky intertidal communities. *Ecology*, 83:1521 –1536.

Root T, MacMynowski D, Mastrandrea M, et al. 2005. Human-modified temperatures induce species changes: joint attribution. *Proc. Natl. Acad. of Sci. U. S. A.*, 102:7465 –7469.

Root T, Price J, Hall K, et al. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421:57 –60.

Rotmans J. 1990. IMAGE: An integrated model to assess the greenhouse effect. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 289.

Sassan S. 1996. Losing Control? Sovereignty in an age of globalization. New York: Columbia University Press, 128.

Scheffer M, Carpenter S, Foley J, et al. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413:591 –596.

Schiermeier Q. 2005. Poles lose out as ozone levels begin to recover. *Nature*, 437:179.

Schneider S H. 1997. Integrated assessment modeling of global climate change: transparent rational tool for policy making or opaque screen hiding value-laden assumptions? *Environ. Model. Assess.*, 2:229 –248.

Schneider S H. 2004. Abrupt non-linear climate change, irreversibility and surprise. *Global Environmental Change*, 14:245 –258.

Schneider S H and Londer R. 1984. *The Coevolution of Climate and Life*. Sierra Club

Sokolov A P, Schlosser C A, Dutkiewicz S, et al. 2005. MIT integrated global system model (IGSM) version 2: model description and baseline evaluation. http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt124.pdf.

State Oceanic Administration of China. 2004. (www.soa.gov.cn/chichao)

Steffen W, Sanderson A, Jäger J, et al. 2004. *Global change and the earth system; a planet under pressure*. Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 332.

Stern P C. 1993. A second environmental science: human-environment interactions. *Science*, 260, 1897 –1899.

Stern P C and Fineberg H, eds. 1996. *Understanding risk: informing decisions in a democratic society*. Washington D C: National Academy Press, 264.

- Stern P C, Young O R and Druckman D. 1992. Global environmental change: understanding the human dimensions. Washington D C: National Academy Press, 308.
- Thomas W L Jr. 1956. Man's role in changing the face of the earth. Chicago: University of Chicago Press, 193.
- Thompson L, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. 2002. Paleoclimate: Kilimanjaro ice core records; evidence of holocene climate change in tropical Africa. *Science*, 298: 589.
- Turner B L II, Clark W, Kates R, et al. 1990. The earth as transformed by human action: global and regional changes in the biosphere over the past 300 years. Cambridge: Cambridge University Press, 713.
- U. S. Commission on Ocean Policy. 2004. An ocean blueprint for the 21st century. http://oceancommission.gov/documents/full_color_rpt/000_ocean_full_report.pdf.
- UN Department of Economic and Social Affairs/Population Division. 2004. World Urbanization Prospects; The 2003 Revision. United Nations, New York, 335.
- United Nations Centre for Human Settlements (Habitat). 2001. Cities in a globalizing world. global report on human settlements. 2001. London: Earthscan, 344.
- United Nations Cyberschoolbus. 2006. Mexico City, Mexico. <http://www.un.org/cyberschoolbus/habitat/profiles/mexico.asp>.
- United Nations University. 2005. As ranks of "environmental refugees" swell worldwide, calls grow for better definition, recognition, support. [http://www.ehs.unu.edu/article;130? menu 20](http://www.ehs.unu.edu/article;130?menu20).
- Van der Leeuw S. E. (ed). 2000. Land degradation as a socio-natural process. New York: Columbia University Press, 22.
- Van der Leeuw S E and Redman C L. 2002. Placing archaeology at the center of socio-natural studies. *Am. Antiquity*, 67: 597 – 605.
- Vayda A P. 1988. Actions and consequences as objects of explanation in human ecology. In: *Human Ecology: Research and Applications*. Borden, R. J., et al., eds. Society for Human Ecology, College Park, Maryland, 9 – 18.
- Victoria University of Wellington Centre for Building Performance Research. 2005. Embodied energy coefficients. [http://www.vuw.ac.nz/cbpr/documents/pdfs/ ee-coefficients.pdf](http://www.vuw.ac.nz/cbpr/documents/pdfs/ee-coefficients.pdf).
- Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J. et al. 1997. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 277: 494 – 499.
- Walker B and Meyers A J. 2004. Thresholds in ecological and social-ecological systems; a developing database. *Ecol. Soc.*, 9, 3.
- Walker B H, Abel N, Stafford-Smith D M, et al. 2002. A framework for the determinants of degradation in arid ecosystems. In: *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Reynolds J F and Stafford-Smith D M, eds. Berlin: Dahlem University Press, 75 – 94.
- Walker B H, Anderies J M, Kinzig A P, et al. 2006. Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development: introduction to the spe-

cial issue. *Ecol. Soc.* ,11:12.

Warren-Rhodes K and Koenig A. 2001. Ecosystem appropriation by Hong Kong and its implications for sustainable development. *Ecol. Econ.* ,39:347 -359.

Webster P J, Holland G J, Curry J A and Chang H R. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*,309:1844 -1846.

World Trade Organization. 2006. World total merchandise trade. <http://stat.wto.org/StatisticalProgram/WSDStatProgramSeries.aspx?Language=E>.

York R, Rosa E A and Dietz T. 2003. Footprints on the earth: the environmental consequences of modernity. *Am. Sociol. Rev.* ,68:279 -300.