

DOI: 10.5846/stxb201809101939

万里洋, 吴和成.石化基地生态环境系统脆弱性演化机理研究——以连云港为例.生态学报, 2019, 39(17): - .

Wan L Y, Wu H C. The evolutionary mechanism of eco-environmental system vulnerability in the petrochemical base: A case study of Lianyungang. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

石化基地生态环境系统脆弱性演化机理研究 ——以连云港为例

万里洋, 吴和成*

南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106

摘要:通过梳理国内外文献,挖掘脆弱性本质,本文提出普遍适用于生态系统脆弱性的 PIR 理论框架,并从人—环境耦合角度构建演化模型探究石化基地生态环境系统脆弱性演化机理。研究发现:生态系统脆弱性来源于压力扰动,体现在暴露性与敏感性的联合效应,而最终取决于弹性应对影响的状态。石化基地是一个多层次闭环系统,在压力影响下,暴露性、敏感性、弹性彼此间的双重导向作用决定着脆弱性的演化进程;内外部人文与环境因素变化是脆弱性的潜在驱动力,而压力源增多、暴露比例扩大、敏感性上升、弹性退化以及缺乏环境治理能力是加剧脆弱性的具体表征。最后,以欠发达地区连云港石化基地为例,模拟其系统脆弱性演化过程,并从压力、暴露性、敏感性、自我恢复能力和人工修复能力方面构建评价指标体系。本文结论与建议不仅对石化基地所在欠发达地区的可持续发展具有启示意义,还为其生态环境系统脆弱性的进一步评价提供理论依据。

关键词:石化基地;生态环境系统;脆弱性;演化机理;欠发达地区

The evolutionary mechanism of eco-environmental system vulnerability in the petrochemical base: A case study of Lianyungang

WAN Liyang, WU Hecheng*

School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: Based on reviewing the previous literature and excavating the essence of vulnerability, this paper proposed a theoretical framework that is generally applicable to ecosystem vulnerability, and then the evolution model was constructed from the perspective of the coupling between human and environment to explore the evolution mechanism of eco-environmental system vulnerability in petrochemical bases. The study finds that ecosystem vulnerability is derived from pressure disturbance. It is reflected in the combined effects of exposure and sensitivity, and ultimately depends on the state that resilience copes with impact. As a multi-level closed-loop system, petrochemical base is disturbed by various pressures, and the interactions among exposure, sensitivity and resilience determine the evolution of system vulnerability. Internal and external human and environmental factors are potential drivers of vulnerability, and the increase in pressure sources, exposure ratio and sensitivity, the degradation of resilience and lack of environmental governance capacity are concrete features that exacerbate vulnerability. Finally, taking Lianyungang petrochemical base as an example, the evolution process of system vulnerability is simulated, and the evaluation index system is built from the aspects of pressure, exposure, sensitivity, self-recovery and artificial repair capacity. The conclusions and suggestions in this paper not only have implications significance for the sustainable development of underdeveloped areas where the petrochemical base is located, but also provide theoretical basis for the further evaluation of the eco-environmental system vulnerability.

基金项目:国家社科基金项目(16BGL033)

收稿日期:2018-09-10; 修订日期:2019-03-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wlyboy2012@163.com

Key Words: petrochemical base; eco-environmental system; vulnerability; evolution mechanism; underdeveloped areas

20 世纪后期以来,世界经济迅猛发展,人类对生态资源过度开发导致的气候变暖、自然灾害等生态环境问题在全球范围内涌现,许多地区对资源、环境的需求已超出当地生态系统的服务能力,生态环境遭到严重破坏,系统功能不断退化。为实现人类社会与生态环境协调发展,国内外学者一直致力于生态环境研究。早期, Lee 等^[1]、Smith 等^[2]从评价方法入手,以寻求更有效客观评价生态环境系统的途径;Bailey^[3]探究生态环境系统与外界环境关系,并将生态环境系统按功能区进行了划分;Kumar 等^[4]则通过敏感性分析,反映了生态环境系统对区域内外干扰的敏感程度。李长安等^[5]关注长江流域生态环境恶化态势,对其复杂生态环境系统的演变过程及退化机制展开了研究并加以优化调控;曹雪琴^[6]则在加速推进城市化进程中,着重探讨了生态环境系统的建设问题。

近年来,环境破坏、资源枯竭等问题日益突出,加上人口数量激增,生态环境系统的协调能力进一步下降,脆弱性逐渐显现并伴有愈演愈烈趋势。如今,生态环境系统脆弱性(简称,EESV)作为一种新的研究范式成为生态环境领域的研究热点^[7-8]并引起国际环保组织(IPCC, WMO, UNEP, WCED)的广泛关注;大量研究也为决策者在区域环境保护及资源管理中提供了较为合理的决策工具及有针对性的可行性政策建议,并将其有效纳入到制定当地环保措施中。另外,回顾以往文献发现,生态环境脆弱性研究具有极强的区域针对性,均以明确具体研究对象、范围为基本前提,如特定流域^[9]、山区^[10]、海域^[11]、岛屿^[12]以及公园^[8]等;再以特定压力扰动为研究切入点,如气候变化^[13]和自然灾害^[14]等。

“十一五”期间,石化基地凭借企业关联性强,公共资源共享以及能够综合治理环境污染等优势迅速发展,成为我国石化产业蓬勃发展的主流形式;然而,其特殊属性却给区域生态环境埋下了巨大隐患,负面效应制约着地区经济的发展。尤其是在欠发达地区,石化基地是把双刃剑,研究其 EESV 对于当地经济可持续发展及生态保护具有重要的指导意义。截至目前来看,有关石化基地脆弱性的研究主要涉及生产安全^[15]、事故风险^[16]以及应急管理^[17]等方面,却鲜有文献从系统视角来考察石化基地生态环境脆弱性问题,忽略了石化基地经济效益给区域生态环境所带来的影响。虽然刘珏珏等^[18]、李风军等^[19]分别就陕北、宁东能源化工基地的生态环境脆弱性进行了评价,但他们侧重于评价方法的应用,理论研究却相对滞后,未能揭示脆弱性的演化机理及其形成根源,致使评价指标体系的建立缺乏理论依据,其结果能否为欠发达地区的经济可持续发展提供准确有效的借鉴和参考,有待验证。

本文研究目的分为三个:首先,通过梳理传统理论,探究脆弱性本质,提出具有普遍适用性的生态系统脆弱性理论框架。一方面弥补生态脆弱性理论研究的不足,丰富理论成果,尝试从系统视角统一生态脆弱性内涵;另一方面为后续评价 EESV 奠定理论基础。其次,基于生态系统脆弱性理论,从人—环境耦合的角度构建石化基地 EESV 演化模型并对其演化机理进行解析,挖掘脆弱性的潜在驱动因素,揭示其演化特征,从而有助于准确有效地预防系统脆弱性。最后,以欠发达地区连云港石化基地为例,模拟其 EESV 演化过程,并从压力、暴露性、敏感性、自恢复能力和人工修复能力等方面构建石化基地 EESV 评价指标体系,为石化基地的建设和发展提供理论指导,同时也为进一步评价 EESV 时的指标选取提供参考。

1 生态系统脆弱性理论框架

脆弱性(Vulnerability),在不同领域和学科中已有数十年的发展历史,如今愈发流行于生态学领域。经过长期的探索与研究,生态脆弱性理论不断丰富、拓展;其中,最具应用代表性的有压力-敏感性(PS)理论^[20]、频率-严重性-损失-适应成本(FSDA)理论^[21]、潜在冲击-适应能力(PA)理论^[7, 22]、压力-敏感性-弹性(PSR)理论^[23]、暴露性-敏感性-适应能力(ESA)理论^[24]、暴露性-易损性-弹性(ESR)理论^[25]、敏感性-适应能力(SA)理论^[26]、驱动力-压力-状态-冲击-响应-管理(DPSIRM)理论^[27]以及压力-状态-响应(PSR)理论^[28]。通过整理、汇总传统理论框架发现,作为一个相对较新的概念,生态脆弱性内涵尚未被阐明,再加上不同生态固有的复杂

性和差异性,致使生态脆弱性理论框架大相径庭。生态脆弱性针对的是特定研究区域,无限制或无约束范围的生态脆弱性评价是盲目而不切实际的,因此,考虑到区域范围的整体性与复杂性,以系统视角探究区域生态脆弱性更具操作性,对于地区可持续发展也更有现实意义。但是,目前有关生态脆弱性的研究多偏重实证分析,强调评价方法而忽略理论研究,更缺乏从系统层面探讨脆弱性的演化机理;这就是为什么尽管在生态脆弱性研究方面做出诸多努力,但其理论框架始终未能达成共识的原因。

事实证明,系统的正常运行是一种动态平衡,而非孤立性特征决定了任一系统难免会受到来自内外部压力的扰动^[8]。当压力影响(也称冲击)逾越系统弹性阈值时,平衡状态将被打破,系统功能退化并短时间内难以恢复,从而产生系统脆弱性^[24,26]。本质上,压力影响是系统暴露于一种或多种压力以及对这些压力敏感性的产物,而系统脆弱性则最终取决于系统构成要素承受/吸收来自压力不利影响的状态^[22]。基于系统脆弱性本质和现有理论成果,本文提出适用于解释生态系统脆弱性(如生态社会系统、生态经济系统、生态环境系统)的理论框架,即压力-影响-弹性(Pressure-Impact-Resilience, PIR)(图1)。从理论框架来看,生态系统所受扰动源于系统内外部压力,而压力对系统产生影响并通过系统暴露性与敏感性的联合效应得以体现。影响分为直接影响与潜在影响,直接影响是系统对压力扰动强烈响应的结果,能在短期内观测到;相反,潜在影响则需长期累积才能得以显现。弹性是反映系统承受压力冲击,并在特定条件下仍能维持系统基本结构和功能的能力,包括系统自我恢复能力和人工修复能力。

迄今为止,脆弱性应用涵盖多个学科、不同领域,虽然概念迥然相异,但其最基本含义仍是系统、子系统或系统元素因暴露于风险、扰动、危险或压力而遭受伤害或损害的程度^[29]。后来,IPCC(2014)^[30]给出官方界定,即“受到不利影响的倾向”,包括“含有敏感或易受伤害的各种概念和要素,以及缺乏应对和适应能力”。生态环境系统是指在特定系统或区域范围内影响人类生活和生产的各种自然资源及其作用的总称,所以,对于EESV概念的界定要根据具体研究对象划定特定区域范围来进行。就石化基地而言,脆弱性是其生态环境系统中不可避免的特性,并由区域内的人、物、环境等因素决定。因此,借鉴脆弱性本质含义并结合生态系统脆弱性理论框架,本文将石化基地EESV概念简化为“在石化基地特定范围内,暴露性要素容易遭受或无法应对压力扰动而产生不利影响的状态”。

2 石化基地生态环境系统脆弱性演化机理

2.1 演化模型构建与分析

基于PIR理论及石化基地EESV概念,本文构建系统脆弱性演化模型,如图2所示。该模型将石化基地生态环境系统视为人类—环境耦合系统,强调内外部驱动因素的多重性以及跨尺度性,系统的呈现出脆弱性的演化过程及特征,是一个多要素构成、多方向发展、跨尺度影响、多重循环的闭合回路。

石化基地生态环境系统是人类与自然环境耦合的产物,其脆弱性必然受到人文与环境两方面因素影响。在演化模型的运行中,区域内外部人文、环境因素是EESV形成的潜在驱动力。人文因素(如:规划目标、资源利用、文化意识、环境管理、科学技术和社会反映等)和环境因素(如:土壤类别、地表水系、动植物多样性、地表植被量、海洋水质以及台风、寒潮、雷雨大风等气候因素)的变化将形成数量、规模不确定性的系统压力,压力的相互作用扰动生态环境系统从而迫使系统暴露性要素做出响应并加以调整、适应,其结果表现在系统敏感性;而系统对压力冲击的敏感程度又取决于暴露性要素的特征、位置、比例以及承载力情况。由此可见,压

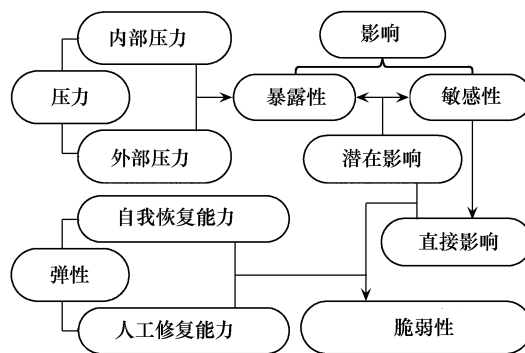


图1 生态系统脆弱性理论框架

Fig.1 Theoretical framework of ecosystem vulnerability

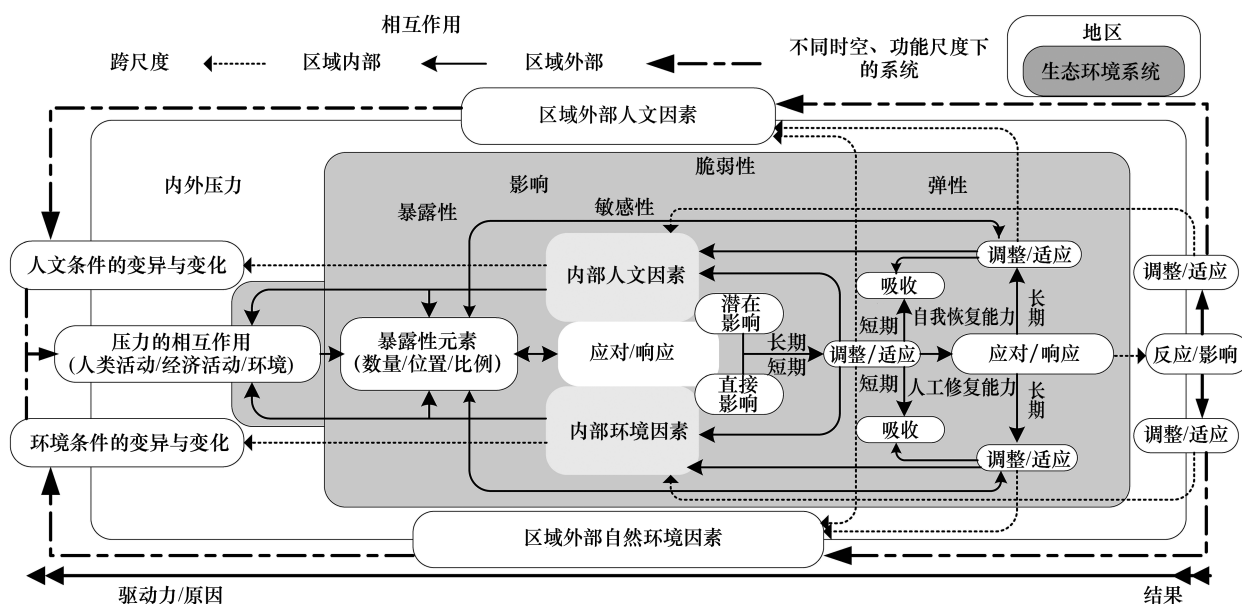


图2 石化基地生态环境系统脆弱性演化模型

Fig.2 Evolution model of petrochemical base EESV

力对生态环境系统所造成的影响通过其暴露性和敏感性的综合效应得以体现。敏感性低的暴露性要素对压力响应不显著,影响在短时间内难以显现,属于潜在影响;凭借自身恢复能力,生态环境系统能够及时调整并适应,其脆弱性难以被察觉。随着暴露性比例的扩大,对压力响应强烈的元素也会增多,再加上累积效应,敏感性骤升,系统来不及调整更难以适应,最终引发毁灭性现象;此时,压力所造成的影响显而易见,视为直接影响。一系列不可逆结果的产生,导致生态环境系统的自我恢复能力不断退化,而欠发达地区又缺乏有效治理能力,生态环境持续恶化,系统功能难以修复,其脆弱性加剧。此外,区域外部人文、环境因素也会根据系统脆弱性演化情况进行调整与适应,其结果又将进一步影响系统内部人文与环境因素变化,从而形成脆弱性演化模型的闭合回路并展开新一轮运转。

从系统整体来看,石化基地生态环境系统是一个多层次系统,归属于母系统,也包含子系统;而且不同系统间势必存在横向与纵向联系。例如:系统在调整、适应时期,压力扰动因素的扩散效应会波及区域外围环境,引起外部环境条件变化;再者,鉴于石化基地的特殊属性,一旦发生意外事故,区域生态环境将倍受社会关注,迫使政府采取紧急处理措施,从而影响着区域外部人文条件的变化。虽然 EESV 程度最终取决于系统自我恢复能力,但单纯依靠自我调节和组织能力显然已无法满足当下可持续发展要求,而跨系统间的人工修复能力在 EESV 演化中的作用日益彰显。也正是这种多层次系统间的相互作用,使得石化基地生态环境系统具有更多的不确定性,阈值也更为复杂;但同时也为石化基地 EESV 的调控提供了多元化渠道和机会。

从系统内部来看,在脆弱性演化过程中,压力扰动下的系统暴露性、敏感性以及弹性间彼此紧密联系且具有双重导向关系,如图3所示。一方面,系统暴露性特征关系着系统对压力扰动的敏感程度(即直接影响和潜在影响)及其弹性水平;而根据敏感性与弹性的状态变化,系统内暴露性元素也将做出相应调整,转化成不同特征表现。另一方面,系统弹性取决于系统敏感性程度;相反,弹性的缓冲作用也会给敏感性一个反馈,从而降低压力扰动对生态环境系统影响。随着暴露性元

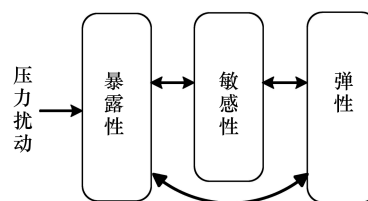


图3 系统暴露性、敏感性和弹性的内在联系

Fig.3 Intrinsic links between the exposure, sensitivity and resilience of system

素的增加,暴露性比例的增大以及暴露性元素与危险源距离的缩短,压力扰动下的系统敏感性将会升高,区域生态环境遭到破坏的可能性也会越大;而当系统弹性难以维持其基本结构和功能时,系统处于崩溃边缘,脆弱性也将升至极值。因此,在压力扰动下,系统暴露性、敏感性和弹性的内在联系决定了石化基地 EESV 程度。

2.2 石化基地生态环境系统脆弱性表征

从演化模型的运行与解析中可以看出,石化基地 EESV 的形成与演化与系统承受压力、暴露性、敏感性与弹性有关;而石化产品的生产、加工、储运、销售等活动的增加,使得石化基地在追求经济效益过程中,难免会加剧其 EESV,具体表现为:

2.2.1 压力源增多

压力源是生态系统脆弱性形成的根本原因,其来源于驱动因素直接刺激系统,对系统产生负面扰动。随着化工生产的规模化、持续化,石化基地使用和储存大量易燃易爆、有毒有害的危险化学产品,不可避免地导致生态环境系统危险源增多。另外,石化基地是许多石化企业集聚之地,其中一些企业共享基地内物料输送管网、设备等公用基础设施,而在产品生产方面又存在非常密切的联系;这就导致危险源企业毗邻且相互影响,一旦发生事故,很有可能产生多米诺连锁效应,其后果将会对区域生态环境系统造成严重破坏。众多危险源,加上内外部人文与自然环境因素的驱动,将对石化基地生态环境系统产生多重压力,加剧系统脆弱性。

2.2.2 暴露性比例扩大

石化基地存有大量种类繁多、性质复杂的易燃易爆、有毒有害化学物质,且化工产品生产大多要在高温、高压等严苛条件下进行,极易引发火灾、爆炸以及泄漏等事故;有害物质的外泄将对区域生态环境造成严重后果。生态环境系统是石化基地的构成基础,其中主要包含动植物、土地及水体等要素。环境要素暴露性比例越大,事故突发后的生态环境越容易遭受污染,系统破坏程度就会越严重,加剧 EESV。例如:目前大多数石化基地趋向沿海、沿江或深水码头地区迁址,这使得石化基地生态环境系统中水体占比较大,有毒有害化学物质的外泄,很可能流入江海,造成区域水域大面积污染。2005 年松花江流域污染事件就是典型案例。

2.2.3 敏感性上升

经济发展是人类社会活动的本质目的,而过度依赖生态环境的经济发展模式已不再适合世界各国的发展策略。历史经验教训足以证明,石化基地的发展必须在一定生态环境“阈值”范围内进行,否则生态环境系统的敏感性将持续升高,最终打破系统平衡状态,导致区域生态环境质量下降,系统服务性功能严重退化,加剧 EESV,从而威胁到人类的正常生存和发展。面对石化基地多年来粗放式发展模式,生态环境已做出强烈回应,系统敏感性一直攀升,久居不下,例如:工业“三废”引发的区域空气质量下降,水质污染、固废污染加重,耕地面积减少,土壤酸化、盐碱化范围扩大等;突发性事故导致的区域地表水系严重污染,地表植被严重破坏,物种多样性持续减少等。

2.2.4 弹性退化

正常情况下,区域生态环境系统拥有完善的组织机制,各构成要素间良好的共生关系以及食物链的相对平衡,使系统具有较好的自我调控能力维持其基本结构和功能。然而,石化基地是一个人类与自然环境相融合的复杂生态环境系统,除了先天具备的自然环境外还填充有大量的人工设施和化学产品。人类活动的参与极大扰乱了系统原有的共生关系,破坏了以往的食物链平衡。环境破坏与污染导致食物链底端的物种数量越来越少,大量废弃物堆积而无法及时有效得到分解,而只能采取人为处理方式解决。技术的限制以及处理方法的不合理,又难免会产生新的污染物,处置不当将威胁到生态环境系统安全,最终造成不可逆转后果,长期以来,区域生态环境系统难以修复再生,加剧 EESV。

2.2.5 生态环境治理能力不足

脆弱性上升还与区域生态环境治理能力不足有关,主要体现在:(1)地方政府因财政问题无法持续为环境治理提供资金支持。石化基地的生产经营权一般归属国家,而在欠发达地区,政府财政收入方式单一,收入规模有限,一系列繁杂的民生问题已经让财政入不敷出,政府更无力支撑生态环境治理工程。(2)石化企业

作为生态环境治理的另一责任方,多年来将关注点过度聚焦在经济效益上,忽视自身对生态环境治理的社会责任,造成石化基地对生态环境欠账积压,无形间加重了生态环境治理压力。(3)人才稀少,技术落后是治理能力欠缺的突出表现。从本质上讲,生态环境治理要从生产技术和设备入手,以及时有效地清理石化基地给生态环境带来的负面效应;然而,实际情况是总会产生新一轮污染现象,无法从根本上解决环境恶化问题。究其根源,就在于生产技术及设备没有得到更新、改进,化工产品未能实现绿色清洁生产;此外,缺少专业技术人才的配合,先进技术和设备也难有成效,但由于实际工作性质和环境等原因,石化基地在人才引进和挽留方面尚有诸多压力。

3 连云港石化基地生态环境系统脆弱性演化过程

近年来,连云港在工业经济方面取得了长足发展,初步形成以临港基础工业和高新技术产业为主的产业体系,规模以上工业增加值可达千亿元,呈现出一定的经济实力与潜力;但是,相比发达地区仍存有一定差距,生产力发展不平衡,科技水平尚未达到先进标准,属于欠发达地区。石化产业极强的产业关联效应,能够带动和引导大批相关产业的发展,因此,石化基地的入驻不仅能弥补连云港在经济发展中的工业短板,还能推动区域经济的进一步发展。生态环境系统为连云港石化基地提供了良好的发展平台和资源保障,同时也对化工副产品进行回收,对维护区域生态平衡具有至关重要的作用;从这点来考虑,以连云港石化基地为例,对其EESV演化过程进行模拟(图4),挖掘其影响因素,从而形成脆弱性评价指标体系并深入研究显得尤为重要。

目前,连云港石化基地正处于建设初期,由于人口稀少,商业活动不多,尚未形成化工产品的生产、销售等活动,所以,生态环境系统具有较好的自我恢复能力,人类活动对区域生态环境所造成的扰动并不明显。但是,值得注意的是,附近海洋水质存在磷酸盐超标现象,地表水系(如烧香支河、扁担河、善后河)中也含有过量总磷、总氮和氯化物等污染物,大量盐田和农田被工业用地所取代,EESV正在萌发。

随着石化基地竣工并投入运营,原本“人类-环境摩擦系数”较小区域逐渐演变为众多石化企业聚集之地,进而成为集化工产品生产、加工、运输及销售于一体的综合贸易场所。大量人口的涌入将使得最初的自然环境系统转变为人类-自然环境耦合的生态环境系统。一方面,由于人口增加,生活垃圾必然骤增,加上人员专业素质、环保意识的差异化,无形中给生态环境带来巨大压力。另一方面,伴随着化工制造业及其相关产业的快速发展,石化基地需要消耗大量资源(如土地、水、电、能源等)以满足发展需要,并不断产生工业废气(SO_2 、 NO_x 、 H_2S 、烃类、烟尘等)、废水(COD、石油类、硫化物、氨氮、盐类等)、固废(油泥和污泥等)。若环境管理机制不完善,不能彻底有效处理有毒有害物质,这将成为生态环境系统的隐患,日积月累,会对区域环境带来持久性污染,再考虑到自然环境(气温、降雨量等)变化,更加剧对生态环境的破坏。

人类活动、经济活动、资源消耗以及环境变化作为连云港石化基地主要压力源,对其生态环境系统造成诸多压力(如图4所示),是脆弱性形成的直接驱动因素。压力的相互作用共同作用于系统暴露性要素(如地表水系、土地、动植物、人口、空气环境、海洋资源和灾害等)。此外,石化基地不仅是一个经济要素集聚之地,凭借其化工企业高度集中,易燃易爆化学原材料大量储存,有毒有害化工产品大批生产等特点,它也是安全事故易发之地。人员操作不当,生产技术不合理,设备可靠性下降以及现场安全防护工作疏忽等原因,都极有可能引发火灾(池火、喷射火、火球、闪火)、爆炸(蒸汽爆炸、沸腾液体爆炸、物理爆炸)等事故。而且,石化基地内各危险源企业往往位置相邻且时常共享公共基础设施,事故发生所带来的多米诺效应会导致大量有毒有害污染物的突发性泄漏,其后果可在短时间内对石化基地生态环境系统造成大规模污染和破坏。动植物数量越多,植被、土地面积越大,生态环境系统对于压力扰动时的敏感性就会越强。例如:区域范围内生物多样性下降,雾霾天气加重,地表植被面积退化,土壤酸化、盐碱化加剧,农田面积骤减等。地表水系、海岸线距离危险源越近,则越容易出现地表水系沉积物堆积,水质恶化,水中溶解氧量减少,细菌增多等现象;污染物也有可能随江河汇聚入海,从而进一步破坏沿海海洋生态,海水质量下降,海洋物种减少。最终,环境的恶化可能演变成暴雨、寒潮、洪水等自然灾害,致使地表径流量增大,水土流失严重,海平面上升;而受灾面积的不断扩大,

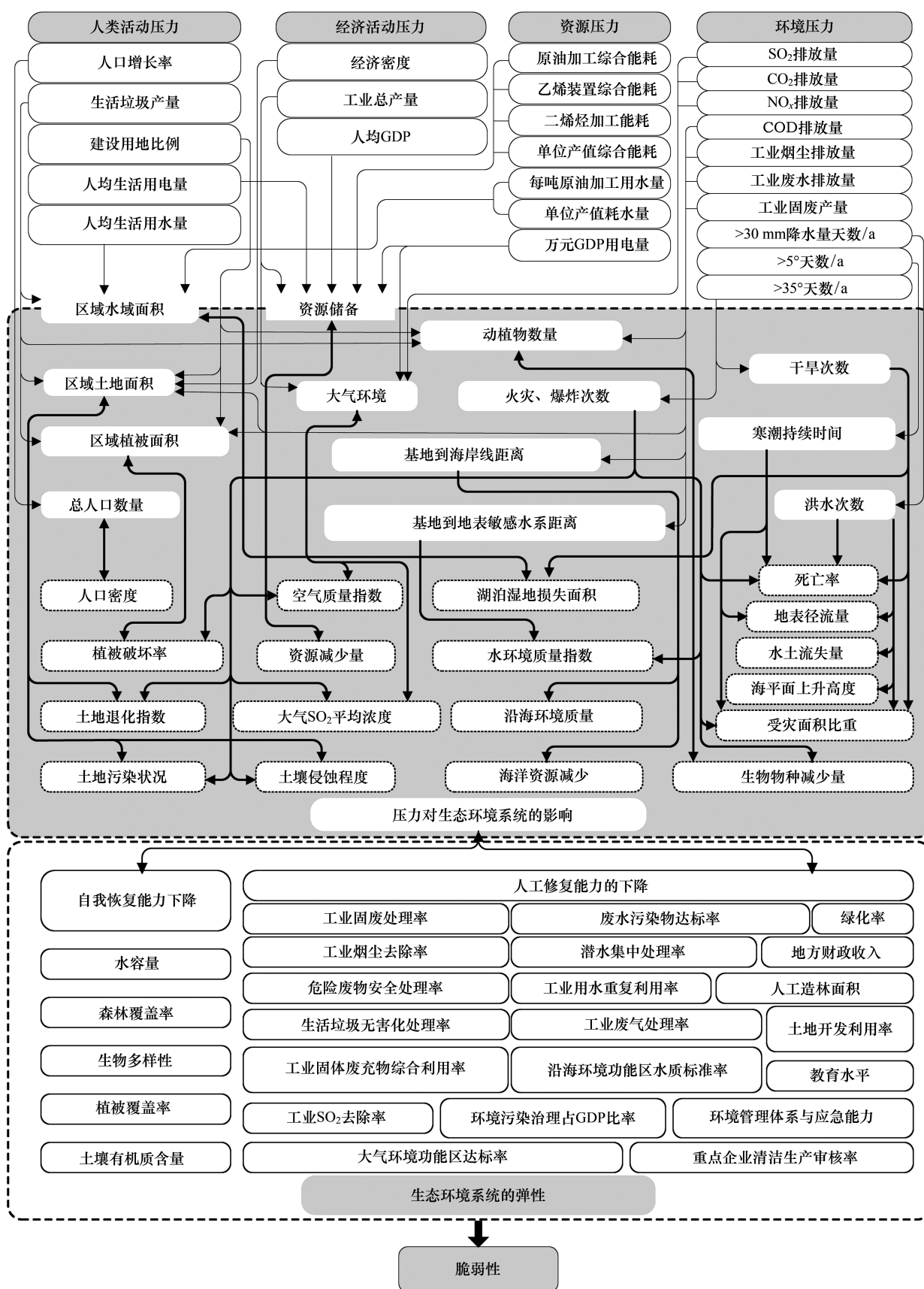


图4 连云港石化基地生态环境系统脆弱性演化过程

Fig.4 Evolution process of EESV in Lianyungang petrochemical base

也将影响到区域居民的正常生活,导致财产受损、死亡率升高,石化基地生态环境系统的敏感性急剧上升,压力对系统的负面影响加重。

弹性,是石化基地生态环境系统应对负面影响的能力,包含两个方面,即自我恢复能力和人工修复能力。从自我恢复能力来看(如水容量、森林覆盖率、生物多样性、植被覆盖率、土壤有机含量等),历史规律表明它会在石化基地的发展过程中逐渐退化。石化产业作为国家基础工业,其市场前景广阔,经济效益可观等特点使连云港石化基地持续发展成为必然;由此看来,区域生态环境也将必定长期受到来自化工产品生产、销售及运输等活动的扰动。不可再生性环境资源不断被消耗,可替代性产品却发展缓慢,这种资源环境泡沫型的经济模式注定了系统自我恢复能力呈现退化趋势。从人工修复能力来看,石化基地在发展初期如果缺乏全面、科学的规划(如环境管理体系与应急能力、土地开发利用率),未能树立区域生态环保意识和可持续发展思想(如教育水平、工业“三废”处理率、生活垃圾处理率、污水集中处理率、重点企业清洁生产审核率、沿海环境功能区水质标准率等),将加重生态环境系统人工修复任务。人力、物力的巨大投入,给连云港地方政府带来沉重负担(如地方财政收入、环境污染治理占 GDP 比率);化工企业又缺乏环境治理的积极性,大都趋于政府压力被动接受以满足环保排放标准(如废水污染物达标率、大气环境功能区达标率、工业 SO_2 去除率等);而达标企业对自身未能提有更高程度的环保要求(如工业固体废弃物综合利用率、工业用水重复利用率、危险废物安全处理率等)。一旦石化基地生态环境系统敏感性骤升,生态环境遭到破坏,地方政府由于财政和效率等问题也只能对系统的细枝末节部分进行修复(如绿化率、人工造林面积等),而无法根治环境恶化问题。自我恢复能力退化和人工修复能力不足是生态环境系统弹性下降的突出表现,以致系统无法从压力影响中恢复,加剧连云港石化基地 EESV。

4 结论与建议

4.1 结论

本文以欠发达地区石化基地为视角,对其 EESV 演化机理进行研究。从理论框架来看,生态系统脆弱性是压力、影响、弹性共同作用下的一种状态。其中,压力是系统脆弱性的来源;影响是系统对压力扰动的响应程度,通过系统暴露性和敏感性的综合效应得以体现;弹性则是系统缓冲、调节、适应压力冲击的能力。为便于理解和操作,本文提出由压力、影响(即直接和潜在的影响)和弹性(即自我恢复能力和人工修复能力)构成的普遍适用于生态系统脆弱性研究的理论框架。从演化机理来看,石化基地内外部人文与自然环境因素的变化是其 EESV 的根源,而在此环境下给生态环境系统带来的诸多压力(即人类活动压力、经济活动压力、资源压力以及环境压力)则是 EESV 产生的直接驱动力。在压力扰动下,系统的暴露性、敏感性及弹性彼此间的双重导向关系决定了脆弱性的演化进程,进而揭示出加剧石化基地 EESV 的具体表征为压力源增多,暴露性比例扩大,敏感性上升,弹性退化以及生态环境治理能力不足。此外,石化基地生态环境系统又是一个多层次的闭环系统,不同系统间存在横向和纵向联系,而正是跨层次系统间的相互作用给系统带来了更多的不确定性因素,使得脆弱性“阈值”更加复杂。因此,明确各系统间作用机理以及跨级间的相互关系能够为其脆弱性调控提供多元化渠道和机会。最后,通过模拟连云港石化基地 EESV 的演化过程,结合当地特征分别从压力、直接影响、潜在影响、自恢复能力和人工修复能力等方面构建了连云港石化基地 EESV 的评价指标体系,为进一步脆弱性评价提供指标选取的参考。

4.2 建议

在欠发达地区,石化基地是地区经济的强力增长点。要实现区域发展的可持续性,首先要从生态环境系统脆弱性的根源入手,地方政府需要转变传统区域发展观念,提高综合效益。一方面对石化基地进行全面、科学的规划,树立区域生态环保意识和可持续发展思想,从源头减少对生态环境系统的压力的形成;另一方面,将石化基地 EESV 评估规范化、定量化、行政化,并把评估结果作为考核政府绩效的基本指标,达到监督、指导、预警和管理的作用,从而使得生态环境系统在有意保护下可持续地为人类提供服务。从这个意义上来说,

通过把控石化基地生态环境系统内外部人文、环境因素的变化,从源头上减少压力源,实现人类与环境的协调发展,能够提高社会经济和人类福祉的综合效益。其次,从系统的影响(暴露性和敏感性)角度考虑,石化基地在对化工原料、产品的存放地进行选址时,要综合权衡系统内暴露性元素的性质,尽量避开环境敏感区域,减少石化基地内敏感性元素的暴露比例;成立安全部门,加大化工原料、产品运输和生产安全的审查;加强环境管控,做好高危地区通风、防火、防水、防瓦斯等检测手段,严格控制温度、湿度和亮度,提高安全预防能力。然后,从系统的恢复能力考虑,地方政府要推动石化企业提升技术和管理水平,实行自下而上的治理。单纯依靠生态环境系统的自我恢复能力已无法满足当前可持续发展的要求,有关部门要严格把关石化企业的技术和管理水平,提高环境保护和治理中的技术效益,实施自下而上治理;此外,还应该充分了解跨级系统间的影响,注重人的发展,提高员工节约意识,调动员工环保积极性;这样才能从源头上检测,预防和治理石化基地 EESV,从而提高生态环境系统人工修复能力。最后,数据收集是实证研究的基础,为脆弱性评估提供科学有力的支撑,考虑到这点,地方组织和机构应加以重视,需要定期收集石化基地内相关指标数据,为区域 EESV 的研究奠定实证基础。

参考文献 (References):

- [1] Lee J T, Elton M J, Thompson S. The role of GIS in landscape assessment: using land-use-based criteria for an area of the Chiltern Hills Area of Outstanding Natural Beauty. *Land Use Policy*, 1999, 16(1):23-32.
- [2] Smith W, Meredith T C, Johns T. Exploring methods for rapid assessment of woody vegetation in the Batemi Valley, North-central Tanzania. *Biodiversity and Conservation*, 1999, 8(4):447-470.
- [3] Bailey R G. Ecoregions: the ecosystem geography of the ocean and continents. New York: Springer-Verlag, 1998: 1-176.
- [4] Kumar K S K, Parikh J. Indian agriculture and climate sensitivity. *Global Environmental Change*, 2001, 11(2):147-154.
- [5] 李长安, 殷鸿福, 俞立中, 许厚泽, 蔡述明, 陈中原, 王建, 殷瑞兰. 关于长江流域生态环境系统演变与调控研究的思考. *长江流域资源与环境*, 2001, (6):550-557.
- [6] 曹雪琴. 加快城市化与生态环境系统建设. *经济经纬*, 2001, (6):67-69.
- [7] Yoo G, Kim A R, Hadi S. A methodology to assess environmental vulnerability in a coastal city: application to Jakarta, Indonesia. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102:169-177.
- [8] Nandy S, Singh C, Das K K, Kingma N C, Kushwaha S P S. Environmental vulnerability assessment of eco-development zone of Great Himalayan National Park, Himachal Pradesh, India. *Ecological Indicators*, 2015, 57:182-195.
- [9] 李连伟, 刘展, 白永良, 盛洁. 基于 AHP-CVI 技术的黄河三角洲海岸带环境脆弱性评价. *生态环境学报*, 2018, 27(02):297-303.
- [10] Liu Z J, Yu X X, Li L, Huang M. Vulnerability assessment of eco-environment in Yimeng mountainous area of Shandong Province based on SRP conceptual model. *The Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8):2084-2090.
- [11] Celikyilmaz A G. Vulnerability of the Black Sea to the impacts of climate change. *Environmental security in watersheds: the Sea of Azov*. Netherlands: Springer-Dordrecht, 2012:173-180.
- [12] Trueba S, Pouteau R, Lens F, Feild T S, Isnard S, Olson M E, Delzon S. Vulnerability to xylem embolism as a major correlate of the environmental distribution of rain forest species on a tropical island. *Plant Cell and Environment*, 2017, 40(2):277-289.
- [13] Al-Kalbani M S, Price M F, Abahussain A, Ahmed M, O'Higgins T. Vulnerability assessment of environmental and climate change impacts on water resources in Al Jabal Al Akhdar, Sultanate of Oman. *Water (Switzerland)*, 2014, 6(10):3118-3135.
- [14] Fernandez P, Mourato S, Moreira M, Pereira L. A new approach for computing a flood vulnerability index using cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2016, 94:47-55.
- [15] 陈清光. 化工园区生产安全免疫机理与模型及免疫力评估研究[D]. 华南理工大学, 2014.
- [16] 胡静涛. 化工园区危险脆弱性分析[D]. 哈尔滨理工大学, 2014.
- [17] 朱卫东. 核电厂安全事故应急管理的脆弱性评估研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2011.
- [18] 刘珏珏, 解建仓, 张建龙. 陕北能源化工基地生态脆弱性评价. *黑龙江大学学报*, 2012, 3(1):61-64.
- [19] 李风军, 冯晓秀, 陆桂琴. 宁东能源化工基地生态环境脆弱性评价研究. *生态科学*, 2014, 33(5):1017-1022.
- [20] Aretano R, Semeraro T, Petrosillo I, De Marco A, Pasimeni M R, Zurlini G. Mapping ecological vulnerability to fire for effective conservation management of natural protected areas. *Ecological Modelling*, 2015, 295:163-175.
- [21] Aslam A Q, Ahmad S R, Ahmad I, Hussain Y, Hussain M S. Vulnerability and impact assessment of extreme climatic event: a case study of

- southern Punjab, Pakistan. *Science of the Total Environment*, 2017, 580:468-481.
- [22] Xu Y, Shen Z H, Ying L X, Ciais P, Liu H Y, Piao S L, Wen C, Jiang Y X. The exposure, sensitivity and vulnerability of natural vegetation in China to climate thermal variability (1901-2013): an indicator-based approach. *Ecological Indicators*, 2016, 63:258-272.
- [23] Hong W Y, Jiang R R, Yang C Y, Zhang F F, Su M, Liao Q. Establishing an ecological vulnerability assessment indicator system for spatial recognition and management of ecologically vulnerable areas in highly urbanized regions: a case study of Shenzhen, China. *Ecological Indicators*, 2016, 69:540-547.
- [24] Pandey R, Bardsley D K. Social-ecological vulnerability to climate change in the Nepali Himalaya. *Applied Geography*, 2015, 64:74-86.
- [25] Ogica R I, Dunnb S, Holderness T, Turpin, E. Assessing the vulnerability of pumping stations to trash blockage in coastal mega-cities of developing nations. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 28:53-66.
- [26] Tapia C, Abajo B, Feliu E, Mendizabal, M, Martinez J A, Fernandez J G, Laburu T, Lejarazu A. Profiling urban vulnerabilities to climate change: an indicator-based vulnerability assessment for European cities. *Ecological Indicators*, 2017, 78:142-155.
- [27] Zhang F, Liu X P, Zhang J Q, Wu R, Ma Q Y, Chen Y N. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China. *Ecological Modelling*, 2017, 349:41-50.
- [28] 王志杰, 苏媛. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析. *生态学报*, 2018, 38(02):432-442.
- [29] Whith G F. *Natural Hazards, Local, National, Global*. New York: Oxford University Press, 1974:5-6.
- [30] IPCC. *IPCC Fifth Assessment Report (AR5): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. UK: Cambridge University Press, 2014:1499-1566.