

区域生态风险评价的关键问题与展望

陈春丽^{1,2}, 吕永龙^{1,*}, 王铁宇¹, 史雅娟¹, 胡文友^{1,2}, 李 静^{1,2}, 张 翔^{1,2}, 耿 静^{1,2,3}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 太原理工大学经济管理学院, 太原 030024)

摘要: 区域生态风险评价具有多风险因子、多风险受体、多评价终点、强调不确定性因素以及空间异质性的特点, 它与传统的生态风险评价在风险源、胁迫因子和评价尺度上具有明显区别。尝试建立了一个基于陆地生态系统的区域生态风险评价框架, 同时针对目前区域生态风险评价的研究现状, 指出不确定性分析、尺度外推难、评价指标不统一、评价标准不统一、风险因子筛选及优先排序、区域内污染物复合、水生过渡到陆生生态系统风险评价、特殊的人为因素等是目前区域生态风险评价存在的关键问题及难点所在, 并提出解决这些问题可能所需的工具、手段和理论方法突破。最后指出区域生态风险观测与数据采集加工、区域生态风险指标体系的统一与整合、区域生态风险评价方法论、区域生态风险的空间分布特征与表达以及区域生态风险评价反馈与管理机制 5 个方面是区域生态风险评价未来的研究重点。

关键词: 生态风险评价; 风险评价; 相对风险模型; 风险管理

Emerging issues and prospects for regional ecological risk assessment

CHEN Chunli^{1,2}, LÜ Yonglong^{1,*}, WANG Tieyu¹, SHI Yajuan¹, HU Wenyu^{1,2}, LI Jing^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, GENG Jing^{1,2,3}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China

3 Business Administration College, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract: Regional ecological risk assessment (regional ERA) was characterized by multiple risk stressors, receptors and endpoints with uncertainty and spatial heterogeneity, and it was distinct from traditional risk assessment in sources, stressors and scales. A framework of regional ERA based on terrestrial ecosystem was established in this paper. A number of major emerging issues in regional ERA such as uncertainty analysis, difficulties in scale extrapolation, disunity of assessment indicators and standards, identification and prioritization of risk factors, mixed pollution in a certain region, transition from aquatic ecosystem to terrestrial ecosystem risk assessment and special human factors were illustrated. In addition, a couple of methods, theories and tools for analyzing these issues in regional ERA were recommended as well. At last, prospects for regional ERA were proposed with emphases on risk monitoring and data collection and processing, integration of index system, new methodology, spatial characterization and expression, feedback and risk management mechanism for regional ERA.

Key Words: ecological risk assessment (ERA); risk assessment; relative risk model (RRM); risk management

区域生态风险评价是近年来环境科学的研究前沿和热点。20 世纪 90 年代, 在流域和大尺度上发表了一系列基于美国 EPA (Environmental Protection Agency) 导则^[1-2]的生态风险评价文章, 研究表明流域和大尺度上

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2007CB407307); 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-YW-06-05-02); 中国科学院知识创新工程方向性资助项目(KZCX2-YW-420-5); 国家自然科学基金资助项目(40601089)

收稿日期: 2008-11-16; 修订日期: 2009-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yllu@rcees.ac.cn

的风险评价是可行的^[3-8]。自此之后,区域生态风险评价得到迅速发展,并取得一定研究成果^[9-11],但大多数研究都是基于 EPA 导则的风险评价框架进行,建立在单污染物基础上,且几乎没有明确受体,这就使得在区域尺度上把环境空间结构、多个风险源以及多个终点有效地结合起来存在很大难度,因此均存在一定的局限性。

目前有关区域生态风险评价与传统风险评价的具体区别,区域生态风险评价框架、存在的关键问题以及解决这些问题的方法鲜见详细报道。本文主要从这几方面进行阐述,提出解决这些问题所需要的必要工具和方法、手段以及理论技术方法突破等建设性建议,同时对区域生态风险评价的未来发展趋势进行展望。

1 区域生态风险评价的特点

1.1 区域生态风险评价

区域是指达到一定面积,并且内部具有一定结构特征的范围。它是一个具有内部结构,起着一定功能,并有一定的历史发展的动态系统^[12]。区域生态风险评价是生态风险评价的一个分支,是在区域尺度上描述和评价环境污染、人为活动或自然灾害对生态系统结构和功能等产生不利作用的可能性和危害程度^[13];另外,区域生态风险评价概念中应该体现多胁迫因子、历史事件、空间结构以及多评价终点的特点^[14-15]。因此,区域生态风险评价是在区域尺度上对存在于不同类型生态系统中的环境污染、人为活动或者自然灾害等多种胁迫因子和多风险源对评价终点造成不利影响的可能性及危害程度进行风险评估。

1.2 区域生态风险评价的特点

区域生态风险评价评价过程中注重对复杂生态系统特征的了解,它具有多风险因子、多风险受体、多评价终点、强调不确定性因素以及空间异质性 5 个典型特点。

在区域生态风险评价过程中,关键物种、种群、群落、生态系统或重要生态过程和生命阶段均可作为化学污染、生态事件以及人类活动等风险因子的评价受体;而物种、种群、群落以及生态系统水平上的任何一个均可以作为区域生态风险评价的终点(表 1)^[16]。

表 1 生态风险评价的可能终点^[16]
Table 1 Possible endpoints of ecological risk assessment^[16]

受体 Receptor	可能的终点 Possible endpoints
个体水平 Individual level	生理状态(以及生长);疾病或虚弱(以及总量异常);回避行为;求偶行为(比如鸟类);迁徙行为(例如:鸟类和鲑鳟鱼);养育行为(比如弃巢)
种群水平 Population level	遗传多样性
群落和生态系统水平 Community And Ecosystem	营养结构;能量流;养分循环(生态系统以及湿地);养分保持;分解速率;沉积物和物质传输;河口河滨生态系统面积和功能;恢复力;植物群落垂直结构;影响公众健康的属性
景观水平 Landscape level	空间格局(随机型,集群型或均一型,优势型,聚集型,连通型或破碎型,并列型)

1.3 区域生态风险评价与传统生态风险评价的区别

区域生态风险评价与传统生态风险评价的基本组成见图 1^[17]。

传统生态风险评价组成:



区域生态风险评价组成:

风险源、生境以及影响是区域生态风险评价的三个重要组成部分,风险源主要指由物理、化学或生物原因而产生的对环境有不利影响的活动^[2];生境是生态主体居住的小环境也是其暴露于胁迫因子的场所^[14];而影响则是指胁迫因子对需要保护的评价终点造成的负面效应^[17]。在区域风险评价中,不同风险源向生境释放出各类型的胁迫因子,从而对评价终点产生不利影响。区域生态风险评价与传统生态风险评价的区别主要表现在胁迫因子、风险源和评价尺度 3 个方面^[17],传统的生态风险评价多着眼于对一个特定场地的单风险源中某一个胁迫因子进行风险评价,而区域生态风险评价则是基于区域尺度上对由多种不同风险源引起的多种胁迫

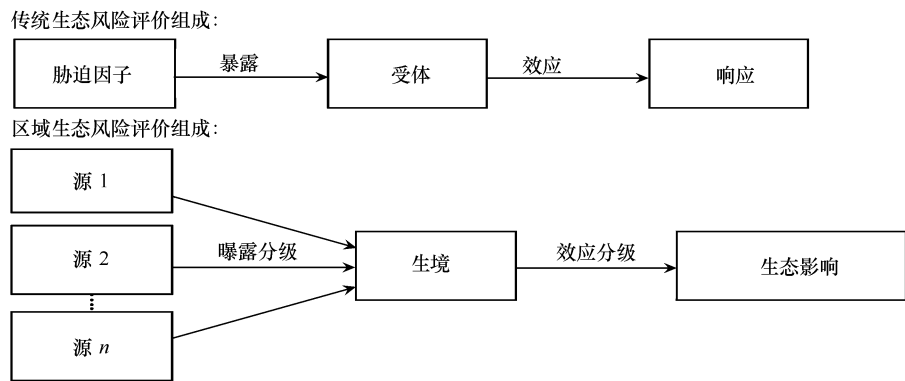


图 1 区域生态风险评价和传统生态风险评价的组成^[17]

Fig. 1 Difference in composition between regional and traditional ecological risk assessment^[17]

迫因子进行风险分析和评价,具体见表 2。

表 2 区域生态风险评价与传统风险评价的区别

Table 2 Difference between regional and traditional ecological risk assessment

类别 Types	区域生态风险评价 Regional ecological risk assessment	传统生态风险评价 Traditional ecological risk assessment
胁迫因子 Stressors	多因素	单因素
风险源 Sources	多风险源	单风险源
评价尺度 Scale	区域尺度	特定场地的小尺度

2 区域生态风险评价的一般框架

随着风险评价尺度的扩大,传统的生态风险评价框架和概念模型已经不能满足涉及多风险源、多胁迫因子、多风险影响的区域和景观尺度生态风险评价要求,这就需要一个合适的能满足大尺度评价要求的区域生态风险评价框架。在区域尺度生态风险评价过程中,区域区划非常重要,它必须包含于评价框架中。目前多用流域边界^[17]、土地利用类型^[18]、生态系统类型^①、行政单元^①、风险源影响范围^{[19] ①}或者相结合的方式来进行区域区划,然后从小单元区域生态风险评价过渡到大区域尺度生态风险评价。

国内一些学者建立了以景观尺度生态风险评价为背景或是基于生态脆弱度和危险度等形成的风险评价条件的区域生态风险评价框架^{[18] ②},但这些框架均侧重于景观格局、自然灾害和生态系统造成的风险,而对化学污染物特别是持久性有毒污染物造成的风险考虑的不够。相对风险模型^[14]是目前区域尺度上应用最广泛的生态风险评价模型之一,曾被成功应用于美国的海湾^[15]、流域^[21]和沿海区域^[22]以及澳大利亚集水区^[23],但其在陆地生态系统中的应用还有待发展。为了能更好地在陆地生态系统中进行区域生态风险评价,在前人研究的基础上,笔者建立了如下区域生态风险评价框架(图 2)。此框架分为区域背景分析、区域划分、子区域生态风险评价、不确定性和敏感性分析、风险表征、区域综合生态风险评价和风险评价反馈和管理七大部分。首先第 1 部分进行待研究区域的背景分析,包括区域内社会经济及自然环境等资料的收集,并在此基础上进行大区域内风险源分析;第 2 部分,根据实际情况,选择合适的区域划分方法,进行区域划分;第 3 部分,对于区域内评价受体和评价指标进行选择的基础上,从子区域风险源、风险源所释放的胁迫因子以及生境 3 方面来分别进行评价,得到各子区域风险等级和风险源的相对风险;第四部分,选择合适的确定性和敏感性分析方法进行定性定量分析;第五部分,进行风险表征,确定危害的大小以及发生的概率;第六部分,结合 GIS 或其

① 杨娟. 岛屿生态风险评价的理论与方法——崇明三岛实证研究. 华中师范大学, 武汉, 2007: 22.

② 杨娟. 岛屿生态风险评价的理论与方法——崇明三岛实证研究. 华中师范大学, 武汉, 2007: 22.

他工具得到区域综合风险评价图;第七部分,构建区域生态风险评价反馈及风险管理机制。

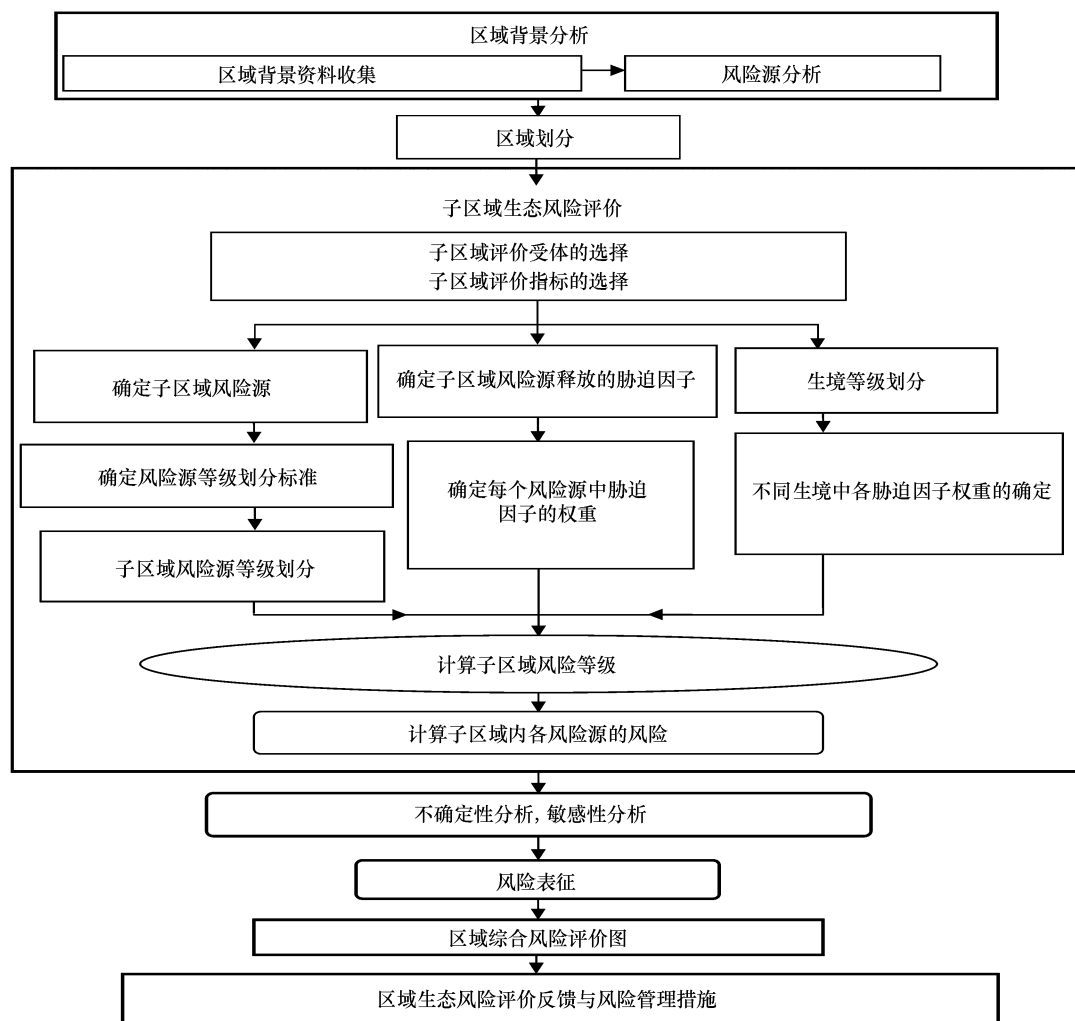


图2 区域生态风险评价框架

Fig.2 Framework for the regional ecological risk assessment

3 区域生态风险评价过程中存在的关键问题

区域生态风险评价强调的是区域尺度,它必须是大尺度、多受体、多风险源的风险评价,这在一定程度上加大了评价难度。基于资料、技术和工具局限,目前的一些区域生态风险评价没有真正上升到区域尺度上,没有脱离传统生态风险评价的模式和框架,也没有突破传统毒理方向上的毒性风险评价方式,主要存在以下8个方面不足。

3.1 不确定性

从区域生态风险评价的整个过程来看,在区域的划分、受体的选择、主要风险源的确定、评价终点的选择、评价方法的选择以及区域和风险源等级划分过程中,均存在不确定因素,不确定性存在于整个区域生态评价过程的始终。

不确定性分析是区域生态风险评价必不可少的一部分。只有对不确定性进行定量分析,了解风险评价结果的不确定性程度,决策者才可以根据评价结果提出更科学更有效的风险管理对策。现阶段,如何对不确定性进行定量表征是区域生态风险评价的一大难点^[24]。目前对不确定性进行分析的研究不多,进行不确定性定量分析就更少,使得其风险评价结果的可靠性降低。目前用于分析不确定性的方法主要有蒙特卡罗法、泰勒简化方法、概率树方法、专家判断法以及灵敏度分析、置信区间法等方法^[25],其中蒙特卡罗法是近年来运用

最多的一种方法^[26]。

评价过程中,在进行不确定性分析的同时,力求做到不过分依赖查阅数据资料,注重实际调查、监测和实验,选择适当的基准并引用充分的毒性数据,通过改进实验方法,发展各种外推理论,建立合适的外推模型,以逐步减小不确定性^[27]。

3.2 尺度外推

目前在生态系统层次上的区域生态风险评价研究多见于国外的报道^[15,17,24,28],相比而言国内报道较少^[18,23],主要还是物种和种群层次上的生态风险评价^[29-32]。由于在评价过程中忽略了环境介质的影响,区域尺度上依据化学分析结果与同步进行的毒性测试所观察到的生物效应分布经常不完全吻合,污染物浓度较高区域并非高生态风险区^[33]。因此,尺度外推仍然是目前区域生态风险评价工作的一个难点。目前应用比较广泛的相对风险评价方法^[27,34]在其评价框架上是以区域为基点的,它可在一定程度上缓解尺度外推问题。

3.3 指标体系不统一

近年来,生态风险评价在区域和景观层次上已经成功地开展了一系列研究^[18,35]。国内也有很多专家对我国部分流域^[22-23,29]、湿地^[22-23]、景观^[36]、岛屿^①及海湾^②等进行了区域生态风险评价研究,采用的典型评价指标见表3。

首先,从表3明显可见,目前的评价指标繁杂,没有统一的评价指标体系,基本上一个案例一套评价体系;其次,生态风险评价指标多考虑内在因素,如生态指数和脆弱性指数等,对其外在风险影响因素考虑较少。在已有的评价案例里,外在因素评价指标多考虑洪涝灾害指数,对污染指数评价少,且污染指数又多见于N、P以及重金属类^[22,29],而把有机污染物作为评价指标的少^[37],尚未见把复合污染作为评价指标纳入评价体系的案例。另一方面,目前所采用的评价指标及标准大多来源于国外资料^[38],其对中国区域实际情况的适合度还有待商讨。

表3 区域和景观生态风险评价典型评价指标
Table 3 Typical indices for regional and landscape ecological risk assessment

区域 Region	辽河三角洲湿地 Liaohe River Delta wetlands	洞庭湖流域 Dongting Lake watershed	黄河三角洲湿地 Wetlands in the Yellow River Delta	渤海 Bohai Bay	崇明三岛 Chongming Three Islands	博斯腾湖区域景观 Bosten Lake landscape
指标体系 Index system	物种重要性指数	物种重要性指数	物种保护指数	环境污染物	危险度指数	景观格局指数
	生物多样性指数	生物多样性指数	生物多样性指数	自然灾害	生态系统脆弱度 指数	景观脆弱度指数
	干扰强度	污染物的毒性污 染指数	干扰强度	农药	社会经济脆弱度 指数	景观生态损失度 指数
	自然度	自然灾害指数 脆弱性指数	自然度 脆弱性指数 生态损失度指数		损失度指数	

3.4 评价标准不统一

由于不可能存在两个完全相同的区域,即使区域外部条件一样,但区域内风险源、胁迫因子、受体等存在着不均匀或不规则分布。因此,不同区域的生态风险很难具有可比性,缺乏一个相对或者绝对的风险评价标准。

3.5 风险因子筛选及优先排序

在区域生态风险评价过程中进行风险源识别和选择时,首先需要鉴别整个生态系统中对受体影响较重的风险因子并对其进行排序。目前的研究大多以已知污染物为切入点,通过统计分析直接把毒性效应归咎于已

① 杨娟. 岛屿生态风险评价的理论与方法——崇明三岛实证研究. 华中师范大学,武汉,2007: 22.
② 王晶. 渤海预期性环境风险评价研究. 中国海洋大学,青岛: 2004.

知污染物,而没有对区域内造成风险的污染物进行筛选及优先排序,缺乏选择某种或某些污染物作为研究对象的依据^[33],从而降低风险评价结果的可靠性。

3.6 区域内污染物的整合

同一研究区域内,存在多种污染物以及多种风险源。在进行区域生态风险评价时,是考虑单污染的简单叠加,还是对其可能存在的相互影响也加以考虑,即对其累积风险进行评价,这就涉及到一个区域内污染物整合问题。目前用于多污染整合的方法主要有因子权重法^[39-40]、风险综合指数法^[40]以及毒性当量法^[40]。目前的研究多考虑多胁迫因子或风险源的简单叠加,关于区域内累积和复合性的风险评价工作鲜见^[24],有待进一步深入研究。

3.7 水生到陆生生态系统的过渡

基于水生生态系统的风险评价开展得较早,其系统研究相对较陆地生态系统多,积累的毒性数据也比陆地生态系统全,在风险评价过程中更容易引入较完整的毒性数据进行暴露分析。因此,目前水生生态系统范围的区域生态风险评价较为常见^[17,26,35]。鉴于当前陆生生态系统毒性数据严重缺乏,如何借鉴水生生态系统风险评价方法和数据,从水生过渡到陆地土壤生态系统风险评价,成为一个新的研究难题。

Taaroza 模型是 Taaroza 等在 2002 年建立的陆地生态系统危害鉴别和风险评价整体理论模型,此模型有针对性考虑了各种生态受体和暴露途径^[41]。生态相关风险模型理论与 Tarazona 类似,包括污染物的环境浓度、持久性、生物富集率、各环境介质暴露水平,并充分考虑了生物多样性。该模型被应用于 37 种杀虫剂的模拟风险评价,结果证明 ECORR 能充分反映这些污染物的潜在生态风险^[42]。损害评价技术也可以由水生借鉴到陆生生态系统中,这项技术首先是确定引起急性毒性、慢性反应的污染物浓度,然后建立预测模型,并建议将一种生物的观察结果外推到另外一种生物上^[43]。

3.8 特殊的人为因素

非自然的突发性事故、入侵物种以及土地利用类型改变等都属于特殊的人为因素,这些人为因素对于维持整个生态系统的稳定性至关重要。如由持久性污染物造成的风险属于长期的累积风险,若在此基础上发生非自然突发性事件,就可能导致长期的积累机制发生突变,从而引起更大风险;突然的政策机制,比如突然性搬迁、企业倒闭或工厂被严令关闭以及突发性经济事件,这些人为因素所带来的区域风险,将是区域生态风险评价面临的又一挑战。

目前已有研究针对突发性事故^[44]、政策^[45]或入侵物种^[14,28]所引起的风险进行评价,但都只是把其作为单一因素来考虑其存在的风险,没有从区域角度综合考虑多风险源、风险因子以及多评价受体和评价终点共存情况下的风险大小。美国 EPA 曾在 2002 年起草了累积风险评价导则^[46],但也没有涉及到特殊人为因素。

综上所述,不确定性分析、尺度外推难、评价指标不统一、评价标准不统一、缺乏选择某种或某些污染物作为研究对象的依据、区域内污染物整合、水生过渡到陆生生态系统风险评价、特殊的人为因素等是目前区域生态风险评价存在的关键问题及研究难点。

4 区域生态风险评价的未来研究重点

区域生态风险评价未来的研究重点应是基于解决目前存在的关键问题而逐步发展,因此,在未来一段时期内应该重点开展以下研究。

4.1 区域生态风险观测与数据采集加工

生态毒理数据是生态风险评价的基础,尤其概率风险评价需要大量的毒理学数据。目前国际生态毒理学数据库大多是基于水生生态系统数据。因此,陆地生态系统研究,特别是上升到区域尺度的毒理数据采集、加工与集成,将是未来区域生态风险评价研究的重点。

4.2 区域生态风险指标体系的统一与整合

区域生态风险评价既涉及大量的毒理学指标,也包含生态系统特征指数以及相关的经济、社会因子,指标的统统一和整合仍是影响评价体系科学性和准确性的一大难题。但就像物理方程 $E = MC^2$ 一样,必须寻求简捷

表征区域生态风险的指标,形成统一认可、科学规范的区域生态风险评价指标体系。

4.3 区域生态风险评价方法论

生态风险评价的关键是调查生态系统及其组分的风险源、预测风险概率及其可能的负面效应,并据此提出响应的缓解措施。因此,方法论的研究将涵盖生态效应评价的一般方法研究、区域风险表征、受体选择以及风险评价终点的判定方法研究。

4.4 区域生态风险的空间分布特征与表达

建立基于空间分布模型的区域生态风险定量表征方法,利用 GIS/RS/GPS 技术,建立区域生态风险分级和风险预警预案。风险评价过程中风险扩散过程不确定性影响因素的分析方法及其基于模型的定量表征仍是研究的难点和重点。

4.5 区域生态风险评价反馈与风险管理机制

构建区域生态风险评价反馈和风险管理机制是区域生态风险评价的后续工作。可以通过研究生态系统管理与经济社会发展的耦合关系,建立单一风险源的风险管理信息库,形成基于风险信息库的区域生态风险评价与管理动态反馈过程,逐步建立区域水平多目标风险源的生态风险管理方法,并跨越行政区域探讨应对区域生态风险的管理体制和机制。

Reference:

- [1] EPA (US Environmental Protection Agency). Framework for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R- 92/001. Risk Assessment Forum, Washington, DC, USA. 1992.
- [2] EPA (US Environmental Protection Agency). EPA Guidelines for ecological risk assessment. EPA/630/R 95/ 002F. Fed Reg 63 (93) :26846-924. May 14. 1998.
- [3] Adams S M, Bevelhimer M S, Greeley MS, Jr, Levine D L, Teh S J. The ecological risk assessment in a large river-reservoir; 6. Bioindicators of fish population health. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(4) :628-640.
- [4] Baron L A, Sample B E, and Suter G W II. Ecological risk assessment in a large river-reservoir; 5. Aerial insectivorous wildlife. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(4) :621-627.
- [5] Cook R B, Suter G W II, Sain E R. Ecological risk assessment in a large river-reservoir; 1. Introduction and background. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999,18(4) :581-588.
- [6] Jones D S, Barnhouse L W, Suter G W II, Eforymson R A, Field J M, Beauchamp J J. Ecological risk assessment in a large river-reservoir; 3. Benthic invertebrates. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(4) :599-609.
- [7] Sample B E and Suter G W II. Ecological risk assessment in a large river-reservoir; 4. Piscivorous wildlife. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(4) :610-620.
- [8] Suter G W II, Barnhouse L W, Eforymson R A, Jager H. Ecological risk assessment in a large river-reservoir; 2. Fish community. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(4) :589-598.
- [9] Cormier SM, Smith M, Norton S, Neiheisel T. Assessing ecological risk in watersheds; A case study of problem formulation in the Big Darby Creek watershed, Ohio, USA. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, 19:1082-96.
- [10] Collins G, Kremer JN, and Valiela I. Assessing uncertainty in estimates of nitrogen loading to estuaries for research, planning, and risk assessment. Environ Management, 2000, 25:635-45.
- [11] Johnson R K, Munns W R, Tyler P L, Marajh-whitemore P, Finkelstein K, Munney K, Short F T, Melville A, Hahn S P. Weighing the evidence of ecological risk from chemical contamination in the estuarine environment adjacent to the Portsmouth naval shipyard, Kittery, Maine, USA. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, 21:182-94.
- [12] Chen C K. Region conception and approach. Areal Research and Development, 1986,01,10-14.
- [13] Fu Z Y, Xu X G. Regional ecological risk assessment. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(2) :267-271.
- [14] Landis W G, Wiegiers J A. Design considerations and a suggested approach for regional and comparative ecological risk assessment. Human and Ecological Risk Assessment, 1997, 3:287-297.
- [15] Wiegiers J K, Feder H M, Mortensen L S, Shaw D G, Wilson V J, Landis W G. A regional multiple-stressor rank-based ecological risk assessment for the fjord of Port Valdez, Alaska. Human and Ecological Risk Assessment, 1998, 4:1125-1173.
- [16] EPA/630/P-02/004F October 2003. Generic Ecological Assessment Endpoints (GEAEs) for Ecological Risk Assessment. Risk Assessment Forum

- U. S. Environmental Protection Agency Washington, DC 20460.
- [17] Moraes R, Landis W G, Molander S. Regional risk assessment of a Brazilian rain forest reserve. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8: 1779-1803.
- [18] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. Probe into the method of regional ecological risk assessment: a case study of wetland in the Yellow River Delta in China. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70:253-262.
- [19] Fu Z Y, Xu X G, Lin H P, Wang X L. Regional ecological risk assessment of in the Liaohe River Delta wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3):365—373.
- [20] Xu X G, Lin H p, Fu Z Y, Bu R C. Regional Ecological Risk Assessment of Wetland in the Huanghe River Delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(1):111—120.
- [21] Obery A M. Landis W G. A regional multiple stressor risk assessment of the Codorus Creek Watershed applying the relative risk model. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8: 405-428.
- [22] Landis W G, Markiewicz A J, Thomas J F, Hart Hayes E, Droscher T. Regional risk assessment predictions for the decline and the future management of the Cherry Point Herring Stock and region //Droscher T ed. *Proceedings of the 2001 Puget Sound Reasearch Conference*, Puget Sound Water Quality Action Team. Olympia, WA, USA. 2002. <http://www.paat.wa.gov/publications/01-proceedings/sessions/sess-5b.htm>
- [23] Walker R. Landis W. Brown P. Developing a regional ecological risk assessment: A case study of a Tasmanian agricultural catchment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7:417.
- [24] Hayes E H, Landis W G. . Regional Ecological Risk Assessment of a Near Shore Marine Environment; Cherry Point, WA. *Human and Ecological Risk Assessment*, 10, 2004.
- [25] Wang Y J, Jia D H. Uncertainty analysis in heath risk assessment. *Environmental Engineering*, 2003, 21(6):66—69.
- [26] Landis W G, Wiegiers J K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2007, 13: 25-38.
- [27] Zheng C W. Discussion on Methods and Problems of Ecological Risk Assessment. *Guangzhou Environmental Science*, 2004, 19(3):54—57.
- [28] Colnar A M, Landis W G. Conceptual model development for invasive species and a regional risk assessment case study: The European green crab, *Carcinus maenas*, at Cherry Point, Washington, USA. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2007, 13: 120-155.
- [29] Lu H W, Zeng G M, Xie G X, Zhang S P, Huang G H, Jin X C, Liu H L. The regional ecological risk assessment of the Dongting Lake watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2520-2530.
- [30] Yan Z G, He Q L, Li F S. The use of earthworm ecotoxicological test in risk assessment of soil contamination. *Research of Environmental Science*, 2007, 20(1):134-142.
- [31] Zhao X, Zhang Y L, Li S Y. Ecological risk of DDT accumulation in economic fishes in Taihu Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(2): 295-299.
- [32] Shen M, Yu H X, Chen X H. Investigation of Heavy Metals and Zoobenthos in Jiangsu Section of the Yangtze River and Ecological Risk Assessment. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1616—1619.
- [33] Huang S B, Wang Z J, Qiao M. Ecological risk assessment (ERA) at the regional scale. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(5):705—713.
- [34] Landis W G. . Twenty years before and hence: Ecological risk assessment at multiple scales with multiple stressors and multiple endpoints. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9:1317—1326.
- [35] Karpouzias D G, Capri E, Papadopoulou-Mourkidou E. Basin-scale risk assessment in rice paddies: An example based on the Axios river basin in Greece. *Vadose Zone*, 2006, 5:273—282.
- [36] Gong L, Ju Q, Pan X L. Ecological landscape risk assessment study of Bosten Lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(1):27—31.
- [37] Rachel N, Wallack, Hope B K. Quantitative consideration of ecosystem characteristics in an ecological risk assessment: a case study. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8(7):1805—1814.
- [38] Zhu L, Tong Y. Case research and issue discussion of ecological risk assessment. *Journal of Safety and Environmen*, 2003, 3(3):22—24.
- [39] Chen H, Liu J S, Cao Y, Li X C, Quyang H. Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1558—1566.
- [40] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Guidance manual for the assessment of joint toxic action of chemical mixtures. U. S department of health and human services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA. 2004. 11-20.
- [41] Tarazona J V, Vega M N. Hazard and risk assessment of chemicals for terrestrial ecosystems. *Toxicology*, 2002, 181-182:187-191.
- [42] Sanchez-Bayo F, Baskarna S, Kennedy I R. Ecological relative risk (ECORR): another approach for risk assessment of Pesticides in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91:37-57.
- [43] Liu P Z. The popular environment topics in the international perspectives — the Research of ecological risk assessment in US. *Environmental*

Science Trends, 1989,2:1-3.

- [44] Xia F, Wu X Q, Hong S Q, Cai S Q, Dong H J, Deng Q. Theory, methodology and technology of environmental policy risk assessment. Environment Herald, 2003, 24.
- [45] Basham P W, Weichert D H, Berry M J. Regional assessment of seismic risk in Eastern Canada. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69: 1567-1602.
- [46] EPA (US Environmental Protection Agency). Draft of Framework for Cumulative Risk Assessment. EPA/630/P 02/ 001A. Risk Assessment Forum, Washington, DC, USA. April 23. 2002.

参考文献:

- [12] 陈传康. 区域概念及其研究途径. 地域研究与开发, 1986, 01, 10-14.
- [13] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-271.
- [19] 付在毅, 许学工, 林辉平, 王宪礼. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. 生态学报, 2001, 21(3): 365-373.
- [20] 许学工, 林辉平, 付在毅, 布仁仓. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 111-120.
- [25] 王永杰, 贾东红. 健康风险评价中的不确定性分析. 环境工程, 2003, 21(6): 66-69.
- [27] 郑创伟. 生态风险评价方法和问题讨论. 广州环境科学, 2004, 19(3): 54-57.
- [29] 卢宏伟, 曾光明, 谢更新, 张硕辅, 黄国和, 金相灿, 刘鸿亮. 洞庭湖流域区域生态风险评价. 生态学报, 2003, 23(12): 2520-2530.
- [30] 颜增光, 何巧力, 李发生. 蚯蚓生态毒试验在土壤污染风险评价中的应用. 环境科学研究, 2007, 20(1): 134-142.
- [31] 赵肖, 张娅兰, 李适宇. 滴滴涕对太湖经济鱼类危害的生态风险. 生态学杂志, 2008, 27(2): 295-299.
- [32] 沈敏, 于红霞, 陈校辉. 长江江苏段沉积物中重金属与底栖动物调查及生态风险评价. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1616-1619.
- [33] 黄圣彪, 王子健, 乔敏. 区域环境风险评价及其关键科学问题. 环境科学学报, 2007, 27(5): 705-713.
- [36] 贡璐, 鞠强, 潘晓玲. 博斯腾湖区域景观生态风险评价研究. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 27-31.
- [38] 朱琳, 佟玉洁. 中国生态风险评价应用探讨. 安全与环境学报, 2003, 3(3): 22-24.
- [39] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 李双成, 欧阳华. 生态风险评价研究进展. 生态学报, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [43] 刘培哲. 当今世界环境科学研究的前沿领域美国的生态风险评价研究. 环境科学动态, 1989, 2: 1-3.
- [44] 夏峰, 吴晓青, 洪尚群, 蔡宋秋, 董海京, 邓晴. 环境政策风险评价的原理方法和技术——兼论政策环境风险评价. 环境导报, 2003, 24.