

生态风险评价方法述评

张思锋*, 刘晗梦

(西安交通大学公共政策与管理学院, 西安 710049)

摘要:生态风险是由环境的自然变化或人类活动引起的生态系统组成、结构的改变而导致系统功能损失的可能性。生态风险评价是定量预测各种风险源对生态系统产生风险的或然性以及评估该风险可接受程度的方法体系,因而是生态环境风险管理与决策的定量依据。在介绍了生态风险概念的基础上,按照风险源性质的分类标准将生态风险划分为化学污染类风险源、生态事件类风险源、复合类风险源3类,并分别论述了3类生态风险对应评价方法的特点与发展的方向。另外,针对生态风险评价研究的现状,讨论了我国生态风险研究的优先领域,包括建立急性、慢性毒理数据库,构建外来生物入侵风险评价标准等,同时,建议将综合概率统计学、复杂系统理论与遥感技术等手段引入生态风险评价方法中,以进一步提高风险评价结果在生态风险管理中的有效性。

关键词:生态风险评价; 生态风险评价方法

Review of ecological risk assessment methods

ZHANG Sifeng*, LIU Hanmeng

School of Public Management and Administration, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China

Abstract: The conceptual framework defines ecological risk as the characterization of the adverse ecological effects of environmental exposures to hazards imposed by natural changes or human activities. Ecological risk assessment is a flexible process for organizing and analyzing data, assumptions, and uncertainties to evaluate the likelihood (probability) of adverse ecological effects that may have occurred or may occur as a result of exposure to one or more stressors related to sources of ecological risk. It can provide a reliable quantitative evidence for the ecological environment risk management and decision-making. The ecological risk assessment can be divided into three regimes according to the classification standard for the characters of the risk source, including risk assessment of chemical pollution risk source, ecological assessment of ecological events risk source and risk assessment of composite risk source (natural risk source and human activities risk source). This paper reviews the recent developments surrounding concept of ecological risk and discusses the future research directions of three methods of ecological risk assessment. The improved quotient method is more quantificational than the old one by setting multiple levels of risk or giving the value of risk, and the further study of this method may be focused on reflecting the relationship between the concentration of pollutants and the effects of the contaminated receptors, estimating influence of pollutants on receptors which are not in the study sites and calculating the range of being polluted or damaged. When the acute toxicological effects is analyze by the exposure-response method to assess ecological risk in the controlled conditions, it is important to analyze the secondary effects of pollutants on objective environment and changes of receptors effects caused by transformation as well. The research of the invasive risk assessment of non-indigenous species is still in the stage of constructing the regime and has not yet formed a same conclusion. This paper argues that we can establish a unified index system through decomposing the indicators of layer guidelines by defining the connotation, extension and the numbers of the specific indicators which corresponding to each layer group, and the "threshold value" of the indexes should be investigate accurately which reflect the capacity of the environment. Furthermore, we suggest that statistical method could be used as

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40771083)

收稿日期:2009-07-15; **修订日期:**2010-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangf@mail.xjtu.edu.cn

an assistant way to prompt the accuracy of the assessment when the ecological niche model is used to evaluate the invasive risk of non-indigenous species. The three-tiered of the procedure for ecological tiered assessment of risks (PETAR) is adapted to evaluate the ecological risks in the case of limited resources or scarce background information of relevance. The priority of the study of the ecological risk assessment should be given three aspects to prompt the availability of the assessment results for the ecological risk management, one is a systematic database of the acute and chronic toxicity data, the other is a unified evaluation regime or national standards to evaluate the invasive risk of non-indigenous species, and the way which using statistical method, complex systems theory and remote sensing technology to assess the ecological risk.

Key Words: ecological risk; ecological risk assessment

生态风险是由环境的自然变化或人类活动引起的生态系统组成、结构的改变而导致系统功能损失的可能性^[1-2]。生态风险评价是定量预测各种风险源对生态系统产生风险的或然性以及评估该风险可接受程度的方法体系,因而是生态环境风险管理及决策的定量依据^[3-4]。20 世纪 30 年代,以项目或工程中的意外事故为风险源、以最大限度降低环境危害为环境管理政策目标的环境影响评价就在一些工业化国家实施;随着 20 世纪 80 年代“风险管理”理念被引入环境政策,对环境进行风险评价的需求也应运而生^[5]。1990 年,美国国家环保局开始使用生态风险评价一词,并逐步在人体健康风险评价的技术基础上演进为以生态系统及其组分为风险受体的生态风险评价概念^[6];1992 年美国环保局颁布了生态风险评价框架;1998 年又对生态风险评价框架内容进行了修改、补充。目前生态风险评价已经进入了大尺度空间的区域生态风险评价新阶段^[7-8]。

学术界对生态风险评价的类型划分有 3 种依据。一是根据风险源的性质,划分为化学污染类风险源生态风险评价、生态事件(生物工程或生态入侵)类风险源生态风险评价、其他复合风险源(自然生态风险源、人类活动风险源)类生态风险评价。二是根据风险源的数量,划分为单一风险源生态风险评价、多风险源生态风险评价。三是根据风险受体的数量与空间尺度,划分为单一物种受体小范围生态风险评价、多物种受体区域范围生态风险评价(见表 1)。

表 1 生态风险评价的类型划分
Table 1 Type of ecological risk assessment

划分标准 Criteria	分类 Type	研究实例 Case of research
风险源性质 The nature of the risk sources	化学污染类风险源	《An Approach to Quantifying Spatial Components of Exposure for Ecological Risk Assessment》 ^[9]
	生态事件类(生物工程或生态入侵)风险源	《外来入侵物种风险评估和风险分析体系的初步构建》 ^[10]
	其他复合风险源	《露天煤矿区生态风险评价方法》 ^[11]
风险源数量 The number of the risk sources	单一风险源	《石油化工污染土壤中萘的生态风险评价》 ^[12]
	多风险源	《黄河三角洲湿地区域生态风险评价》 ^[13]
风险受体数量与空间尺度 The number of the risk receptors and spatial scales	单一物种受体、小范围	《DDT 对太湖大银鱼种群危害的生态风险》 ^[14]
	多物种受体、区域范围	《扎龙自然保护区土地利用变化与生态风险评价》 ^[15]

本文依据风险源性质的分类标准,对生态风险评价方法进行分类综述。

1 化学污染类风险源生态风险评价方法

1.1 商值法

商值法是判定某一浓度化学污染物是否具有潜在有害影响的半定量生态风险评价方法^[16],即依据已有文件或经验数据,设定需要受到保护的受体的化学污染物浓度标准,再将污染物在受体中的实测浓度与浓度标准进行比较获得商值,由商值得出“有无风险”的结论。当风险表征结果为无风险时,并非表明没有污染发生,而表示污染尚处于可以接受的程度。之后出现的改进的商值法把污染物在受体中浓度的“有无风险”,改

进为“多个风险等级”。改进的商值法有两类。

第一类是根据研究对象的特点,设定多个风险等级,将实测浓度与浓度标准进行比较获得的商值,用“多个风险等级”表示风险表征判断结果。路永正等^[17]在分析松花江 12 种鱼类的汞含量时,划分了无风险、低风险、较高风险、高风险 4 个风险等级。

第二类是以商值法为基础发展而成的地质累积指数法和潜在生态风险指数法。

(1)地质累计指数法是德国海德堡大学 Müller 等在 1969 年研究河底沉积物时提出的一种计算沉积物中重金属元素污染程度的方法^[18],自然条件下或者人为活动影响下重金属在环境中的分布评价均可使用此方法。地质累计指数法通过测量环境样本浓度和背景浓度计算地质累计指数值 I_{geo} ,以评价某种特定化学物造成的环境风险程度^[19]。计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{k \times BE_n} \right]$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数, C_n 为样品中元素 n 的浓度, BE_n 为环境背景浓度值, k 为修正指数,通常用来表征沉积特征、岩石地质以及其他影响。

(2)潜在生态风险指数法也是瑞典 Håkanson 于 1980 年研究水污染控制时建立的一种计算水体中重金属等主要污染物的沉积学方法^[20]。通过计算潜在生态风险因子 E_r^i 与潜在生态风险指数 RI ,可以对水体沉积物中的重金属的污染程度进行评价。计算公式如下,

$$C_f^i = C_d^i / C_R^i, C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i, E_r^i = T_r^i \times C_f^i, RI = \sum_{i=1}^m E_r^i$$

式中, C_f^i 为金属 i 污染系数, C_d^i 为金属 i 实测浓度值, C_R^i 为现代工业化以前沉积物中第 i 种重金属的最高背景值, C_d 为多金属污染度, T_r^i 为金属 i 的生物毒性系数^[21], E_r^i 为金属 i 的潜在生态风险因子, RI 为多金属潜在生态风险指数(E_r^i 、 RI 等级划分标准见表 3)

由于分别计算 E_r^i 与 RI 的数值,因此潜在生态风险指数法的计算结果不仅能够反映单一重金属对环境造成的影响,还能够说明多种重金属并存时对周围环境造成的综合影响程度。更由于对 E_r^i 与 RI 的计算结果具有明确的划分等级标准,因而不同区域和时段的生态风险的评价结果之间也具有可比性^[23-24]。

商值法的数据和标准一般易于获得,且成本低、便于操作,因此在生态环境管理初期,可以通过设定合适物种的污染物标准浓度,以方便对生态风险进行管理。但商值法评价结果为半定量,属于一种低水平的风险评价,且由于不同物种对不同污染物之间敏感度的差异,对标准浓度的设定具有潜在的不准确性。

改进的商值法在结果量化上有很大进步,但仍有诸多不足,如无法反映污染物的浓度与被污染受体效应之间的关系;不能推论测度点之外的其它点上污染物浓度对受体的损伤效应;没有计算生态环境受到污染或损伤的范围等。

1.2 暴露-反应法

暴露-反应法是依据受体在不同剂量化学污染物的暴露条件下产生的反应。建立暴露-反应曲线或模型,再根据暴露-反应曲线或模型,估计受体处于某种暴露浓度下产生的效应,这些效应可能是物种的死亡率、产量的变化、再生潜力变化等的一种或数种^[25]。暴露-反应曲线或模型一般在危害评价过程中专门建立,并因污染物的种类、毒性、受体的种类的不同而变化。运用暴露-反应法可以对农作物的减产、鱼类数量减少等进

表 2 潜在生态风险因子、潜在生态风险指数分级与对应生态风险程度^[22]

Table 2 E_r^i , RI and the corresponding degree of ecological risk

生态风险程度 Degree of ecological risk	潜在生态 风险因子 E_r^i Potential ecological risk factor	潜在生态 风险指数 RI Potential ecological risk index
极高 Extremely high	$E_r^i \geq 320$	
很高 Very high	$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$
高 High	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$
中等 Medium	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$
轻微 Low	$E_r^i < 40$	$RI < 150$

行研究^[26]。针对单一物种建立的暴露-反应曲线或模型只能反映污染物对单一的被评价物种的危害效应,而无法反映对整个环境的危害程度。目前有研究提出将物种敏感性分布引入对暴露在相同污染物中的不同物种的生态风险评价^[27],对于克服暴露-反应法的这个缺点做出了有益探索。同时,建立暴露-反应曲线或模型,需要大量的污染物暴露与受体效应的数据,由于很难获得足够量的与实际情况更为接近的慢性毒理数据,因而研究者往往采用受控条件下的急性毒理数据。这种基于受控条件下急性毒理数据的研究,可能会将污染物在实际环境中出现的次生效应或因转化而引起的受体效应增强或减弱排除在外,从而引起不必要的误差^[1]。

此外,用于化学污染类风险源生态风险评价的方法还有污染指数法^[28]、回归过量分析法^[29]等。

2 生态事件类风险源生态风险评价方法

2.1 物种入侵生态风险评价方法

人类、动物、植物及其它物质在不同地区之间的频繁流动与接触,使外来物种入侵也成为造成地区、国家生态风险的重要原因之一。在评价外来物种入侵导致的生态风险时,既要了解被侵入地的生态环境状况,也要把握入侵物种的生物学特性,由此判断风险或计算风险概率^[30]。

(1)物种入侵生态风险的定性评价。实际中,往往先通过对一系列筛选性问题的回答,判断入侵是否具有明显的全面或局部的重大风险,当判断具有重大风险时,再对入侵物种的生存环境、影响因素、自身的生物学、生态学特性进行进一步的评价^[31]。澳大利亚的杂草风险评价系统(Weed Risk Assessment,简称WRA)^[32]是评价外来杂草入侵风险的较为成功的生态风险评价应用体系。即在引进某一物种时,首先对WRA体系中设定的由初步定性评价到具体定性评价3个层次共49个问题进行回答,并针对每一个问题的回答给出一个得分,然后得到一个综合分值,由此确定对该物种是接受引进、或拒绝引进、或进一步评估的结论。对需要进一步评估的物种再通过大田种植或实验种植确定其实际入侵潜力。

我国对外来物种入侵的生态风险定性评价研究,主要集中在指标体系构建的研究。如丁晖等构建了外来物种风险评估的指标体系,并提出了指标量化、权重设置、综合模型建立以及风险等级划分的方法^[33]。于广利等采用类似的指标体系构建方法对河南省入侵植物的生态风险进行了评价研究^[34]。殴健等依据国外经验和实态资料,构建了针对厦门市外来物种入侵风险评价的指标体系,其中包括外来物种的传入、定殖、扩散可能性、入侵史、已入侵分布情况、危害与影响、防治的可行性等指标,并以指标体系的综合分值表示风险等级^[35]。

目前,对指标体系中的准则层,研究者的认识比较一致,大多是从传入、定殖、扩散、危害四个角度构建指标。在计算入侵风险总值时,一种方法是对准则层各指标值进行求和,另一种方法是对准则层各指标值进行连乘。考虑到准则层各指标之间具有相互依存性,采用连乘的计算方法更加合理。对指标体系中低一级的具体指标层,研究者们尚未形成一致的看法,不同研究文献所设计的具体指标在数量、内容以及在指标体系中的功能差异很大。可以通过对准则层指标的分解,界定对应于准则层各指标的各组具体指标的数量和内涵、外延;并对那些特别重要的具体指标设定反映环境承载力的“阈值”,这些“阈值”和入侵风险总值一起作为判断物种入侵风险的依据。

(2)物种入侵生态风险的定量评价。生物学家一般采用两种方法预测物种的入侵潜力,一种是考察物种自身的特征,如生活史等;另一种是分析外在因素,即物种存在的环境^[36]。生态位模型法是通过考察物种生存的环境因素即生态位要求,依据该物种的已知分布,利用数学模型归纳或模拟其生态位需求,得到被入侵区域该物种的适生区分布,再根据可能的适生区分布结果对入侵风险进行评估的一种生态风险评价方法。生态位模型方法,主要包括机理模型和关联模型两类。其中,机理模型研究方法主要有CLIMEX模型法^[37];关联模型研究方法包括分类回归树法(CART)、生态位因子分析法(ENFA)等^[38-40]。

(3)基于遗传算法的规则集合(Genetic Algorithm for Rules set Production,简称GARP),也属于对外来物种入侵导致的生态风险的定量研究中的关联模型研究方法,由于使用的比较普遍,本文予以单列介绍。GARP需要入侵物种的现有分布信息以及被入侵地区的环境数据,其中现有分布信息中一半作为训练数据以及模型

质量检验数据,另一半用于建模后的独立模型质量检验。首先利用训练数据,选择一种算法规则,经过多次运行,生成一个由不同规则组成的生态模型,然后运用独立数据对模型进行验证。验证通过后,只要给定一系列被入侵地区的环境变量参数即条件值,即可根据模型对该物种在被入侵区域的定殖风险进行预测。Adjemian 等通过采用此方法增加了用于预测 13 种鼠疫载体可能分布的空间数据^[41];余岩等应用此方法对加拿大一枝黄花在中国的潜在扩散区进行预测,并对影响其分布的因素进行了分析^[42]。

由于生态位模型法只考虑了非生物环境,任何生物的分布同时也会受到共同生长环境中的其他生物因素的影响。如胡天印等在采用聚类方法研究外来杂草品种对浙江金华市生物多样性的影响时发现,人为干扰程度和生境土壤的干湿程度可能是某些杂草相互伴生的主要因素^[43]。因此在采用各类生态位模型法研究的同时,引入概率统计学方法研究非生物环境对生物入侵的影响,可以增加对物种入侵生态风险评价的准确度。

2.2 遗传修饰生物体生态风险的评价方法

运用现代生物工程技术对已有生物进行遗传修饰,得到遗传修饰生物体(Genetically Modified Organism, 简称 GMO)。研究表明,有些 GMO 放入环境中会对人类健康与环境产生潜在风险^[44]。对 GMO 导致的生态风险的评价,主要是实验方法,即通过个体水平实验、种群水平实验、生态系统水平实验等不同评价层次,获得相关信息,作为评价 GMO 已经或可能带来的生态风险的依据。生态系统水平实验中的微宇宙法,是近代发展起来的研究生物种群、群落、生态系统和生物圈水平上的生物效应的一种方法,又被称为模型生态系统(Model Ecosystem)法。微宇宙法既可以用于污染对生态系统影响的研究,也可以用于自然生态系统的结构和功能的研究^[45]。由于其原理是近似模拟被评价的生物体在实际自然条件下的状态,是在可控条件下进行的,因此特别适合于对那些不能轻易放入自然环境中的 GMO 的研究。

3 复合风险源类生态风险评价方法

随着风险受体扩展到种群、群落、生态系统以及景观水平等更高层次^[46-49],风险源也延伸为涉及化学、生物、物理多领域的复合风险源(污染物、物种入侵、自然灾害、生境破坏、以及严重干扰生态系统的人为活动等)^[50]。由于复合风险源的影响一般是区域范围的,因而 20 世纪末形成了研究区域范围内的复合风险源类生态风险评价方法。

3.1 $R = P \cdot D$ 模型

其中, R 为生态风险, P 为风险源发生的概率, D 为风险源可能造成的损失。在进行区域生态风险评价时,根据研究需要,运用适当的函数关系式把 $R = P \cdot D$ 模型具体化^[51];选用模型具体化过程中形成的典型指标,计算风险源发生的概率 P 和风险源可能造成的损失 D ^[52-54];在进行区域生态风险评价时,对指标的选取要考虑到被评价对象的特点,即生态系统的稳定性、完整性、生态系统功能的可持续性以及空间异质性^[55]。生态损失度指数法就是一种应用较为广泛的基于 $R = P \cdot D$ 模型的生态风险评价方法^[56],其数学表达式是,

$$R = P \cdot D$$

其中,

$$D = YS_i = E_i \cdot CR_i$$

式中, YS_i 为生态损失度指数, E_i 为生态指数^①, CR_i 为生态脆弱度指数。

国内应用生态损失度指数法进行生态风险评价的研究,较多的集中在湿地、湖区、流域、岛屿等生态风险的评价^[57-59]。但是由于这些研究所选用的指标不尽一致,使得不同研究的结论之间缺乏可比性。蒙古军等在研究区域生态风险评价的指标体系时,提出了建立统一指标体系的客观性、整体性、层次性、可比性原则^[60],这些原则对于完善生态损失度指数法的指标体系,提高不同研究结论之间的可比性具有借鉴意义。

此外,由于生态风险的数学内涵定义的不统一,以及生态风险具有模糊性、灰色性和不确定性等特点,还有学者在进行评价时采用模糊数学或灰色系统理论的方法来构建生态风险的数学表征公式^[61]。

3.2 生态梯度风险评价方法(procedure for ecological tiered assessment of risks,简称 PETAR)

Moraes 与 Molander 设计了在背景资料、基本数据短缺情况下分步进行的生态梯度风险评价方法^[62]。第

① 生态指数多通过物种多样性指数、物种原生性指数、自然度这 3 个指标按一定权重加权获得,也有利用其他指标计算获得生态指数的

一步,在生态功能区域内,通过定性评价,初步确定风险源、风险受体、风险源特点、风险源对风险受体可能造成的生态效应;第二步,在初步确定的风险源影响范围内,通过半定量评价,确定影响最大的风险源、面临风险最大的生境、最有可能遭受风险源影响的次级区域;第三步,在最有可能遭受风险源影响的次级区域,通过定量评价,验证定性评价确定的生态效应是否在特定次级区域及特定生境发生,并且将特定风险源与生态效应一一对应。生态梯度风险评价方法有 3 个特点:在概念模型构建中加入了对压力的产生、传递、形成风险的因果分析;采用综合方法进行暴露和危害分析;将证据权重分析法运用于因果分析。

3.3 相对风险模型法(Relative Risk Model,简称 RRM)

此方法是美国学者 Landis 与 Wiegiers 1997 年在评价原油运输船压舱水处理站对 Valdez 港口 151.2km² 范围内 11 个次级区域内 8 类生境的生态风险时,构建的用于区域生态风险评价的方法^[63]。RRM 方法的基本程序是,①确定评价区域及评价区域的生态环境管理与利益目标;②由熟悉评价区域情况的利益相关者,根据生态环境管理和利益目标,选择、确定作为风险受体的生境与评价终点;③通过对评价区域生态环境资料的分析,识别区域内的风险源;④根据资料与实际测量数据等,分析每种可能风险源的产生地点、压力作用、强度及潜在影响;⑤分析每种可能风险源是通过何种压力作用使生境发生变化的,分析生境变化是通过何种压力作用改变评价终点的;⑥构建 RRM 概念模型;⑦对风险源、生境、暴露系数、危害系数进行评分;⑧根据 RRM 模型的计算公式分别计算风险源、生境、生态终点的相对风险值;⑨对相对风险值进行不确定性分析^[64-65]。相对风险模型法的计算公式为:

$$RS_{l,j,m} = \sum (S_j \times H_l \times X_{jkl} \times E_{lm})$$

式中, RS 为各类相对风险得分(由下标决定是对于什么的相对风险), S_j 为风险源得分, H_l 为生境得分, X_{jkl} 为各风险源-压力作用-生境组合的暴露系数得分, E_{lm} 为各生境-评价终点组合的危害系数得分, j 为风险源类型, k 为压力作用类型, l 为生境类型, m 为评价终点类型^[66]。

目前 RRM 方法在许多区域生态风险的研究中得到了应用,如,Landis、Luxon 等应用 RRM 方法分别于 2000、2005 年先后两次评价了俄勒冈州 Willamette-McKenzie 流域的区域生态风险^[67-68];HartHayes 与 Landis 于 2004 年应用 RRM 方法评价了华盛顿 Cherry Point 区域的生态风险^[69];王小龙 2006 年应用 RRM 方法评价了山东省长岛县南五岛的生态系统风险^[70];付光辉 2007 年应用 RRM 方法评价了江苏省大丰市沿海滩涂项目开发土地整理的生态风险^[71]。

RRM 方法中的一个重要创新就是等级打分法(ranking method)的使用,通过设置等级使得将多风险源、多压力以及多终点能够较好的结合在一起,同时概念模型中对风险源与栖息地、栖息地与评价终点之间暴露、效应“系数(Filter)”概念的引入也进一步推进了等级打分法的使用。RRM 方法进行风险表征时是分别对风险源、生境、评价终点进行计算,有利于后续生态风险管理中有重点的对风险源、生境进行治理与修复。

4 结论与展望

(1) 目前针对化学污染物类风险源的生态风险评价研究方法较为成熟,但研究过程中的各类毒理数据多参考其他国家已有的数据库中的数据,且以急性毒理数据为主。可能会因为地域间物种差异性而造成一定的结果偏差。此外,使用慢性毒理数据能够获得更准确的评价结果,而慢性毒理数据的获得需要长期连续的监测才能获得,因此尽早建立我国系统、完整的急性、慢性毒理数据库,补充各类化学物质参考计量数据十分具有必要性。

(2) 针对物种入侵造成的生态风险我国目前还没有正式提出一个评价体系或标准^[72],目前国内对此类生态风险评价的指标体系的研究为今后国家相关标准的提出做出了有益探索,但对标准体系内某些关键指标的“阈值”设定研究还有所欠缺。此外在采用生态位模型法对物种入侵生态风险进行定量研究的同时,进一步采用概率统计学方法研究非生物环境对生物入侵的影响可能对更准确的评价物种入侵生态风险具有重要意义。

(3) 由于目前国内关于生态风险评价的评价指标繁杂,没有统一的指标体系。因此用于生态风险评价的

一手数据资料大多较为匮乏,在此条件下生态梯度风险评价方法中3个评价层级的划分理念可以将一个区域内的风险评价工作在有限的资源情况下尽可能得到准确而定量的结果。以此为基础进一步引入综合概率统计学方法、复杂系统理论、遥感技术等,加强定量模型开发,是生态风险评价方法的发展重要趋势之一。

(4)生态风险评价的目的是为生态风险管理提供决策依据,国内目前的研究还集中在对生态风险评价的研究中,对生态风险管理的研究尚不够深入^[73]。因此在发展已有的生态风险评价研究的同时,还应注意提高评价过程与管理过程的可对接性,提高评价结果在管理决策中的有效性。

References:

- [1] Mao X L, Ni J R. Recent progress of ecological risk assessment. *Acta Scientiarum Naturalium University Pekinensis*, 2005, 41(4): 646-654.
- [2] Yang W R, Wang R S, Huang J L, Li F, Chen Z. Ecological risk assessment and its research progress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [3] Ma Y, Zheng X M. Study on ecological risk assessment. *Territory and Natural Resources Study*, 2005, 2: 49-51.
- [4] Li G Q, An S Q, Chen X L, Zhang J L, Zhang J H, Tan J K, Zhu X L. A summary on ecological risk assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 18(4): 57-64.
- [5] Fu G H. Study on Ecological Risk Assessment of Land Consolidation. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [6] Chen H, Liu J S, Cao Y, Li S C, Ouyang H. Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [7] Li X H, Li J Y. Study on ecological risk assessment in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(3): 70-74.
- [8] US EPA. Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA 630-R-95-002F, Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 1998.
- [9] Clifford P A F, Barchers D E, Ludwig D F, Sielken R L, Klingensmith J S, Graham R V, Banton M I. An approach to quantifying spatial components of exposure for ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995, 14(5): 895-906.
- [10] Chen C. Risk Assessment on Alien Invasive Species and Construction of the Risk Analysis Framework. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [11] Chen J L, Lu Z H, Fan Y H. Method of ecological risk assessment for opencast mine area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2945-2950.
- [12] Liu Z Q, Li L H, Li X J, Cao Y Z, Li G H. Ecological risk assessment of naphthalene in the soil of a petrochemicals-contaminate site. *China Environmental Science*, 2006, 26(6): 746-750.
- [13] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River Delta. *Acta Scientiarum Naturalium*, 2001, 37(1): 111-120.
- [14] Zhao X, Zhang Y L, Li S Y. Ecological risk assessment of DDT damage to *Protosalanx hyalocranium* (Abbott) population in Taihu Lake. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1342-1345.
- [15] Zhou L J, Zhang X P, Chen S. Land use change and ecological risk assessment of Zhalong Natural Protection Area. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(2): 186-190.
- [16] Cao H F, Shen Y W. Brief review: ecological risk assessment research. *Environmental Chemistry*, 1991, 10(3): 26-30.
- [17] Lu Y Z, Yan B X, Li H W, Wang M J, Guo L Y. The evolution rule and ecology risk assessment of mercury in fish of Songhua River. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(6): 2430-2433.
- [18] Mller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [19] Peng J, Li Z Q, Hou J Y. Application of the index of geo-accumulation index and ecological risk index to assess heavy metal pollution in soils. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(8): 13-17.
- [20] H kanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 995-1001.
- [21] Jia Z B, Zhao Z J, Yang X M, Liu J B, Chen Z Y. Pollution and assessment of heavy metals in Yangchong River, Maozhou River and Dongbao River sediments, Shenzhen. *Environmental Chemistry*, 2001, 20(3): 212-219.
- [22] Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, Zhang C J. Calculation of heavy metal's toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [23] Liu J, Teng Y G, Cui Y F, Wang J S. Review in ecological risk assessment methods for heavy metal polluted soils. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2007, 19(3): 6-11.
- [24] Zhou X W, Wang L P, Zheng B H. Ecological risk assessment of sediment pollution based on triangular fuzzy number. *Environmental Science*, 2008, 29(11): 3206-3212.
- [25] Zhang Y C. Ecological Risk Assessment of Hazardous Waste. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 181-183.
- [26] Hou S G, Zhang Y Q. Review of ecological risk assessment. *Journal of Anyang Institute of Technology*, 2006, 1: 5-8.
- [27] Wang Y, Wang J J, Qin N, Wu W Q, Zhu Y, Xu F L. Assessing ecological risks of DDT and lindane to freshwater organisms by species sensitivity. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(11): 2407-2414.

- [28] Ma H, Qu Y C, Liu R W. Application of water quality evaluation with pollution index method and fuzzy mathematics method. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2002, 8(3): 164-165.
- [29] Jia Z B, Yu P T. Using excess after regression analysis (ERA) method to evaluate heavy metal pollution in Taizi River of Benxi City. *Acta Scientiarum Naturalium*, 1995, 31(4): 451-459.
- [30] Ma Y J, Fu H. Discussion about method of ecological risk assessment. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 25(4): 80-84.
- [31] Hu Y C, Li Y, Luo J R, Tan X C. Risk assessment system for alien aquatic animals. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2006, 34(10): 113-115.
- [32] NWRAS Review Group. Review of the National Weed Risk Assessment System. NRMSC 12 Canberra: A Sub-committee of the Natural Resources Policies and Programs Committee, 2006.
- [33] Ding H, Shi B Q, Xu H G. Index system and methodology for risk assessment of alien species. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(2): 92-96.
- [34] Yu G L, Li W Z, Chen G L. Ecological risk of invasive plants in Henan province based on PRA. *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*. 2009, 37(4): 133-135.
- [35] Ou J, Lu C Y. Present situation of alien plants invasion and its risk assessment system in Xiamen City. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(10): 1240-1244.
- [36] Fitzpatrick M C, Weltzin J F. *Invasive Plants: Ecological and Agricultural Aspects*. Switzerland: Birkh user Verlag, 2005.
- [37] Song H M, Zhang Q F, Han X M, Yu Y, Xu R M. CLIMEX: professional biological software for predicting potential distribution of species. *Entomological Knowledge*, 2004, 41(4): 379-386.
- [38] Wang Y S. *Application of Niche Models in the Risk Assessment of Invasive Alien Species*. Hunan: Hunan Agricultural University, 2007.
- [39] Zheng J M, Li J Q, Sun Q X, Zhou J X. Review of ecological prediction and risk analysis on woody plant invasion. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5549-5560.
- [40] Jia W M, Zhou Y L, Ding S L, Duan X Y. The methods and technologies in pest risk analysis. *Journal of Northwest Sci-Tech University. Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2005, 33(suppl): 195-200.
- [41] Adjemian J C Z, Girvetz E H, Beckett L, Foley J. Analysis of Genetic Algorithm for Rule-Set Production (GARP) modeling approach for predicting distributions of fleas implicated as vectors of plague, *Yersinia pestis*, in California. *Journal of Medical Entomology*, 2006, 43(1): 93-103.
- [42] Yu Y, Chen L L, He X J. Potential distributions of *Solidago canadensis* (Asteraceae) in China as predicted by GARP. *Acta Botanica Yunnanica*, 2009, 31(1): 57-62.
- [43] Hu T Y, Huang H, Guo S L, Fang F. Niche characteristic of exotic weeds in suburb and the impacts on biodiversity. *Guihaia*, 2007, 27(6): 873-881.
- [44] National Marine Data & Information Service. Cartel Bio Safety Protocol. [2009-06-16]. <http://biodiv.coi.gov.cn/fq/gy/anquan.htm>, 2005.
- [45] Qian Y Q, Tian Y, Wei W. Ecological risk assessment of transgenic plants. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 289-299.
- [46] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W II, Neill R V O, Bainthouse L W, Gardner R H. Assessing Ecological Risk on a Regional Scale. *Environmental Management*, 1990, 14(3): 325-332.
- [47] 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(2): 405-428.
- [48] Yin H, Wang Y L, Cai J L, Lu X F, Liu X Q. Regional ecological risk assessment: Its research progress and prospect. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(5): 969-975.
- [49] Sun H B, Yang G S, Su W Z, Wan R R. Research progress on ecological risk assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(2): 335-341.
- [50] Landis W G. Ecological Risk assessment conceptual model formulation for non-indigenous species. *Risk Analysis*, 2004, 24(4): 847-858.
- [51] Fu Z Y, Xu X G. Regional ecological risk assessment. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 267-270.
- [52] Meng D P, Zhang J T. Ecological risk assessment of heavy and energy sources industry compound biome in Shanxi Province. *Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica*, 2004, 24(8): 1480-1484.
- [53] Peng Y, Liu X H, Zhang S, Jin Q. Ecological risk assessment of the Shunyi District, Beijing based on an analysis of the integrated ecological loss; *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2008, 48(3): 367-370.
- [54] Feng J F, Teng X W, Wu Y D, Sun B H. The initial study on ecological risk assessment on paper making factories based upon GIS. *Environmental Engineering*, 2006, 24(5): 72-75.
- [55] Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 354-358.
- [56] Ma X J, Lu Z H, Chang Z H. Method of ecological risk assessment for Yancheng seashore wet land. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(4): 80-84.

- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] Lu H W, Zeng G M, Xie G X, Zhang S F, 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.
- [60] Meng J J, Zhao C H. Research progress on index system of regional ecological risk assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 983-990.
- [61] Zhou T, Meng J J. Research progress in regional ecological risk assessment methods. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(4): 762-767.
- [62] Moraes R, Molander S. A procedure for ecological tiered assessment of risks (PETAR). *Human and Ecological Risk Assessment*, 2004, 10(2): 349-371.
- [63] 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(3): 287-297.
- [64] 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(5): 1125-1173.
- [65] 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(2): 405-428.
- [66] Environment Waikato. Application of the relative risk model (RRM) to investigate multiple risks to the Miranda Ramsar Site; Environment Waikato Technical Report. Hamilton East: Environment Waikato, 2007.
- [67] Landis W G, Luxon M, Bodensteiner L R. Design of a relative rank method regional-scale risk assessment with confirmational sampling for the Willamette and McKenzie Rivers, Oregon // Price F T, Brix K V, Lane N K eds. Ninth Symposium on Environmental Toxicology and Risk Assessment: Recent Achievements in Environmental Fate and Transport. West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials, 2000.
- [68] Luxon M, Landis W G. Regional Scale Ecological Risk Assessment Using the Relative Risk Model. Boca Raton (FL): CRC, 2005.
- [69] Hart Hayes E, Landis W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment: Cherry Point, WA. *Human Ecological Risk Assessment*, 2004, 10(1): 299-325.
- [70] Wang X L. Application of Ecological Risk Assessment Method of Island Ecosystem. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [71] Fu G H. Study on Ecological Risk Assessment of Land Consolidation. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [72] Ministry of Environmental Protection of the PRC. HJ/T 192-2006 Technical Criterion for Eco-environmental Status Evaluation. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [73] Zhou P, Meng J J. Progress of ecological risk management research; a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2097-2104.

参考文献:

- [1] 毛小苓, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(4): 646-654.
- [2] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 李锋, 陈展. 生态风险评价及研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [3] 马燕, 郑祥民. 生态风险评价研究. *国土与资源研究*, 2005, 2: 49-51.
- [4] 李国旗, 安树青, 陈兴龙, 张纪林, 张久海, 谈健康, 朱学雷. 生态风险研究述评. *生态学杂志*, 1999, 18(4): 57-64.
- [5] 付光辉. 土地整理生态风险评价研究. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [6] 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.
- [7] 李谢辉, 李景宜. 我国生态风险评价研究. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(3): 70-74.
- [10] 陈晨. 外来入侵物种风险评估和风险分析体系的初步构建. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [11] 程建龙, 陆兆华, 范英宏. 露天煤矿区生态风险评价方法. *生态学报*, 2004, 24(12): 2945-2950.
- [12] 刘志全, 李丽和, 李秀金, 曹云者, 李广贺. 石油化工污染土壤中苯的生态风险评价. *中国环境科学*, 2006, 26(6): 746-750.
- [13] 许学工, 林辉平, 付在毅. 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.
- [14] 赵肖, 张娅兰, 李适宇. DDT 对太湖大银鱼种群危害的生态风险. *生态环境*, 2007, 16(5): 1342-1345.
- [15] 周利军, 张雪萍, 陈设. 扎龙自然保护区土地利用变化与生态风险评价. *自然灾害学报*, 2009, 18(2): 186-190.
- [16] 曹洪法, 沈英娃. 生态风险评价研究概述. *环境化学*, 1991, 10(3): 26-30.
- [17] 路永正, 阎百兴, 李宏伟, 王明君, 郭立英. 松花江鱼类中汞含量的演变趋势及其生态风险评价. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2430-2433.
- [19] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染重的应用及探讨. *广东微量元素科学*, 2007, 14(8): 13-17.

- [21] 贾振邦, 赵智杰, 杨小毛, 刘家宝, 陈志远. 洋浦河、茅洲河和东宝河沉积物中重金属的污染及评价. 环境化学, 2001, 20(3): 212-219.
- [22] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 张成江. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [23] 刘晶, 滕彦国, 崔艳芳, 王金生. 土壤重金属污染生态风险评价方法综述. 环境监测管理与技术, 2007, 19(3): 6-11.
- [24] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉. 基于三角模糊数的沉积物污染生态风险评价. 环境科学, 2008, 29(11): 3206-3212.
- [25] 张永春. 有害废物生态风险评价. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 181-183.
- [26] 侯绍钢, 张晏卿. 生态风险评价进展. 安阳工学院学报, 2006, 1: 5-8.
- [27] 王印, 王军军, 秦宁, 吴文婧, 朱樱, 徐福留. 应用物种敏感性分布评估 DDT 和林丹对淡水生物的生态风险. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2407-2414.
- [28] 马虹, 屈宜春, 刘仁伟. 污染指数法和模糊数学法在水质评价中的运用. 水利科技与经济, 2002, 8(3): 164-165.
- [29] 贾振邦, 于鹏涛. 应用回归过量分析法评价太子河沉积物中重金属污染的研究. 北京大学学报(自然科学版), 1995, 31(4): 451-459.
- [30] 马娅娟, 傅桦. 浅析生态风险及其评价方法的要点. 首都师范大学学报(自然科学版), 2004, 25(4): 80-84.
- [31] 胡隐昌, 李勇, 罗建仁, 谭细畅. 水生动物外来物种入侵风险评估系统的建立. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 113-115.
- [33] 丁晖, 石碧青, 徐海根. 外来物种风险评估指标体系和评估方法. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 92-96.
- [34] 于广丽, 李文增, 陈光磊. 基于 PRA 入侵植物对河南省生态风险性研究. 河南师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 133-135.
- [35] 殷健, 卢昌义. 厦门市外来物种入侵现状及其风险评估指标体系. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1240-1244.
- [37] 宋红敏, 张清芬, 韩雪梅, 余岩, 徐汝梅. CLIMEX: 预测物种分布区的软件. 昆虫知识, 2004, 41(4): 379-386.
- [38] 王运生. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究. 湖南: 湖南农业大学, 2007.
- [39] 郑景明, 李俊清, 孙启祥, 周金星. 外来木本植物入侵的生态预测与风险评价综述. 生态学报, 2008, 28(11): 5549-5560.
- [40] 贾文明, 周益林, 丁胜利, 段霞瑜. 外来有害生物风险分析的方法和技术. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(增刊): 195-200.
- [42] 余岩, 陈莉莉, 何兴金. 基于 GARP 的加拿大一枝黄花在中国的分布区预测. 云南植物研究, 2009, 31(1): 57-62.
- [43] 胡天印, 黄华, 郭水良, 方芳. 城市郊区外来杂草生态位特点及对生物多样性影响研究. 广西植物, 2007, 27(6): 873-881.
- [45] 钱迎倩, 田彦, 魏伟. 转基因植物的生态风险评价. 植物生态学报, 1998, 22(4): 289-299.
- [48] 殷贺, 王仰麟, 蔡佳亮, 吕晓芳, 刘小茜. 区域生态风险评价研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(5): 969-975.
- [49] 孙洪波, 杨桂山, 苏伟忠, 万荣荣. 生态风险评价研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(2): 335-341.
- [51] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-270.
- [52] 孟东平, 张金屯. 山西省能源重工业复合生态带生态风险评价. 西北植物学报, 2004, 24(8): 1480-1484.
- [53] 彭羽, 刘雪华, 张爽, 靳强. 基于综合生态损失度的顺义区生态风险评价. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(3): 367-370.
- [54] 丰江帆, 滕学伟, 伍耀东, 孙保华. 基于 GIS 的造纸企业生态风险评价初探. 环境工程, 2006, 24(5): 72-75.
- [55] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [56] 马喜军, 陆兆华, 常志华. 盐城海滨湿地的生态风险评价方法. 中国环境监测, 2007, 23(4): 80-84.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 蒙古军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. 应用生态学报, 2009, 20(4): 983-990.
- [61] 周婷, 蒙古军. 区域生态风险评价方法研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(4): 762-767.
- [70] 王小龙. 海岛生态系统风险评价方法及应用研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [71] 付光辉. 土地整理生态风险评价研究. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [72] 国家环境保护部. HJ/T192-2006 生态环境状况评价技术规范(试行). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [73] 周平, 蒙古军. 区域生态风险管理研究进展. 生态学报, 2009, 29(4): 2097-2104.