应用生态学报 2014年3月 第25卷 第3期
Chinese Journal of Applied Ecology, Mar. 2014, **25**(3): 911-918

# 城市生态风险评价研究进展*

王美娥** 陈卫平 彭 驰
(城市与区域生态国家重点实验室/中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘 要** 随着城市化发展和城市人居环境的恶化,城市生态风险越来越受到关注,但尚缺乏有关城市生态风险评价的深入系统研究.本文依据城市生态学原理及生态风险评价框架从驱动力、风险源、风险受体与评价终点,以及生态风险综合评价方法等方面对城市生态风险评价研究进行综述.指出城市经济社会活动类型与程度是城市生态风险产生的主要驱动力;城市生态系统不同等级功能实体和城市整体是城市生态风险评价中的风险受体;城市生态风险评价终点包括城市生态系统结构、过程、功能要素,以及城市整体水平的性质和功能变化;耦合了社会经济需求的生态系统模型是城市生态风险评价方法的发展方向.未来城市生态风险评价研究应明确生态风险管理具体目标,确定综合性评价终点,建立多指标评价体系和综合评价方法.

**关键词** 城市生态学 综合评价方法 综合性评价终点 服务功能

**文章编号** 1001-9332(2014)03-0911-08 **中图分类号** Q149 **文献标识码** A

**Urban ecological risk assessment: A review.** WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, PENG Chi (*State key Laboratory of Urban and Regional Ecology/Research Centre for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, **25**(3): 911-918.

**Abstract**: With the development of urbanization and the degradation of urban living environment, urban ecological risks caused by urbanization have attracted more and more attentions. Based on urban ecology principles and ecological risk assessment frameworks, contents of urban ecological risk assessment were reviewed in terms of driven forces, risk resources, risk receptors, endpoints and integrated approaches for risk assessment. It was suggested that types and degrees of urban economical and social activities were the driven forces for urban ecological risks. Ecological functional components at different levels in urban ecosystems as well as the urban system as a whole were the risk receptors. Assessment endpoints involved in changes of urban ecological structures, processes, functional components and the integrity of characteristic and function. Social-ecological models should be the major approaches for urban ecological risk assessment. Trends for urban ecological risk assessment study should focus on setting a definite protection target and criteria corresponding to assessment endpoints, establishing a multiple-parameter assessment system and integrative assessment approaches.

**Key words**: urban ecology; integrative risk assessment approach; integrative assessment endpoint; ecosystem service.

随着科学技术和经济的快速发展,人类的城市化进程十分迅速.根据联合国人口议题2012年报告,2011年全球城市人口比例达52.1%,全球城市人口年增长率将持续保持在0.5%以上,预计2030年中国城市人口将达68.7%[1].人口的过度密集、高强度工业活动和交通压力等导致城市生态环境、生态过程与功能发生变化,并引起局地、区域和全球环境的胁迫效应,以及自然生态系统响应机制的改变,成为当前国际社会和学术界关注的热点问题[2].

目前有关城市生态风险评价的报道较少,已有的研究把城市生态风险评价纳入了区域生态风险评

*国家自然科学基金面上项目(41271503)和国家自然科学重点项目(41030744)资助.
**通讯作者. E-mail: mewang@ rcees. ac. cn
2013-08-16 收稿,2013-12-16 接受.

价范畴，或者作为城市环境风险评价的内容之一[3-6]. 随着城市生态学的发展，对城市生态学的理解已经从城市中的生态学(ecology in the city)发展到了城市的生态学(ecology of the city)[7]，依据城市生态学原理，城市生态风险评价应该既包括不同等级城市生态系统的生态风险评价，还包括城市整体水平上的生态风险评价. 尽管城市生态风险评价与区域生态风险评价或流域生态风险评价类似，都具有大尺度、综合性，以及经济、社会、自然耦合的复杂性的特征[8-9]. 但由于城市的特征、内涵及边界界定与区域或流域不同，沿用一般区域或流域生态风险评价的原理与方法对城市生态系统进行生态风险评价会产生许多不合理之处，必须进一步深入生态风险评价原理与方法研究以适应城市生态风险评价的需要.

本文基于城市生态学原理及生态风险评价方法论，结合国内外有关城市生态风险评价的文献报道，对城市生态风险评价研究进行总结和探讨，并对未来的研究方向进行展望，以期促进城市生态风险评价研究的发展.

## 1 城市生态风险与评价

生态风险是指特定生态系统中具有不确定性的事故或灾害对生态系统及其组分所发生的非期望事件的概率和后果，包括对生态系统结构、生态过程和功能的危害，从而损害生态系统的安全和健康[3-6]. 城市生态风险可以认为是城市发展与城市建设导致城市生态环境要素、生态过程、生态格局和系统生态服务发生的可能不利变化，以及对人居环境产生的可能不良影响. 城市生态风险评价具有多风险源、多风险受体、复杂暴露途径等特点[3-4]，目的是为了明确城市生态风险评价的对象、范围和技术方法，揭示城市生态风险产生的机理与过程，为城市生态学发展提供理论基础.

国内对城市生态风险评价的研究报道较少，且报道时间至今为止只有十余年. 最具有代表性的研究为：周启星和王如松[10] 1998 年对浙中地区小城镇过程的生态风险研究；孙心亮和方创琳[5] 2006 年基于城市化综合指数和生态环境综合指数的相关性进行的河西走廊 7 个城市的生态风险评价；石洪华[4] 2008 年对青岛崂山市空气质量、降水量和气温变化的生态风险评价；安佑志[3] 2011 年采用多风险源、多风险受体的区域生态风险评价方法对上海市进行的城市生态风险评价. 在这些研究中风险源主要与城市化过程有关，也包括一些自然因素如降水和气温的变化，风险受体则以自然生态系统为主，生态效应多采用耦合了自然与社会因子的生态效应，如生态系统服务[3]和人类生态适宜度[4]. 国外对城市生态风险的报道主要为发生在城市区域的生态风险，并且大多针对化学污染物[11-15].

根据生态风险评价框架，城市生态风险评价与研究的内容可以分为：1）城市生态风险源与驱动力：城市生态风险源包括自然风险源和人为风险源的强度和频率，驱动力即引发城市生态风险的城市经济社会活动的类型与程度；2）城市生态风险受体：指受到人类活动不良影响的城市生态系统不同等级功能实体，如个体、种群、群落、城市生态系统和城市整体等；3）城市生态风险评价终点：是风险受体受到胁迫后产生的生态响应，城市生态风险评价终点通常是与人群健康和城市经济社会发展密切相关的城市生态系统结构、过程、功能要素，以及城市整体水平的性质和功能变化；4）城市生态系统评价方法：除了与自然生态系统风险评价方法类似大多选择基于生态系统模型的方法以外，更多地需要耦合社会经济需求. 由于在风险源和评价终点分析中通常包含暴露途径、方式、强度和频率，本文不对污染物暴露作单独阐述与讨论.

## 2 城市生态风险源与驱动力

城市生态风险主要来源包括人为风险源和自然风险源(表 1). 人为风险源的驱动力为城市经济社会活动，包括人口高度密集、土地利用改变和不透水地表增加、工业生产和污染物排放、交通压力增加等. 人为风险源可以分为物理胁迫、化学胁迫和生物学胁迫等.

自然风险源主要指洪涝灾害等气候变化和突发性灾害事件[4,16-17]. 徐丽芬等[17] 2010 年以 8 种自

**表 1 城市生态风险源**
**Table 1 Urban ecological risk sources**

| 风险源 Risk resource | 类别 Category | 项目 Item |
|---|---|---|
| 自然 Natural | - | 资源能源紧缺、全球气候变化、山体滑坡、泥石流和台风暴潮等突发性灾害 |
| 人为 Anthropogenic | 物理 Physical | 不透水地表、河岸带、跨河桥、噪声、灰霾、土地利用变化 |
| | 化学 Chemical | 危险化学品、点源和非点源污染物、固体废弃物、温室气体 |
| | 生物 Biological | 外来物种、病原菌及有害生物 |

然灾害(干旱、洪涝、地震、风暴潮、暴雪、冰雹、低温冷冻、沙尘暴等)作为综合风险源对北京幅(J-50)范围进行生态风险评价. 石洪华[4] 2008 年针对洪涝灾害、气温变化等风险源对青岛市进行了生态风险评价.

城市生态风险评价中自然风险源具有偶然性、小概率和高强度的特点,并且与人为风险源紧密相关. 人为风险源具有经常性和可控制性,概率大但是强度可以预测与控制.

### 2.1　城市物理胁迫

城市物理胁迫大多与城市规划管理有关,与城市化驱动因子的关联性最强,包括不透水地表、河岸带、跨河桥、取水、河流作业、灌渠改造等(表 1). 城市不透水地表比例的增加是产生城市热岛效应的直接因素之一[18]. 与乡村相比,城市不透水地表还导致了城市的蒸散发从 40% 降低到 25% ,地表径流从 10% 增加到 30% ,地下水从 50% 下降到 32% ,导致城市河流地貌的改变[18-21].

城市生态风险物理胁迫是城市化不可避免的过程,依据城市生态用地的数量计算及空间配置等城市生态学原理与方法能够实现对城市物理胁迫最大程度的控制与管理.

### 2.2　城市化学胁迫

城市化学胁迫主要与污染物排放有关,也是传统生态风险评价中最受关注的胁迫类型,是目前城市生态风险评价研究中的主要人为风险源[10-15]. 城市经济开发区的发展导致各种大气污染物排放增加[22]. 周启星和王如松[10] 对江南地区乡村城镇化引起水污染的生态风险评估结果表明,城市化过程中人口密度的增加与地表水中 BODs、$NO_3^-$-N、苯酚、表面活性剂和降水 pH、Pb、$NO_2^-$-N、苯酚,以及地下水 $NO_3^-$-N 等水质参数呈正相关关系. Collins 等[21] 研究发现,周末降雨概率的增加与周末汽车尾气排放导致空气中颗粒物含量增加有关.

城市工业活动与汽车交通排放是形成城市土壤、大气和水体面源或点源重金属和有机物污染的重要来源. 土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量与城市化及工业化景观指数呈极显著相关关系[23],工业活动排放的重金属种类通常与工业类型有关[24]. 对城市不同功能区土壤重金属及多环芳烃(PAHs)含量的调查发现,城市中心、老居民区、主要交通干道等土壤中重金属和 PAHs 含量较高[25-26].

综上所述,城市生态风险的化学胁迫大多并非来自人类主观行为,是城市人类活动驱动下产生的负面效应,能够通过相应的环境管理与控制技术得到改善.

### 2.3　城市生物学胁迫

城市生物学胁迫主要指外来物种与病原菌,是当前比较受关注的胁迫类型. 生物入侵是个全球性的问题,国际旅游和贸易增加了生物资源在全球不同地区之间的流通,增加了生物和病原菌的入侵机会. Andersen 等[27] 2004 年提出要把生物入侵纳入生态风险评价中,并修订了生物入侵的管理框架以及生态风险评价方法条例使其适用于生物学胁迫风险源. 与自然生态系统相比,城市受到的人为干扰频繁,更容易受到生物入侵胁迫,而城市绿地是外来物种进入城市生态系统的主要通道. 对 2010 年上海举行世界博览会带来的城市绿地中外来物种入侵的生态风险评估结果表明,7 个物种(4 个昆虫、2 个植物病原菌和 1 个植物线虫)具有高风险[28].

此外,有害生物传播和传染性病原菌风险也是城市生态风险评价的重要内容之一[29],典型的例子是 2008 年的 SARS 流行病爆发及 2013 年春季人感染禽流感事件. 与其他两种人为风险源相比,城市生态风险中的生物学胁迫与自然风险源的关系更为密切. 因此,对生物学胁迫的控制不仅要考虑到人类活动的因素,还需要结合城市自然生态环境条件.

## 3　城市生态风险评价中的受体与评价终点

根据城市功能实体等级,城市生态风险受体可以从人体和人群、生物个体、种群、群落、生态系统以及城市整体水平这几个层次来讨论[30-31]. 城市生态风险评价终点即为城市不同等级功能实体的结构、过程、功能要素等对胁迫的响应. 随着功能实体等级的升高,响应的时间和空间跨度依次增大,譬如陆地生态系统时间尺度可以从几年到几十年甚至更长时间,水域生态系统相对较短,一般为数天到数年[32]. 在城市生态风险评价中,不同等级的评价终点相互作用、互相关联. 人类是最重要的风险受体,人体和人群的健康状况、过敏症状,以及流行病、地方病、老龄化等是城市生态风险的重要评价终点.

### 3.1　城市生态系统生物个体、种群、群落水平上的评价终点

生物个体、种群、群落水平上的评价终点主要体现在城市自然生态系统中这些风险受体对环境胁迫的响应. 城市化对城市自然生态系统中的微生物、植物、动物群落水平上的结构与功能的影响受到了广泛关注,包括动植物和土壤微生物多样性降

低[33-34],以及植物群落结构的变化等[19-20].

### 3.2 城市生态系统水平上的评价终点

城市生态系统水平上的评价终点更多地体现了社会、经济等要素.在城市生态系统水平上选择评价终点时,除了要考虑关键性的生态系统要素外,更需要从系统的功能出发,选择具有重要生态学及经济社会意义的生态系统组成和结构、生态过程及生态系统服务.常见的城市生态系统水平上的评价指标包括:生态系统过程指标生物量、产量、物质动态变化;生态系统四大要素大气、水、土壤环境质量及生物多样性;城市生态系统服务功能,如环境净化、灾害防护、调节气候、固氮释养,以及其他直接价值和间接价值等.城市生态系统水平上的评价终点在目前的城市生态风险评价研究中应用较为普遍,如安佑志[3]应用生态系统服务价值和生态系统弹性度等指标作为评价终点.

### 3.3 城市整体水平上的评价终点

城市整体水平上的评价终点包括:景观格局、生态要素质量、生态过程、服务功能,以及城市自然与社会灾害、事件发生频率等.生态要素质量是最直观也是最受关注的城市整体水平上的评价终点,与城市人居环境及社会经济状况密切相关.譬如城市热环境、大气质量、水环境质量以及 GDP、人口密度等,其中水环境质量包括水源地的水质与水量.城市化过程中人类活动(如石油燃料、氯氟烃排放、颗粒物排放、森林砍伐和植被消失等)导致的城市热环境、水环境等评价终点的变化只有通过长期观察才能显现.生态过程评价终点主要针对人类社会行为的变化,反映了城市社会经济发展及运行模式,如城市物质和能量流、水资源利用、污染物排放强度等.城市整体水平上的服务功能评价终点主要包括调节气候、净化污染物、调节水文、固碳、提供栖息地、文化服务等,其中提供栖息地功能包括人居环境、基础设施等.城市突发事件与灾害发生频率在所有评价终点中最具有社会学和生态学意义,能够体现城市整体情况,包括大气灰霾、酸雨、流行病、城市内涝、水体富营养化的发生等.城市化的特征会使它们更容易或更不容易受到这些灾害的影响,其风险能够通过这些灾害事件的发生频率高于一定级别(如每100 $hm^2$范围内的水灾事件数目)来评估[30-31].目前在城市生态风险评价中应用较多的整体水平上评价终点为自然灾害的发生和景观格局的变化,如石洪华[4]、李辉霞和蔡永立[16]等采用洪涝灾害发生率为评价终点;安佑志[3]以植被覆盖度和亮温指数为评价终点.因此,城市整体水平上的评价终点与城市社会、经济等要素关联最为密切,充分体现了城市化特征,反映了城市化过程及城市功能.然而城市整体水平上的评价终点往往缺乏与生物及人体和人群的直接联系,但景观格局变化在高质量卫星和航拍影像以及地理信息数据的支持下较容易定量化,且能够较好地反映人类对陆地环境的物理性干扰[35-36].

**表 2 城市生态风险评价的评价终点**
**Table 2 Assessment endpoints in urban ecological risk assessment**

| 评价终点 Assessment endpoint | 项目 Item | 评价指标 Assessment index |
|---|---|---|
| 人体和人群 Human and Population | 生长发育、衰老、致病 | 身高、体质量、疾病 |
| | 人体健康风险 | 人群流行病、癌症发生率、地方病、老龄化 |
| 个体水平 Individual level | 生长发育 | 生物量、细胞和组织完整性、器官衰竭 |
| | 代谢活动 | DNA 损伤、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、mRNA、蛋白质 |
| | 繁殖能力 | 生物内源激素水平、生物繁殖速度 |
| 种群水平 Population level | 种群密度和分布 | 种群数量、密度、出生率、死亡率 |
| | 种群空间格局、种群扩散 | 迁入和迁出率、种群结构和性比、种群空间格局 |
| 群落水平 Community level | 群落组成 | 物种构成、食物链(网)、丰富度、多样性、物种密度、频度、盖度、生物量、优势度 |
| | 群落功能 | 物质流、能量流、生态效率 |
| 生态系统水平 Ecosystem level | 生态系统组成与结构 | 大气、水、土壤等环境质量及生物多样性 |
| | 生态系统过程 | 生物量、生产力、养分循环、土壤和养分流失、水资源利用 |
| | 生态系统服务功能 | 土壤肥力、调节气候、固碳、释氧、保持土壤、涵养水源、净化环境、减弱噪声,灾害防护功能等(直接价值、间接价值) |
| 城市整体水平 The whole city | 景观格局 | 斑块数和大小、分维数、聚集度、优势度、多样性、植被覆盖度、高程、坡度 |
| | 生态要素质量 | 大气环境、水环境、饮用水源、土壤环境、热环境、光环境、地下水、GDP、人口密度 |
| | 生态过程 | 能量流、物质流、元素流、水资源利用、生态效率、污染物排放强度 |
| | 服务功能 | 调节气候、净化污染物、调节水文、固碳、提供栖息地、文化服务 |
| | 城市突发事件与灾害发生频率 | 灰霾、酸雨、水体富营养化、干旱、热岛、城市内涝、流行病 |

### 3.4 以服务功能为评价终点

服务功能包括城市生态系统及城市整体水平上的服务功能,是这两个等级水平上的重要评价终点. Suter[30]提出评价终点的选择必须依据生态风险评价目标确定. Suter 和 Cormier[37]指出决策者对生态风险评价结果关注较少的原因之一是风险评价科学

工作者与利益方之间存在交流障碍. 风险评价者没有对科学管理环境的最终目标进行明确阐述，即利益方和决策者不知道要“保护什么”[38]. 而要引起决策者的注意，必须要让利益方明白哪些服务和功能是有利的，并且需要管理的. 风险评价工作者的研究重点在于应用何种工具（即评价指标）来表达这些服务功能. 在 2010 年的“A Community on Ecosystem Services”会议上，专家们正式提出了以“生态系统服务”作为生态风险评价终点的观点. 服务功能作为生态风险评价终点的优点有以下几个方面[38]：

1）便于与公众交流，基于服务功能的环境及管理政策往往能够较好地解释系统对人类的价值.

2）体现整体性和囊括性，在生态风险评价中采用服务功能为评价终点，有利于把各种不同的生态系统评价方法与社会-生态评价方法整合在一起.

3）便于价值定量化，服务功能可以采用“货币形式”进行价值定量，使决策者能够较易通过净环境利益了解系统的生态恢复或修复所带来的服务功能与损坏系统所产生的不良环境效应之间的利益差[39].

尽管服务功能在城市生态风险评价中具有很好的应用前景，目前相关实际应用的报道仍较为少见. Faber 和 Wensem[38] 在评价农药污染对特定生态系统的生态风险时，尝试以生态系统服务功能为评价终点，其他报道大多还停留在概念阶段.

## 4 城市生态风险评价方法

综合指数法和模型模拟法是城市生态风险评价的重要手段，其共同优点是包含了风险源强度、风险受体与评价终点特征等信息，能够对风险产生的概率、强度及时空特征进行系统全面的估计和预测.

### 4.1 综合指数法

综合指数法能够综合多个因素指标进行评价并定量化. 对于非定量化因子，采用质量等级评分，并兼顾专家意见，由定性转向定量. 大尺度生态风险评价中应用较为广泛的改进的综合指数法主要有：生物效应评价指数法（bio-effect assessment index，BAI）、证据权重法（weight-of-evidence）及相对风险法[40-41].

### 4.2 模型模拟法

模型模拟法是生态风险评价的最主要、应用最广泛的方法. Chen 等[42] 把基于系统的生态风险评价模型分为 3 个层次，分别为食物网模型、生态系统模型及社会生态学模型，应用尺度从亚系统到系统再到多系统组合. 综合应用多种模型组合，即系统模型（system model）法，是今后大尺度生态风险评价方法包括城市生态风险评价方法的发展方向[42-43]. Thomsen 等[43] 采用系统模型法进行了特定土地利用类型土壤的生态风险情景分析. 该方法由 5 个子模型组成：

1）问题分析模型（problem decomposition model，PDM）：包括所有的能导致风险产生的子问题，即维持和增加特定生态系统服务功能所涉及的一系列生态需求及其相关的生态指示指标.

2）情景组合模型（scenario composition model，SCM）：评估下一级子问题，这些子问题与高风险情况相关，即对胁迫较敏感的生态指标.

3）基准模型（criteria model，CM）：对情景组合模型（SCM）中的子问题和基础数据库中有关高风险/低风险环境基准值进行比较分析，即通过对比相关基准值，对指定生态指标进行定量化.

4）情景选择模型（scenario selection model，SSM）：基于基准值进行高风险情景模拟，即针对特定胁迫采用土壤生态系统脆弱性基准值、土壤质量基准值等.

5）风险定量模型（risk quantification model，RQM）：对每一个所选情景进行风险等级预测与评估.

系统模型法能够减小在风险评价过程中由于易混淆的多重因子、复杂的交互作用以及数据缺口而产生的不确定性，因此具有重要的应用前景.

城市生态系统是一个以人类活动为中心的社会、经济、自然复合生态系统，采用社会-生态学模型评价城市生态风险能够使评价过程与相关法律法规相结合，评价结果符合社会经济利益和目标. 据 Chen 等[42] 报道，目前较受关注的社会-生态学模型包括：1）净利益分析模型（NBAM），主要用于植物入侵的风险与利益预测评估；2）社会-生态系统脆弱性模型（SSVM），以生态系统服务及其相关的生态系统性质变化为评价终点的评价模型；3）综合坝评估模型（IDAM），针对某些人类活动，如建坝所产生的生态风险，该模型在单一成本-效益评价中综合了生物物理、社会经济及地理政治条件等. 然而，至今为止，这些模型还没有在城市生态风险评价中广泛应用，需要结合案例深入探讨.

采用综合指数法和模型模拟法进行城市生态风险评价时，必须有一个能够反映城市生态系统质量或城市态系统服务功能或城市生态系统脆弱性的基

准值,基于此定量或定性表征城市生态风险. 然而,基准值的选择和建立极为复杂,有关研究将是限制城市生态风险评价方法中的难点和关键之一.

## 5 结论与展望

城市生态风险在我国作为一个特定的概念被提出,被认为有别于区域和流域生态风险评价,而国外研究中较少见到这个特定名词. 随着城市化程度不断提高,城市化过程产生的生态风险类型和涉及面日益广泛. 城市生态风险的风险源包括各种物理、化学、生物胁迫和突发灾害事件,风险受体包括人类在内的城市生态系统及城市整体;评价终点的确定更倾向于城市生态系统的结构、过程和功能响应,以及城市整体水平上的格局、生态过程和功能变化;而评价方法研究集中在指标体系和数学模型的建立.

尽管当前城市生态学研究的日益成熟为城市生态风险评价的发展提供了坚实的理论基础,但是城市生态风险评价研究从风险源识别到风险受体与评价终点的确定,以及评价指标体系和评价方法的建立,都还处于借鉴区域生态风险评价或城市环境风险评价的方法体系阶段. 今后相关研究应从以下 3 个方面重点展开:

1)在理论基础研究方面,依据城市生态学原理进一步明确城市生态风险管理目标,即明确城市生态风险评价所保护的具体对象. 城市生态风险评价研究基于城市生态学原理,但是滞后于城市生态学的发展. 城市生态学研究已从城市中的生态学发展到了城市的生态学,因此,城市生态风险评价的具体保护对象也应从城市内各个生态系统的结构、过程和功能发展到城市整体水平上的人类健康、生态环境质量、社会经济可持续发展、历史文化价值保护等. 针对保护对象,确定风险产生的驱动力、风险源、暴露途径、风险受体及评价终点,建立生态风险评价概念模型. 譬如:以保护城市土壤生态环境质量为目标,风险产生的驱动力为城市化带来的城市景观格局与生态系统结构、过程和功能的变化,风险源应包括以硬化地表和城市建筑为代表的物理胁迫、以工业和交通排放为主的化学胁迫,以及以外来生物入侵为主的生物胁迫,而评价终点则包括以城市土壤自然生态系统不同功能实体水平上的生态学反应以及城市整体水平上的土地资源利用.

2)在评价终点选择和评价指标体系建立方面,应发展符合城市生态风险综合性特点的综合性评价终点和评价指标体系研究. 以系统服务功能为评价终点可以较好地反映城市生态系统和城市整体的综合生态效应、结构与过程,并涵盖社会、经济意义,较好地体现以人类为核心的城市及城市生态系统所受到的危害. 以土壤生态系统服务功能为例,城市土壤生态系统的服务功能首先是以水分涵养、污染物过滤、脱毒转化、气温调节为主的调节功能,每一项服务功能都是土壤生物与其物理化学环境相互作用的结果,包含了相应的土壤生物、物理、化学性质,体现了土壤生态学的整体性. 化学胁迫及土地利用类型变化会对土壤生物多样性和土壤肥力、土壤健康产生影响,导致土壤生物栖息地质量下降,使土壤正常生态过程和废物吸收同化及脱毒等生态系统服务功能难以维持. 在以城市土壤生态系统服务功能为评价终点的研究中,可以通过建立一系列生态评价指标来评估土壤生态系统服务功能受到不良影响的程度.

3)整体性评价方法研究是城市生态风险评价研究的重点. 在采用生态系统服务功能进行生态风险评价时,单纯把相关的系统服务功能作为评价终点,而评价方法仍旧沿用传统生态风险方法是远远不够的,必须采用能够体现系统服务功能整体性特征的方法. 系统模型法体现了多系统组合的特点,社会-生态学模型能够使生态风险评价过程与社会法律、法规密切联系,是城市生态风险评价方法的最佳选择.

**致谢** 本文从构思到完成均得到欧阳志云研究员的悉心指导,敬致谢意.

**参考文献**

[1] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2011 Revision. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2012

[2] Wang R-S (王如松). The frontiers of urban ecological research in industrial transformation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(5): 830-840 (in Chinese)

[3] An Y-Z (安佑志). The Urban Ecological Risk Assessment Based on GIS: A Case Study of Shanghai. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Normal University, 2011 (in Chinese)

[4] Shi H-H (石洪华). Study on Urban Typical Ecological Risk Assessment and Its Management Strategy. PhD Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2008 (in Chinese)

[5] Sun X-L (孙心亮), Fang C-L (方创琳). Model and application of ecological risk appraisal in the course of urbanization in arid area. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2006, **29**(5): 668-674 (in Chinese)

[6] Tan S-Q (谭三清), Li N (李 宁), Li C-H (李春

华）, *et al*. A study on urban land ecological risk and its evaluation in Changsha City. *Chinese Agricultural Science Bulletin*（中国农学通报）, 2010, **26**(15)：336-342 (in Chinese)
［7］ Pickett STA, Cadenasso ML, Grove JM, *et al*. Urban ecological systems：Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, **32**：127-157
［8］ Chen C-L（陈春丽）, Lü Y-L（吕永龙）, Wang T-Y（王铁宇）, *et al*. Emerging issues and prospects for regional ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报）, 2010, **30**(3)：808-816 (in Chinese)
［9］ Xu Y（许　妍）, Gao J-F（高俊峰）, Zhao J-H（赵家虎）, *et al*. The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报）, 2012, **32**(1)：284-292 (in Chinese)
［10］ Zhou Q-X（周启星）, Wang R-S（王如松）. Ecological risk and background warning values of water pollution from rural urbanization. *Chinese Jounal of Applied Ecology*（应用生态学报）, 1997, **8**(3)：309-313 (in Chinese)
［11］ Tixier G, Lafont M, Grapentine L, *et al*. Ecological risk assessment of urban stormwater ponds：Literature review and proposal of a new conceptual approach providing ecological quality goals and the associated bioassessment tools. *Ecological Indicators*, 2011, **11**：1497-1506
［12］ Perrodin YB. Ecological risk assessment of urban and industrial systems：A review. *Science of the Total Environmnet*, 2011, **409**：5162-5176
［13］ Bowen JL, Valiela I. The ecological effects of urbanization of coastal watersheds：historical increases in nitrogen loads and eutrophication of Waquoit Bay estuaries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, **58**：1489-1500
［14］ Mellor A. Lead and zinc in the Wallsend Burn, and urban catchment in Tyneside, UK. *Science of the Total Environment*, 2001, **269**：49-63
［15］ Diamond JM, Serveiss VB. Identifying sources of stress to native aquatic fauna using a watershed ecological risk assessment framework. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**：4711-4718
［16］ Li H-X（李辉霞）, Cai Y-L（蔡永立）. Ecological risk assessment of flood disaster in major cities in Taihu basin. *Journal of Catasterophology*（灾害学）, 2002, **17**(3)：91-96 (in Chinese)
［17］ Xu L-F（徐丽芬）, Xu X-G（许学工）, Lu Y-L（卢亚灵）, *et al*. Integrated ecological risk assessment of J-50 based on natural disasters risk source. *Ecology and Environmental Sciences*（生态环境学报）, 2010, **19**(11)：2607-2612 (in Chinese)
［18］ Mcintyre NE, Knowles-Yanez K, Hope D. Urban ecology as an interdisciplinary field：Differences in the use of "urban" between the social and natural sciences. *Urban Ecosystems*, 2000, **4**：5-24
［19］ Moran MA. Influence of adjacent land use on understory vegetation of New York forests. *Urban Ecology*, 1984, **8**：329-340
［20］ Klotz S. Species/area and species/inhabitants relations in European cities// Sukopp H, Hejny S, eds. Urban Ecology：Plants and Plant Communities in Urban Environments. The Hague：SPB Academic Publishing, 1990：99-103
［21］ Collins JP, Kinzig A, Grimm NB, *et al*. A new urban ecology. *American Scientist*, 2000, **88**：416-425
［22］ Guo LB, Gifford RM. Soil carbon stocks and land use change：A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, **8**：345-360
［23］ Lin YP, Teng TP, Chang TK. Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua conty in Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 2002, **62**：19-35
［24］ Al-Khashman OA, Shawabkeh RA. Metals distribution in soils around the cement factory in southern Jordan. *Environmental Pollution*, 2006, **140**：387-394
［25］ Luo XS, Yu S, Li XD. Distribution, availability, and sources of trace metals metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong：Implications for assessing the risk to human health. *Environmental Pollution*, 2011, **159**：1317-1326
［26］ Peng C（彭　驰）, Wang M-E（王美娥）, Liao X-L（廖晓兰）. Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils：A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报）, 2010, **21**(2)：514-522 (in Chinese)
［27］ Anderson MC, Adams H, Hope B, *et al*. Risk assessment for invasive species. *Risk Analysis*, 2004, **24**：787-793
［28］ Ju R-T（鞠瑞亭）, Li B（李　博）. A risk analysis system for alien species in urban green spaces and application to the 2010 Expo, Shanghai. *Biodiversity Science*（生物多样性）, 2012, **20**(1)：12-23 (in Chinese)
［29］ Yang W-R（阳文锐）, Wang R-S（王如松）, Huang J-L（黄锦楼）, *et al*. Ecological risk assessment and its research progress. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报）, 2007, **18**(8)：1869-1876 (in Chinese)
［30］ Suter GW. Endpoints for regional ecological risk assessments. *Environmental Management*, 1990, **14**：9-23
［31］ Landis WG. 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
［32］ Cutter SL, Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**：2301-2306
［33］ Zhou Q-X（周启星）, Wang M-E（王美娥）, Wang R-S（王如松）. Ecological effects of land-use changes in a small town of Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报）, 2005, **16**(4)：651-654 (in Chinese)
［34］ Nilon CH, Pais RC. Terrestrial vertebrates in urban

ecosystems: Developing hypotheses for the Gwynns Falls Watershed in Baltimore, Maryland. *Urban Ecosystems*, 1997, **1**: 247-257

[35] Jing Y-P (荆玉平), Zhang S-W (张树文), Li Y (李颖). Ecological risk analysis of rural-urban ecotone based on landscape structure. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **27**(2): 229-234 (in Chinese)

[36] Li J-G (李景刚), He C-Y (何春阳), Li X-B (李晓兵). Landscape ecological risk assessment of natural/semi-natural landscapes in fast urbanization regions: A case study in Beijing, China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2008, **23**(1): 33-47 (in Chinese)

[37] Suter GW, Cormier SM. Revitalizing environmental assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2008, **4**: 385

[38] Faber JH, Wensem JV. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. *Science of the Total Environment*, 2012, **415**: 3-8

[39] Efroymson RA, Nicolette JP, Suter II GW. A framework for net environmental benefit analysis for remediation or restoration of contaminated sites. *Environmental Management*, 2004, **34**: 315-331

[40] Dagnino A, Sforzini S, Dondero F, *et al*. A "Weight-of Evidence" approach for the integration of environmental "Triad" data to assess ecological risk and biological vulnerability. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2008, **4**: 314-326

[41] Obery AM, Landis WG. A regional multiple stressor risk assessment of the codorus creek watershep applying the Relative Risk Model. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, **8**: 405-428

[42] Chen S, Chen B, Fath BD. Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-art models and future perspectives. *Ecological Modelling*, 2013, **250**: 25-33

[43] Thomsen M, Faber JH, Sorensen PB. Soil ecosystem health and services: Evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. *Ecological Indicators*, 2012, **16**: 67-75

**作者简介** 王美娥,女,1975 年生,副研究员. 主要从事污染生态学研究,发表论文 30 余篇. E-mail: mewang@rcees.ac.cn

**责任编辑** 肖 红