

张小飞, 王如松, 李正国, 李 锋, 吴健生, 黄锦楼, 于盈盈. 城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例. 生态学报 2011, 31(20): 6204–6214.
Chang H F, Wang R S, Li Z G, Li F, Wu J S, Huang J L, Yu Y Y. Comprehensive assessment of urban ecological risks: the case of HuaiBei City. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(20): 6204–6214.

城市综合生态风险评价 ——以淮北市城区为例

张小飞¹, 王如松¹, 李正国², 李 锋^{1,*}, 吴健生³, 黄锦楼¹, 于盈盈¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081; 3. 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 城市面临复杂的生态风险, 为了保障城市安全, 需要对单一灾害或污染源的生态风险评估结果进行整合。基于城市复合生态系统特性, 将当前城市地域常见的生态风险区分为自然灾害、环境污染及生态退化等 3 种主要类型, 以土地利用单元作为风险受体, 整合自然、人文、景观及环境因子, 在现有生态风险评价研究方法基础上, 构建了城市综合生态风险评价的空间分析框架。研究中选择淮北市城区作为研究区, 针对研究区内存在的洪涝、干旱、水污染、大气污染、采煤塌陷及生态服务降低等生态风险类型, 定量评价其空间差异, 并提出相应的风险防范措施。案例分析结果表明, 研究区综合生态风险较高的区域包括龙河、岱河、龙岱河与闸河等过境河流流经塌陷密集带的河段, 北湖、东湖、中湖及南湖等人工湖泊沿岸, 化家湖湖岸, 及土型、新蔡、北杨新杨煤矿及其外围地区。由降低生态风险保障城市生态安全角度, 在未来城市的整体规划中, 建议结合城市外围绿地与城市内部的高风险区域, 划定禁建或限建区域, 共同构建淮北城市生态风险防范的空间结构。

关键词: 城市生态系统; 综合生态风险; 土地利用类型; 淮北市

Comprehensive assessment of urban ecological risks: the case of HuaiBei City

CHANG Hsiao-fei¹, WANG Rusong¹, LI Zhengguo², LI Feng^{1,*}, WU Jiansheng³, HUANG Jinlou¹, YU Yingying¹

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

2 Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture, Ministry of Agriculture (MOA), Beijing 100081, China

3 Graduate School of Shenzhen, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract: Ecological risk is defined as the probability that a specific population, landscape, or ecosystem in a dangerous environment has its health, productivity, hereditary features, or economic and aesthetic values affected. Various and complex ecological risks occur widely in urban ecosystem. Conventional assessments for single types of ecological risks are not comprehensive enough to evaluate the degree of ecological risk, and are also unsuitable to meet the multiple needs of sustainable urban development and management. In this paper, a research framework has been formulated to evaluate urban ecological risks spatially and more comprehensively. The framework has five steps: identification of potential risk types, selection of influential factors, exposure analysis, effect analysis, and putting forward of mitigation measures.

First, three primary kinds of ecological risks, including natural disasters, environmental pollution, and ecological degeneration are considered. Selecting factors of the natural environment, social economy, landscape, and pollution would be used to explain the influence of spatial characteristics. Exposure analysis showed frequency, range, and duration of each risk based on the weather record, Annual Report of Environment Quality, and other statistical data from government

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2010CB951502); 国家自然科学基金重点项目(71033005); 国家自然科学基金项目(4100138); “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAC28B04)

收稿日期: 2011-06-21; 修订日期: 2011-07-11

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

departments.

The effect analysis integrated the results of exposure degree, effect of environmental factors, and degree of vulnerability. Degree of vulnerability depends on risk object characteristics. Land use unit is suitable to be the object for illustrating the degree of risk influence directly and linking with urban planning. Considering function and land cover, land use types would be categorized as high density building area, medium density building area, low density building area, traffic land, forest land, grassland, cultivated land, garden land, water, and unused land.

The urban core area of HuaiBei city has been chosen to test this framework. Major ecological risks in HuaiBei include flood, drought, water pollution, air pollution, land subsidence, and ecological service degradation. Single and comprehensive ecological risk degrees have been calculated. Based on these, spatial strategies of urban ecological planning are proposed that incorporate these assessment results. Three risk levels were recognized in this study area by our comprehensive ecological risk assessment. In high risk areas land use for urban expansion and construction should be limited in future planning, vegetation cover should be restored, and climate change and environmental quality should be monitored to protect the urban ecological environment and the lives and health of human beings. Medium risk areas require a different building code for each risk category when building and constructing to ensure the safety of infrastructure such as traffic, energy, and water. Furthermore, an environmental impact assessment should be undertaken and approved to guide building. High density development should be limited to low risk areas, although the need for land use management after planning remains.

The framework of comprehensive ecological risk assessment integrated different risks of natural disasters, environmental pollution, and ecological degeneration. Land use units have been used as the risk objects and which can be directly used as the ecological background for urban planning in the future. Also, it is simple to adjust when land use changes, and when different planning scenarios require new decisions. Furthermore, it can highlight spatial variation of ecological risks and make suggestions for efficient mitigation. There are still some difficulties in the study, i. e. the considerations of the degree of vulnerability are complicated, and have to integrate the opinions of experts, local residents, and governments. For governments, the degree of vulnerability is linked with financial expenditure; for residents, it depends on the safety of life and belongings; and for different experts, it involves natural capital, environmental quality, human health, and so on.

Key Words: urban ecosystem; comprehensive ecological risks; landuse types; HuaiBei City

生态风险是生态系统暴露在某种危险环境状态下的可能性,指一个种群、生态系统或整个景观的正常功能受外界胁迫,从而在目前和将来破坏或减小该系统内部某些要素或其本身的健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值的可能性^[1]。生态风险评价是定量化的评估发生生态环境灾害的机率^[2-5]。目前生态风险评价涉及层面相当广泛,有从个别产业角度,探讨农业、矿产、旅游等开发对环境影响,例如农药使用对水系及土壤的影响范围^[6],开矿产生的重金属污染对周围土壤与植被的破坏^[7],旅游开发对社会、经济及自然生态带来的冲击^[8];有从规划角度,探讨不同情景方案带来景观及区域土地利用结构的改变,例如不同的道路网络方案对森林、冠丛、耕地产生的影响^[9];或由城市环境角度,分析发展与建设带来的环境污染,例如城市交通废气产生的重金属残留^[10]。随着风险源的复杂性与影响范围在空间上的重合性,风险的分析也扩展至多风险、多受体的领域,例如孙洪波等便以人类活动为切入点,建立经济快速发展地区,土地利用活动驱动下的综合生态风险评价^[11]。

全球暖化与气候变化是当前生态、环境、城市规划乃至产业发展等领域研究的热点问题^[12-13],其衍生的风险防范与适应研究更是上述领域的重要议题。城市涵盖了全球主要的人口,其应对各项风险的能力将影响国家、区域乃至人类的未来发展。防灾与减灾是缓解风险影响的重要内容,城市所面临的风险已不仅仅为单一的自然灾害,也有可能并发环境污染与生态退化,对人类生存健康带来影响,因而对可能的灾害风险进行

综合评估尤为重要。

本研究针对城市面临的风险类型,将不同土地利用单元作为风险受体,整合自然、人文、景观及环境因子,在现行生态风险评价方法基础上,构建城市综合生态风险空间评价方法。研究选择淮北市城区作为研究区,通过对区内不同生态风险空间差异的定量评价,进而判定城市发展所面临的高风险区域,为城市规划与风险管理提供参考依据。

1 城市生态风险

城市生态系统是由社会、经济及自然子系统所构成,子系统功能的健全直接影响城市运转,同时由于子系统结构及功能差异,在面对生态风险时产生的影响也不相同。由于城市生态系统的特殊性,其所面临的生态风险也与其它生态系统有所不同,一方面由城市发展角度,来自气候、地质灾害的风险,对城市建设带来一定的限制;另一方面,随着人口与产业的集聚,开发建设也对城市影响范围的环境带来冲击,进而威胁人居环境及人类健康^[14-15]。在经营管理与空间规划的过程中,除了各别风险的防范,同时也须对不同的风险进行综合的分析与对策研拟。基于风险来源的差异,可将城市生态系统所面临的风险类型分为自然灾害风险、环境污染风险及生态功能与服务退化风险三种主要类型。自然灾害风险会因所处地域不同而有所差异,在沿海地区最常受到洪水、台风、海啸、风暴潮、泥石流等自然灾害袭击^[16-18]。环境污染风险中以工农业产生的废物对城市环境的影响最为严重,工业油污、化学及金属物质将造成空气、土壤与水源污染,将对人体产生长期影响并危害后代健康^[19]。随着城市空间扩展与资源开发利用,人类经济、社会活动改变区域物质能量流,进而影响区域生态过程,造成生态退化的结果,包括残留自然区域的破碎化及孤立化^[20],局地与区域气候变化等问题^[21-23]。

2 城市综合生态风险评价方法

有鉴于城市发展对风险管理的迫切性,及目前多数生态风险缺乏实测或可空间化的数据可提供城市经营与规划参考,本研究在国内外生态风险评价研究基础上,整合自然因子、社会经济因子与土地利用特征,提出城市综合生态风险评价空间分析方法(图1),尝试结合GIS的空间分析功能,对城市综合生态风险发生概率进行空间定量评价。

在风险受体的选择上,由于不同的单元对于风险的脆弱程度各有不同,因此在风险受体的选择上,需能直观反应其受风险影响的程度并与城市功能有直接联系。城市土地利用单元可满足上述条件,并能直接指导城市空间的未来发展,因此本研究选择其作为生态风险受体。

在风险类型识别的基础上,城市生态风险分析包括因子分析、暴露分析、影响分析。其中因子分析是对个别风险影响因子的判别,不同的风险性质,遭遇不同自然环境、社会经济状态、景观格局、城市环境等空间特征,将造成不同的影响结果。暴露分析是通过气象、环境及其它相关报告及数据进行整理,以获得个别风险发生频率、影响范围及持续时间的信息。影响分析则是通过整合暴露分析结果与受体脆弱程度,量化不同风险在空间上的影响程度。

本研究单一风险影响的计算公式为:

$$RISK = EF \times VD \quad (0 \leq EF \leq 1) \quad (0 \leq RISK \leq 10) \quad (1)$$

式中 EF 为环境影响因子, VD 为不同土地利用类型的脆弱程度。 EF 是通过相关的影响因子进行空间分析所得,为使不同风险间具有一定的可比性, EF 值经过标准化处理,在此将其值设定为 0 至 1 之间。不同土地利用类型的脆弱程度(VD) 则依据不同土地利用类型对风险的脆弱程度进行打分,本研究中,将土地利用分为 10 类,脆弱度最高者为 10,最低者为 1。

综合生态风险(Comprehensive Ecological Risk, CER) 发生概率则为标准化后单一生态风险发生概率的总和,计算公式为:

$$CER = \sum OF \times EF \times VD \quad (0 \leq EF \leq 1) \quad (2)$$

式中 OF 为风险发生频率,其具体取值可从城市统计及环境质量报告中获得。整合单一风险发生概率的计

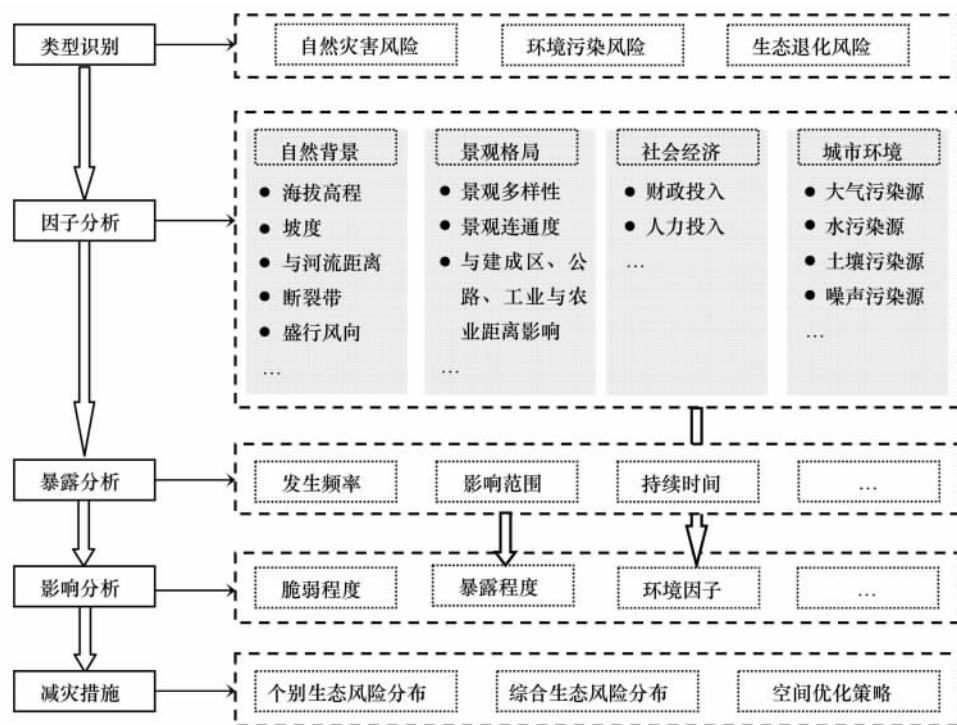


图1 城市综合生态风险评价研究框架

Fig. 1 Framework of comprehensive urban ecological risk assessment

算结果可获得研究区综合风险的空间分布差异分析,判断城市的高风险区域,并针对其原因制定风险防范方案与城市发展的保障措施。

2.1 自然灾害风险

在自然风险影响因子分析时,除了与风险源的距离,需综合考虑坡度、海拔高度、降雨分布、低温分布、季节风向、断裂带等区域自然特性的影响。在风险受体脆弱程度的判定中,自然灾害主要影响居民生命财产和社会经济活动,例如洪涝、干旱、冻害等主要造成农作物损失,地震、泥石流则对建筑物、交通等造成伤害,因此在进行脆弱性的判定时,需依据风险的差异进行评估。

2.2 环境污染风险

在环境污染风险分析时,除了与风险源的类型,包括工业污染源、农业污染源、大气污染源等,尚需综合考虑影响污染扩散的因素,例如季节风向、水流方向。进行脆弱性的判定时,除了受污染直接影响的区域,同时需考虑对人体健康及人居环境的影响。以水污染为例,水体及水生物种受影响程度最大,其次则是受污染水体间接影响的区域。

2.3 生态退化风险

进行开发建设风险分析时,主要考虑开发行为的强度、范围和社会经济活动的影响,因子包括建成区、交通用地的密度、距离,人流、物流的空间分布。在脆弱性的判定上,则依据风险的特性有所不同,例如资源开采所造成的危害中,人居环境及自然环境的影响皆较大;而生态服务的降低则主要影响自然生态系统,间接影响人居环境。

3 案例分析

3.1 研究区概况

淮北市位于安徽省北部,为典型的资源城市,随着经济结构调整以及资源型产品供求关系的重大变化,面临经济衰退、接续产业难以发展、生态环境恶化、低收入和高失业等一系列问题^[24]。在自然条件方面,淮北地势平坦,储水排灌能力较差的特点,近50a来具有旱多涝重,旱涝交织的特点^[25]。地表水体的大面积污染,工

业的发展成为影响大气环境的主要因素,近几年降水有酸化趋势。长期以来的煤矿开采,地表大面积下沉,对原本地面上的建筑物、耕地、河流、土壤及交通带来影响。另外,城市的建设与道路的开发也对周围森林、草地、农田及水域等用地的服务功能造成冲击。本文选择淮北市主城区为研究区(图2),探讨其主要面临的旱涝、水污染、大气污染、采煤塌陷及生态服务降低等风险。计算过程中,就当前土地利用分类体系中各类用地的功能特性,整合为高密度建成区、中密度建成区、低密度建成区、交通、水域、林地、草地、耕地、园地和未利用地等类型。

3.2 自然灾害风险空间差异

根据淮北市的自然灾害发生记录(1957—2006),区内每年都发生不同程度的旱涝灾害。其中有33a持续干旱3个月以上或有持续5旬的特大旱,水涝则相对较少,其中涝灾严重的有8a^[25]。旱涝灾害对淮北市经济建设的影响甚大。本研究基于用地类型及其生态特性,将淮北市土地利用现状调查数据归纳为10大类,通过专家问卷,评价主要用地类型对洪涝及旱灾风险的脆弱性,以判断其受影响程度的差异,其中脆弱性最高者为10分(表1)。

(1) 洪涝(Flood, F) 风险

选择高程(Elevation, ELE)及与河流距离(Distance to River, DtR)两个因子,说明研究区洪涝风险的空间差异(图3a)。计算公式如下:

$$RISK_F = EF_F \times VD_F$$

$$EF_F = 1 / (ELE \times DtR) \quad (0 \leq EF_F \leq 1)$$

表1 淮北市自然灾害风险下主要用地类型的脆弱程度

Table 1 Vulnerability degree of major land use type under natural disaster in Huaibei

风险类型 Risk type	建成区 Building area			交通用地 Traffic land	林地 Forest land	草地 Grassland	耕地 cultivated land	园地 Garden Land	水体 Water	未利用地 Unused land
	高密度 High density	中密度 Middle density	低密度 Low density							
洪涝风险 Flood	8	7	6	5	2	3	10	9	1	4
旱灾风险 Drought	4	3	2	1	8	7	10	9	6	5

分析结果表明,研究区潜在洪涝风险程度较高的区域位于河流沿岸及北湖、东湖、中湖及南湖等地势较低的地区。其中,闸河与龙岱河间的农地受洪涝影响的可能性较高,相山东侧的高密度建成区由于地势相对较高,洪涝发生的可能性较低。为降低洪涝威胁,于未来的城市规划过程中应加强闸河与龙岱河间农田排水水渠等基础设施的建设,对洪涝威胁较大的区域进行流域全面性评估,改善农田水利;另外在北湖、东湖、中湖及南湖外围地势相对较低的区域,由于人工塌陷地并未与联外河流相接,排水能力相对较低,应避免规划高密度

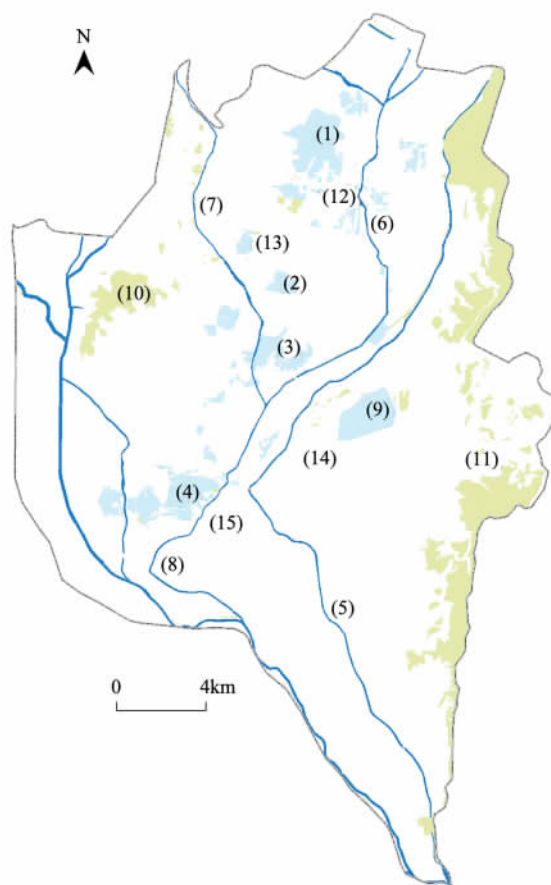


图2 淮北主城区重要地点空间位置

Fig. 2 Position of key points in the core area of Huaibei city

(1) 北湖 North lake (2) 东湖 East lake (3) 中湖 Center lake (4) 南湖 South lake (5) 闸河 Zha river (6) 龙河 Long river (7) 岱河 Dai river (8) 龙岱河 Longdai river (9) 化家湖 Huajia lake (10) 相山 Xiang mountain (11) 龙脊山 Long Ji mountain (12) 朔里 Shuoli (13) 房庄 Fangzhuang (14) 土型 Tuxing (15) 列山 Lieshan

建成区。

(2) 旱灾(Drought , D) 风险

本研究选择高程因子(ELE) 与汇水面积(Area of Water Accumulation , AWA) 两个因子 ,说明研究区旱灾风险的空间差异(图 3b) 。计算公式如下:

$$RISK_D = EF_D \times VD_D$$

$$EF_D = ELE / AWA \quad (0 \leq EF_D \leq 1)$$

分析结果表明 ,从自然地势与水文条件因素考虑 ,研究区范围内以西侧相山及东侧老龙脊、大太山、鹰山等高程高于 120m 的区域发生干旱的可能性较高。从不同用地对水资源的依赖角度考虑 ,在农业发展上 ,闸河与龙岱河间的耕地地势平坦 ,需水量大且不易储水 ,受干旱的威胁较大; 在城市中心区 ,目前的居民生活饮用水水源主要仰赖地下水供给 ,并无立即的威胁 ,但就未来长远的城市发展 ,人口与产业成长势必带来水资源需求的增加。在未来规划上 ,建议结合产业与人口方案 ,妥善规划东湖、南湖等较大面积人工湖泊 ,一方面提高城市生态环境质量 ,另一方面也为城市发展提供一定的水资源储备与调节。

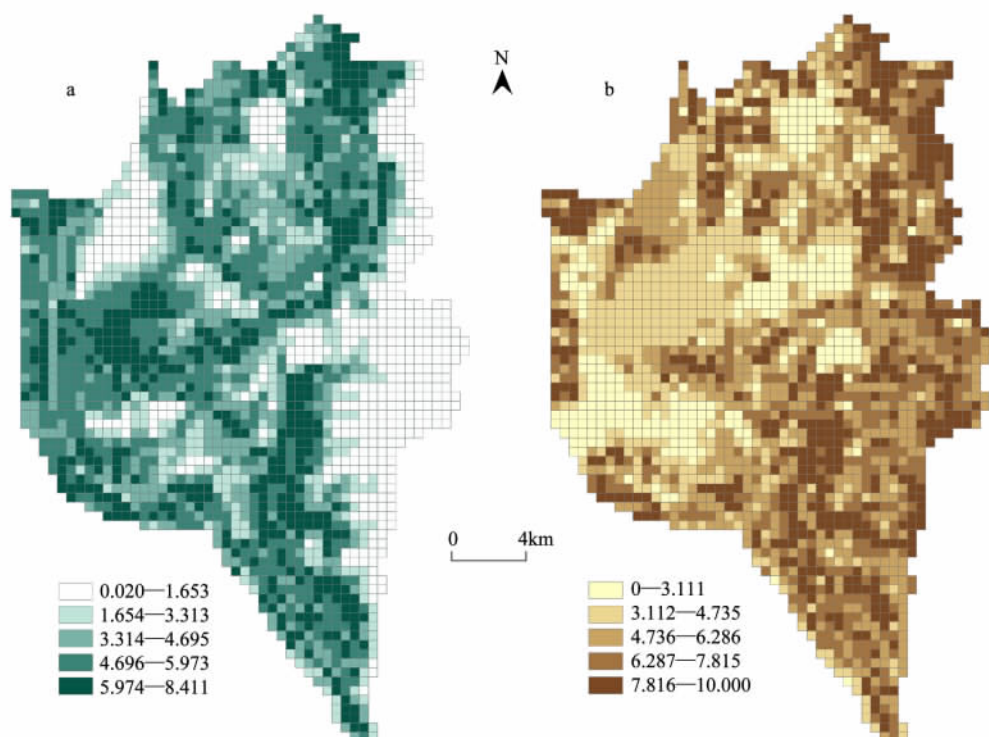


图3 洪涝风险程度(a) 与干旱风险程度(b) 空间分布(0—10 ,无量纲)

Fig. 3 Spatial distribution of risk degree of flood (a) and drought (b) (0—10 ,dimensionless)

3.3 环境污染风险空间差异

淮北市环境污染风险类型主要为水污染及大气污染两类。本研究基于用地类型及其生态特性 ,通过专家问卷 ,评价主要用地类型对水污染及大气污染风险的脆弱性 ,以判断其受影响程度的差异 ,其中脆弱性最高者为 10 分(表 2) 。

(1) 水污染(Water pollution , WP) 风险

本研究选择水体密度(Density of Wetland , DoW) 、工业区密度(Density of Industry , DoI) 、农业用地密度(Density of Cropland , DoC) 、建成区密度(Density of Residence , DoR) 因子 ,说明研究区水污染风险的空间差异(图 4a) 。计算公式如下:

$$RISK_{WP} = EF_{WP} \times VD_{WP}$$

$$EF_{WP} = DoW \times (DoI + DoC + DoR) \quad (0 \leq EF_{WP} \leq 1)$$

表2 淮北市环境污染风险下主要用地类型的脆弱程度

Table 2 Vulnerability degree of major land use type under environmental pollution in Huaibei

风险类型 Risk type	建成区 Building area			交通用地 Traffic land	林地 Forest land	草地 Grassland	耕地 cultivated land	园地 Garden land	水体 water	未利用地 Unused land
	高密度 High density	中密度 Middle density	低密度 Low density							
水污染风险 Water pollution	5	4	3	1	9	8	7	6	10	2
大气污染风险 Air Pollution	10	9	8	1	7	4	5	6	3	2

分析结果表明 研究区水污染风险的来源主要来自工业区、采矿及部分的农业化学药物的使用,其中龙河北部与闸河及岱河的土楼至列山区段间,由于煤矿开采密集,对水资源质量造成威胁,岱河北部受工业发展影响较大,而西山至王庄段间的闸河水质则受两侧农业活动的影响较大。在未来城市发展规划中,为降低水污染风险,除发展低污染产业,推广有机农业外,亦应加强污水处理厂等基础设施的建设,以降低城市生活污水、工业污水对区域水质带来的影响。

(2) 大气污染(Air Pollution, AP) 风险

本研究选择交通路线密度(Density of Traffic Lines, DoTL)、工业区密度(Density of Industry, DoI)、距工业区距离(Distance to Industry, DiI)、距交通路线距离(Distance to Traffic Lines, DiTL),说明研究区大气污染风险的空间差异(图4b)。计算公式如下:

$$RISK_{AP} = EF_{AP} \times VD_{AP}$$

$$EF_{AP} = (DoTL + DoI) / (DiTL + DiI) \quad (0 \leq EF_{AP} \leq 1)$$

分析结果表明 研究区大气污染风险较大的区域主要位于相山西侧的城市中心区、工业区及朔里等煤矿及其周边区域。淮北市环境空气的首要污染物是颗粒物,大量土地季节性裸露,在一定气象条件下,造成自然扬尘,污染环境空气。加上淮北属能源型城市,许多矿山位于市区周围,且市区的各类锅炉均以燃煤为主,煤矸石电厂与工业污染所产生的二氧化硫也对研究区的大气环境造成污染。城市的快速发展,许多老企业位于市区,也是造成环境空气污染的主要因素。在未来的城市发展规划上,建议逐步转移污染及相对落后的产业,并对城市电力及热力订定长期发展方案,转变高污染的生产方式,提高区域整体环境质量。

3.4 生态退化风险空间差异

淮北市生态退化风险主要包括采煤塌陷和生态服务降低等两类。本研究基于用地类型及其生态特性,通过专家问卷,评价主要用地类型对采煤塌陷与生态服务降低的脆弱性,以判断其受影响程度的差异,其中脆弱性最高者为10分(表3)。

表3 淮北市生态退化风险下主要用地类型的脆弱程度

Table 3 Vulnerability degree of major land use type under ecological degradation in Huaibei

风险类型 Risk type	建成区 Building area			交通用地 Traffic land	林地 Forest land	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	园地 Garden land	水体 Water	未利用地 Unused land
	高密度 High density	中密度 Middle density	低密度 Low density							
采煤塌陷 Mining Siding	10	7	6	8	3	2	5	4	9	1
生态服务降低 Ecological service degrading	4	3	2	1	9	8	6	7	10	5

(1) 采煤塌陷(Mining Siding, MS) 风险

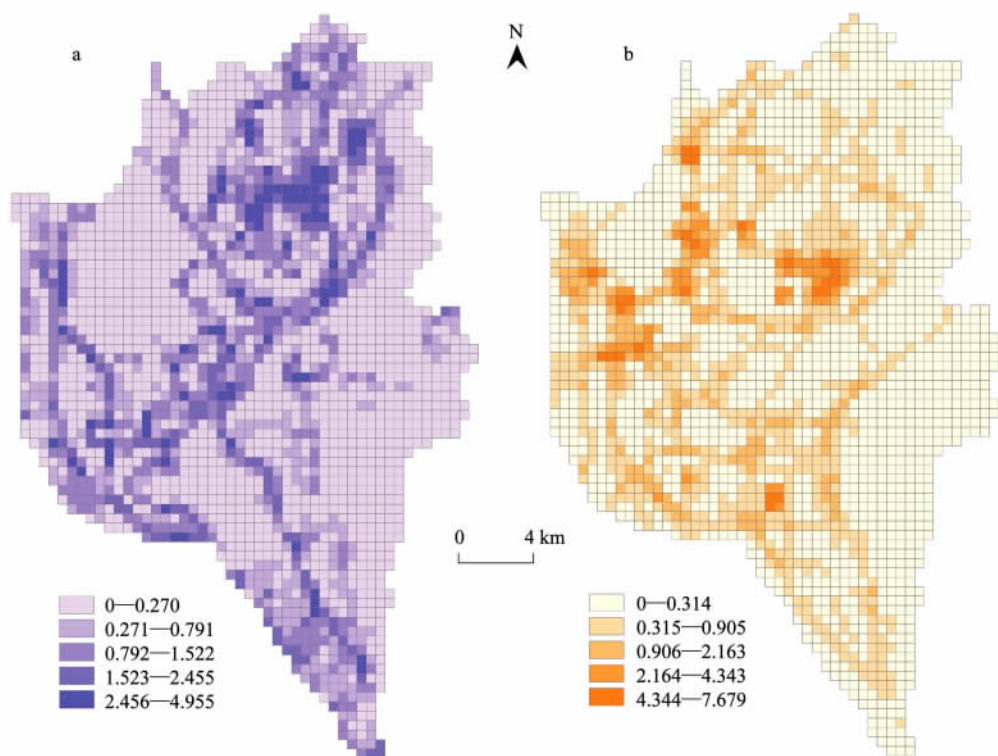


图4 水污染风险程度(a)与大气污染风险程度空间分布(b) (0—10,无量纲)

Fig. 4 Spatial distribution of risk degree of water pollution (a) and air pollution (b) (0—10, dimensionless)

淮北矿区是我国重要的十大煤炭生产基地之一,长期以来因采煤塌陷引起地貌变形、房屋倒塌、生态环境恶化等灾害,严重影响了当地工农业生产和居民生活。本研究在塌陷范围的基础上,选择距塌陷区距离 (Distance to Subsiding Area, $DtSA$) 说明研究区采煤塌陷 (Mining Siding, MS) 风险的空间差异 (图 5a)。计算公式如下:

$$RISK_{MS} = EF_{MS} \times VD_{MS}$$

$$EF_{MS} = 1 / DtSA \quad (0 \leq RD_{MS} \leq 1)$$

分析结果表明,研究区塌陷风险较高的区域位于北湖、东湖、中湖及南湖及其外围地区构成的连片带状区域,虽距离城市中心区较远,但对于带状区域上的农村居民点及农地仍带来较大的影响。部分煤矿仍会造成新的塌陷,产生更大面积迫切需要进行修复的土地。目前政府已对现有的塌陷土地进行补偿与修复,但仍存在部分塌陷形成水面和沼泽地。由于区内水系、交通、植被、土壤系统遭到破坏,生态环境和生产条件恶化,土地效益低下,在未来城市规划中,建议将城市道路两侧的塌陷地复垦治理为建设用地,可提升土地利用效益并对城市未来发展提供一定的基础,而在人工湖外围的塌陷地,则建议结合人工湿地的整体规划,在保障生态服务功能的前提下,有条件的进行经济开发。

(2) 生态服务降低 (Ecological Service Degrading, ESD)

生态服务的降低来自人为活动对自然生态系统的影响,在空间上主要为城市建设对自然用地的侵占,而通过建设用地增长方式预测,可反推生态服务退化的强度与空间位置。本研究选择距建成区距离 (Distance to Residence, DtR)、距交通路线距离 ($DtTL$)、距工业区距离 (Distance to Industry, DtI) 说明研究区生态服务降低风险的空间差异 (图 5b)。计算公式如下:

$$RISK_{ESD} = EF_{ESD} \times VD_{ESD}$$

$$EF_{ESD} = DtR + DtTL + DtI \quad (0 \leq RD_{ESD} \leq 1)$$

分析结果表明,研究区生态服务降低风险较高的区域集中于东北至西南的塌陷带,包括龙河、岱河、龙岱河等过境河流,东湖、中湖至南湖间零星的森林、园地及大面积农地,另外化家湖及其外围山体也由于道路的开发对自然生态环境带来一定的影响。在西北部也由于城市区的扩展,面对较大的生态服务降低风险。在未来的城市发展规划中,为保障区域良好的生态环境与经济发展,建议结合研究区及外围山水资源、生态环境与城市建设需求进行综合评价,明确生态控制范围,以确保生态服务功能,平衡发展与保育的冲突。

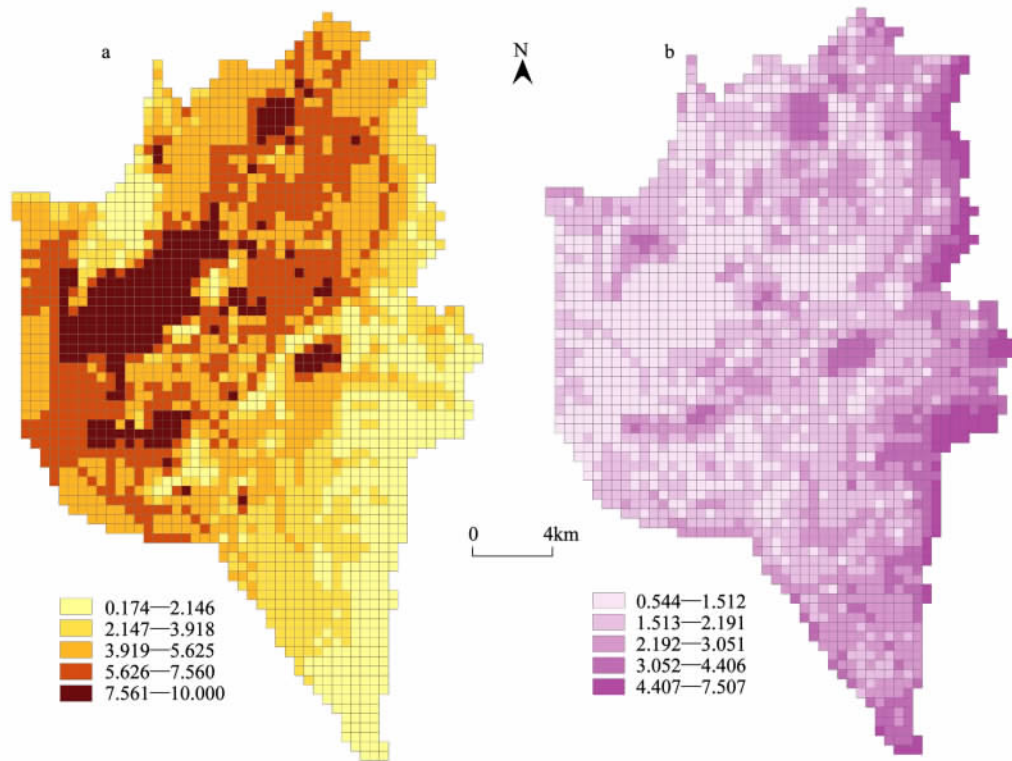


图5 地表塌陷风险程度(a)与生态服务退化风险程度(b)的空间分布(0—10,无量纲)

Fig. 5 Spatial distribution of risk degree of land subsidence (a) and ecological service degradation (b) (0—10, dimensionless)

3.5 综合生态风险空间差异

在完成淮北市旱涝、水与大气污染、采煤塌陷及生态服务降低等典型生态风险评估的基础上,分析其对当前土地利用的空间影响,并将不同风险的年发生频率进行空间叠加,以获得研究区综合生态风险程度的空间分布。其中,洪涝风险年平均发生概率为40%、旱灾风险年平均发生概率为66%;根据2001—2005年淮北市环境质量报告书中劣V类水质断面占25.0%,与大气污染轻微污染(Ⅲ1级)的天数占9.1%为水污染及大气污染发生概率;采煤塌陷和生态服务退化等风险主要受人为活动的影响,属于持续发生的生态风险,但由于安全管理不同,国营与私营煤矿风险发生概率存在差异,受限于数据较难获得,计算时以等概率视之。在上述单因子生态风险评价的基础上,通过标准化处理与线性加权得到综合生态风险的空间分布结果,并按风险程度划分等级(图6)。

从空间分析结果来看,研究区综合生态风险较高的区域包括龙河、岱河、龙岱河等过境河流流经塌陷密集带的河段,北湖、东湖、中湖及南湖等人工湖泊沿岸和化家湖湖岸,及土型、新蔡等煤矿及其外围地区。生态风险相对较低的区则位于西侧相山及东侧老龙脊等山体。

为减缓或降低研究区生态风险危害,在未来的土地利用规划中,建议于高度风险区域结合市域保护区规划,限制土地开发建设活动,恢复山体植被覆盖,并限制人为活动,结合气候及环境污染风险监测,以降低风险发生的影响;中度风险区域应结合主要风险类型,在建筑规范符合抵御风险标准、基础设施安全获得提升及资源能源利用获得保障的前提下,结合环境影响评估与可行性研究进行开发,以促进城市空间的有效利用;对于

低生态风险区域可适度进行高密度开发,通过土地的使用管理,保障城市功能运转。在未来城市的整体规划中,建议结合城市外围绿地与城市内部的高风险区域,划设禁建或限建区域,共同构建淮北城市生态风险防范的空间结构。

4 结论与讨论

相较于单一灾害或风险的城市生态风险评价,本研究基于城市复合生态系统特性,针对城市面临的各种生态风险类型,构建多风险的城市综合生态风险评价框架体系。研究选择土地利用斑块为受体,有利于加强城市土地管理空间优化布局与城市规划之间的联系,以期在城市空间发展提供策略依据。同时结合未来土地利用变化对评价结果进行更新,可对未来不同用地方案的选择提供科学依据。

研究选择淮北主城区作为研究区进行了案例分析,本研究所提的风险评价方法,在计算操作上仍存在深化改善的空间。首先,关于不同土地利用的脆弱程度,目前采用专家打分方法进行定量评估,未来亦可结合专家、当地居民及政府管理部门意见,对其进行进一步修正;其次,由于风险间相互作用的复杂性,目前在综合生态风险的评估分析中采用的空间叠加仍存在较大不确定性;关于实测数据与评价结果之间的联系,目前只采用简化的估算方法,在后续研究中将进行进一步补充完善。例如,研究中通过插值来反映生态风险的空间分布,但仍存在空间解释性不足的问题。受限于目前研究区数据不足,对于土地利用类型进行简化,并忽略单元内部差异,下一步计划结合研究区不同季节风向、过境水量和空气污染、水污染等更及时且动态的实测数据对风险评价结果进行修正;另外,本研究对经济效益低下、传统文化精神丧失等城市特殊风险的量化,仍未有突破,将于后续工作中尝试加以分析。另外,由于淮北市的煤矿开采主要是在地面下,其造成的塌陷区影响多种土地利用类型,且塌陷范围大过现有采矿用地面积,因此在本文的土地利用分类中并未强调采矿用地,因而较难体现淮北市资源型城市特色。

References:

- [1] Zhou Q X, Wang R S. Ecological risk assessment of urbanization processes — a case study. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 337–342.
- [2] Freedman B. *Environmental Science: A Canadian Perspective*. Scarborough: Prentice Hall, 1998: 509–523.
- [3] Harwell M A, Gentile J H, Bartuska A, Harwell C C, Myers V, Obeysekera J, Ogden J C, Tosini S C. A science-based strategy for ecological restoration in South Florida. *Urban Ecosystems*, 1999, 3(3/4): 201–222.
- [4] Schweiger E W, Leibowitz S G, Hyman J B, Foster W E, Downing M C. Synoptic assessment of wetland function: a planning tool for protection of wetland species biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 2002, 11(3): 379–406.
- [5] 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(3): 253–262.
- [6] Schriever C A, Liess M. Mapping ecological risk of agricultural pesticide runoff. *Science of the Total Environment*, 2007, 384(1/3): 264–279.
- [7] Li Z Q, Hou J Y, Wang J Z. Potential ecological risk assessment model for heavy metal contamination of agricultural soils in mining areas. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(5): 509–516.
- [8] Petrosillo I, Zurlini G, Grato E, Zaccarelli N. Indicating fragility of socio-ecological tourism-based systems. *Ecological Indicators*, 2006, 6(1):

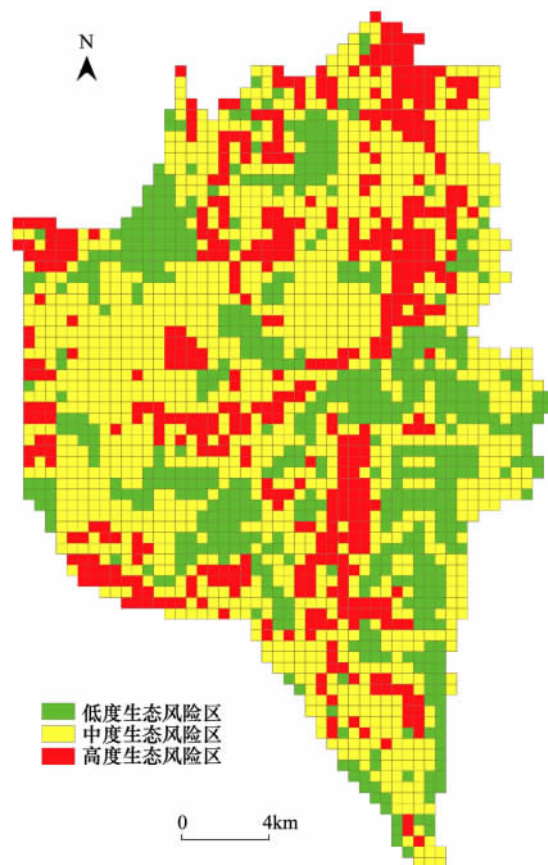


图6 综合生态风险程度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of comprehensive ecological risk degree

104-113.

- [9] Liu S L, Cui B S, Dong S K, Yang Z F, Yang M, Holt K. Evaluating the influence of road networks on landscape and regional ecological risk — a case study in Lancang River Valley of Southwest China. *Ecological Engineering*, 2008, 34(2): 91-99.
- [10] Shi G T, Chen Z L, Wang L, Zhang J, Li H W, Xu S Y. Heavy metal pollution and the ecological risk in dust of Shanghai urban parks. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2006, 19(4): 40-43.
- [11] Sun H B, Yang G S, Zhu T M, Su W Z, Wan R R. Assessment of land use ecological risks in rapidly developing regions: a case study on Kunshan City. *Resources Science*, 2010, 32(3): 540-546.
- [12] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Summary for Policy Makers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [13] UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). *Climate Change: Impacts, Vulnerabilities and Adaptation in Developing Countries*. 2007. [2011-05-12]. <http://unfccc.int/resource/docs/publications/impacts.pdf>.
- [14] Najem G R, Louria D B, Lavenhar M A, Feuerman M. Clusters of cancer mortality in New Jersey municipalities; with special reference to chemical toxic waste disposal sites and per capita income. *International Journal of Epidemiology*, 1985, 14(4): 528-537.
- [15] Sun X L, Fang C L. Model and application of ecological risk appraisal in the course of urbanization in arid area. *Arid Land Geography*, 2006, 29(5): 668-674.
- [16] 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.
- [17] Li X R. The main types, characteristics and countermeasures of geological hazards in coastal cities. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1997, 8(2): 92-94.
- [18] Wu J S, Wang Y L, Nan L, Li Z G, Li L. Influence of natural disasters on urban development in Shenzhen. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(2): 39-45.
- [19] Wang Z G. *Environmental Medicine*. Beijing: Peking University Medical Press, 2001: 5-7.
- [20] Song Z Q, Wang Y L. Progress in research on ecological impact of urban landscape structure. *Progress in Geography*, 2004, 23(2): 97-106.
- [21] Marzluff J M, Bowman R, Donnelly R. A historical perspective on urban bird research: trends, terms, and approaches//Marzluff J M, Bowman R, Donnelly R, eds. *Avian Ecology and Conservation in an Urbanizing World*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001: 1-15.
- [22] Zhou H M, Zhou C H, Ge W Q, Ding J C. The surveying on thermal distribution in urban based on GIS and remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(2): 189-197.
- [23] Weng Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(10): 1999-2014.
- [24] Zhang R G. Economy reforming experience of resources cities and indication. *Ecological Economy*, 2008, (12): 82-84.
- [25] Zhang P, Wang F H, Wu Z L, Zhu Z. Climatic analysis of drought and flood transfer in Huaibei city. *Express Water Resources and Hydropower Information*, 2008, 29(S1): 139-140, 151-151.

参考文献:

- [1] 周启星, 王如松. 城镇化过程生态风险评价案例研究. *生态学报*, 1998, 18(4): 337-342.
- [7] 李泽琴, 侯佳渝, 王奖臻. 矿山环境土壤重金属污染潜在生态风险评价模型探讨. *地理科学进展*, 2008, 23(5): 509-516.
- [10] 史贵涛, 陈振楼, 王利, 张菊, 李海雯, 许世远. 上海城市公园灰尘重金属污染及其潜在生态风险评价. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(4): 40-43.
- [11] 孙洪波, 杨桂山, 朱天明, 苏伟忠, 万荣荣. 经济快速发展地区土地利用生态风险评价——以昆山市为例. *资源科学*, 2010, 32(3): 540-546.
- [15] 孙心亮, 方创琳. 干旱区城市化过程中的生态风险评价模型及应用——以河西地区城市化过程为例. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 668-674.
- [16] 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.
- [17] 李相然. 沿海城市环境地质灾害的主要类型、特点及防灾对策研究. *中国地质灾害与防治学报*, 1997, 8(2): 92-94.
- [18] 吴健生, 王仰麟, 南凌, 李正国, 李莉. 自然灾害对深圳城市建设发展的影响. *自然灾害学报*, 2004, 13(2): 39-45.
- [19] 王振刚. *环境医学*. 北京: 北京医科大学出版社, 2001: 5-7.
- [20] 宋治清, 王仰麟. 城市景观及其格局的生态效应研究进展. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 97-106.
- [22] 周红妹, 周成虎, 葛伟强, 丁金才. 基于遥感和 GIS 的城市热场分布规律研究. *地理学报*, 2001, 56(2): 189-197.
- [24] 张汝根. 资源型城市经济转型经验及启示. *生态经济*, 2008, (12): 82-84.
- [25] 张屏, 汪付华, 吴忠连, 朱珠. 淮北市旱涝急转型气候规律分析. *水利水电快报*, 2008, 29(增刊): 139-140, 151-151.