

流域景观结构的城市化影响与生态风险评价

胡和兵^{1,2}, 刘红玉^{1,*}, 郝敬锋¹, 安静¹

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210046; 2. 池州学院 资源环境与旅游系, 池州 247000)

摘要:以南京市九乡河流域为研究区域,以 2003、2009 年两期遥感影像数据为基本信息,在构建生态风险指数的基础上,利用 ARCGIS 的空间分析功能,揭示了城市化对研究区景观结构的影响,生态风险的时空变化以及城市化与生态风险之间的关系。结果表明:2003—2009 年,城市化过程使流域的景观结构发生较大变化,建设用地大幅增加,分离度降低,而耕地则大幅减少,耕地、水域、草地等景观类型的分离度、破碎度增加;流域生态风险程度从中度/低风险向中度/较高风险转变,生态风险有增加的趋势;生态风险的空间差异明显,生态风险较低的区域主要集中在流域南部青龙山一带,较高的区域主要集中在西北部地区,中度风险区集中在流域中部的平原农业区;城市化对生态风险的正效应明显,生态风险随着城市化水平的增加而升高。

关键词:生态风险;景观结构;空间分析;城市化

The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological risk assessment

HU Hebing^{1,2}, LIU Hongyu^{1,*}, HAO Jingfeng¹, AN Jing¹

1 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

2 Department of Resources Environment and Tourism, Chizhou 247000, China

Abstract: Regional ecological risk assessment is an intricate, challenging task. Methods of ecological risk estimation have been recognized in recent years. But most research methods focused on empirical and statistical approaches, which can't exhibit the special differences of ecological risk levels in regional scales. The intrinsic ability of GIS to store, analyze and display large amounts of spatial data enables it to make a significant contribution to ecological risk assessment. The purpose of this paper is to develop an integration methodology for regional ecological risk assessment, and to help managers to analyze and visualize spatial differences in ecological risk levels in the Jiuxiang River watershed for effective eco-environmental protection.

Jiuxiang River watershed in Nanjing city, as a case study area, its two landscape classification maps was conducted from 2003 and 2009 by remote sensing images interpretation, which were used as the main data source for assessment of ecological risk levels. Based on landscape ecology, an ecological risk assessment index was firstly constructed, and further developed by embedding the index into the GIS system. In addition, the spatial distribution map of ecological risk level was created by using the spatial sample method and the ordinary Kriging interpolator method, which could effectively exhibit the spatial-temporal variation characteristics of watershed ecological risks in 2003 and 2009. Finally, the relationship between watershed urbanization and watershed ecological risks were analyzed. the conclusions included: (1) There were clear changes in watershed landscape structure as a result of urbanization, in which the patch numbers of open waters sharply declined, and the cultivated land, grassland, building land increased. The area of building lands increased rapidly, and its separation decreased in landscape scale during period of 2003 and 2009. With the area of cultivated land declined substantially, the landscape fragmentation in cultivated lands, open waters and grasslands increased. As results, the dominant landscape type in watershed transformed from woodlands/ cultivated lands to woodland/ building lands. (2) the

基金项目:国家自然科学基金项目(40871084, 40701174);江苏省“青蓝工程”资助项目(184080H10240)

收稿日期:2010-05-29; 修订日期:2011-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuhongyu@njnu.edu.cn

ecological risk assessment showed that the level of ecological risk in watershed developed from the medium/lowest-risk to medium /higher-risk during the period of 2003 – 2009. The peak value of risk level increased from 0.1827 to 0.2309, and the mean value increased from 0.1137 to 0.1204. The ecological risk levels of watershed was showing a tendency of increasing. (3) Spatial differences of ecological risk levels were also significant in the watershed. The regions with low ecological risk levels were mainly distributed in the southern Qinlong mountain areas, and regions with high risk levels were mainly distributed in the northern areas, and the regions with medium risk levels were mainly located at the middle areas of watershed where were the farming areas during period of 2003 – 2009. (4) Urbanization had a positive effect on ecological risk levels, which showed the levels of ecological risk increased with urbanization. So, we should establish a watershed ecological planning to reduce the ecological risk level by protecting forestlands and croplands, and controlling the density of building lands strictly in Jiuxiang River watershed.

Key Words: ecological risk; landscape structure; spatial analysis; urbanization

城市化是城市扩展的影响过程,其实质是区域自然生态系统和农业生态系统向城市生态系统不断转化的过程^[1]。城市化过程通过直接或间接的改变地面形态及原本自然的生物地球化学过程,使生态系统的结构、过程和功能受到影响或发生不可逆转的变化^[2]。随着城市化进程的不断推进,城市景观格局特征越来越复杂,受格局影响的生态过程、功能也不断发生变化^[3],影响着区域的生态安全。因此,如何定量表达城市化地区生态系统风险水平,并对其进行有效、合理的评估正成为众多研究者关注的问题^[4]。

生态风险是指一个种群、生态系统或整个景观的正常功能受外界胁迫,从而在目前和将来减少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一种状况^[5-6]。区域生态风险评价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^[7-8]。从 20 世纪 80 年代开始至今,区域生态风险评价内容、范围和方法都有了很大的发展,风险受体从个体发展到种群、群落、生态系统和景观尺度^[9-11]。但区域生态风险评价是大尺度上研究复杂环境背景下包含多风险源、多风险受体的综合风险研究^[12],其作用所影响的范围也都较大,作用时间及其产生的后果也很难预测^[8,13]。

城市中的流域是人为活动占优势的区域,不同土地利用方式和强度产生的生态影响具有区域性和累积性的特征,并且可以直观地反映在生态系统的结构和组成上,因此,生态风险分析可从景观结构出发,综合评估各种潜在生态影响类型及其累积性后果^[14]。景观结构还可以准确地显示出各种生态影响的空间分布和梯度变化特征,使各种空间分析的手段成为可能^[15]。然而从景观生态学角度来评价城市化过程中生态风险的研究成果较少,尤其是对城市化与生态风险之间关系的研究更是鲜见报道。

因此,本文从区域生态系统结构出发,构建基于景观结构的综合生态风险指数,利用 ArcGIS 的空间分析功能,揭示了九乡河流域生态风险的时空变化特征,以及城市化对流域生态风险的影响,以为流域的生态保护与开发建设的协调发展提供决策依据。

1 研究区域

九乡河流域(118°52'—119°1'E, 32°1'—32°10'N)位于南京市的东部(图 1),南北长 18.50 km,东西平均宽约 5.74 km,总面积 106.21 km²。地势南高北低,南部丘陵、岗地连绵起伏,北部沿江平原,地势低平,汛期常受洪水威胁,是南京市重点防洪区之一。北部的仙林大学城是南京市重要的科技和人才集中区,栖霞山风景区被誉为“金陵第一名秀山”。中部和南部农业基础雄厚,是南京市重要的农副产品生产基地。2003 年以前,该地区是比较典型的农业景观,在近几年,随着南京仙林新市区的不断扩展,北部大量的自然和农业景观类型被改造成非农业景观类型,景观结构逐渐显示出强烈的快速城市化色彩,区域生态系统所承受的人为改造压力不断增加。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

采用2003和2009年两期 Quick bird 影像为基础信息源,首先进行几何校正,以南京市 1:50000 地形图为参考图像,在 ArcGIS9.2 中分别对2003年和2009年的影像进行配准,让其具有相同的地理坐标,配准时 RMS(配准残差)控制在半个象元之内;然后建立遥感解译标志并对遥感信息资料进行判译。根据城市流域的景观特点,同时参照全国土地利用分类方法,将研究区的景观类型分为耕地、林地、水域、居民及工矿用地、草地、交通用地和未利用地7种类型。2个时期的景观分类图见图2。

对 1:50000 南京市地形图进行数字化后,获得该区域的 DEM 数据,然后使用 ArcGIS9.2 的 Hydrology 模块完成流域分割,获取流域范围。

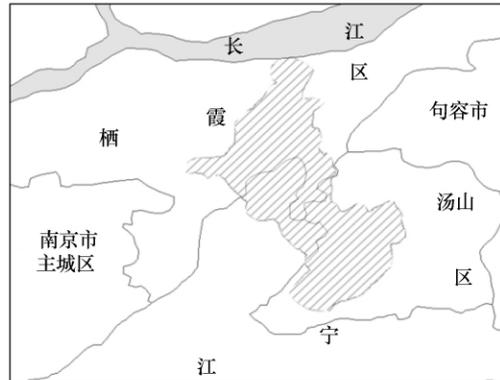


图1 研究区位置

Fig.1 The location of the study area

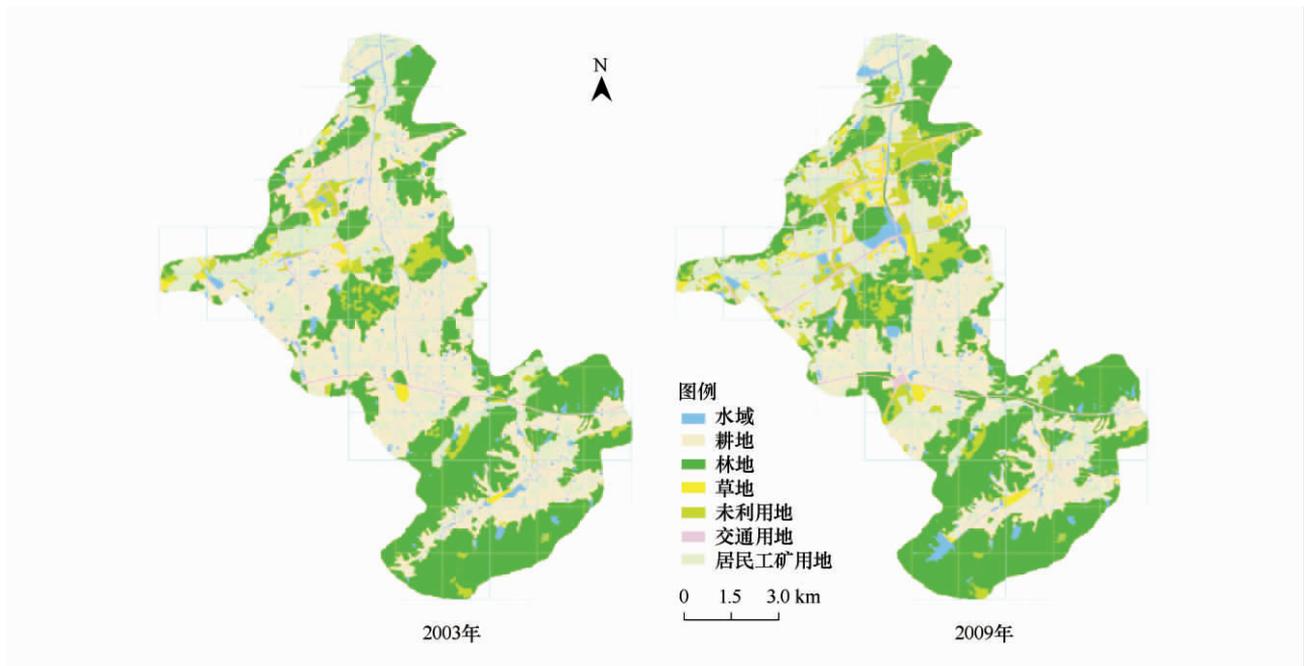


图2 九乡河流域景观分类图及采样方格

Fig.2 Classification map of landscape and the samples

2.2 采样方法

为了能够将生态风险指数进行空间化,在考虑研究区空间异质性和斑块大小的基础上,本文将研究区划分 1.5km × 1.5km 的采样方格(生态风险小区),共计 57 个(图2),在 ARCGIS 工作平台上,将样方矢量图转化为栅格图,将栅格图输入到 FRAGSTATS 软件,分别计算各生态风险小区的生态风险值,并将这个值作为格网中心点的值。

2.3 基于景观结构的生态风险指数构建

生态风险的大小取决于区域生态系统所受外部干扰的强弱和内部抵抗力的大小。区域系统所受的外部干扰越大,系统对外部干扰的抵抗力越小,区域系统的生态风险越大,反之越小。而区域生态系统对外界的抵抗力和生态系统自身的脆弱性成反比,因此,区域生态系统所受的干扰越大,脆弱性越强,区域生态风险越大。基于上述考虑,本文从区域生态系统的景观结构出发,利用景观组分的面积比重构建了由景观干扰度指数和

景观脆弱度指数构成的生态风险指数^[16-18],以建立景观结构与综合区域生态风险之间的经验联系。

2.3.1 景观干扰度指数构建

景观干扰度指数用来反映不同景观所代表的生态系统受到外部干扰的程度。区域所受干扰越大,生态风险越大。而不同景观类型所受外界干扰的大小可反映在其景观结构的变化上,因此,本文通过3个景观结构指数叠加构建了干扰度指数 E_i :

$$E_i = \sum_{j=1}^3 \lambda_j \cdot U_j \quad (1)$$

式中 U_1 、 U_2 、 U_3 分别为景观破碎度、景观优势度和景观分离度,计算公式见文献^[19]。 λ_j 为3个分指数的权重,且 $\sum \lambda_j = 1$,三者在不同程度上反映出干扰对景观所代表的生态环境的影响,根据分析权衡,认为破碎度指数最为重要,其次为分离度和优势度。以上3个指数分别赋以0.5、0.3、0.2的权值^[13,17-18]。而对未利用地的权重赋值为0.3、0.2和0.5^[17]。

2.3.2 景观脆弱度指数构建

景观脆弱度表示不同景观所代表生态系统内部结构的易损性,以反映不同景观类型对外部干扰抵抗能力的大小。生态系统的脆弱度越大,则抵抗力越小,生态风险越大。而不同的景观类型对外界干扰的抵抗能力的差异性与自然演替过程中所处的阶段有关^[8,18]。参考相关文献^[17-18],将7类景观类型按其脆弱性的高低依次进行赋值:未利用地6,水域5,耕地4,草地3,林地2,居民及工矿用地1,交通用地1,归一化处理后得到各景观类型的脆弱度 F_i 。

2.3.3 生态风险指数

从区域生态系统的景观结构出发,引入景观组分的面积比重,构建了由景观干扰度指数和景观脆弱度指数构成的生态风险指数^[17-18],以建立景观结构与综合区域生态风险之间的经验联系:

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} (E_i \times F_i) \quad (2)$$

式中 ERI_k 为第 k 个采样区生态风险指数, A_{ki} 为第 k 个采样区第 i 类景观的面积, A_k 为第 k 个采样区的总面积, E_i 为第 k 个采样区第 i 类景观的干扰度指数和脆弱度指数。

2.4 空间分析方法

区域生态风险指数作为一种典型的区域化变量,它在空间上的异质性规律,可采用地统计学来分析。地统计学是一系列检测、模拟和估计变量在空间上的相关关系和格局的统计方法。半方差分析是地统计学的一个重要组成部分。半方差分析主要有两种用途:一是描述和识别格局的空间结构,二是用于空间局部最优化插值,即克里格插值^[20]。计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3)$$

式中 h 为配对抽样间隔距离, $N(h)$ 是抽样间距为 h 时的样点对的总数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是景观生态风险指数在 x_i 和 $x_i + h$ 点的取值。

3 结果分析

3.1 九乡河流域景观结构变化

2003—2009年,九乡河流域的景观格局发生了较大的变化(图3)。从面积来看,由于城镇的快速扩展,至2009年居民及工矿用地增长了39.02%,交通用地和未利用地增长接近2003年的2倍。建设用地大规模增长的同时,耕地这一传统优势景观类型的比重则大幅度降低,减少了43.86%。流域的优势景观类型由林地+耕地向林地+建筑用地转变。从斑块的数量来看,尽管研究期间增加了龙尚湖、大城名店等几个中小型湖泊水库,水域面积有所增加,但散布在耕地间的池塘仍大量的被用作新城镇的建设用地,致使水域的斑块数减少。其他各景观类型的斑块数都有所增加。居民及工矿用地、交通用地、未利用地和水域的破碎度降低,而草地、林地和耕地的破碎度升高,表明在城市化过程中,居民及工矿用地、交通用地、未利用地和水域的面积增

加的同时,各景观类型斑块也趋向于连片分布,而草地、林地和耕地趋向于破碎化。除了耕地的分离度略有增加外,其他各景观类型的分离度都有所降低,这反映出随着其他各景观类型面积的不断扩展,景观斑块在地域上的分离程度有所降低,景观的连通性在加强。

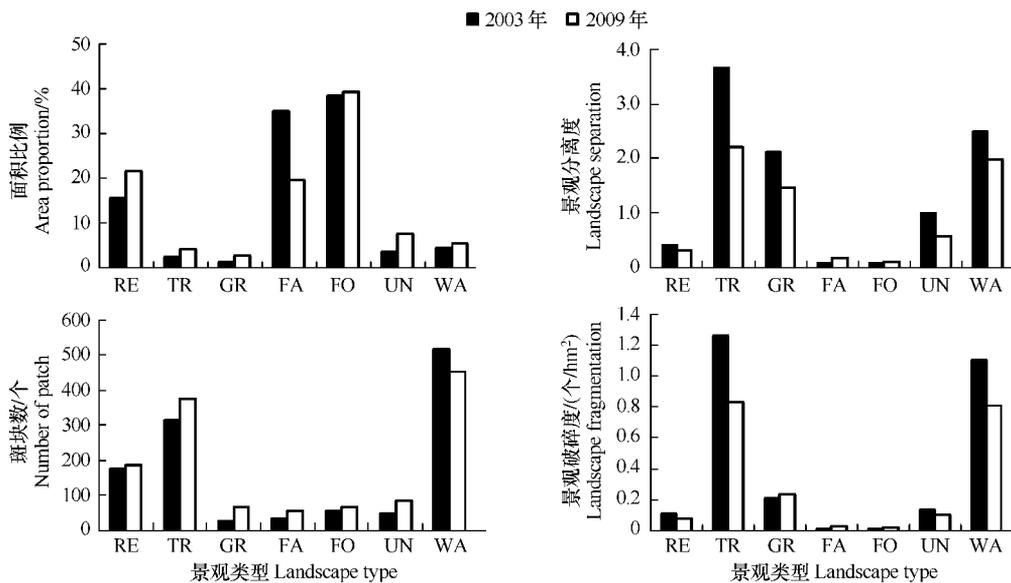


图3 九乡河流域主要景观参数变化

Fig. 3 Variation of main landscape parameter in the Jiuxiang River watershed from 2003 to 2009

RE: 居民工矿用地, TR: 交通用地, GR: 草地, FA: 耕地, FO: 林地, UN: 未利用地, WA: 水域

3.2 九乡河流域生态风险时空变化

3.2.1 生态风险时间序列变化

利用公式(2)计算出57个风险小区的生态风险值,统计结果发现2003年各生态风险小区的生态风险在0.0278—0.1827之间,均值为0.1137,2009年在0.0278—0.2309之间,均值为0.1204,从生态风险值的峰值和均值看,2009年九乡河流域的生态风险较2003年有所增加。从2003年到2009年各风险小区的生态风险有增有减,有61.40%的生态风险小区的生态风险值增加,38.60%的生态风险小区的生态风险值减少。

2003和2009年各风险小区的生态风险值都处在0—0.25之间,作者按照等分法,将风险程度划分为5个等级:≤0.05 低生态风险,0.05—0.10 较低生态风险,0.10—0.15 中生态风险,0.15—0.20 较高生态风险,0.20—0.25 高生态风险。然后统计出各等级风险区的面积。

结果表明,从2003—2009年,流域都以中生态风险为主,但各级生态风险面积的变化趋势存在较大差异:高生态风险从无到有,呈增加趋势;低生态风险和较高生态风险也呈增加趋势;较低和中生态风险则呈下降趋势。

3.2.2 生态风险空间变化

利用地统计学方法,在生态风险系统采样的基础上,计算得出实验半变异函数,然后进行理论半变异函数的拟合,由于球状模型拟合结果比较理想,生态风险空间结构分析主要基于球状模型计算结果。在半变异函数分析的基础上,本文利用克里格插值法编制了生态风险程度图(图4),并统计了各生态风险级别所占的面积(表1),以便直观描述研究区内生态风险的空间分布情况。

2003年较高生态风险区主要分布在流域北部的石埠桥、戴家库以及流域的西部地区。中生态风险区分布的面积最大,从北部的九乡河两侧经流域中部一直延伸到南部的坟头、汤山头 and 龙泉一带。较低风险区分布在北部的栖霞山、南部的连山以及青龙山和大龙山之间的区域。从整体上看,2003年的流域的生态风险以中低生态风险为主。

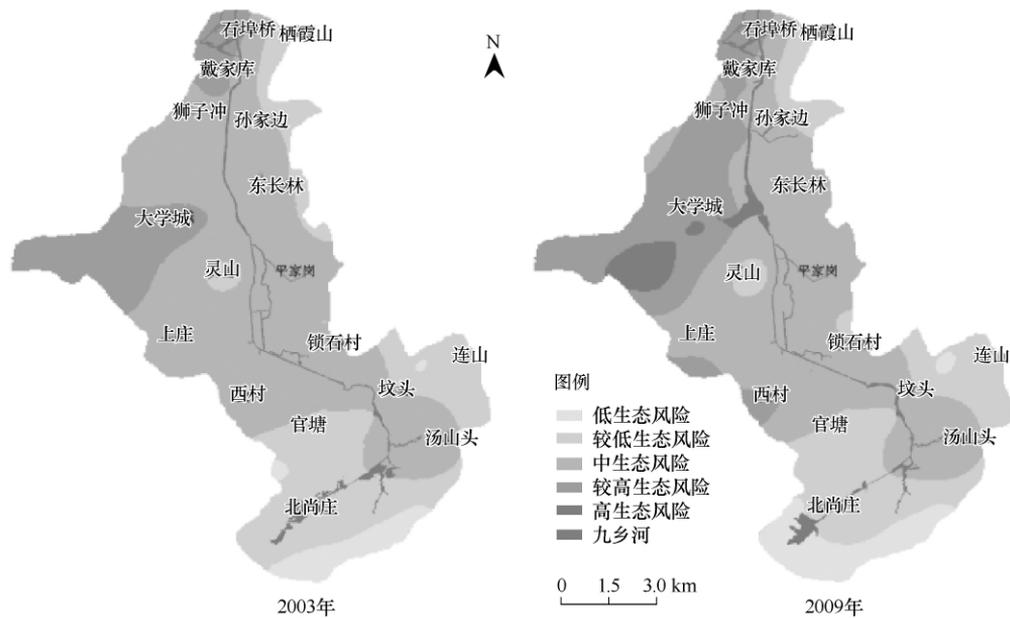


图 4 九乡河流域生态风险空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecological risk for Jiuxiang River watershed

2009 年高生态风险面积增加, 由 2003 年的无高生态风险区分布向多点分布转变, 主要分布在靠近主城区的西部区域, 面积增加 2.66%。较高风险区的分布面积有所扩展, 从北部的石埠桥、戴家库一直延伸到西部的仙林大学城, 占据了整个流域的西北角, 由 2003 年占流域面积的 12.78% 增加到 2009 年的 20.16%。中生态风险区有部分转化为较高生态风险, 分布区域有所减少。较低风险区的分布位置基本没有变化, 仅在九乡河的源头有部分区域转化为低风险区, 因此分布面积减少 3.54%。这也使得低生态风险区的面积增加到 6.82%。从整体上看, 2009 年的流域的生态风险以中较高生态风险为主。

表 1 生态风险级别克里格插值面积统计

Table 1 Area from the Kriging interpolation for ecological risk grade

生态风险等级 Ecological risk grade	2003 年		2009 年		2003—2009 年	
	面积/hm ² Area	面积比例/% Area proportion	面积/hm ² Area	面积比例/% Area proportion	面积变化/hm ² Area variation	比例变化/% Proportion variation
低生态风险 Lowest ecological risk	429.25	4.04	724.25	6.82	295.00	2.78
较低生态风险 Lower ecological risk	2757.25	25.98	2391.00	22.53	-366.25	-3.45
中生态风险 Moderate ecological risk	6071.50	57.20	5077.25	47.83	-994.25	-9.37
较高生态风险 Higher ecological risk	1356.75	12.78	2139.50	20.16	782.75	7.38
高生态风险 Highest ecological risk			282.75	2.66	282.75	2.66

从各等级生态风险的空间转化来看(图 5), 一部分向高等级风险转化, 另一部分向低等级风险转化; 中生态风险向较高生态风险转化的面积最大, 占转化总面积的 53.41%, 其次是较低生态风险向低生态风险, 较高生态风险向高生态风险的转化, 分别占总转化面积的 15.78%, 13.87%。

3.3 生态风险与城市化的关系

建设用地不断增加是快速城市化地区景观结构变化的最显著标志^[21-22], 城市化发育水平的差异主要体

现在单位面积内建设用地面积比重的差异^[23-24]。因此,城市化水平可用区域内城市建设用地占区域全部用地面积的比例(建筑用地的密度)来间接表示^[24]。本文利用这一理论来探讨生态风险与城市化的关系。为便于后续分析,首先将居民、工矿用地类型和交通用地合并为建设用地,然后利用 1.5km × 1.5km 的样地对两期景观分布图进行覆盖全区的系统采样,共计 57 次,分别计算各样地的城市化水平指数。

从图 5 可见,九乡河流域各采样单元的城市化水平和生态风险之间具有良好的线性关系,同时 2 个时期的生态风险值变化的线性拟合方程的决定系数(R^2)分别达到 0.799 和 0.657,拟合效果较佳。可以看出,随着城市化水平的提升,流域的生态风险呈现出明显的增加趋势,城市化对生态风险的正效应明显。

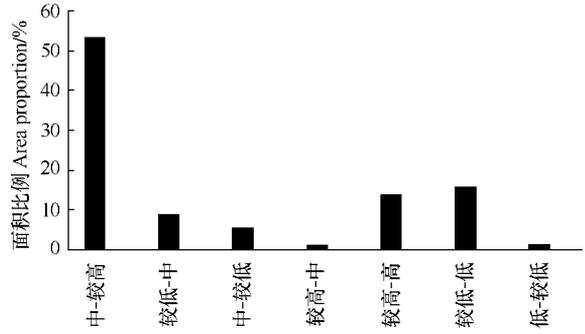


图 5 九乡河流域各级生态风险的相互转化
Fig. 5 Transition map of different ecological risk types from 2003 to 2009

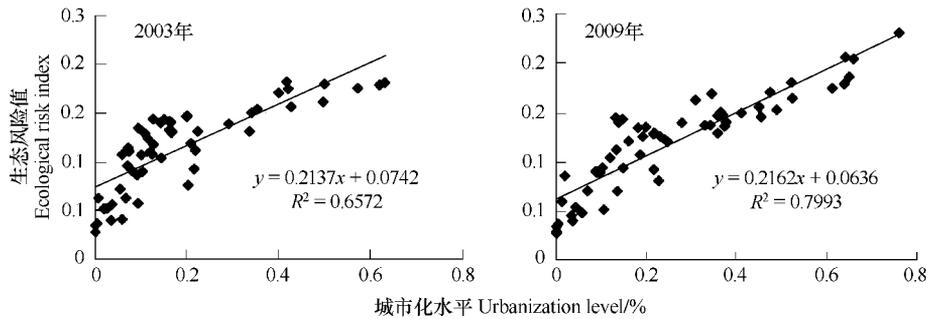


图 6 九乡河流域生态风险与城市化的关系
Fig. 6 The relationship between ecological risk and urbanization of Jiuxiang River

4 讨论

4.1 生态风险小区(采样方格)生态风险变化的原因分析

研究期间九乡河流域大部分风险小区的生态风险变化不显著(图 2,图 4),变化较大的风险小区主要集中在西北部的仙林大学城至戴家库,以及南部的九乡河源头一带。西北部的仙林大学城至戴家库一带风险小区的生态风险值上升,尤其在仙林大学城,少数风险小区达到高生态风险水平。一方面这些区域靠近主城区,受城市化影响最为明显;另一方面随着基础设施的日益完善,以及入住高校的逐渐增多,仙林大学城已逐渐发展成为仙林新市区的中心区,区域的景观分离度和破碎度在加大,区域系统的抗干扰能力降低,生态风险程度增加。

生态风险水平下降的风险小区主要集中在南部九乡河的源头地区,由较低生态风险下降为低生态风险。这是由于 2004 年九乡河上游修建了龙尚湖水库,随着库区居民迁出,区域生态系统受人为干扰的概率降低,青龙山一带的林地受到了很好的保护,再加上青龙山地势崎岖,人为影响本来就小,植被生长茂盛,景观完整性好,生态系统的抗干扰能力增强,生态风险降低。

流域的中部区域属平原农业区域,目前受城市化影响较小,其景观结构在研究期没有发生大的变化,因此各风险小区的生态风险水平只是发生微小波动,基本保持不变。

4.2 城市化过程与生态风险空间变化的关系

城市化过程影响着生态风险的空间分布及其变化。九乡河流域城市化过程最为明显的是北部(图 2),中部其次,而南部山区受城市化过程影响最小。流域生态风险的空间分布及其变化与城市化过程表现相一致(图 4):在流域的北部,生态风险水平整体较高,研究期间随着城市化过程的推进,区域生态风险也随之升高,

面积也在扩张;而在南部青龙山一带,由于受城市化过程影响很小,生态风险水平整体较低,在研究期间基本没有变化。总体而言,流域的生态风险的分布格局是:从南北方向看,北部>中部>南部;从东西方向看,西部>东部。就东西向而言,随着仙林新市区的建设,其范围在由西向东扩展,较高和高风险分布区域也明显呈现出从西向东蔓延的趋势,而东部的低风险区域逐渐萎缩,被中风险所代替。这说明城市化过程影响生态风险的空间分布和变化。城市化过程越强烈的区域,建筑用地的面积扩展较快,密度较大,城市化水平往往较高,生态风险也越高,反之生态风险越低。

本研究中有成片林地分布或处于林地和农田过渡的区域,生态风险都处在较低的水平。说明以林地为代表的自然景观和以农田为代表的农业景观是维护景观生态稳定性、降低生态风险的主要生态屏障之一。而城市化过程引起建设用地的不断增长,不但对面积较大的农业和自然组分斑块产生强烈的侵蚀作用,还使残存斑块的分离度增加,破碎化程度不断提高,农业和自然生态系统的稳定性下降,且对整个人工生态系统的调节能力降低,引起生态风险增加。

4.3 控制生态风险的策略

随着仙林新市区建设的稳步实施,九乡河流域的快速城市化过程将不可避免,为降低流域生态风险,维护流域整体生态安全,应采取以下措施:(1)制定流域生态规划。在对流域景观整体结构、格局和动态变化特征进行系统分析的基础上,根据城市化的进程和目标,确定合理的景观组构成及功能和空间分布的安全格局。利用生态规划将这些区域生态建设需求落实到具体的城市建设用地开发过程中^[21]。(2)保护林地和农田。较低生态风险区都分布在林区(山地)或者林地与农田过渡区,表明林地和农田对维护流域整体生态环境良好状态起着支撑作用,应作为流域景观格局维护的关键区域。因此,城市化过程中应严格保护流域内自然分布的山丘(体)并减少对农田的占用。(3)控制建筑用地密度。流域建筑用地密度越高,流域的生态风险将越大。因此,在城市化过程中,应合理的安排建筑用地的密度,并在建筑用地之间构建以乔灌木为主的城市绿地系统,以缓冲建筑用地扩张带来的生态风险。

5 结论

本文利用两个时段的遥感影像信息,结合GIS的空间分析功能,较好的揭示了2003—2009年城市化对南京市九乡河流域景观结构影响、流域生态风险的时空变化以及城市化与生态风险的关系。本研究可以得出以下主要结论:

(1)研究期间九乡河流域的景观结构发生了较大的变化,城市化过程致使居民及工矿用地增长了39.02%,交通用地和未利用地增长接近2003年的2倍。耕地减少了43.86%。耕地、水域和草地破碎度和分离度增加。流域的优势景观类型由林地/耕地向林地/建筑用地转变。

(2)流域生态风险增加,空间差异明显。风险小区的生态风险峰值和均值增加,流域整体的生态风险程度从中度/较低风险向中度/较高风险转变,生态风险有增加的趋势。生态风险较低的区域主要集中在流域南部的青龙山一带,生态风险较高的区域主要集中在西北部的仙林大学城,中部广阔的平原农业区以中度风险为主。

(3)城市化对生态风险的正效应明显。城市化水平越高,生态风险也越高。制定流域生态规划、保护流域内的林地和农田以及严格控制流域内建筑用地密度,是九乡河流域今后城市化过程中规避生态风险的主要策略。

References:

- [1] Guo L, Du S H, Xue D Y, Jiang X D. Spatial-temporal variation of landscape patterns during rapid urbanization in Guangzhou City. *Acta Universitatis Pekinensis (Naturalium Universitatis)*, 2009, 45(1): 129-136.
- [2] Li S C, Zhao Z Q, Wang Y L. Urbanization process and effects of natural resource and environment in China: research trends and future directions. *Progress in Geography*, 2009, 28(1): 63-70.
- [3] Li W F, Ouyang Z Y, Wang R S, Wang X K. Landscape pattern and their formation of urban ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 428-432.

- [4] Li J G, He C Y, Li X B. Landscape ecological risk assessment of natural/semi-natural landscapes in fast urbanization regions—a case study in Beijing, China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 33–45.
- [5] 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*, 1999, 18(4): 57–64.
- [6] Kelly J R, Levin S A. A comparison of aquatic and terrestrial nutrient cycling and production processes in natural ecosystems, with reference to ecological concepts of relevance to some waste disposal issues//Kullenberg G, ed. *The Role of the Oceans as a Waste Disposal Option*. Hingham: Reidel Publish Company, 1986: 165–203.
- [7] Fu Z Y, Xu X G. Regional ecological risk assessment. *Advances in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 267–271.
- [8] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y, Bu R C. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River Delta. *Acta Universitatis Pekinesis (Scientiarum Naturalium)*, 2001, 37(1): 111–120.
- [9] Landis W G. Twenty years before and hence: ecological risk assessment at multiple scales with stressors and multiple endpoints. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(5): 1317–1326.
- [10] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W, O'Neill R V, Barnhouse L W, Gardner R H. Assessing ecological risk on a regional scale. *Environmental Management*, 1990, 14(3): 325–332.
- [11] Zeng Y. The regional ecological risk assessment of Hohhot City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 668–673.
- [12] Chen H, Liu J S, Cao Y, Li S C, Ouyang H. Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1558–1564.
- [13] Wang J, Cui B S, Liu J, Yao L H, Zhai H J. The effect of land use and its change on ecological risk in the Lancang River watershed of Yunnan Province at the landscape scale. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 269–277.
- [14] Zeng H, Liu G J. Analysis of regional ecological risk based on landscape structure. *China Environment Science*, 1999, 19(5): 454–457.
- [15] Zhang J T, Qiu Y, Zhen F Y. Quantitative methods in landscape pattern analysis. *Journal of Mountain Research*, 2000, 18(4): 364–352.
- [16] Chen L D, Fu B J. Analysis of impact of human activity on landscape structure in Yellow river delta—a case study of Dongying region. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4): 337–344.
- [17] Cheng P, Pan X L. Ecological risk analysis of regional landscape in inland river watershed of arid area—a case study of Sangong River Basin in Fukang. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(4): 116–120.
- [18] Li X Y, Zhang S W. Analysis on the dynamic trend of ecological security in the west part of Jilin Province, China based on the landscape structure. *Arid Zone Research*, 2005, 22(1): 57–62.
- [19] Wang G X, Cheng G D. Study on the landscape pattern of a desert-oasis ecological system: a spatial grid method and its application. *Arid Zone Research*, 1999, 16(3): 6–11.
- [20] Wu J G. *Landscape Pattern, Process, Scale and Grade*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [21] Zeng H, Jiang Z Y. Landscape structure of Longhua area in Shenzhen city during fast urbanization process—structure and heterogeneity analysis of urban construction area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 567–572.
- [22] Thomlinson J R, Rivera L Y. Suburban growth in Luquillo, Puerto Rico: some consequences of development on natural and semi-natural systems. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 49(1/2): 15–23.
- [23] Wang Y Q, Zhang X S. A dynamic modelling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes. *Ecological Modelling*, 2001, 140: 141–162.
- [24] Li S J, Zeng H. The expanding characteristics study of built-up land use along the urbanization gradient in quickly urbanized area: a case study of Nanchang area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 55–62.

参考文献:

- [1] 郭东, 杜世宏, 薛达元, 江学顶. 快速城市化进程中广州市景观格局时空分异特征的研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(1): 129–136.
- [2] 李双成, 赵志强, 王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 63–70.
- [3] 李伟峰, 欧阳志云, 王如松, 王效科. 城市生态系统景观格局特征及形成机制. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 428–432.
- [4] 李景刚, 何春阳, 李晓兵. 快速城市化地区自然/半自然景观空间生态风险评价研究——以北京为例. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 33–45.
- [5] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [11] 曾勇. 区域生态风险评价——以呼和浩特市为例. *生态学报*, 2010, 30(3): 668–673.
- [12] 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): 1558–1564.
- [13] 王娟, 崔保山, 刘杰, 姚华荣, 翟红娟. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 269–276.
- [14] 曾辉, 刘国军. 基于景观结构的区域生态风险分析. *中国环境科学*, 1999, 19(5): 454–457.
- [15] 张金屯, 邱扬, 郑凤英. 景观格局的数量研究方法. *山地学报*, 2000, 18(4): 364–352.
- [16] 陈利顶, 傅伯杰. 黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响分析——以山东省东营市为例. *生态学报*, 1996, 16(4): 337–344.
- [17] 陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆河流域区域景观生态风险分析——以阜康三工河流域为例. *生态学杂志*, 2003, 22(4): 116–120.
- [18] 李晓燕, 张树文. 基于景观结构的吉林西部生态安全动态分析——景观空间方法与应用. *干旱区研究*, 2005, 22(1): 57–62.
- [19] 王根绪, 程国栋. 荒漠绿洲生态系统的景观格局分析. *干旱区研究*, 1999, 16(3): 6–11.
- [20] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [21] 曾辉, 江子瀛. 深圳市龙华地区快速城市化过程中的景观结构研究——城市建设用地结构及异质性特征分析. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 567–572.
- [24] 李书娟, 曾辉. 快速城市化地区建设用地沿城市化梯度的扩张特征——以南昌地区为例. *生态学报*, 2004, 24(1): 55–62.