

近 20 年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制*

黄木易, 何 翔

(安徽建筑大学环境与能源工程学院, 合肥 230601)

摘 要: 基于 1995、2005、2013 年 3 期 Landsat TM/ETM⁺ 遥感影像及 DEM, 应用 GIS 方法开展巢湖流域景观格局特征分析及生态风险网格化定量评估。研究表明: (1) 近 20 年来, 巢湖流域景观格局特征变化明显, 表现为建设用地景观破碎度、分离度均呈先下降后上升趋势; 农地、林地与水体景观破碎度、分离度均呈上升趋势。 (2) 生态风险时序分析表明, 1995—2013 年, 巢湖流域低、较低和中等级生态风险区域面积在逐渐缩小, 而较高和高等级生态风险区域范围在不断蔓延。近 20 年来, 巢湖流域生态风险主要由低级向高级转化, 面积达 6025 km², 是由高级向低级转化面积的 2.30 倍。 (3) 生态风险时空演化机制分析表明, 巢湖流域生态风险变化区域主要集中在北、西南和东南部, 具有明显的阶段性和区域性。近 20 年来, 巢湖流域经历了快速的城市化、工业化以及受到行政区划调整的政策影响, 高强度土地利用模式及县域经济活力的释放叠加于本身脆弱的流域生态条件, 对景观生态系统造成的强烈干扰促进流域生态风险整体有恶化趋势, 需重点加强中级以上生态风险区域的生态保护与建设工作。因此, 生态风险演化趋势体现了该流域自然特点和区域社会经济发展对景观生态系统干扰的压力响应。

关键词: 景观格局; 生态风险; 网格化采样; 城市化; 巢湖流域

Landscape ecological risk assessment and its mechanism in Chaohu Basin during the past almost 20 years

HUANG MUYI & HE Xiang

(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, P.R.China)

Abstract: Based on landscape classification maps that are conducted from 1995, 2005 and 2013 by Landsat TM/ETM⁺ remote sensing images interpretation and scope of study area extracted from DEM and cell sampling by GIS platform, the landscape pattern characteristics and changes of ecological risk in Chaohu Basin during the past 20 years (1995–2013) are analyzed quantitatively. Meanwhile, the spatial-temporal change of ecological risk has been explained in the paper. The results show: (1) in recent 20 years, the landscape structure and the landscape pattern characteristics have changed greatly in Chaohu Lake Basin. Rapid urbanization has impact on catchment landscape pattern significantly, whose fragmentation and isolation index of construction land show a trend of decrease first and then increase, but that of woodland, farmland, and water landscape have increasing trends. (2) ecological risk index in Chaohu Basin shows that, during the past almost 20 years, the area of ecological risk at low, lower and medium level decreases gradually, along with significant increase in area with high and higher level of ecological risk. In 1995, the Chaohu Basin is dominated by medium and low ecological risk, which accounts for nearly 70% of the total area. In 2005, the scope at medium and high ecological risk is in the majority, accounting for nearly 71% of the total area. Ecological risk level transfer matrix analysis shows that in recent 20 years, there are 17 types of ecological risk level transformation change, in which 8 types convert from superior to inferior with transformation area of 2618 km², and other 9 types convert from junior to senior with transformation area of 6025 km², which is 2.30 times of area that converted from superior to inferior. (3) Analysis of spatial difference characteristic about ecological risk shows that the spatial distribution of ecological risk grade change obviously, the main change occurred in the north, southwest and southeast of Chaohu Basin. The evolution of the ecological risk in Chaohu Basin has obvious periodicity and regional characteristics, which reflects not only the natural characteristics of the Chaohu Basin, but the response of pressure

* 国家自然科学基金项目(41471422)、安徽省高校省级优秀青年人才基金重点项目(2013SQRL047ZD)和安徽省财政、住建厅徽派建筑保护省级专项(HPZX2013-01)联合资助。2015-08-09 收稿; 2015-11-11 收修改稿。黄木易(1978~), 男, 博士, 副教授; E-mail: huangyang78@163.com。

that regional social and economic development has a huge impact on the land ecosystem. The study shows that the ecological status of the Chaohu Basin has deteriorated with the development of urbanization and industrialization in the last 20 years. The scope of ecological risk at medium or higher level must to give more attention.

Keywords: Landscape pattern; ecological risk; cell sampling; urbanization; Chaohu Basin

流域是复杂的自然、地理环境综合生态地域系统,随着城市化、工业化和流域经济的不断发展,人类活动的强烈扰动叠加于自然因素之上,加剧了流域内资源和生态系统的胁迫,其生态压力和风险日益增加^[1-2]. 生态风险是指一个种群、生态系统或整个景观的生态功能受到外界胁迫,从而在目前和将来对该系统健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值产生不良影响的一种状况^[3]. 国外生态风险评价研究起步早,从最初主要关注化学、有毒污染物等单一风险源对环境、健康和土壤影响发展到多风险源在种群、生态系统、海洋等更大尺度上对多受体影响的研究,国内生态风险研究则集中在水环境化学生态风险评价^[4]、区域和景观生态风险评价上^[5-9]. 1990s 以来,生态风险指数法、RRM (Relative Risk Model)、PESR (Pressure Effect Social Response) 和计算机模拟法等评价方法被广泛应用到流域生态风险评价研究中^[10-15]. 生态风险区是以景观作为具有高度空间异质性的区域,它是由相互作用的景观要素或生态系统以一定的规律所组成. 区域生态系统的变化,首先表现在景观结构组分(或景观要素)的空间结构、相互作用以及功能的变化和演替上^[16]. 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^[3]. 目前,景观生态风险评价是区域生态风险评价的重要内容,为国内外研究的热点^[17],而大尺度的流域景观生态风险定量化评估及生态过程机制等相关研究仍缺乏.

巢湖流域地处中部地带,是安徽省经济发达地区,也是中部崛起战略的重点开发区域、皖江城市带示范区主战场. 近年来,随着城市化和工业化的高速发展,社会经济水平提高和人口的增加,其景观结构、生态环境和水土资源承载力日益受到严重影响,大城市扩张对巢湖流域生态服务价值损益作用明显,并呈现逐年加剧趋势^[18-20]. 人类活动对生态环境的强烈扰动叠加于自然因素的影响之上,加剧了该地区生态风险恶化的可能. 目前,巢湖流域相关研究中缺乏对流域景观生态风险定量化评估、演化趋势及机理机制分析,巢湖流域城镇化和经济社会发展正处于快速发展时期,高速的经济发展对土地资源的消耗及高强度的土地利用必然造成土地生态系统的巨大压力. 本文基于遥感、GIS 技术以及景观生态学理论与研究方法,开展巢湖流域景观格局特征及生态风险网格化定量评价,探索流域景观格局变化及生态风险时空差异特征,揭示生态风险时空演化规律及机制. 研究成果在一定程度上可为未来巢湖流域生态规划、景观结构调整及格局优化、生态风险预警、社会经济可持续发展决策等提供理论依据.

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

巢湖(31°43'~32°25'N, 117°16'~117°51'E)流域位于安徽省中部,长江流域下游左岸,行政区划涉及 11 个县及合肥市辖区、六安市辖区和巢湖市辖区. 流域总面积约 14000 km². 地势南高北低,西南为山区,东北为丘陵及浅山区,沿湖及东南为平原. 巢湖周围共有大小入湖河流 33 条^[21]. 研究区所在位置见图 1 所示.

1.2 数据来源与处理

利用三期 Landsat TM/ETM⁺影像数据(其中 1995 年为 1 月份,2005 年 TM 及 2013 年 ETM⁺为 3 月份)和 DEM 数据(格式为 GRID 的 SRTM 数字高程数据,来源于美国对地观测全球高程数据,分辨率为 90 m). 首先利用 ArcGIS 10.0 的水文分析模块对 DEM 进行巢湖流域范围提取. 其次,利用 ERDAS 2013 对 3 期遥感影像进行几何纠正、拼接、直方图匹配等图像预处理. 最后,利用提取的巢湖流域范围对拼接处理后的遥感影像进行裁剪,并对影像进行解译,结合流域的景观特点,将研究区分为农地、林地、水体、建设用地 4 种景观类型. 对 3 期遥感影像的分类结果进行精度检验,其 Kappa 系数均在 0.75 以上,符合研究要求.

2 研究方法

2.1 评价单元采集

利用 ArcGIS 10.0 对研究区范围进行网格化,从而采集生态风险评价单元. 按照研究区景观斑块平均面

积 2~5 倍^[22] 进行网格采样,具体采用 3 km×3 km 的正方形网格对巢湖流域(图 1)进行空间网格化采样,共采集评价单元小区 1548 个. 分别计算每一采样评价单元(生态风险评价样本)的生态风险指数值,以此作为评价单元中心点的生态风险水平,作为生态风险评价空间插值分析的样本.

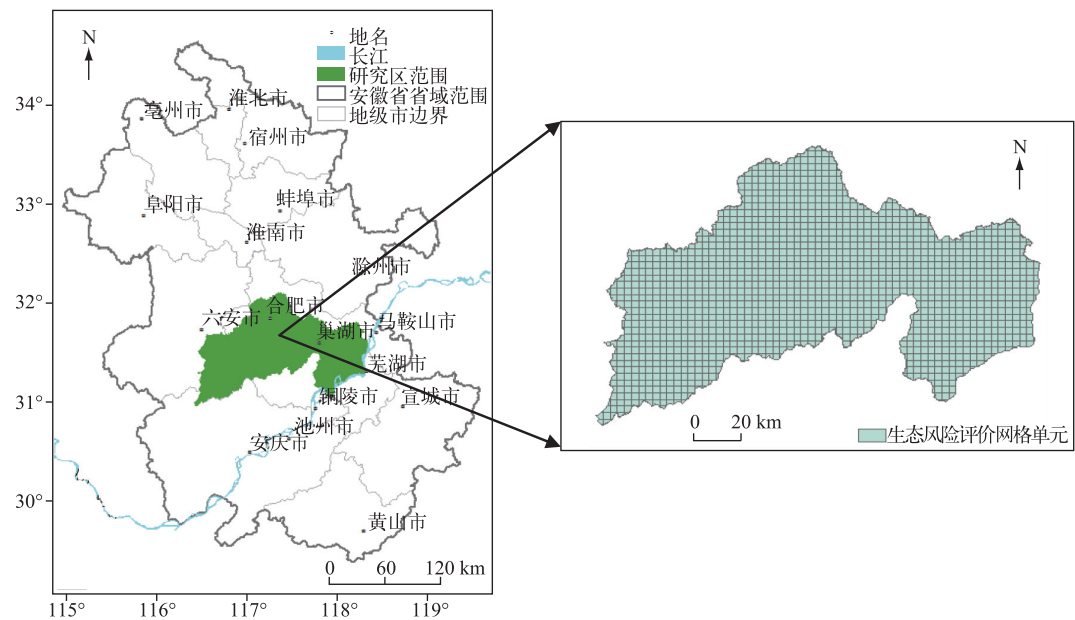


图 1 研究区位置及巢湖流域生态风险评价单元网格化采样

Fig.1 The location of Chaohu Basin and cell samples for ecological risk assessment

2.2 生态风险评价模型构建

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^[8]. 区域景观空间格局的研究是揭示该区域生态状况及空间变异的有效手段. 景观所受的干扰度越大,则景观的敏感性亦越强,抵抗外界干扰能力和自我恢复能力越弱,其生态风险也就越大^[23]. 为探讨流域景观格局与生态风险的关系,通过景观与生态环境之间的定量分析研究来揭示二者之间的相互关系. 本文借鉴前人的研究成果,基于景观格局指数,如景观破碎度、景观分离度和景观优势度建立景观干扰指数,结合景观敏感度指数建立景观损失指数,在此基础上构建景观生态风险指数. 其计算公式^[23]为:

$$ERI_k = \sum_{i=1}^m \frac{A_{ki}}{A_k} \cdot LL_i \tag{1}$$

式中, ERI_k 为第 k 采样区的景观生态风险指数; LL_i 为景观生态损失指数; A_{ki} 为采样区景观面积; A_k 为第 k 采样区的面积; m 为采样区网格单元内景观类型数目; i 为农地、林地、水体和建设用地 4 种景观类型(下同). LL_i 计算公式为:

$$LL_i = 10 \times U_i \cdot S_i \tag{2}$$

式中, U_i 为景观干扰指数; S_i 为敏感度指数;参考相关文献^[6,24],结合巢湖流域景观分类的实际情况,按敏感性高低对 4 类景观类型的 S_i 分别赋值,水体为 4,农地为 3,林地为 2,建设用地为 1,归一化后得到各景观类型的敏感度指数. U_i 计算公式为:

$$U_i = a \cdot C_i + b \cdot F_i + c \cdot D_i \tag{3}$$

式中, C_i 为景观破碎度; F_i 为景观分离度; D_i 为景观优势度; a 、 b 和 c 分别为破碎度、分离度和优势度的权重,参考前人研究结果^[6,24],对其分别赋值为 0.3、0.2 和 0.5. 限于篇幅,关于景观破碎度 C_i 、景观分离度 F_i 和景观优势度 D_i 计算公式参考文献^[6,24].

2.3 空间分析方法

流域生态风险指数是一种空间变量,其空间异质性可利用地统计学方法进行空间分析^[6]. 本文采用地统计学中半方差函数进行区域生态风险的空间分析,具体应用 ArcGIS 10.0 对生态风险指数进行克里格空间插值,进而分析巢湖流域生态风险的空间差异特征. 变异函数的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

式中, $\gamma(h)$ 为变异函数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为系统某属性 Z 在空间位置 x 和 $x+h$ 处的值; $N(h)$ 为样本对数; h 为空间距离. 本文利用 ArcGIS 10.0 将生态风险指数网格值赋予其中心点,完成生态风险空间插值点样本的采集,基于该样本计算得出实验变异函数,从而进行理论半变异函数的拟合. 本文主要采用拟合结果较理想的球状模型进行生态风险空间插值.

3 结果与分析

3.1 巢湖流域景观格局变化特征分析

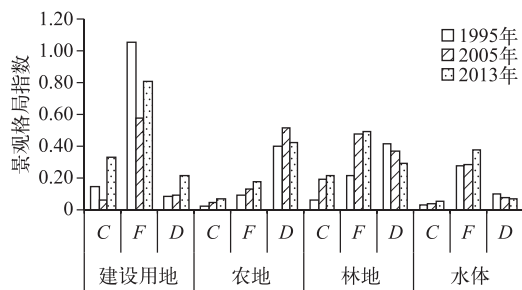


图2 巢湖流域景观格局指数变化特征(1995—2013年)

Fig.2 Changes of landscape pattern indices in Chaohu Basin (1995–2013)

景观特征可以用数量化的景观指数方法和空间统计学方法来计算和描述,从而反映景观生态的结构、功能与过程,数量化的景观指数即景观格局指数. 景观异质性是许多基本生态过程和物理环境过程在空间和时间尺度连续体上共同作用的产物^[25]. 利用 Patch Analyst 扩展模块,应用 ArcGIS 10.0 计算研究区 1995、2005 和 2013 年流域景观斑块水平格局指数,结果显示,在近 20 年间,巢湖流域景观格局发生了显著的变化(图 2).

景观格局特征分析表明,随着城市化的推进,建设用地景观破碎度、分离度均呈先下降后上升趋势,优势度呈上升趋势. 与其他景观类型相比,建设用地景观格局变化的机制相对复杂,主要由于建设用地

景观类型既受自然,又受到社会、经济等人为因子的强烈影响和干扰有关^[26]. 农地景观破碎度、分离度指数呈现上升趋势,优势度先上升后下降,总体呈上升趋势. 林地和水体这两种也具有重要生态功能的景观类型,其破碎度和分离度的变化趋势与农地景观一致,呈上升趋势,但优势度一直呈现下降趋势. 景观破碎化加剧将会对流域生态系统的过程、功能及其所提供的生态服务功能具有显著的影响. 分离度指数呈上升趋势,反映出流域景观类型的分布趋于从集中向分散转变,景观类型聚集程度和连通性下降. 因此,需要加强对农地、林地和水体景观类型的破碎化程度上升的管控,避免过高的破碎化对土地生态系统产生的不利影响.

3.2 巢湖流域生态风险时空演化及机制分析

3.2.1 网格单元生态风险指数变化分析 利用公式(1),分别对 1995、2005 和 2013 年巢湖流域研究区 1548 个评价单元的生态风险指数进行计算. 结果表明,巢湖流域 1995 年生态风险指数值介于 0.2617~1.0043 之间,均值为 0.4708;2005 年生态风险指数介于 0.1919~1.0839 之间,均值为 0.5317;2013 年生态风险指数介于 0.0113~1.2662 之间,均值为 0.5500. 从最小值、峰值和均值来看,2013 年较 1995 年生态风险指数最小值在下降,峰值和均值均趋于上升,其中均值增加幅度较小,峰值增加较为明显,从 1995 年的 1.0043 上升为 2013 年的 1.2662,增长 26.08%,显示出较为明显的增长趋势.

3.2.2 生态风险时空分布及差异分析 为了比较巢湖流域生态风险指数的等级空间变化,本文利用 ArcGIS 10.0 的 Natural breaks 将研究区生态风险指数(ERI)划分为 5 个等级,分别为低生态风险($ERI \leq 0.2220$),较低生态风险($0.2220 < ERI \leq 0.4357$),中生态风险($0.4357 < ERI \leq 0.5689$),较高生态风险($0.5689 < ERI \leq 0.7034$)和高生态风险($ERI > 0.7034$). 结果显示,1995—2013 年巢湖流域生态风险指数变化明显,低、较低、

中生态风险区域呈下降趋势,而较高、高生态风险区域呈上升趋势. 其中,1995 年,以中、较低生态风险为主,而 2005 年以后以中、较高生态风险为主(图 3 和表 1). 近 20 年来,巢湖流域生态风险等级相互转化主要类型有 17 种,其中由高级向低级转化的类型有 8 种,即高向较高、高向中、高向较低、较高向中、较高向较低、中向较低、中向低和较低向低,转化面积为 2618 km²;而由低级向高级转化的类型达 9 种,即低向较低、低向中、低向较高、较低向较高、较低向高、较低向中、中向较高、中向高和较高向高,转化面积达 6025 km²,是由高级向低级转化面积的 2.30 倍(表 2). 研究表明,近 20 年来,巢湖流域的生态风险由低等级向高等级转变,整体上有恶化趋势,今后应重点加强中级及以上生态风险区域的生态保护、规划与建设工作. 本文基于 ArcGIS 10.0 地统计模块对采样网格单元风险指数值进行插值,流域生态风险空间差异特征显示(图 4),巢湖流域近 20 年来的城市化过程中,低、较低和中生态风险区域范围在逐渐缩小,而较高和高生态风险等级区域不断蔓延.

表 2 巢湖流域生态风险等级转移矩阵
(1995—2013 年)(km²)

Tab.2 Transition matrixes of ecological risk from 1995 to 2013 in Chaohu Basin

生态风险等级	低	较低	中	较高	高	1995 年总计
低	84	82	169	17	0	342
较低	35	48	909	1591	519	3102
中	10	554	2714	1514	953	5745
较高	0	219	961	673	281	2135
高	0	73	101	665	362	1201
2013 年总计	129	977	4844	4460	2115	12525
面积净变化	-213	-2125	-901	2325	914	0

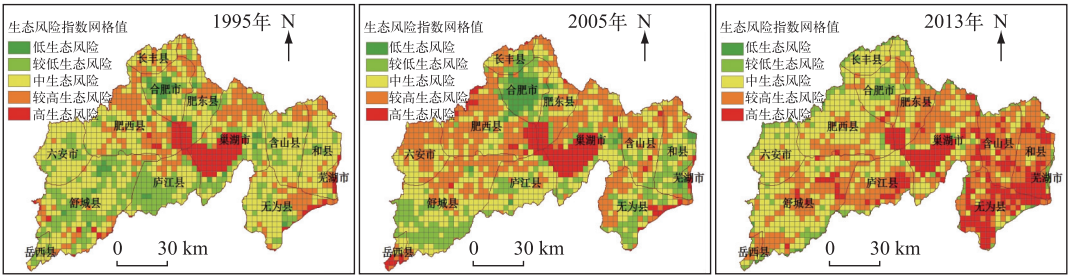


图 3 巢湖流域网格单元生态风险指数计算结果(1995—2013)

Fig.3 The data of ecological risk assessment index of cell samples in Chaohu Basin (1995 - 2013)

表 1 巢湖流域生态风险等级面积统计

Tab.1 The area of ecological grade in Chaohu Basin

风险 级别	1995 年		1995—2005 年 面积变化/km ²	2005 年		2005—2013 年 面积变化/km ²	2013 年		1995—2013 年 面积变化/km ²
	面积/ km ²	占流域面 积比/%		面积/ km ²	占流域面 积比/%		面积/ km ²	占流域面 积比/%	
低	342	2.73	151	493	3.94	-364	129	1.03	-213
较低	3102	24.77	-1506	1596	12.74	-619	977	7.80	-2125
中	5745	45.87	-889	4856	38.77	-12	4844	38.67	-901
较高	2135	17.05	1902	4037	32.23	423	4460	35.61	2325
高	1201	9.59	342	1543	12.32	572	2115	16.89	914

3.2.3 生态风险时空演化机制分析 研究表明,巢湖流域土地利用程度在空间上具有明显的集聚性^[28],景观生态风险的空间分布规律在一定程度体现了流域土地利用/覆被变化的特点. 巢湖流域生态风险时空差异分析显示,1995、2005 和 2013 年生态风险等级空间差异变化较大,主要变化区域集中在北、西南和东南部(图 4). 巢湖流域生态风险演化趋势体现该区域自然特点和社会经济发展的规律,生态风险空间演化机制可以从 2 个阶段和 3 个变化区域来分析:

第1阶段为1995—2005年期间,该阶段巢湖流域生态风险变化区域主要发生在合肥市区、肥东县、肥西县、六安市金安区和舒城县境内,此期间合肥市社会经济发展较为平稳,尤其合肥市区在生态园林规划与绿化建设中投入较大,生态环境质量较高,自1992年获得国家“园林城市”荣誉称号后,园林绿化建设工作力度不断加强^[29]。同时,城市市区土地开发强度平稳,建设斑块逐步聚合,破碎度下降,斑块与斑块之间的分离度下降,表现在生态风险趋于下降,低和较低生态风险范围扩大。而县域相对市区较为稳定的空间结构来说,在城镇建设、土地开发、交通基础设施新建等方面的力度大,高强度的县域城镇建设使得景观斑块更加破碎,斑块之间的分离度增加,景观结构受到人类活动的强烈干扰趋于退化,增加了生态系统恶化的风险,表现为生态风险等级上升、面积增加。

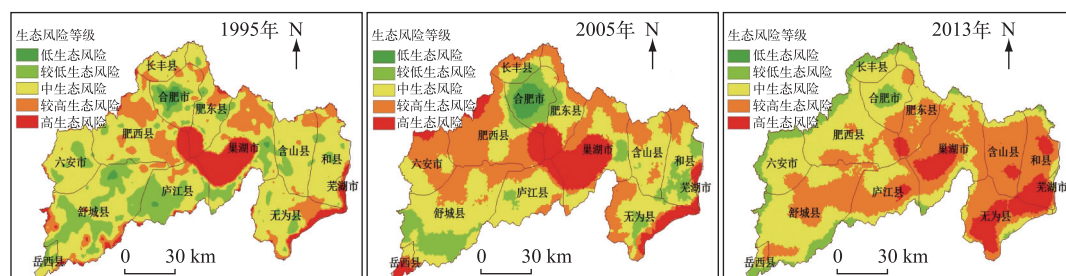


图4 巢湖流域生态风险空间分布(1995—2013)

Fig.4 Spatial distribution of ecological risk in Chaohu Basin (1995—2013)

第2阶段为2005—2013年期间,该阶段巢湖流域迎来了区域发展的重要机遇,包括2006年国务院批准的皖江城市带产业转移示范区设立、2011年安徽省巢湖地级市的撤销与行政区划的调整、合肥经济圈建设和区域性特大城市建设目标确定。巢湖流域是皖江城市带的主战场,另外,经济发展长期落后的巢湖地区被撤销合并(庐江、巢湖市区划归合肥市;无为、和县沈巷镇划归芜湖市;含山、和县除沈巷外部分划归马鞍山市),区划调整后的县域经济活力得到释放,城镇化、工业化进入了快速发展期,人口不断增加、社会经济水平显著提高。该阶段,巢湖流域核心城市合肥市处于区域性特大城市建设时期,着力加强对滨湖新区、老城区和政务新区的建设与改造,推进现代化中心城区的构成。同时,加强全国重要综合交通枢纽建设,推动城市内、外部交通网络优化改造。合肥市区大规模基础设施和固定资产投资项目建设的推动必然造成高强度土地利用模式。城市化、工业化推动社会经济高速发展,必然带来土地生态系统的压力响应,城市空间格局调整对土地生态系统的干扰增强,景观生态风险趋于上升。该阶段的流域生态风险空间演化规律表现为:合肥市区生态风险等级上升,由低、较低向较低、中和较高转变;划归合肥市的巢湖市区、庐江县由较低和中等等级演变为中、较高等级风险;划归芜湖市的无为县由较低、中和较高等级向较高和高等级变化;划归马鞍山市的含山县、和县主要表现为由中、较高向较高和高等级演变。值得注意的是,作为全国百强县和安徽省十强县之一的肥西县及其西南部邻近区域,在该阶段的发展主要依托在原有较好的基础设施上拓展,城市建设逐步集中连片发展,表现为建设用地斑块破碎度和分离度进一步降低,生态风险趋于优化。另外,六安市舒城县中南部、岳西县东北部由于近年来的森林覆盖率下降及水土流失导致了生态系统破坏,生态风险上升的趋势也要引起关注。整体上,该阶段巢湖流域生态系统受到了政策驱动下的强烈人为活动干扰,生态风险演化特点表现为:局部优化整体恶化;低级别风险区域范围缩小,高级别范围扩大;生态风险变化空间性强,与区域社会经济发展关系紧密;流域东部较西部区域变化大。

4 结论与讨论

本文基于GIS和遥感平台,应用景观生态学研究范式,对巢湖流域生态风险网格化定量评估,并对空间演化机制进行了初步探讨,结果在一定程度上揭示了流域生态风险的时空分布、变化特征和风险转化规律。流域景观格局分析表明,近20年来,巢湖流域建设用地、农地、林地和水体景观破碎度和分离度整体呈上升趋势,反映出流域景观类型的分布趋于从集中向分散转变,景观类型聚集程度和连通性下降。生态风险时序

分析显示,巢湖流域近20年来的城市化进程中,低、较低和中生态风险区域在逐渐下降,较高和高生态风险区域不断蔓延。巢湖流域生态风险等级转换呈多样化,其中,以低级向高级转化类型为主,整体上流域生态风险有恶化趋势,今后应重点加强中级以上生态风险区域的生态保护与建设工作。空间差异及演化机制分析表明,生态风险变化区域主要集中在巢湖流域北、西南和东南部,生态风险空间演化格局在一定程度上体现了土地利用/覆被变化的空间差异。随着皖江城市带产业示范区的设立,以合肥市为核心的巢湖流域社会经济显著增加,而安徽省撤销巢湖地级市进行区划调整更释放了县域经济活力,城镇化、工业化推动流域社会经济高速增长的同时,对土地利用也产生了强烈干扰。其次,森林覆盖率降低、水土流失加剧、湖泊和湿地生态系统功能退化,脆弱的生态条件叠加人为活动的强烈干扰,加剧了流域生态风险恶化的趋势。

目前,巢湖流域面临着新一轮的城镇化和工业化浪潮,未来新型城镇化道路上的流域经济发展,应当首先加强流域内环境保护和改善,优化流域生态系统,为城镇化、工业化发展创造良好的生态条件,实现流域生态环境建设与社会经济发展相协调。针对生态风险中级及以上区域,必须加大土地利用规划对建设用地扩张中土地利用开发强度的管控力度,尽量减轻建设过程中的人为活动对农地、林地和水体等生态功能景观类型的破坏与强烈干扰,保持景观完整性和连通性,降低景观破碎化程度和分离度有利于生态系统功能的正常发挥。对于城市内部用地,应当通过城市规划严格控制建筑密度,合理调整城市内部用地结构,加强绿地规划与建设,引导城市景观生态资源的合理配置。巢湖流域应以生态文明建设为契机优化区域内城市生态系统,增加城市生态风险抵抗力有助于降低生态风险水平。最后,要大力加强巢湖流域上游局部区域的森林保护与水土流失治理,提高森林覆盖率和水土保持能力,优化生态系统条件,改善生态环境质量。特别要加强对巢湖水域、湿地风景区周边及生态脆弱区的土地利用用途管制,避免生态系统遭受人为活动的扰动带来的生态风险上升。本文由于受限于遥感影像的分辨率和研究的尺度等,关于巢湖流域生态风险演变生态过程的机理等问题将会在后续研究中进一步加强。

5 参考文献

- [1] Song Changqing, Yang Guishan, Leng Shuying. Progress and prospect of scientific research of lakes and river basin. *J Lake Sci*, 2002, **14**(4): 298-300(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2002.0401. [宋长青, 杨桂山, 冷疏影. 湖泊及流域科学研究进展与展望. 湖泊科学, 2002, **14**(4): 298-300.]
- [2] Xu Yan, Gao Junfeng, Zhao Jiahu *et al.* The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 284-292(in Chinese with English abstract). DOI 10.5846/stxb201011101615. [许妍, 高俊峰, 赵家虎等. 流域生态风险评估研究进展. 生态学报, 2012, **32**(1): 284-292.]
- [3] Zeng Hui, Liu Guojun. Analysis of regional ecological risk based on landscape structure. *China Environmental Science*, 1999, **19**(5): 454-457(in Chinese with English abstract). [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.]
- [4] Sun Guangyou, Tian Wei, Jia Zhiguo *et al.* Risk analysis and mitigation on the impact of the development of Songyuan Irrigation area on the ecology of Lake Chagan. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 66-73(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2014.0108. [孙广友, 田卫, 贾志国等. 松原灌区建设对查干湖生态风险分析及对策. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 66-73.]
- [5] Sun Hongbo, Yang Guishan, Su Weizhong *et al.* Research progress on ecological risk assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(2): 335-341(in Chinese with English abstract). [孙洪波, 杨桂山, 苏伟忠等. 生态风险评估研究进展. 生态学杂志, 2009, **28**(2): 335-341.]
- [6] Chen Peng, Pan Xiaoling. 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(in Chinese with English abstract). DOI 10.13292/j.1000-4890.2003.0090. [陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆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.]
- [7] Zhou Ting, Meng Jijun. Research progress in regional ecological risk assessment methods. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(4): 762-767(in Chinese with English abstract). [周婷, 蒙吉军. 区域生态风险评估方法研究进展. 生态学杂志, 2009, **28**(4): 762-767.]
- [8] Hu Hebing, Liu Hongyu, Hao Jingfeng *et al.* The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological

- risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(12): 3432-3440 (in Chinese with English abstract). [胡和兵, 刘红玉, 郝敬峰等. 流域景观结构的城市化影响与生态风险评价. 生态学报, 2011, **31**(12): 3432-3440.]
- [9] Zhang Xuebin, Shi Peiji, Luo Jun *et al.* The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: A case study on Shiyang River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(3): 410-419 (in Chinese with English abstract). DOI 10.11849/zrzyxb.2014.03.005. [张学斌, 石培基, 罗君等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析——以石羊河流域为例. 自然资源学报, 2014, **29**(3): 410-419.]
- [10] Cook RB, Suter GW II, Sain ER. Ecological risk assessment in a large river reservoir: 1. Introduction and background. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, **18**(4): 581-588. DOI 10.1002/etc.5620180402.
- [11] Wallack RN, Hope BK. Quantitative consideration of ecosystem characteristics in an ecological risk assessment: A case study. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, **8**(7): 1805-1814. DOI 10.1080/20028091056863.
- [12] Landis WG, Kelly L. Regional scale ecological risk assessment: Using the relative risk model. Boca Raton, USA: CRC Press, 2005: 195-230.
- [13] Landis WG, Wiegiers JK. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2007, **13**(1): 25-38. DOI 10.1142/S0217751X97001262.
- [14] Liu SL, Cui BS, Dong SK *et al.* 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. DOI 10.1016/j.ecoleng.2008.07.006.
- [15] Yang Pei, Li Tianhong, Mao Xiaoling. Ecological risk analysis for Shenzhen river watershed based on PESR Model. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, **47**(4): 727-734 (in Chinese with English abstract). [杨沛, 李天宏, 毛小菱. 基于 PESR 模型的深圳河流域生态风险分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, **47**(4): 727-734.]
- [16] Fu Zaiyi, Xu Xuegong, Lin Huiping *et al.* Regional ecological risk assessment of in the Liaohe River Delta wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(3): 365-373 (in Chinese with English abstract). [付在毅, 许学工, 林辉平等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. 生态学报, 2001, **21**(3): 365-373.]
- [17] Gao Yongnian, Gao Junfeng, Xu Yan. Response of landscape ecological risk to land use change in level aquatic eco-functional regions in Lake Taihu watershed. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(7): 1088-1096 (in Chinese with English abstract). [高永年, 高俊峰, 许妍. 太湖流域水生生态功能区土地利用变化的景观生态风险效应. 自然资源学报, 2010, **25**(7): 1088-1096.]
- [18] Xu Qiang, Chen Lai. Study on quantitative evaluation of ecological carrying capacity in Chaohu Basin. *Soil and Water Conservation in China*, 2010, (6): 52-55 (in Chinese with English abstract). [徐强, 陈来. 巢湖流域生态承载力定量评价研究. 中国水土保持, 2010, (6): 52-55.]
- [19] Wang Chuanhui, Guo Zhenya, Gao Chao *et al.* Changes of landscape pattern in the Chaohu Lake Basin based on remote sensing. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(12): 1586-1592 (in Chinese with English abstract). [王传辉, 郭振亚, 高超等. 基于遥感的巢湖流域景观格局变化研究. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(12): 1586-1592.]
- [20] Li Yunsheng, Zhou Guangjin, Liang Tao *et al.* Study of land use change on the gains and losses of ecosystem service function values of Chaohu Basin. *Geographical Research*, 2009, **28**(6): 1656-1664 (in Chinese with English abstract). [李云生, 周广金, 梁涛等. 巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益. 地理研究, 2009, **28**(6): 1656-1664.]
- [21] Yan Wujia, Wang Xinyuan. Preliminary study on non-point sources pollution in the Chaohu Lake drainage basin. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, **18**(3): 263-267 (in Chinese with English abstract). DOI 10.13249/j.cnki.sgs.1998.03.011. [阎伍玖, 王心源. 巢湖流域非点源污染初步研究. 地理科学, 1998, **18**(3): 263-267.]
- [22] Su Haimin, He Aixia. Land use based on RS and geostatistics in Fuzhou City. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(1): 91-99 (in Chinese with English abstract). [苏海民, 何爱霞. 基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析. 自然资源学报, 2010, **25**(1): 91-99.]
- [23] Wang Juan, Cui Baoshan, Liu Jie *et al.* 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 (in Chinese with English abstract). DOI 10.13671/j.hjkxb.2008.02.007. [王娟, 崔保山, 刘杰等. 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): 269-277.]
- [24] Li Xiaoyan, Zhang Shuwen. 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 (in Chinese with English abstract). DOI 10.13866/j.azr.2005.01.011. [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.]
- [25] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming *et al* eds. The principle and application of landscape ecology. Beijing: Science Press, 2001: 58(in Chinese). [傅伯杰, 陈利顶, 马克明等. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001: 58.]
- [26] Nusser M. Understanding cultural landscape transformation; a re-photographic survey in Chitral, eastern Hindukush, Pakistan. *Landscape & Urban Planning*, 2001, **57**(3/4): 241-255. DOI 10.1016/S0169-2046(01)00207-9.
- [27] Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu *et al*. Review on landscape ecological risk assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(4): 664-677(in Chinese with English abstract). [彭建, 党威雄, 刘焱序等. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, **70**(4): 664-677.]
- [28] Huang Mui, He Xiang, Wu Di *et al*. Landscape pattern and its ecological risk assessment in Chaohu Lake Basin. *Soils*, 2015, **47**(5): 994-1000(in Chinese with English abstract). DOI 10.13758/j.cnki.tr.2015.05.029. [黄木易, 何翔, 吴迪等. 巢湖流域土地利用程度变化及其空间异质性分析. 土壤, 2015, **47**(5): 994-1000.]
- [29] Yue Yiping. Gain and loss of Hefei city landscape construction. *Jianghuai Tribune*, 2010, (2): 181-187(in Chinese with English abstract). DOI 10.16064/j.cnki.cn34-1003/g0.2010.02.017. [岳毅平. 合肥市城市园林建设得失论. 江淮论坛, 2010, (2): 181-187.]