

# 基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估

袁玉,方国华,陆承璇,颜敏

(河海大学水利水电学院,南京 210098)

**摘要:** 以秦淮河流域为例,构建HEC-HMS模型,采用统计学分析方法,在两期历史景观分布情况下,研究洪水特征值(洪量、洪峰)与不同景观的景观格局指数间的响应关系,提出并构建基于景观格局的洪水生态风险(洪水—景观生态风险)指数,结合空间分析方法,进行全流域风险的时空变化分析和特征子流域间的对比分析。结果表明:不同类型景观的景观格局与洪水特征值间均具有一定程度的响应关系,景观类型不同,其响应指标与程度不同;2003—2017年,研究区风险程度有所增加,空间差异明显;景观格局对区域洪水影响显著,避免景观的大面积聚集发展,增加各类景观周边的景观丰富度,提高景观间的接触面积,有助于减弱城市化进程中建设用地景观面积增加带来的洪水危害,发挥景观的生态正效应。

**关键词:** 景观格局; Spearman秩相关性分析; 多元线性回归分析; HEC-HMS水文模型; 克里格插值; 洪水—景观生态风险指数

DOI: 10.11821/dlxb202009008

## 1 引言

1960年至今,世界人口增加了30亿,联合国人口组织预测2100年将进一步增加至112亿<sup>[1]</sup>。巨大的人口增长促进了全球范围内城市化进程的高速推进。在城市化进程中,建设用地景观面积迅速增加,其他各类景观面积与分布情况也会相应发生变化,最终导致区域整体景观格局(景观水平)和各类景观内部格局(斑块类型水平)的变化,主要反映在景观的形状、结构、连通性等方面<sup>[2]</sup>。Dadashpoor等<sup>[3]</sup>和Feng等<sup>[4]</sup>分别对大不列颠都市区和上海市开展了城市化景观格局变化的特征与规律研究。

城市化会显著影响流域水文过程<sup>[5]</sup>,且对短时间尺度水文过程的影响更为明显<sup>[6]</sup>,意味着城市化作用下,洪水响应程度相较于长系列年径流响应等更为显著。特别是在经济发达地区,密集的人口、高度发展的经济使得城市化带来的区域洪水问题更加严重<sup>[7]</sup>。在全球范围内,已有不少专家学者探讨了城市化对洪水响应规律,大多数研究结果表明,城市化显著增加了洪量和洪峰,且洪量和洪峰随着城市化率的提高而表现出增加趋势<sup>[8]</sup>。城市化所导致景观格局的变化也显著影响流域的水文过程<sup>[9-10]</sup>。林炳青等<sup>[11]</sup>从景观水平角度出发,探讨了晋江流域景观格局对洪枯径流的影响机制,发现景观格局对洪水径流影响显著。江颂等<sup>[12]</sup>分析了景观格局变化对黑河中游流域产流的影响,发现在景观

收稿日期: 2019-05-15; 修订日期: 2020-04-05

**基金项目:** 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17\_0427); 中央高校基本科研业务费(2017B686X14); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 [Foundation: Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province, No.KYCX17\_0427; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.2017B686X14; The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions]

**作者简介:** 袁玉(1992-),男,安徽淮南人,博士生,研究方向为景观生态风险评估,土地资源与水源利用与评价。

E-mail: yuanyu@hhu.edu.cn

尺度上景观类型越丰富、分布越均匀,越有利于产流,反之则抑制产流。Kim等<sup>[13]</sup>以美国德州4大都市圈为研究区,探讨了城市绿地景观格局与区域径流过程的响应关系,提出具有较高聚集度与连通性的城市绿地景观可以在洪峰调解中发挥生态正效应。

基于上述分析,目前城市化景观格局变化的研究主要集中在区域景观格局变化的特征和规律研究;城市化水文效应的研究主要集中于城市化进程中景观面积变化与水文过程的响应关系研究,部分研究者分析了区域整体景观格局变化对流域水文过程的影响,或针对城市化进程中特定景观类型分析了其格局洪水径流效应。然而,目前流域尺度下不同类型景观的内部格局特征与洪水过程之间的响应关系尚待进一步研究<sup>[14-15]</sup>。不同类型景观与洪水过程之间的响应关系是否一致?如何在流域尺度下针对不同景观类型定量分析其内部格局特征对洪水过程的影响程度?需进一步探讨分析。

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与生态系统间存在不利影响的可能性和危害程度,极端气候、景观变化等自然和人类活动带来的干扰是区域生态风险评价关注的重点<sup>[16]</sup>。Peng等<sup>[17]</sup>对深圳市、Jin等<sup>[18]</sup>对德令哈市,分别开展了针对景观格局变化的生态风险评价。随着城市化进程的不断推进,区域景观格局特征的复杂程度逐渐提高,受格局影响的生态过程、功能也不断发生变化,影响着区域的生态安全<sup>[19]</sup>。

城市化进程中水文过程的剧烈响应与景观格局的显著变化,景观格局与水文过程间的相关性,及景观格局变化带来的生态风险问题,使得城市化背景下的洪水灾害与区域生态风险间存在必然的联系。但目前尚没有明确提出如何分析“景观格局—洪水灾害—生态风险”之间的关系<sup>[20]</sup>。因此,在城市化进程中,如何在流域尺度构建三者之间的联系?如何根据景观格局特征定量评估洪水生态风险水平?需进一步深入研究和探讨。

本文以秦淮河流域为例,构建HEC-HMS水文模型,模拟研究区两期景观分布情况下的洪水过程,采用Spearman秩相关性分析与多元线性回归分析方法,研究洪水特征值与景观格局指数的响应关系,提出并构建洪水—景观生态风险指数,利用地统计学方法计算洪水—景观生态风险,并进行全流域尺度的时空变化分析与子流域尺度的对比分析。

## 2 研究区概况与数据预处理

### 2.1 研究区概况

秦淮河流域(31°34'N~32°10'N, 118°39'E~119°19'E)位于长江三角洲地区长江南京段南岸,流域面积2631 km<sup>2</sup>,主要有句容河、溧水河两大河源,两源在江宁区西北村汇合为秦淮河干流。流域出口位于研究区西北角南京市主城区。研究区属于半湿润季风气候区,多年平均气温15.4℃,多年平均降雨1047 mm。研究区地势相对平坦,四周以丘陵为主,中部多为低洼平原。主要土地利用类型为旱地、水田、建设用地等。由于上述气候与下垫面特征,研究区雨季(5—9月)洪水灾害频发<sup>[21-22]</sup>,洪水源短流急、汇流快、洪峰高<sup>[22-23]</sup>。秦淮河流域位置及子流域划分如图1所示。

### 2.2 数据预处理

本文所使用数据的基本情况如表1所示。以研究区遥感影像为基础数据源,采用ENVI软件并结合历史图集、实地调研进行景观监督分类。根据研究区景观特点,同时参考全国土地利用分类方法,将研究区的景观类型划分为建设用地、旱地、水田、草地、林地、水体6类。其中秦淮河流域2003年与2017年景观分类图如图2a与图2b所示。对

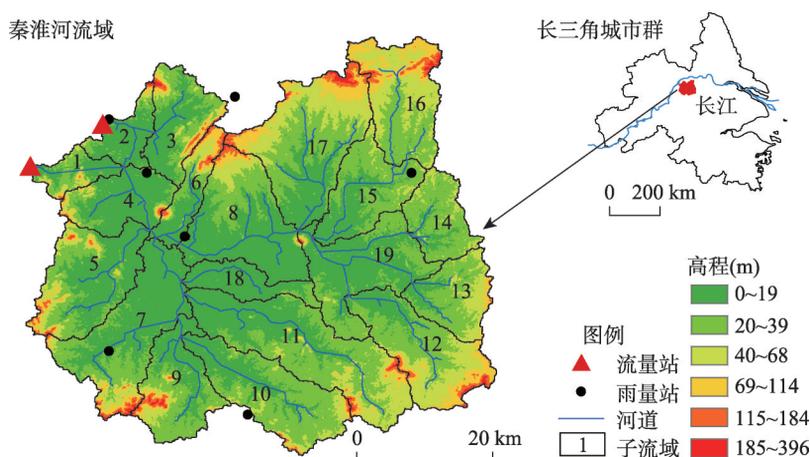


图1 秦淮河流域位置图及子流域划分

Fig. 1 Location of Qinhuai river basin and distribution of sub-basins

表1 本研究所使用数据基本情况

Tab. 1 The data used in this study

数据类型	时间(年份)	精度	来源
降雨	1986—2016	1 d	资源环境数据云平台( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> ), 南京气象局
流量	1986—2016	1 d	
太阳辐射、气温	1986—2016	1 d	世界和谐土壤数据库HWSD 1.1
土壤	2009	1 km	
数字高程	2009	30 m	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
遥感影像	1988, 1994, 1999, 2003, 2010, 2017	30 m	

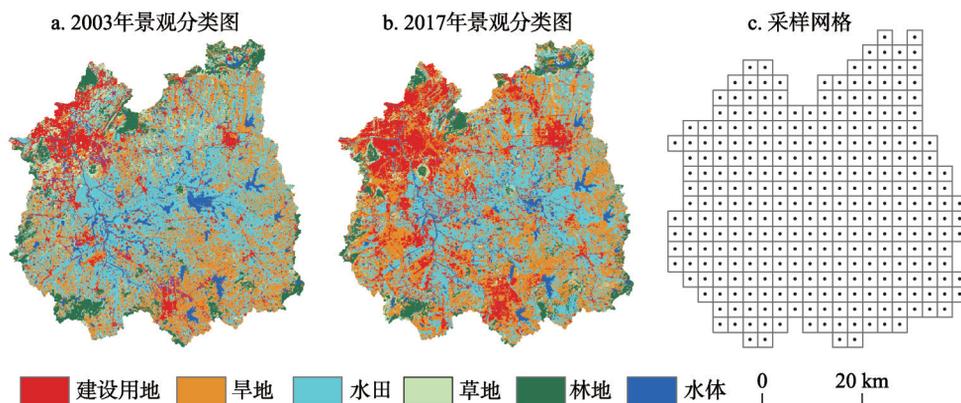


图2 2003年和2017年研究区景观分类与采样网格划分

Fig. 2 Landscape distribution maps and the samples in the study area

历史景观分类情况进行统计分析,可以得到,1988—2003年秦淮河流域建设用地百分比从4.6%增加至8.7%,到2017年增加至20.4%,可见2003年后城市化演进明显加速。同时,本文根据研究区7个雨量站与2个流量站点的实测气象水文数据,选取了62场具有不同规模与特征的洪水过程数据用于模拟研究。

### 3 研究方法

#### 3.1 洪水—景观响应关系研究

从数量、形状与结构特征3个角度选取6个斑块类型水平的景观格局指数用于量化研究区各类景观的格局特征,分别为斑块数量指数(NP)、最大斑块面积指数(LPI)、平均面积权重分维数指数(FRAC\_AM)、形状指数(LSI)、散布与并列指数(IJI)、聚集度指数(COHESION),各指数的具体计算方法与生态学意义参见文献<sup>[24]</sup>。

本文具有6期秦淮河流域历史景观分类图,根据数据预处理结果,2003年之后的城市化更为显著,且为反映景观格局在较长时间段内的变化特征,本文选取2003年与2017年进行景观格局变化特征分析。

采用Spearman秩相关性分析,计算城市化进程中,研究区19个子流域在2003年与2017年两种景观格局情景下,流域62场洪水的洪量、洪峰变化率与不同景观的景观格局指数变化率的秩相关系数( $\alpha$ ),根据 $\alpha$ 的计算结果,确定不同景观与洪量、洪峰具有相关性的景观格局指数。 $\alpha$ 取值范围为[-1, 1],当其绝对值超过0.4,则认为所研究的指标间具有中等程度以上的相关性<sup>[9]</sup>。

根据相关性分析结果,以研究区19个子流域洪量、洪峰变化率为因变量,以各类景观类型通过相关性分析筛选出的景观格局指数为自变量,进行多元线性回归分析,以多元线性回归分析结果中的标准化回归系数( $\beta$ )为度量,量化相关性较强的景观格局指数对洪水的影响程度。

由于秦淮河流域河道堤防、闸、坝等水利工程的修建,本文期内流域尺度的水体景观面积、分布、结构等总体保持不变<sup>[25]</sup>,因此本文主要分析城市化进程中,建设用地、旱地、水田、林地、草地5类景观的格局变化与洪水的响应关系。

#### 3.2 HEC-HMS模型构建与参数率定

本文具有秦淮河流域两个出口流量站的实测流量数据,无各子流域出口的实测流量数据,为建立3.1节中景观结构指数与洪水特征值间的响应关系,本节构建研究区HEC-HMS水文模型,用于模拟各子流域的洪水过程。

HEC-HMS模型系统主要包括气象模型、流域模型及控制模块3部分<sup>[23]</sup>。气象模型用于分析处理气象数据,建立气象数据同各子流域之间的关系。本文根据研究区已有的7个雨量站,构建泰森多边形,用以确定子流域和雨量站的匹配情况。流域模型将子流域中降雨径流的形成过程划分为4个部分,本文分别采用NRCS-CN曲线法、SCS单位线法、指数退水模型、马斯京根法,模拟计算损耗产流、坡面汇流、基流、河道汇流。研究区HEC-HMS模型框架如图3所示。

本文采用4个指标进行模型的模拟精度评价,分别为相关系数( $R$ )、Nash-Sutcliffe效率系数( $NSE$ )、洪量相对误差( $D_v$ )与洪峰相对误差( $D_p$ )。当 $R$ 与 $NSE$ 大于0.75, $D_v$ 与 $D_p$ 低于30%时,认为模拟结果较好<sup>[23]</sup>。模型需要率定的参数主要有流域滞时、基流阈值峰值比重、退水指数、蓄量常数及流量比重,采用单变量梯度搜索算法进行参数率定。

选用11场具有不同规模与特征的洪水事件进行模型的率定与验证,其中率定期与验证期各场次洪水对应的景观分布年份、模拟精度评价结果如表2所示,模拟和实测流量过程线对比如图4所示。率定期与验证期11场洪水事件的模拟洪水过程线与实测洪水过程线均基本吻合,且 $R$ 、 $NSE$ 均超过0.75, $D_v$ 、 $D_p$ 均低于30%,因此本文构建的HEC-HMS模型适用于研究区洪水过程模拟。

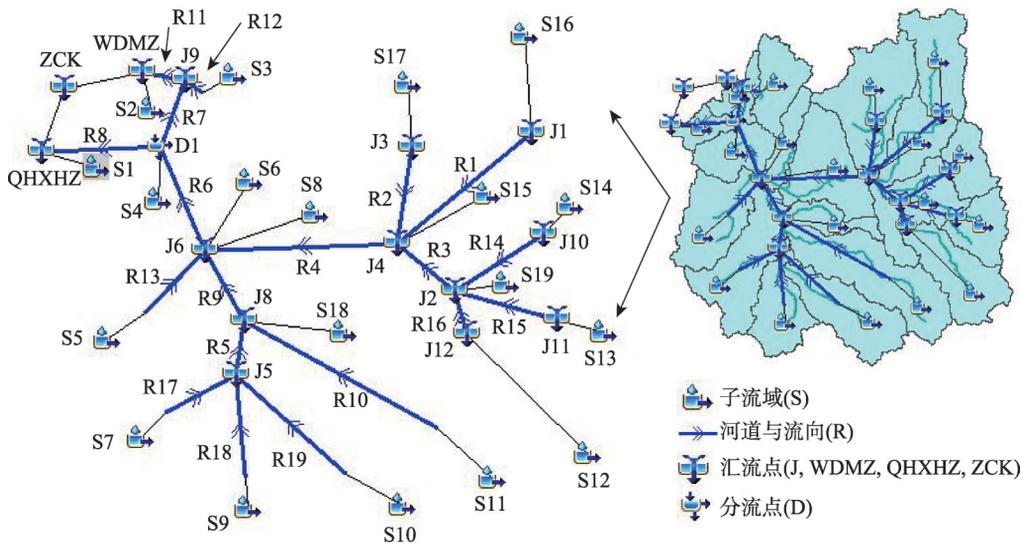


图3 研究区HEC-HMS模型框架图

Fig. 3 Sketch map of HEC-HMS model

表2 HEC-HMS模型模拟11场洪水的评价指标结果

Tab. 2 Summary of calibration and validation results for simulation at daily step

	洪号	景观分布年份	R	NSE	D <sub>v</sub> (%)	D <sub>r</sub> (%)
率定期	19870630	1988	0.96	0.91	3.53	-9.23
	19930618	1994	0.94	0.86	25.44	0.39
	20030626	2003	0.98	0.87	22.88	12.84
	20080615	2010	0.99	0.99	7.66	3.85
验证期	19870819	1988	0.95	0.81	18.27	13.64
	19910629	1988	0.83	0.80	-3.81	20.21
	19960623	1994	0.99	0.89	29.32	2.60
	19990622	1999	0.95	0.82	29.25	7.87
	20020618	2003	0.98	0.96	-0.29	-6.95
	20060718	2003	0.98	0.89	21.11	19.50
	20150712	2017	0.95	0.88	0.77	-7.36

### 3.3 洪水—景观生态风险指数构建

3.3.1 洪水—景观响应度指数 洪水—景观响应度指数 ( $E_i$ ) 用来反映洪水对不同景观的格局变化的响应程度。区域景观内部格局变化带来的洪水响应程度越大, 洪水生态风险越大, 结合3.2节中响应关系的研究结果, 采用景观格局的变化程度反映该响应度:

$$\begin{cases} E_i = \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\lambda_{ij}^v + \lambda_{ij}^p}{2} \times U_{ij} \\ \lambda_{ij}^v = \frac{|\beta_{ij}^v|}{\sum_{j=1}^{m_i} |\beta_{ij}^v|}, \lambda_{ij}^p = \frac{|\beta_{ij}^p|}{\sum_{j=1}^{m_i} |\beta_{ij}^p|} \\ U_{ij} = \text{Rescaling} \left( X_{ij}^{(-1)^r} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $X_{ij}$  为景观  $i$  的第  $j$  种景观格局指数,  $1 \leq j \leq m_i$ ;  $m_i$  为景观  $i$  对应的相关性较强的景

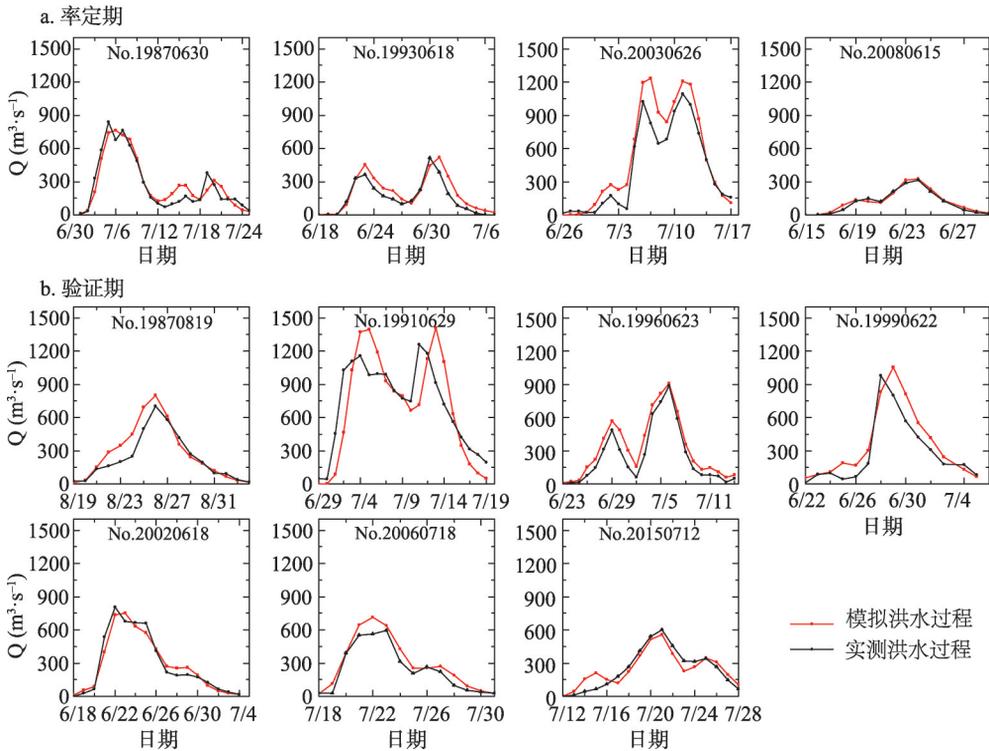


图4 研究区率定期与验证期场次洪水模拟与实测结果  
Fig. 4 The calibration and validation results of HEC-HMS model

观格局指数的数量； $\beta_{ij}^V$ 、 $\beta_{ij}^P$  分别为洪量、洪峰对应的景观  $i$  的第  $j$  种景观格局指数对应的标准化回归系数； $\lambda_{ij}^V$ 、 $\lambda_{ij}^P$  分别为洪量、洪峰对应的景观  $i$  的第  $j$  种景观格局指数的权重； $\sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} = 1$ ； $U_{ij}$  为  $X_{ij}^{(-1)q}$  归一化后的结果，考虑研究区不同景观的水文效应，即建设用地面积的增加会导致洪量、洪峰增加，其余景观面积增加影响相反<sup>[23]</sup>，因此本文对于建设用地，当  $\beta_j < 0$  时， $q = 1$ ，当  $\beta_j \geq 0$  时， $q = 2$ ，对于其他景观，当  $\beta_j > 0$  时， $q = 1$ ，当  $\beta_j \leq 0$  时， $q = 2$ 。

**3.3.2 洪水—景观敏感度指数** 洪水—景观敏感度表示不同景观系统内部格局对洪水的敏感程度，敏感度越大，则说明该种景观类型越易产生洪水，洪水—景观生态风险越大。本文将6类景观类型按其敏感度进行赋值：建设用地6，水田4，旱地3，林地、草地均为2<sup>[9-10]</sup>，归一化处理后得到各景观类型的洪水—景观敏感度指数  $F_i$ 。

**3.3.3 洪水—景观生态风险指数** 从区域生态系统的景观格局出发，引入景观组分的面积比重，构建了由洪水—景观响应度指数和洪水—景观敏感度指数构成的洪水—景观生态风险指数，以建立景观格局与区域综合洪水生态风险之间的联系：

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

式中： $ERI_k$  为第  $k$  个采样区的洪水—景观生态风险指数； $A_{ki}$  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； $E_{ki}$  为第  $k$  个采样区第  $i$  类景观的洪水—景观响应度指数。

### 3.4 空间分析方法

为了将洪水—景观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,本文将研究区划分为303个3 km×3 km的采样方格(生态风险小区),分别计算各生态风险小区的风险值,并赋值给网格中心点。采样网格划分如图2c所示。

区域生态风险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。本文采用地统计学中半方差分析中的克里格插值<sup>[26]</sup>进行洪水—景观生态风险的空间化。

## 4 研究结果

### 4.1 洪水—景观响应研究

Spearman秩相关性分析结果显示(图5),对于不同类型景观,与洪量、洪峰具有较强相关性的景观格局指数不同。根据图5a,对于建设用地,洪量与LPI之间的相关系数箱型图的下边缘为0.45,与IJI之间的相关系数箱型图的上边缘为-0.59,绝对值均超过0.4,与FRAC\_AM之间的相关系数箱型图的下边缘为0.29,但下四分位数为0.42,超过0.4,可以保证大部分场次洪水的分析结果满足要求;而NP、LSI、COHESION无法满足箱型图的边缘或四分位数的绝对值超过0.4,无法保证大部分场次洪水的分析结果满足要求。因此,建设用地景观与洪量具有较强相关性的景观格局指数为LPI、FRAC\_AM、IJI。同样可以得出,旱地为IJI;水田为NP、IJI;林地为NP、LSI、IJI、COHESION;草地为NP、IJI。对比图5a与图5b,可以得出,对于同种景观,尽管箱型图的统计结果略有差异,但与洪量、洪峰具有较强相关性的景观格局指数是相同的。

景观格局指数与洪量、洪峰的多元线性回归分析获得的标准化回归系数( $\beta$ )统计结果箱型图显示(图6),各类景观相关性较强的格局指数对洪量、洪峰的影响程度。

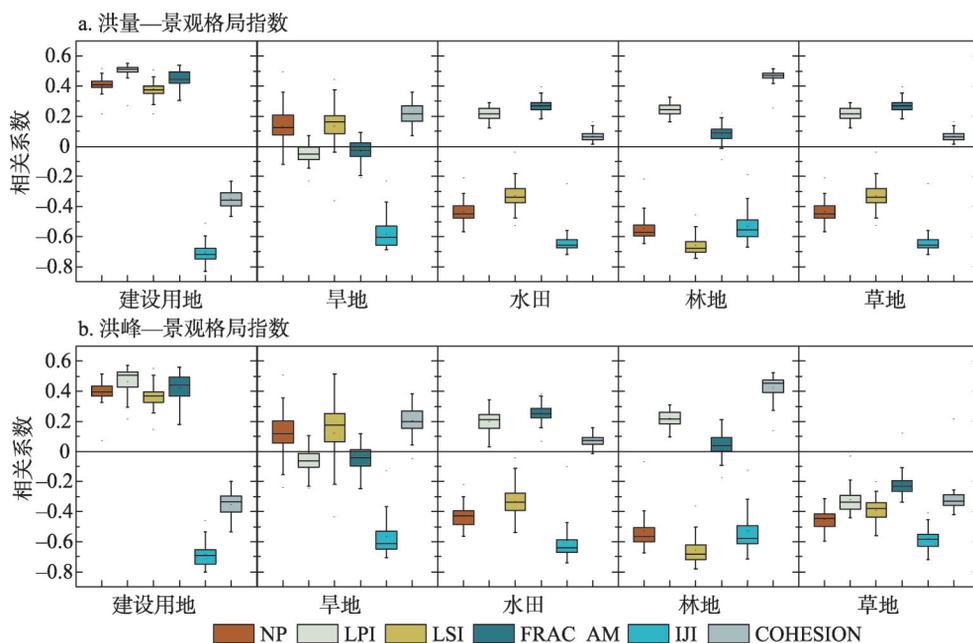


图5 洪水—景观相关系数箱型图

Fig. 5 Correlation analysis results of flood-landscape

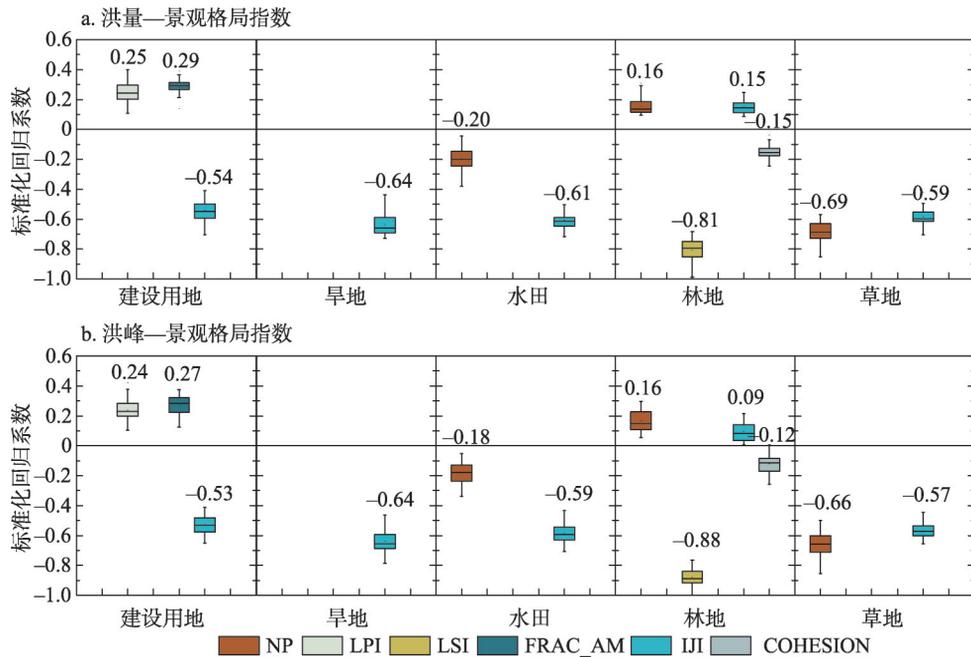


图6 洪水—景观标准化回归系数箱型图

Fig. 6 Regression analysis results of flood-landscape

以建设用地为例，对于洪量  $\beta_{LPI}=0.25$ 、 $\beta_{FRAC\_AM}=0.29$ 、 $\beta_{IJI}=-0.54$ ，对于洪峰  $\beta_{LPI}=0.24$ 、 $\beta_{FRAC\_AM}=0.27$ 、 $\beta_{IJI}=-0.53$ ，说明随着城市化进程中建设用地面积的增加，建设用地景观LPI与FRAC\_AM的增加、IJI的减小会促使洪量与洪峰的增大，根据各景观指数的生态学意义<sup>[24]</sup>，LPI、FRAC\_AM的增加，与IJI的减小，分别反映建设用地景观连通性的增加，景观边界复杂程度的增加，与其他类型斑块接触面积的减少。在城市化进程中，由于建设用地面积的增加与道路的修建等，建设用地斑块间连通性增强；建设用地景观向其他类型景观中的扩展，使建设用地景观的边界复杂程度增加；建设用地斑块由零散向集中分布转变，形成了大面积的建设用地斑块，同时建设用地周边景观类型减少且趋于简单化。这些建设用地格局特征的变化，促使建设用地景观产流量的增加、提高汇流效率，水流在建设用地上汇流演进受不同景观间的摩擦延滞作用减弱，减少了下渗等汇流演进过程中的损耗。同时，根据 $|\beta|$ 的取值大小可以得出，相较于LPI与FRAC\_AM，IJI指数反映的建设用地景观结构特征对洪量与洪峰的影响程度均更为显著。

#### 4.2 洪水—景观生态风险时空变化

根据4.1节得出的洪水—景观响应关系，利用3.3节中构建的洪水—景观生态风险指数，计算各生态风险小区的洪水—景观生态风险值，统计结果发现，2003年各生态风险小区的ERI的均值为2.13，2017年的ERI的均值为2.74，且303个生态风险小区中，68.2%的生态风险小区的风险值增加，31.8%的生态风险小区的风险值减少。总体而言，2017年秦淮河流域洪水—景观生态风险较2003年有所增加。

利用地统计学方法，在洪水—景观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，并通过不同半变异函数模型模拟结果的相互比较，确定采用球状模型进行洪水—景观生态风险空间结构拟合；其次，利用克里格插值法编制了研究区2003年与2017年洪水—景观生态风险图，并根据2003年与2017年的

ERI取值范围, 将其划分为8个等级区间, 即 (0, 1]、(1, 2]、(2, 3]、(3, 4]、(4, 5]、(5, 6]、(6, 7]、(7, +∞], 分别对应1级至8级风险水平, 如图7a和图7b所示; 同时绘制了2017年相较于2003年洪水—景观生态风险空间变化 ( $\Delta$ ERI) 图, 如图7c所示。

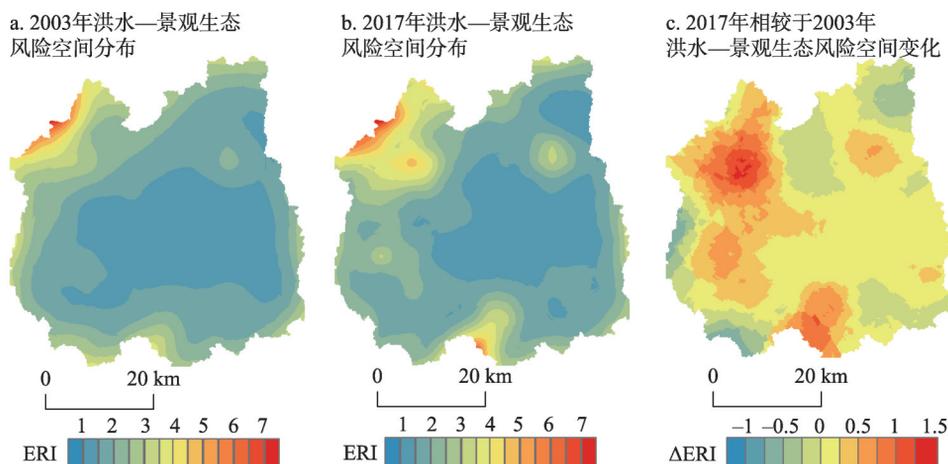


图7 2003年与2017年洪水—景观生态风险空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of flood-landscape ecological risk for 2003 and 2017

根据图7a, 2003年秦淮河流域4级及以上风险区主要分布于下游出口处的南京市主城区, 及位于上游的溧水市区与句容市区的部分区域, 其余地区以4级以下风险为主, 总体而言, 2003年的洪水—景观生态风险以4级以下风险为主。根据图7b, 2017年流域4级及以上风险区的面积显著增加, 其增加模式主要为在2003年4级及以上风险区的基础上向外缘扩展, 但总体而言, 2017年秦淮河流域的洪水—景观生态风险依然以4级以下风险为主。根据图7c, 2017年相较于2003年, 洪水—景观生态风险增加的区域主要集中在6个地区, 分别为东山村、百家湖—九龙湖地区、禄口村、禄口机场区域、溧水市市区、句容市市区。上述结果也反映了研究区洪水—景观生态风险分布的空间异质性。

#### 4.3 典型子流域洪水—景观生态风险对比分析

根据3.3.3节所构建的洪水—景观生态风险指数的计算方法, 景观面积会对洪水—景观生态风险产生影响, 为进一步探讨景观格局对区域洪水—景观生态风险空间分布的影响, 从控制面积变量的角度出发, 本节选取总面积及各类景观面积比例均近似的2017年秦淮河流域7号 (193 km<sup>2</sup>) 与8号 (189 km<sup>2</sup>) 子流域进行研究。7号与8号子流域的景观分布与洪水—景观生态风险空间分布如图8所示。

根据图8a, 7号子流域的建设用地、水田均集中分布于中上部地区, 旱地大部分集中分布于中部地区, 小部分零散分布于下部地区。根据图8c, 相较于7号子流域, 8号子流域的建设用地、水田、旱地3类主要景观在上部、中部及下部地区均有分布, 相对较为离散。根据图8b与图8d, 统计7号与8号子流域洪水—景观生态风险的均值分别为2.24和1.60, 总体而言, 7号子流域风险略高于8号子流域, 但7号与8号子流域各类景观面积比例基本一致, 这也说明了景观格局对洪水生态风险会产生影响。7号子流域风险较高的区域主要集中于中部与西南部区域, 中部地区也为建设用地聚集发展的地区, 西南部地区为秦淮河流域边缘, 采样网格中空白区域较多, 计算误差较大, 故不予考虑。8号子流域风险较高的区域主要集中于西北部地区, 该地区也为建设用地的小规模聚集区, 但8号子流域中下部建设用地的主要聚集区, 风险值却相对较低。

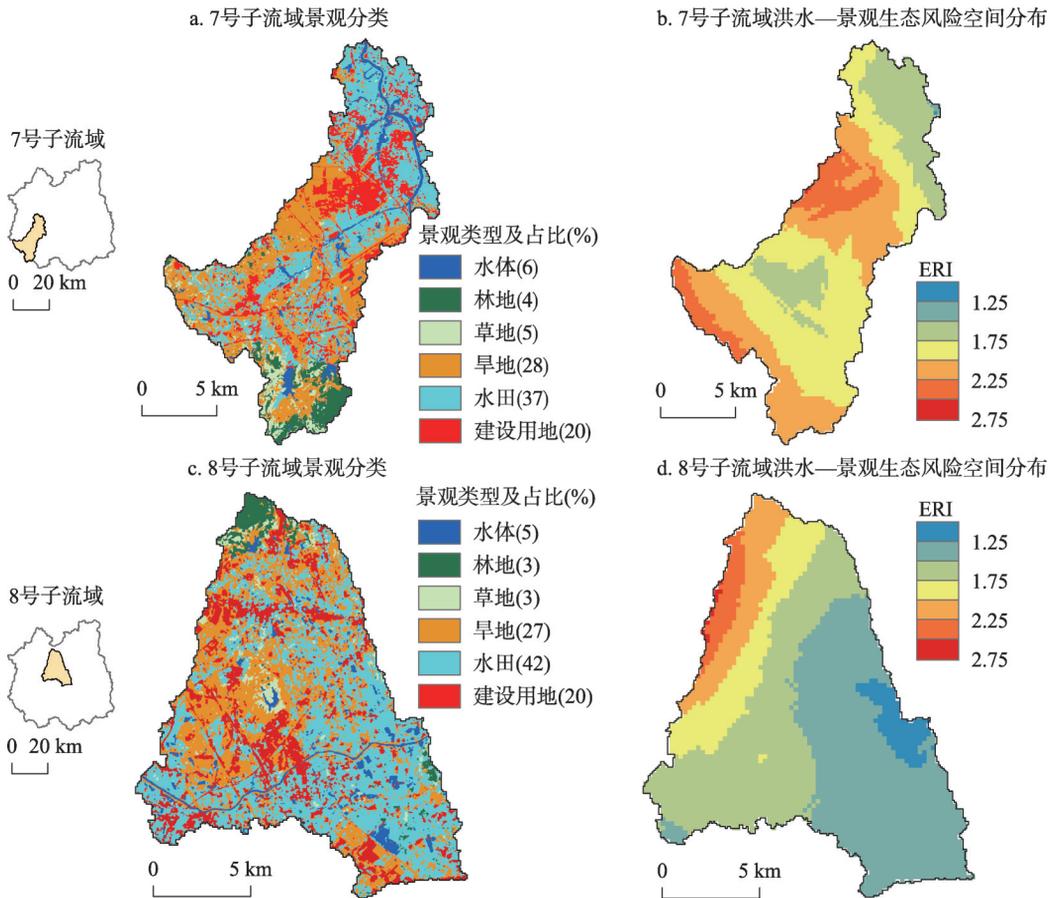


图8 7号与8号子流域的景观分布与洪水—景观生态风险

Fig. 8 Landscape and flood-landscape ecological risk distribution of No.7 and No.8 sub-basins

根据上述对比, 在各类景观面积基本一致的条件下, 景观结构会对区域洪水生态风险产生重要影响。结合4.2洪水—景观响应关系研究结果, 在区域景观的规划建设, 尽可能避免景观的大面积聚集发展, 增加各类景观周边的景观丰富度, 提高景观间的接触面积, 有助于减弱城市化进程中, 建设用地景观面积增加带来的洪水生态风险的增大, 发挥景观的生态正效应。

## 5 结论

本文构建HEC-HMS模型, 模拟得到研究区2003年与2017年两期景观分布情况下的洪水过程, 并采用Spearman秩相关性分析与多元线性回归分析方法, 定量分析了洪水特征值与不同类型景观的景观格局指数间的响应关系, 同时, 提出并构建了洪水—景观生态风险指数, 运用地统计学方法, 量化并空间化研究区洪水—景观生态风险, 并进行全流域尺度的时空变化分析与子流域尺度的对比分析。主要结论如下:

(1) 不同类型景观的景观格局与洪水特征值间均具有一定程度的响应关系, 景观类型不同, 景观格局与洪水特征值的响应指标与程度不同。秦淮河流域建设用地景观与洪水特征值具有较强相关性的景观格局指数为LPI、FRAC\_AM、IJI; 旱地为IJI; 水田为

NP、IJI; 林地为NP、LSI、IJI、COHESION; 草地为NP、IJI。以建设用地为例, 随着城市化进程中建设用地面积的增加, 建设用地景观LPI与FRAC\_AM的增加、IJI的减小会促使洪量与洪峰的增大, 且相较于LPI与FRAC\_AM, IJI指数所反映的建设用地景观结构特征对洪水的影响程度更为显著。

(2) 2003—2017年, 秦淮河流域洪水—景观生态风险有所增加, 且空间差异明显, 研究区洪水—景观生态风险较高区域主要集中于中下游地区、句容市市区和溧水市市区。

(3) 在各类景观面积比例基本一致的情况下, 景观结构会对区域洪水产生重要影响, 在区域景观的规划建设中, 尽可能避免景观的大面积聚集发展, 增加各类景观周边的景观丰富度, 提高景观间的接触面积, 有助于减弱城市化进程中建设用地景观面积增加带来的洪水危害, 发挥景观的生态正效应。

为了降低城市化过程中景观格局变化带来的洪水生态风险, 在城市化的进程中, 需要统一、长远的规划来指导建设, 使城市化建设在一定的框架内进行, 而不是大规模、随机、分散的建设。同时, 对于不同类型的景观, 应采取不同的格局规划模式, 以充分发挥各类景观的生态正效应。例如, 部分研究者提出的相对零散分布且相互连通的绿地基础设施可以在区域景观洪水生态风险控制中发挥积极作用<sup>[27-28]</sup>。一方面, 绿色基础设施有助于吸收和储存雨水, 从而减少地表径流, 缓解洪水; 另一方面, 它可以通过连接不同的绿地斑块, 将绿地景观与其他景观连接起来, 提高景观的连通性和多样性。

本文的研究成果可以为城市化背景下流域景观与防洪规划提供新的视角, 有助于景观规划部门、水利部门、生态环境部门等评估区域景观格局变化对洪水生态风险的综合影响, 为区域景观规划、防洪规划、生态保护等提供参考。同时, 本文所构建的研究思路与方法, 可以为城市化背景下流域不同类型景观的内部格局特征与洪水过程之间的响应研究、“景观格局—洪水灾害—生态风险”之间关系研究、及洪水—景观生态风险的量化方法研究, 提供一定借鉴与参考; 同时, 也可为极端气候等其他自然和人类活动带来的干扰对区域生态风险的影响研究, 提供可行的研究思路。

## 参考文献(References)

- [1] Zlotnik H. World Urbanization: Trends and Prospects. New Forms of Urbanization. London, New York: Routledge. 2017: 43-64.
- [2] Lee Y C, Ahern J, Yen C T. Ecosystem services in peri-urban landscapes: The effects of agricultural landscape change on ecosystem services in Taiwan's western coastal plain. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139: 137-148.
- [3] Dadashpoor H, Azizi P, Moghadasi M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. *Science of The Total Environment*, 2019, 655: 707-719.
- [4] Fend Y, Liu Y, Tong X. Spatiotemporal variation of landscape patterns and their spatial determinants in Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 22-32.
- [5] Du J K, Li Q, Rui H, et al. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465(5): 127-139.
- [6] Zhou F, Xu Y P, Chen Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [7] Salvadore E, Bronders J, Batelaan O. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 62-81.
- [8] Zhang W, Villarini G, Vecchi G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 2018, 563(7731): 384-388.
- [9] Zhou Z, Li J. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 417-426.
- [10] Pend Y, Wang Q, Wang H, et al. Does landscape pattern influence the intensity of drought and flood? *Ecological Indicators*, 2019, 103: 173-181.

- [11] Lin Bingqing, Chen Xingwei, Chen Yin, et al. Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(7): 1772-1780. [林炳青, 陈兴伟, 陈莹, 等. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的SWAT模型模拟分析. *生态学报*, 2014, 34(7): 1772-1780.]
- [12] Jiang Song, Meng Jijun, Chen Yiyun. Analysis of hydrological effects of land use and landscape pattern in the middle reaches of Heihe River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(1): 64-73. [江颂, 蒙吉军, 陈亦云. 黑河中游土地利用与景观格局的水文效应分析. *中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 64-73.]
- [13] Kim H W, Park Y. Urban green infrastructure and local flooding: The impact of landscape patterns on peak runoff in four Texas MSAs. *Applied Geography*, 2016, 77: 72-81.
- [14] Li C, Zhang Y, Kharel G, et al. Impact of climate variability and landscape patterns on water budget and nutrient loads in a peri-urban watershed: A coupled analysis using process-based hydrological model and landscape indices. *Environmental Management*, 2018, 61(6): 954-967.
- [15] Xue Xinghua, Qian Hua. Advance and current core issues in riverscape ecology. *Advances in Water Sciences*, 2018, 29(6): 887-897. [薛兴华, 钱华. 河流景观生态学的发展与当前核心议题. *水科学进展*, 2018, 29(6): 887-897.]
- [16] Chen Feng, Li Hongbo, Zhang Anlu. Ecological risk assessment based on terrestrial ecosystem services in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 432-445. [陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价. *地理学报*, 2019, 74(3): 432-445.]
- [17] Peng J, Pan Y, Liu Y, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [18] Jin X, Jin Y, Mao X. Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes-Case study of Delingha City. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 185-191.
- [19] 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. [胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 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.]
- [20] Xue L, Zhu B, Wu Y, et al. Dynamic projection of ecological risk in the Manas River basin based on terrain gradients. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 283-293.
- [21] Luo Xian, Xu Youpeng. A bivariate analysis of flood risk in the middle reaches of Qinhuai River Basin. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 126-130. [罗贤, 许有鹏. 秦淮河流域中游地区两变量洪水风险分析. *自然灾害学报*, 2011, 20(4): 126-130.]
- [22] Gao Yuqin, Ye Liu, Lai Lijuan. Analysis of flood risk in Qinhuai River Basin based on G-H copula. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 172-177. [高玉琴, 叶柳, 赖丽娟. 基于G-H copula函数的秦淮河流域洪水风险分析. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 172-177.]
- [23] Fang G H, Yuan Y, Gao Y Q, et al. Assessing the effects of urbanization on flood events with urban agglomeration polders type of flood control pattern using the HEC-HMS model in the Qinhuai River Basin, China. *Water*, 2018, 10(8): 1003. Doi: 10.3390/w10081003.
- [24] Mcgarigal K. FRAGSTATS Help. Documentation for FRAGSTATS, 2014.04.
- [25] Gao Y Q, Yuan Y, Wang H Z, et al. Examining the effects of urban agglomeration polders on flood events in Qinhuai River basin, China with HEC-HMS model. *Water Science and Technology*, 2017, 75(9): 2130-2138.
- [26] Yang Yuting, Shang Songhao, Li Chao. Correcting the smoothing effect of ordinary kriging estimates in soil moisture interpolation. *Advances in Water Sciences*, 2010, 21(2): 208-213. [杨雨亭, 尚松浩, 李超. 土壤水分空间插值的克里金平滑效应修正方法. *水科学进展*, 2010, 21(2): 208-213.]
- [27] Ernstson H. The social production of ecosystem services: A framework for studying environmental justice and ecological complexity in urbanized landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 109(1): 7-17.
- [28] Su M, Zheng Y, Hao Y, et al. The influence of landscape pattern on the risk of urban water-logging and flood disaster. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 133-140.

## Flood risk assessment under the background of urbanization based on landscape ecology

YUAN Yu, FANG Guohua, LU Chengxuan, YAN Min

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper used HEC-HMS hydrological model and statistical analysis method to examine the relationship between flood eigenvalues (i.e. flood volume, peak flow) and landscape pattern indexes of different landscapes. And on the basis of the above relationships, this paper constructed a flood ecological risk index to quantitatively calculate the basin's flood-landscape ecological risk. Then, the spatio-temporal risk change analysis of the whole basin and comparative risk analysis between selected sub-basins were performed. The Qinhuai River basin was selected as the study area, and two historical landscape distributions (2003 and 2017) were used in this study. The results showed that, for different landscapes, there are certain relationships between landscape patterns and flood eigenvalues, for different landscapes, the response indexes and degrees are different. From 2003 to 2017, the flood-landscape ecological risk increased and showed significant spatial differences. Landscape patterns have significant impacts on regional floods. In urbanization process, avoiding forming large-scale landscape patches, increasing landscape abundance of landscapes, and increasing contact area between different types of landscape patches can be helpful to reduce the negative effects of the increase of urban landscape area on flood.

**Keywords:** landscape pattern; Spearman rank correlation analysis; multiple linear regression analysis; HEC-HMS hydrological model; kriging interpolation; flood-landscape ecological risk index