杭州市土地利用变化及生态风险评价

田 鹏[1], 史小丽[2], 李加林[1,3], 王丽佳[1], 刘瑞清[1]

(1. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211;
2. 宁波大学 学报编辑部, 浙江 宁波 315211; 3. 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211)

摘 要: [目的] 分析浙江省杭州市土地利用变化并对其生态风险评价,为保护该地区生态安全,合理开发土地资源和制定科学有效的规划提供理论依据。[方法] 基于杭州市土地利用格局变化,构建生态风险指数,分析生态风险的时空变化及生态风险对土地利用的响应特征。[结果] ①土地利用变化主要表现为:耕地减少和建设用地剧增;耕地、林地向建设用地转移,水域、草地向耕地、林地转移;土地利用强度减缓。②杭州市生态风险增加,生态风险值与土地利用呈明显正相关;中生态风险区占主导地位,高生态风险区主要分布在市辖区、杭州湾,西南部的淳安县中心,生态风险等级区以此为中心向周围递减。③生态风险等级以低—高等级转移为主,生态风险等级上升,年均转换速率呈下降趋势。④生态风险对土地利用变化的响应弹性时空分异较大,市区、建德市、桐庐县响应系数下降,其风险源和风险因子趋于多样化;其他单元的响应系数上升,土地利用对区域生态风险呈正响应弹性。[结论] 杭州市土地利用格局时空变化明显,土地利用的快速变化加剧了杭州市的生态风险。

关键词: 土地利用; 生态风险; 空间自相关; 弹性理论; 杭州市

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)04-0274-08 **中图分类号**: X820.4

文献参数: 田鹏, 史小丽, 李加林, 等. 杭州市土地利用变化及生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 274-281. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.044. Tian Peng, Shi Xiaoli, Li Jialin, et al. Land use change and ecological risk assessment in Hangzhou City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 274-281.

Land Use Change and Ecological Risk Assessment in Hangzhou City

TIAN Peng[1], SHI Xiaoli[2], LI Jialin[1,3], WANG Lijia[1], LIU Ruiqing[1]

(1. *Department of Geography & Spatial Information Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang* 315211, *China*; 2. *Journal Editorial Office, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang* 315211, *China*; 3. *East China Sea Institute, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang* 315211, *China*)

Abstract: [Objective] The analyses of land use change and ecological risk assessment in Hangzhou City, Zhejiang Province will provide theoretical basis for protecting ecological security, developing land resources reasonably and making scientific and effective planning. [Methods] Based on the change of land use pattern in Hangzhou City, the ecological risk index was constructed to analyze the spatial and temporal change of ecological risk and the response characteristics of ecological risk to land use. [Results] ① The land use change was mainly manifested as: the reduction of cultivated land and the increase of construction land; the transfer of cultivated land and forest land to construction land, the transfer of waters and grassland to cultivated land and forest land; the intensity of land use was slowed. ② The ecological risk increaseed in Hangzhou City, and the ecological risk value was positively correlated with land use. The moderate ecological risk area occupied the dominant position, the extremely high ecological risk areas were mainly distributed in the city area, Hangzhou Bay, southwest of the center of Chun'an County, the ecological risk area as a center to

收稿日期: 2018-03-11 **修回日期**: 2018-04-17

资助项目: 宁波市重大科技计划项目"村镇生态化治理及社区可持续发展研究集成示范"(2015C110001)

第一作者: 田鹏(1 994—),男(土家族),湖北省利川市人,硕士研究生,研究方向为土地利用与规划。E-mail: tppyang@163.com。

通讯作者: 李加林(1973—),男(汉族),浙江省台州市人,博士,教授,博士生导师,主要从事资源开发与环境保护研究。E-mail: nbnj2001@163.com。

periphery decline. ③ The ecological risk grade was mainly low-high grade transfer, the ecological risk grade rises, and the annual average conversion rate was decreasing. ④ The response of ecological risk to land use change was more flexible in spatiotemporal space, and the response coefficient of urban areas, Jiande City and Tonglu County was declining. The risk sources and risk factors tended to diversify; the response coefficients of other units increased, and land use had a positive response to regional ecological risks. [Conclusion] The spatial and temporal change of land use pattern in Hangzhou City is obvious, and the rapid change of land use aggravates the ecological risk of Hangzhou City.

Keywords: land use; ecological risk; spatial autocorrelation; elasticity theory; Hangzhou City

生态风险评价是当区域生态系统在受到外界干扰时,对区域生态环境负面效应的可能性进行评估[1-2]。在人类活动占主导地位的区域里,土地利用变化表现为人类对自然环境生态系统的影响,其结果具有区域性和累积性,可以直接作用在生态系统的结构和组成上[3-4]。因此在缺乏生态监测资料时,从土地利用变化来研究区域生态风险具有一定的理论和实践意义[5]。当前,基于土地利用的生态风险评价模式主要有两种:一是从风险源、生境和生态受体等着手,建立区域生态风险评价模型[6]。如刘晓等[7]引入相对风险模型、周启刚等[8]基于正态云模型对三峡库区重庆开县消落区、三峡库区进行生态风险评价。二是从景观生态学角度出发,构建生态风险指数进行生态风险评价[9]。如刘勇、赵岩洁、刘永超[10-12]等从景观格局的角度出发构建生态风险指数,探索土地利用变化对区域生态风险的影响。杭州市作为浙江省最大的城市,经济发达,人口密集,人类活动对土地资源的大力开发与生态环境之间产生了激烈的矛盾。本文通过分析杭州市土地利用变化并对其引起的生态风险进行评价,旨在了解社会经济发展对生态环境的影响,为保护当地的生态安全、合理开发土地资源、制定科学有效的规划提供理论依据[13]。

1　研究区概况

杭州市位于我国东南沿海,浙江省北部,地处东经 118°21′—120°30′和北纬 29°11′—30°33′之间。地形以丘陵、平原为主,土壤以红壤和水稻土为主,西部为丘陵区,地势起伏较大,东部为平原,地形平坦。河网密布,水资源充足。亚热带季风气候区,雨热充沛。生物种类繁多,物种多样性丰富。杭州市下辖 8 个市辖区、2 个县,3 个县级市,市辖区有上城区、下城区、江干区、拱墅区、西湖区、滨江区、萧山区、余杭区,2 个县为淳安县、桐庐县,3 个县级市为临安市、建德市、富阳市。杭州开发历史悠久,是浙江省重要的经济、政治、文化、交通、教育、金融中心,城市化水平高,人类活动对土地开发利用程度强。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

以浙江省 1995, 2005, 2015 年 3 个时期的 LandsatTM/OLI 遥感影像为基础,在地理空间数据云获取,空间分辨率均为 30 m,每个时期包括轨道号为 118—39,119—39,119—40,120—39 和 120—40 共 5 景影像,利用 ENVI 5.0 遥感软件对各期影像校正、配准、图像拼接等操作,并结合杭州市各地级市的行政边界图对影像进行裁剪,获得研究区范围。最后对遥感影像进行土地利用类型的目视解译和人机交互解译,经检验精度均在 0.87 以上,符合要求,得到研究区各时期的土地利用数据[14]。根据全国土地资源分类系统和研究区内的实际情况,把研究区分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地 6 种土地利用类型[15]。

2.2　研究方法

2.2.1　*土地利用动态分析*　借助转移矩阵来反映杭州市 1995—2015 年土地利用的转化数量、速率和方向[16]。土地利用动态度包括单一和综合土地利用动态度,分别表示土地利用类型的数量变化情况和整体情况,计算公式参考文献[17]。

2.2.2　*生态风险指数*　不同景观,维护生态系统的性能各异,自身应对外界干扰的能力差异较大,从景观格局的角度构建生态风险评价模型[18-19]。引入景观干扰度指数、脆弱度指数来建立损失度指数(R_i),来反映在外界影响下各景观类型所受到的风险程度[20-21]。计算公式为:

$$R_i = E_i \cdot F_i \tag{1}$$

式中:R_i——景观损失度指数;E_i——景观干扰度指数;F_i——景观脆弱度指数。

景观干扰度指数(E_i)表示各种景观受到外界干扰影响的程度,计算公式为:

$$E_i = aC_i = bN_i + cD_i \tag{2}$$

式中:E_i——景观干扰度指数;C_i——景观破碎度指数;N_i——景观分离度指数;D_i——景观优势度指数;a,b,c——其对应的权重。

景观脆弱度指数反映的是在人类活动影响下不同景观的承受能力，根据前人的研究经验，将 6 种景观类型按抵抗外界影响能力分级，由低到高分别是未利用地、水域、耕地、草地、林地、建设用地，并通过归一化计算出景观脆弱度指数[22-24]。对研究区进行全面网格采样，为充分体现生态风险的空间分布，基于前人研究经验[12-13]，渔网宜采用研究区平均斑块面积的 2～5 倍，结合研究区实际文章采用了 6 km×6 km 的网格，得到了 539 个风险小区(图 1)，计算每一个样本的生态风险指数，并以此作为该样本中心的生态风险值。计算公式为：

$$ERI_i=\sum_{i=1}^{N}\frac{A_{ki}}{A_k}R_i$$

式中：ERI_i——第 i 个样本的生态风险指数；A_{ki}——第 k 个样本区内景观类型 i 的面积；A_k——第 k 个样本的面积[24]。

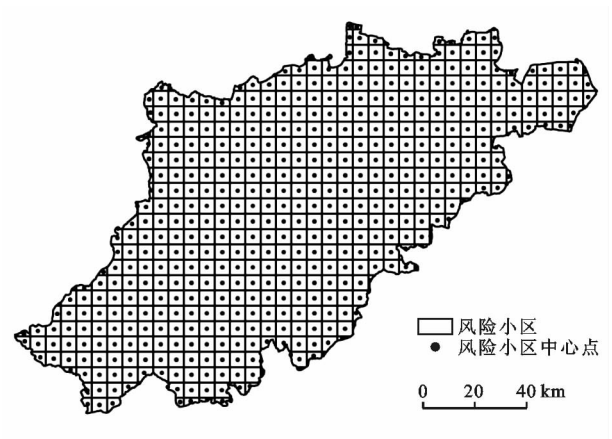


图 1 生态风险小区的划分

2.2.3 空间统计分析 空间自相关分析变量在空间上的相互关系和依赖程度，包括全局自相关和局部自相关，主要是通过 Morans'I 指数和 LISA 检验来分析空间的生态风险指的自相关和集聚程度，计算公式参考文献[25-26]。地统计分析主要功能是半方差分析法优化和空间结构分析[27]，计算出各风险小区的生态风险值，赋给采样区中心点，采用半方差分析法进行克里金插值，生成生态风险图，公式参考文献[28]。为了更好地对各期生态风险进行分类和分析，基于自然断点法，统一间隔为 0.001，分为 5 个生态风险等级，低生态风险区(ERI＜0.003 5)，较低生态风险区(0.003 5≤ERI＜0.004 5)，中生态风险区(0.004 5≤ERI＜0.005 5)，较高生态风险区(0.005 5≤ERI＜0.006 5)，高生态风险区(ERI≥0.006 5)。

2.2.4 响应弹性分析 弹性反映因变量对自变量相应变化的灵敏程度，引入弹性系数分析生态风险对土地利用的响应特征[29]，能清楚客观地表示生态风险对土地利用变化的反应程度。以杭州市下辖的区、市、县为变量，在土地利用和生态风险值之间，建立生态风险对于土地利用的响应弹性系数。计算公式为：

$$ERC=\frac{(ERI_b-ERI_a)/ERI_a}{S} \quad (3)$$

式中：ERC——T 时间段内生态风险对土地利用的响应弹性系数；ERI_a，ERI_b——初始和末期的生态风险指数；S—— T 时间段内综合土地利用动态度，详细参考文献[30]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

3.1.1 总量变化 分析杭州市 1995—2015 年土地利用总量变化(图 2)，总体上，1995—2015 年，建设用地剧增，增加了 65 299.15 hm^2，增长率为 126.73%。耕地面积锐减，减少了 53 612.19 hm^2，林地面积变化最小。分时间段上，1995—2005 年，未利用地变化最大，变化率为 103.17%，增长了 315.68 hm^2。其次是建设用地，面积增加了 26 011.5 hm^2，增长率为 50.48%；耕地、草地面积下降，而林地、水域增加；2005—2015 年，建设用地继续增长，增加了 39 287.65 hm^2，增长率为 50.67%，耕地持续下降。建设用地和草地面积增长，其他土地类型面积下降。

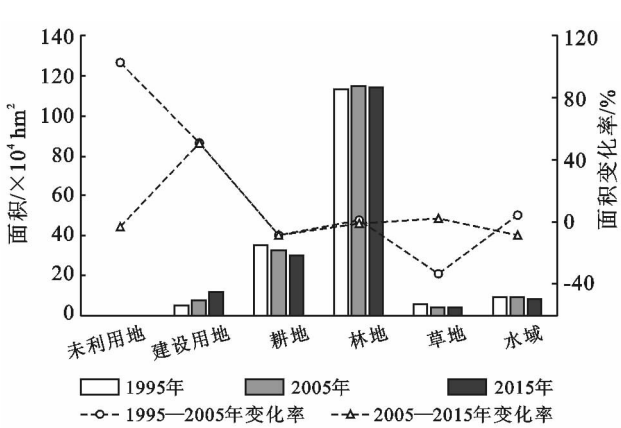


图 2 1995－2015 年杭州市土地利用面积变化

3.1.2 土地利用结构变化 通过 ArcGIS10.3 里的叠加分析整理得到杭州市 1995—2015 年土地利用转移矩阵(表 1—2)，来表示各土地类型间相互转换的数量与方向。主要变化为：1995—2005 年，发生转换以耕地转换为建设用地为主，转换面积为 24 692.09 hm^2，占耕地总量的 75.86%。其次为草地转换为林地，转换了 21 180.65 hm^2，为草地转移总量的 97.96%。其他用地类型转换面积较少。2005—2015 年，发生转移类型也主要是耕地转换为建设用地，转

换面积为 33 191.82 hm^2,比 1995—2005 年增加了 8 499.73 hm^2。其次是水域向耕地、林地向建设用地转换,转换面积为 8 308.00,4 947.26 hm^2。其他类型发生转换不明显。

表 1　杭州市 1995—2005 年土地利用转移矩阵　　hm^2

项目		2005 年						
		未利用地	建设用地	耕地	林地	草地	水域	总计
1995 年	未利用地	—	0.00	0.27	26.29	3.24	0.00	305.98
	建设用地	0.00	—	1 074.15	835.46	38.28	171.02	51 526.61
	耕地	11.09	24 692.09	—	840.27	1.92	7 005.13	352 550.49
	林地	183.33	2 513.91	2 072.48	—	2 005	41.47	1 133 816.19
	草地	151.05	186.79	97.58	21 180.65	—	5.06	57 570.11
	水域	0.00	737.63	1 500.77	85.89	257.12	—	91 058.42
总计		621.66	77 538.11	324 745.24	1 149 968.55	38 254.54	95 699.70	1 686 827.80

表 2　杭州市 2005—2015 年土地利用转移矩阵　　hm^2

项目		2005 年						
		未利用地	建设用地	耕地	林地	草地	水域	总计
2015 年	未利用地	—	18.51	0.00	0.02	0.00	0.00	621.66
	建设用地	0.00	—	24.98	30.98	201.23	19.77	77 538.11
	耕地	0.00	33 191.82	—	319.94	0.02	933.47	324 745.24
	林地	0.01	4 947.26	172.36	—	1 643.17	205.75	1 149 968.55
	草地	0.00	402.67	132.96	14.85	—	173.13	38 254.54
	水域	0.00	1 004.35	8 308.00	56.54	0.00	—	95 699.70
总计		603.15	116 825.75	298 938.30	1 143 422.34	39 375.34	87 662.91	1 686 827.80

3.1.3　土地利用动态度变化　1995—2015 年杭州市土地利用程度差异较大(表 3)。整体上,1995—2015 年,综合土地利用动态度较大,为 0.69%。期间 1995—2005 年土地利用强度最大,综合土地利用动态度为 0.39%,2005—2015 年相对下降,综合土地利用动态度为 0.31%。

从单一土地利用动态度来看,两个时间段内,建设用地处于持续增长状态,增长速度减弱而耕地则持续下降,主要是工业化和城市化对耕地的占用。未利用地变化速率最大,草地先下降后上升,林地、水域则相反。以上数据也表明土地利用的强度先增强后减缓的过程。

表 3　杭州市 1995—2015 年土地利用动态度变化

时间	单一动态度/%						综合土地利用动态度/%
	未利用地	建设用地	耕地	林地	草地	水域	
1995—2005 年	20.63	10.10	−1.58	0.28	−6.71	1.02	0.39
2005—2015 年	−0.60	10.13	−1.59	−0.11	0.59	−1.68	0.31
1995—2015 年	19.42	25.35	−3.04	0.17	−6.32	−0.75	0.66

3.2　土地利用生态风险评价

3.2.1　景观格局指数时序特征　通过 ArcGIS 10.3 和 Fragstats 4.2,可得到不同时期景观格局指数[31-33](图 3)。1995—2015 年,杭州市景观指数发生较大变化,未利用地面积增加,且较集中分布,破碎度和分离度下降。城市建设不断向周围郊区扩展,建设用地优势度增加。耕地面积大量减少,其破碎度、分离度上升,受到外界干扰大,干扰度增加。林地是杭州主要的景观类型,斑块面积较大,破碎度小,随着经济活动的影响加深,林地也向建设用地、草地转移,受到外界的影响逐渐增大。草地面积变化明显,受干扰程度上升。经济发展对水域的利用程度增加,水域损失度上升。

3.2.2　土地利用生态风险指数空间自相关分析

(1) 全局自相关。在 Geoda1.10 中计算出杭州市 1995—2015 年生态风险指数 3 期全局自相关的 数值,分别为 0.248 4,0.243 5,0.235 9。Moran'I 值为正数,表明生态风险与土地利用呈显著的正相关特征,生态风险出现集聚区,高等级风险区周围分布着相应高等级的风险区,低等级生态风险区周围风险区等级也较低[34]。全局自相关数值呈下降趋势,表明研究区在 1995—2015 年土地利用生态风险区集聚趋势减弱。全局自相关反映了研究区土地利用与生态风险的相关性较强。

(2) 局部自相关。利用 检验得到杭州市 1995—2015 年生态风险值的局部自相关分布图(图 4),生态风险指数空间分布主要以高—高聚集和低—低集聚类型为主。局部自相关反映了基于土地利用的生态风险空间集聚特征。生态风险高值集聚区主要集中在杭州市的东北部的市辖区,这里经济发达,城市化水平高;西南部高值集聚区区的淳安县中心,水域面积广,经济活动对其利用强度大,引起生态风险增加。生态风险低值集聚区主要分布在杭州市的边缘地区,低—低集聚不断向边缘推进,受人类活动影响较小,土地利用强度较低。

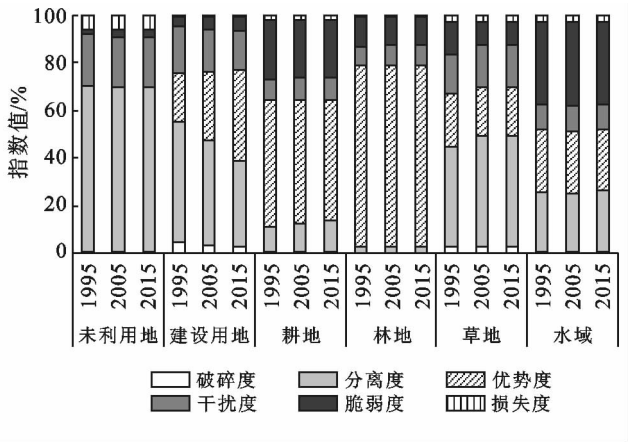


图 3 1995—2015 年杭州市景观格局指数变化

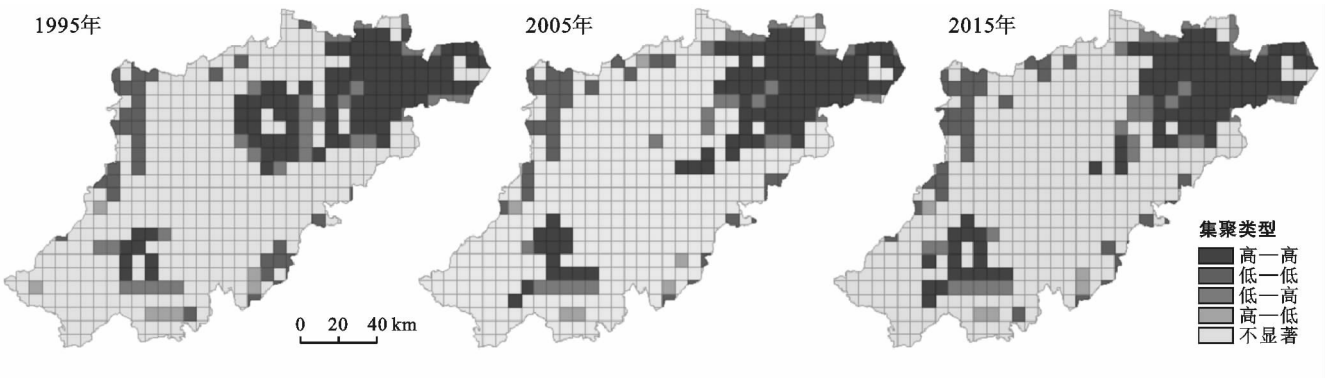
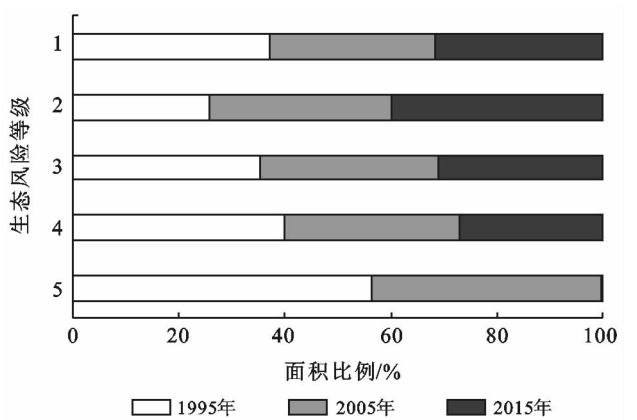


图 4 生态风险局部自相关情况

3.2.3 土地利用生态风险时空变化 通过克里金插值得到杭州市 1995—2015 年生态风险空间分布图,整理得到其 3 个时期生态风险等级区的面积、空间分布及各生态风险等级区之间的转换数量和方向等信息。生态风险时序变化表明(图 5),1995—2015 年,中生态风险区逐渐上升且保持主导地位,各时段分别占全风险面积的 30.05%,34.90%,36.67%。低、较低生态风险等级区面积不断下降,分别下降了 95 467.9,267 996.59 hm^2。较高生态风险等级区范围持续扩大,上升了 190 153.99 hm^2,增长率为 94.21%。高生态风险等级区面积不断上升,增加了 61 629.05 hm^2。各生态风险区面积的排序为中、较高、较低、高、低生态风险区。

生态风险空间变化表明(图 6),1995—2015 年杭州市生态风险空间分异较明显。高生态风险等级区以东北部的市辖区、杭州湾为中心向四周扩散,西南部以淳安县中心向周围扩散。东北部生态风险等级高,主要是这里位于杭州湾附近,经济发达,城市密集,港口对外贸易频繁,交通便利,土地利用强度大。西南部的高生态风险区主要是建设用地面积增加和水域利用程度上升等人类活动对土地利用强度增加导致。1995 年富阳区西北部有一集聚的高生态风险区,其土地利用类型为草地,草地面积广,土地利用强度加深导致风险值较高,而后草地向林地、耕地转移,生态风险值下降。较高生态风险区以高生态风险区为中心,逐渐向外围扩散,东北部和西南部的较高生态风险区在 2015 年相连接。中生态风险区一直占主导地位,且面积呈上升趋势。较低、低生态风险区面积逐渐减少,分布逐渐边缘化,呈圈层状向外分布,人类活动对其影响程度递减。



注:1 为低生态风险区;2 为较低生态风险区;3 为中生态风险区;4 为较高生态风险区;5 为高生态风险区。

图 5 杭州市生态风险等级区面积

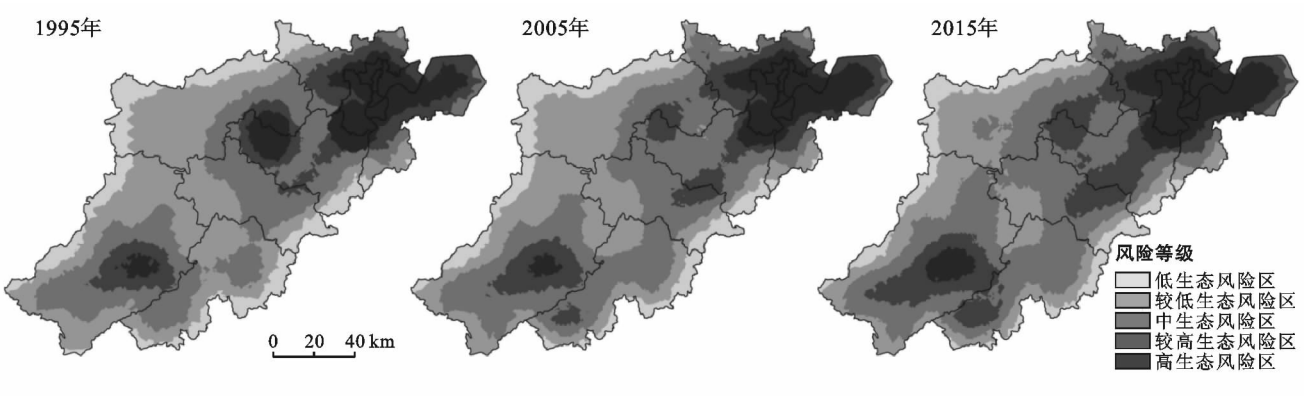


图 6　杭州市生态风险空间分布

3.2.4　土地利用生态风险转移分析　对 1995—2015 年转移矩阵进行分析发现(表 4—5),1995—2015 年,生态风险等级区发生转换较复杂。

1995—2005 年发生转移面积较大,共 492 531.44 hm^2,转移方向主要为低—较低、较低—中、中—较高、较高—高,其转移面积为 49 543.24,168 638.12,138 871.05,56 247.26 hm^2,区域生态风险等级增加。

2005—2015 年,转换数量下降,共发生转移了 420 543.78 hm^2,转移方向主要为低—较低、较低—中、中—较高、较高—高,其各生态风险等级区的转移面积为 39 508.79,182 087.11,152 865.74,44 820.99 hm^2。

1995—2005 年转移面积比 2005—2015 年转移面积增加了 71 987.66 hm^2,低—较低、较高—高转移方向的面积下降,较低—中、中—较高转移方向的面积上升,表明生态风险的转换差异明显。

表 4　杭州市 1995－2005 年生态风险等级转移矩阵　　hm^2

项目		2005 年					
		低	较低	中	较高	高	总计
1995 年	低	—	49 543.24	10 215.97	0.71	0.00	209 022.41
	较低	3 792.67	—	168 638.12	2 538.89	0.45	566 959.17
	中	0.00	6.74	—	138 871.05	2.35	506 820.04
	较高	0.00	0.60	23 805.02	—	56 247.26	201 842.88
	高	0.00	0.72	18 125.89	20 741.75	—	202 183.30
总计		153 055.18	441 540.33	588 724.89	283 942.40	219 565.00	1 686 827.80

表 5　杭州市 2005－2015 年生态风险等级转移矩阵　　hm^2

项目		2015 年					
		低	较低	中	较高	高	总计
2005 年	低	—	39 508.79	46.18	0.14	0.00	153 055.18
	较低	8.51	—	182 087.11	0.96	0.00	441 540.33
	中	0.00	12.36	—	152 865.74	0.83	588 724.89
	较高	0.05	0.08	618.51	—	44 820.99	283 942.40
	高	0.00	0.00	0.14	573.41	—	219 565.00
总计		113 508.63	298 964.98	618 597.89	391 943.02	263 813.27	1 686 827.80

对 1995—2015 年各等级转换进行分析发现(表 6),1995—2005 年由低转换为高生态风险区的面积共 426 058.04 hm^2,由高转换为低的生态风险区面积共 66 473.4 hm^2,低—高转移是高—低转移面积的 6.41 倍,生态风险转移趋向于低—高的转换方向。2005—2015 年由低转换为高生态风险区的面积共 419 330.73 hm^2,由高转换为低的生态风险区面积共 1 213.05 hm^2,低—高转移是高—低转移面积的 345.68倍。这反映了生态风险区转移方向以低到高等级生态风险区为主,城市化加快,经济快速发展,人类活动对土地利用程度提高。1995—2015 年由低到高转移方向有低—较低、低—中、低—较高、较低—中、较低—较高、较低—高、中—较高、中—高、较高—高 9 种,生态风险等级由高到低转移方向有较低—低、中—较低、较高—低、较高—较低、较高—中、高—较低、高—中、高—较高 8 种。其年均转换速率主要

呈下降趋势，转移面积以低—高转移方向为主，这也表明低等级生态风险区向高等级生态风险区转换，生态风险高等级区的面积在逐渐上升。

表 6 杭州市 1995—2015 年生态风险等级转换

转换类型	转换面积/hm^2			
	1995—2005 年	年均转换速率/($hm^2 \cdot a^{-1}$)	2005—2015 年	年均转换速率/($hm^2 \cdot a^{-1}$)
低—较低	49 543.24	4 954.32	39 508.79	3 950.88
低—中	10 215.97	1 021.60	46.18	4.62
低—较高	0.71	0.07	0.14	0.01
较低—低	3 792.67	379.27	8.51	0.85
较低—中	168 638.12	16 863.81	182 087.11	18 208.71
较低—较高	2 538.89	253.89	0.96	0.10
较低—高	0.45	0.05	0.00	0.00
中—较低	6.74	0.67	12.36	1.24
中—较高	138 871.05	13 887.11	152 865.74	15 286.57
中—高	2.35	0.24	0.83	0.08
较高—低	0.00	0.00	0.05	0.01
较高—较低	0.60	0.06	0.08	0.01
较高—中	23 805.02	2 380.50	618.51	61.85
较高—高	56 247.26	5 624.73	44 820.99	4 482.10
高—较低	0.72	0.07	0.00	0.00
高—中	18 125.89	1 812.59	0.14	0.01
高—较高	20 741.75	2 074.17	573.41	57.34

3.3 生态风险对土地利用的响应弹性分析

由表 7 可知，1995—2015 年杭州市生态风险对土地利用的响应弹性呈现较大的时空差异。1995—2015 年，所有单元的生态风险对土地利用变化的响应弹性为正响应，建德市、市辖区、淳安县响应弹性系数最大，即生态风险对土地利用响应较明显。分开看，1995—2005 年，富阳市生态风险对土地利用变化呈负响应，其他单元的生态风险对土地利用变化为正响应。其中以建德市、市辖区、淳安县的响应弹性最大，反映出该区域的生态系统抗外界干扰能力弱，土地利用变化对生态风险影响程度大。富阳县呈负响应，该生态系统较稳定，受土地利用影响较小。2005—2015 年，所有单元的生态风险对土地利用为正响应。横向比较两期数据，各区域生态风险对土地利用变化的响应弹性系数差异较大，市辖区、建德市、淳安县系数下降，其中市辖区和建德市下降幅度较大，分别减少了 10.32，10.3，淳安县变化较小，反映了影响区域生态风险对土地利用变化的反应程度下降，其它风险源和风险因子趋于多样化。临安市、富阳市、桐庐县响应系数上升，分别增加了 14.04，27.7 和 7.96，表明区域生态风险对土地利用变化反应剧烈，土地利用变化对生态风险影响较大。

表 7 1995—2015 年生态风险对土地利用变化的响应弹性系数

单元	响应弹性系数		
	1995—2005 年	2005—2015 年	1995—2015 年
市辖区	22.78	12.46	19.84
临安市	3.81	17.85	10.76
富阳市	−8.82	18.88	3.35
建德市	26.96	16.66	24.58
淳安县	17.14	17.13	18.71
桐庐县	9.91	17.87	14.57

4 结 论

(1) 杭州市土地利用结构发生较大变化。建设用地面积变化最大，增长了 65 299.15 hm^2，增长率为 126.73%。耕地面积锐减，减少了 53 612.19 hm^2，林地面积变化最小。1995—2005 年，发生转移主要是耕地转换为建设用地，其次是草地转换为林地，其他用地类型转换面积较少。2005—2015 年，发生转移类型主要是耕地转换为建设用地，其次是水域向耕地、林地向建设用地转换，其他类型转换不明显。土地利用速率也呈变缓趋势。

(2) 杭州市土地利用生态风险时空分异较明显。生态风险与土地利用呈较显著的空间正相关特征；生态风险分布以高—高聚集和低—低集聚类型为主。时间序列上，1995—2015 年均以中生态风险区为主，生态风险等级呈上升趋势。空间分布上，高生态风险区以市区、杭州湾为中心向四周扩散，西南部以淳安县中心向周围扩散。较高生态风险区以高生态风险区为中心并向四周扩张。中生态风险区一直保持主导地位，低、较低生态风险区一直处于下降趋势，分布逐渐外缘化，呈圈层状向外分布。

(3) 杭州市土地利用生态风险等级转移较显著。1995—2005 年各等级区转换数量和转换概率都大于 2005—2015 年。1995—2005 年生态风险低—高转移是高—低转移面积的 6.41 倍，生态风险转移趋向于高—低的转移方向。2005—2015 年生态风险低—高转移是高—低转移面积的 345.68 倍。年均转换速率主要呈下降趋势，转移面积以低—高转移方向为主，这也表明低等级生态风险区向高等级生态风险区转换，生态风险高等级区的面积在逐渐上升。

(4) 杭州市生态风险对土地利用响应系数时空分异较大。市辖区、建德市、淳安县响应系数下降，反映了区域生态风险对土地利用变化的反应程度下降，其他风险源和风险因子趋于多样化。其他单元的响应系数明显上升，表明土地利用对区域生态风险反应显著。

[参 考 文 献]

[1] Hunsaker C T, Graham R L, Suter Ⅱ G W. Assessing ecological risk on a regional scale[J]. Environmental Management, 1990,14(3):325-332.

[2] Chen Shaoqing, Chen Bin, Fath B D. Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-artmodels and future perspectives[J]. Ecological Modeling, 2013,250(1573):25-33.

[3] 徐建昭,郝仕龙,王玉英.黄土丘陵区的土地利用变化及其生态风险[J].水土保持通报,2017,37(5):157-162.

[4] Kapustka L A, Galbraith H, Luxon B M, et al. Using landscape ecology to focus ecological risk assessment and guide risk management decision-making[J]. Toxicology & Industrial Health, 2001,17(5/10):236-246.

[5] 刘永超,李加林,史小丽,等.1985—2015 年美国 Tampa Bay 流域景观生态风险态势研判[J].水土保持通报,2016,36(3):125-130.

[6] 周汝佳,张永战,何华春.基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价[J].地理研究,2016,35(6):1017-1028.

[7] 刘晓,苏维词,王铮,等.基于 RRM 模型的三峡库区重庆开县消落区土地利用生态风险评价[J].环境科学学报,2012,32(1):248-256.

[8] 周启刚,张晓媛,王兆林.基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J].农业工程学报,2014,30(23):289-297.

[9] 许妍,高俊峰,高永年.基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价[J].湖泊科学,2011,23(4):642-648.

[10] Liu Shiliang, Cui Baisheng, Dong Shikui, et al. Evaluating the influence of road networks on landscape and regional ecological risk: A case study in Lancang River Valley of Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2008,34(2):91-99.

[11] 赵岩洁,李阳兵,邵景安.基于土地利用变化的三峡库区小流域生态风险评价:以草堂溪为例[J].自然资源学报,2013,28(6):944-956.

[12] 刘永超,李加林,袁麒翔,等.象山港流域景观生态风险格局分析[J].海洋通报,2016,35(1):21-29.

[13] 李谢辉,王磊,李景宜.基于 GIS 的渭河下游河流沿线区域生态风险评价[J].生态学报,2009,29(10):5523-5534.

[14] 冯佰香,李加林,龚虹波,等.30 年来象山港海岸带土地开发利用强度时空变化研究[J].海洋通报,2017,36(3):250-259.

[15] 许妍,高俊峰,赵家虎,等.流域生态风险评价研究进展[J].生态学报,2012,32(2):284-292.

[16] 佟光臣,林杰,陈杭,等.1986—2013 年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析[J].水土保持研究,2017,24(2):240-245.

[17] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.

[18] Leuven R S E W, Isabelle P. Riverine landscape dynamics and ecological risk assessment[J]. Freshwater Biology, 2010,47(4):845-865.

[19] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.

[20] 曾辉,刘国军.基于景观结构的区域生态风险分析[J].中国环境科学,1999,19(5):454-457.

[21] 任志远,孙艺杰,吴林筱.1990—2012 年榆林市土地生态风险综合评价[J].中国生态农业学报,2017,25(5):656-664.

[22] Zhang Ying, Lei Guoping, Lin Jia, et al. Spatiotemporal change and its ecological risk of landscape pattern in different spatial scales in Zhalong Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(5):1250-1256.

[23] 李潇然,李阳兵,韩芳芳.基于土地利用的三峡库区生态屏障带生态风险评价[J].水土保持通报,2015,35(4):188-194.

[24] 苏浩,吴次芳.基于景观结构的农林交错带土地利用生态风险时空分异研究[J].经济地理,2017,37(5):158-165.

[25] 谢花林.基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析:以江西兴国县为例[J].中国环境科学,2011,31(4):688-695.

[26] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2016(1):120-148.

[27] 王涛,张超,于晓童,等.洱海流域土地利用变化及其对景观生态风险的影响[J].生态学杂志,2017,36(7):2003-2009.

[28] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.

[29] 肖琳,田光进.天津市土地利用生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(2):469-476.

[30] 史利江,王圣云,姚晓军,等.1994—2006 年上海市土地利用时空变化特征及驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2012,21(12):1468-1479.

[31] 胡金龙,周志翔,滕明君,等.基于土地利用变化的典型喀斯特流域生态风险评估:以漓江流域为例[J].应用生态学报,2017,28(6):2003-2012.

[32] 杜宇飞,李小玉,高宾,等.辽宁沿海城市带生态风险综合评价[J].生态学杂志,2012,31(11):2877-2883.

[33] 徐兰,罗维,周宝同.基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价:以洋河为例[J].自然资源学报,2015,30(4):580-590.

[34] 巩杰,谢余初,赵彩霞,等.甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J].中国环境科学,2014,34(8):2153-2160.