

基于LUCC的南四湖流域面源污染输出风险评估

荆延德^{1,2}, 张华美^{1,2}

(1. 曲阜师范大学地理与旅游学院, 日照 276826;

2. 山东省高校南四湖湿地生态与环境保护重点实验室, 济宁 273165)

摘要: 基于1990-2015年土地利用和统计数据, 运用输出风险模型、CA-Markov模型及回归模型, 结合GIS技术, 对南四湖流域的1990-2015年间土地利用覆盖变化情况和面源污染输出风险空间变化情况进行分析, 模拟了2020年土地利用变化和输出风险空间分布。结果表明: 研究期间, 南四湖流域主要的土地利用类型为耕地和建设用地, 共占总研究面积的85%以上; TN、TP有明显的风险变化对比, TN风险值分布在0~0.65, TP风险值约在0~0.12之间, 氮为流域内主要污染物; 在1990-2005年间, TN风险呈先增加后减少的趋势, 2010年之后急剧增大。TP风险随着时间的增加一直下降; 从空间分布上来看, 风险较高的污染区多位于南四湖区以西的平原地带, 南四湖东部的山地地区污染风险型较低, 多为低风险污染区。较2015年, 2020年的未利用地面积变化不大, 除建设用地数量增加外, 其他用地面积均有不同幅度的减少, TN风险略有减小, TP风险变化不大。为了控制研究区域面源污染的发展, 相关部门需把提高农业科技、减少肥料施用作为当下的工作重心, 从源头上控制污染发生。

关键词: 输出风险; 土地利用变化; 面源污染; CA-Markov; 回归模型; 南四湖流域

由于社会经济迅速发展, 越来越多的营养盐和有机物超负荷地排放到河流、湖泊等水域, 导致水体富营养化, 对人类的健康发展和生产生活的正常进行造成了恶劣的影响。水环境污染生活污水和工业用水的点源排放以及不同土地利用下垫面的面源排放均会造成水环境污染^[1]。点源污染得到了较好的控制, 但面源污染由于排放的无序性以及相关部门的忽视, 污染情况愈加严重^[2]。较点源污染而言, 面源污染具有发生方式间歇、过程复杂、发生时间随机、排放量和排放方式多样且难以确定、时空变化迅速的特点, 导致面源污染的监测与控制更加困难^[3-4]。对于有效控制面源污染来讲, 找出有效的面源污染评估方法并以此定量分析研究区域对面源污染的响应, 是控制面源污染发生的关键。

输出系数法操作简便、精度较高且所需参数较少, 易获取资料, 能很好地与地理信息技术结合, 比较适用于大中尺度流域面源污染的研究^[5]。基于输出系数模型, 根据各地类的分布特征运用输出系数法评估各地类的面源污染输出风险的高低^[6], 将公式中表示土地利用面积的参数代替为该土地利用类型面积百分比, 该模型已在我国大辽河流域^[7]、呼兰河流域^[8]、拉萨河流域^[9]等地区得到很好应用。CA-Markov模型既可以对研究区域的土地转移情况进行长期预测, 又可较为真实地反映一些复杂的系统空间变化^[10], 已被广泛应用到滇池流域^[11]、清江流域^[12]、三峡库区^[13]等地区。

收稿日期: 2018-06-27; 修订日期: 2018-09-24

基金项目: 教育部人文社会科学研究面上项目 (15YJAZH027)

作者简介: 荆延德 (1970-), 男, 山东淄博人, 博士, 教授, 研究方向为环境修复与资源再生。

E-mail: jingyande@163.com

南四湖流域地势东高西低,西部平原人口分布密集,频繁的人类活动对流域造成严重的面源污染。目前对面源污染的研究较多,主要集中在监测河流中污染物浓度、估算中小尺度地区污染物负荷量并分析污染来源等方面,而利用输出系数模型对长时间尺度下的面源污染风险的增减进行评估的研究较少。因此本研究以南四湖流域(包括江苏省徐州市的丰县和沛县)为例,对1990-2015年间的流域土地利用变化情况进行分析,基于输出系数模型,对研究区面源污染输出风险的时空特征按地类进行评估,利用CA-Markov模型对2020年土地利用空间格局进行模拟,对2020年南四湖流域的面源污染输出风险进行预测。分析不同土地利用方式对流域面源污染的影响,得到对流域面源污染贡献最大的土地利用类型,以期为南四湖流域的土地利用规划提供理论参考依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

作为我国北方最大的淡水湖,南四湖向江苏、山东、河南、安徽四省的30多个县市区提供用水,湖泊呈西北东南走向,位于山东省西南部的济宁以南。南四湖流域属于淮河流域泗河水系,位于 $34^{\circ}41' \sim 35^{\circ}98'N$, $114^{\circ}82' \sim 117^{\circ}83'E$,流域总面积 3.17万 km^2 。温带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均降水为 $750 \text{ mm}^{[14]}$ 。南四湖流域入湖河流53条,分上、下两级湖泊,上级入湖河流30条,下级入湖河流23条。研究区范围包括济宁市、菏泽市、枣庄市、泰安市宁阳县、徐州市的丰县和沛县,共30个县市区。随着城市化、工业化进程不断加快,大量生产、生活污水未经处理便排入河道与湖泊,导致水体污染愈发严重^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 输出风险模型

输出风险模型公式的一般表达为:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} \frac{A_i}{A} \quad (1)$$

$$P_j = \frac{L_j - E_h}{L_j} \quad (2)$$

式中: j 为污染物类型,本研究将N、P作为主要污染物类型进行研究; i 是研究区主要的土地利用类型,本文以六种主要的用地类型即水域、草地、未利用土地、耕地、林地、建设用地作为研究对象; L_j 表示流域内污染物 j 带权重的平均输出系数 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; E_{ij} 表示污染物 j 在第 i 种土地利用类型上的输出系数 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; A_i 表示第 i 种地类的面积 (hm^2); A 为南四湖流域的总面积 (hm^2); E_h 为林地的最大输出系数 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; P_j 为污染物 j 的输出风险概率。

较其他土地利用类型,人类活动对林地影响较小,在自然状态下,林地几乎不产生面源污染,以林地作为参考地类,最大输出系数即可作为评价阈值,当某地类输出系数高于该值,证明该地类存在着一定的面源污染风险^[16-17],风险程度可由风险值来衡量,风险值在-1到1之间波动。若该区域面源污染风险高于阈值时风险值即为正数,意味着该区域受到面源污染影响,影响程度越深,其风险程度越高,该地类风险值越大;反之,风险值为负数,即当该区域面源污染风险低于阈值,意味着受面源污染程度较小,受面源污染影响的风险也较小。风险值为0表示无面源污染风险;风险值为负数表示不受面源

污染威胁，无污染风险，为方便作图起见，本研究中风险值为负数的均用0表示。

1.2.2 模型参数确定

确定各土地利用类型的输出系数是研究的关键，国内外对其研究较为丰富。目前对南四湖流域面源污染，由于研究区范围较大，现实条件无法实现实地测量，且南四湖流域类似研究较少，参考数据不足，本研究通过查阅文献并参考前人研究对输出系数进行确认。研究区域的耕地、城市用地、林地和草地的氮磷输出系数可参考对云蒙湖流域的相关研究成果^[18]。对于未利用土地和水域而言，即使在不同地区，其输出系数并无差别，因此可参考并采用国内目前大部分研究地区所利用的输出系数。南四湖流域各土地利用类型的输出系数见表1。

李怀恩等^[19]研究发现，由于地表径流而导致的氮素损失高达施肥量比例的15%。这表明在氮素的地表径流中，氮素损失与耕地的输出系数在空间变化上具有一致性。包括草地、林地、水域、建设用地在内的多个土地利用类型其化肥的施用量较少，耕地化肥用量较多，故仅对研究区间各年份的耕地输出系数进行修正，见表2。

1.2.3 CA-Markov 模型

本文利用 *Kappa* 系数检验模型精度，当系数值高于0.75，证明解译与模拟的土地用地类型的空间分布以及数量特征相似性满足检验标准，模型模拟效果较好。研究设计了两种模拟方案以准确模拟出2020年土地利用情况，一种方案是通过1990年和2000年的两期数据进一步模拟2010年的土地覆被变化情况。另一种方案以5年为时间间隔，运用2005年和2010年两期数据进行模拟。对比两种方案的模拟精度，第二种方案的模拟结果精度更高，因此采用以5年为间隔预测模拟2020年的土地利用变化情况。

运用IDRISI软件，将前期获得的2005-2015年共3期的土地利用数据转化为可识别的数据格式。利用Markov模块对2010-2015年的土地利用数据进行运算，借助转移概率矩阵和转移面积矩阵进一步基于2015年对2020年各地类的空间分布状况进行预测。栅格单元的精度大小为30 m×30 m。CA滤波器作用于元胞，并以此确定元胞下一时期状态的改变，可创建具有显著空间意义的权重因子，本文选用CA标准的5×5的滤波器。

1.2.4 回归分析

作为一种数理统计方法可有效处理变量间的相关关系，文章运用了SPSS软件进行回归分析，其公式表示为：

$$Y=a+bx$$

(3)

式中：*Y*是因变量，文中主要指氮肥施用折纯量（万t）；*x*是自变量，即耕地面积（10³

表1 南四湖流域输出系数表

Table 1 Export coefficients of Nansihu Lake Basin

污染物	土地利用类型/kg·(hm ² ·a) ⁻¹					
	耕地	林地	草地	水域	城镇用地	未利用地
TN	~	11.50	16.56	15.00	11.00	14.90
TP	0.7	0.16	0.21	0.36	0.24	0.20

表2 耕地输出系数

Table 2 Export coefficients of cultivated land

年份	耕地面积 /10 ³ hm ²	氮肥使用量 /折纯万 t	平均施肥量 /kg hm ⁻²	径流损失 /kg·(hm ² ·a) ⁻¹
1990	2308.00	36.25	157.07	23.56
1995	2281.88	40.35	176.83	26.53
2000	2275.31	43.80	192.51	28.88
2005	2245.60	46.02	204.93	30.74
2010	2232.16	44.76	200.51	30.08

hm²); *a*、*b*为常数。

利用SPSS 16.0做散点图, 可发现氮肥折纯量与耕地面积间具有线性相关关系, 相关系数*R*高达0.943, 表明耕地面积和氮肥施用量两因素之间存在很强的相关性; 拟合优度*R*²为0.889, 经调整, 拟合优度为0.861, 表明大部分散点均较为集中地分布在回归曲线两侧; 通过对模型显著性检验得Sig.为0.005, 对因变量和常数项进行*t*检验, 因变量值为0.005、常数项为0.003, 二者均小于0.05, 说明常数项、回归系数以及回归关系均满足相关性分析要求, 为定量分析氮肥施用量与耕地面积之间的线性相关关系, 拟构建一元线性回归模型。回归方程表示为 $Y=-0.128x+333.114$ 。

1.3 数据来源及处理

本研究用到的数据处理软件为ArcGIS 10.1和IDRISI。研究区的DEM图片从地理空间数据云下载获得, 运用ArcGIS拼接, 结合研究区边界, 裁剪得到研究区DEM, 再运用软件的水文分析功能提取研究区水系, 并划分出221个子流域。从地理国情监测云平台上获取1990-2015年间共6年的土地利用数据, 根据研究区边界裁剪出相应的土地利用数据, 结合全国土地资源分类系统, 将研究区域的土地利用类型主要划分为包括建设用地、水域、耕地、林地、草地和未利用土地在内的6种。统计数据来源主要为研究区各县市区氮肥的施用量。在ArcGIS软件支持下, 裁剪出研究区221个子流域的土地利用图, 并统计各子流域6种土地利用面积百分比, 以子流域作为最小单元, 来探究南四湖流域面源污染输出风险的时空变化特征。

2 结果分析

2.1 各年份土地利用现状分析

根据上文中对南四湖流域土地利用类型的划分, 各年份土地利用覆被的空间组成、分布与比例(表3、图1)如下。根据表3和图1可得, 耕地和建设用地是南四湖流域研究时段内最主要的土地利用类型, 两者总用地面积在25年内一直超过流域总面积的85%且二者范围以相反的趋势发展, 耕地在不断缩小而建设用地面积在不断扩张。建设用地在2005-2010年间增量最大, 林地和草地在研究时段内变动不大, 在2005-2015年有减小趋势。水域面积在1990-1995年间有所增长, 在1995-2015年间变化较小。未利用地面积最小呈缓慢减势, 研究时段内未利用土地减少量明显。从空间分布上看, 耕地主要分布在湖区西面的平原地区; 在南四湖流域东岸地势较高的地区, 林地和草地的分布多且集中; 在南四湖湖区附近及流域东部山地未利用土地相对较多, 1995年起, 水域面积开始扩大, 占据了湖区东部的部分未利用土地; 同时湖区西部的城镇用地扩张明显, 尤其在河流干流两岸扩张最为显著。

近年来, 为了增强南四湖流域湿地的生态系统服务功能, 政府于1996年建立南四湖自然保护区, 并于2005年出台了关于南四湖自然保护区的管

表3 1990-2015年土地利用构成
Table 3 Land use structure from 1990 to 2015 (%)

年份	土地利用面积组成					
	耕地	林地	草地	水域	城镇用地	未利用地
1990	72.76	2.59	5.41	3.65	13.40	2.18
1995	71.94	2.87	5.34	5.48	13.92	0.45
2000	71.73	2.59	5.41	5.24	14.61	0.42
2005	70.80	2.59	5.33	5.53	15.31	0.43
2010	70.37	1.76	4.19	5.55	17.87	0.26
2015	69.79	1.71	4.18	5.54	18.52	0.26

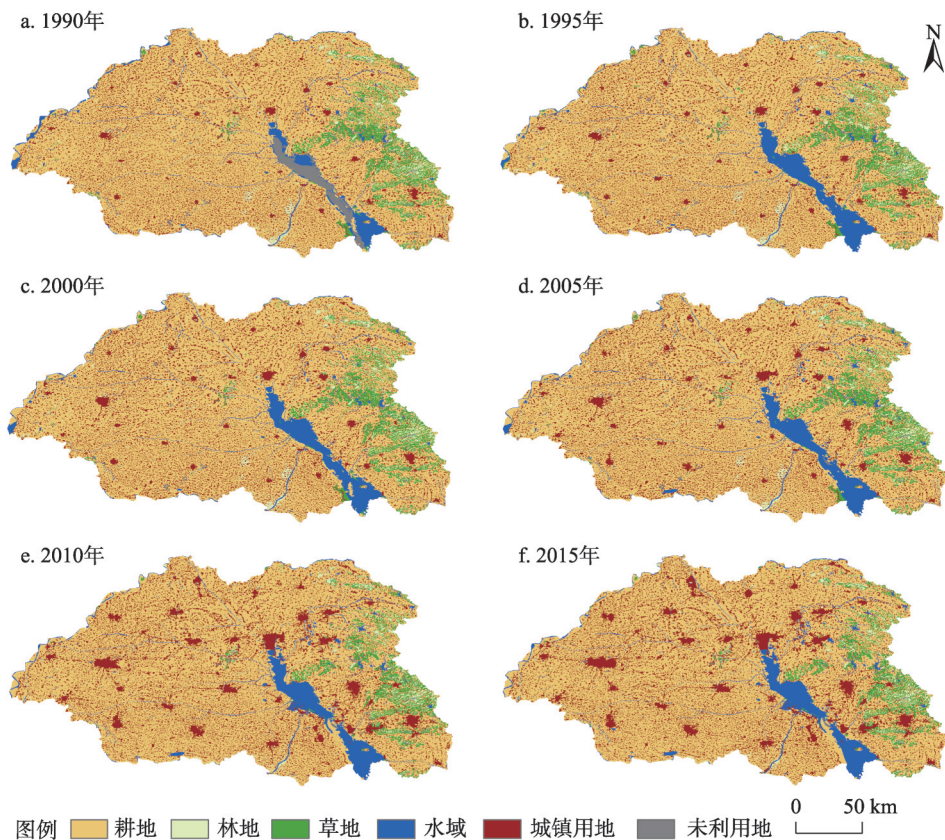


图1 南四湖流域土地利用图

Fig. 1 The land use of the Nansihu Lake Basin

理办法, 水域面积缩减及时得到控制。建设用地对水域面积的侵占也在缓和, 转为从耕地、林地、草地和未利用地中获取, 但因地形原因, 林地、草地以及未利用地这3种地类主要分布在流域以东的山地地区, 因自然条件限制, 在城镇用地扩张的过程当中, 对平原耕地的占有数量较大。

2.2 面源污染输出风险空间分布特征

针对面源污染输出风险等级的划分, 研究选择分位数分级法对等级间隔进行划分, 分别采用不同的风险等级划分标准对TN和TP风险进行划分, 可以更好地发现面源污染风险受时空变化的影响情况。根据结果, TN的风险范围为(0~0.65], 0.28、0.35、0.47、0.53、0.56、0.59为分界数值, 划分成7个等级区间; TP的风险范围为(0~0.12], 各等级区间相隔0.02的数值大小, 划分成6个等级区间。通过计算获得25年内研究区域面源TN、TP污染输出风险的时空空间分布情况(图2、图3), 等级越高说明面源污染发生的可能性越大。

由图2可知, 整体来看, TN风险性在1990-2005年间呈增大趋势, 在2005-2010年间风险降低, 自2010年起, 面源污染风险再次上升, 这种情况体现在高风险区的面积在不断扩大。如主要分布在湖区北部、西部及东南部的部分子流域的Ⅶ级风险区面积高达55.85%; 研究时段内, 大致分布在南四湖沿湖周围以及湖区东部子流域的Ⅰ和Ⅱ级风险区面积整体较少, 多位于湖区周围以及东部的子流域附近, 所占总流域比例不大。因受人

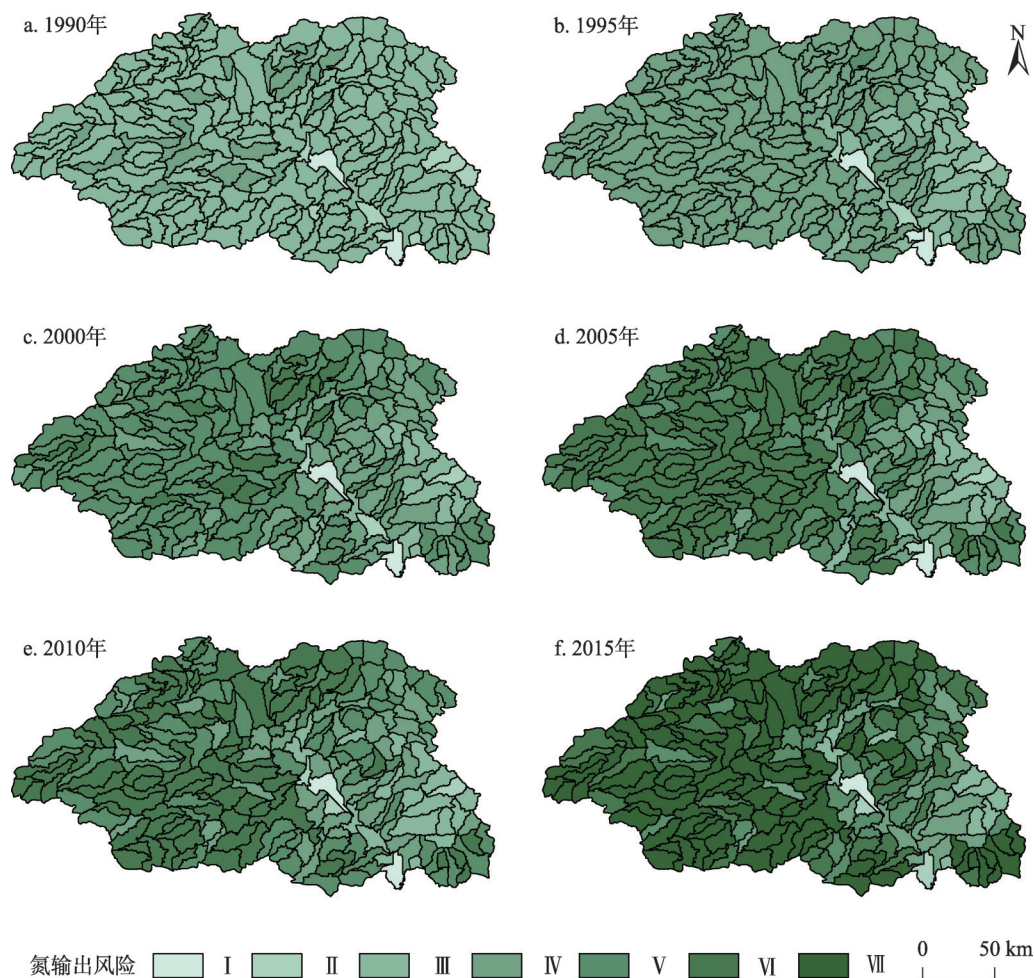


图2 南四湖流域TN污染输出风险空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of TN pollution export risk degree in Nansihu Lake Basin

类活动的影响较小,生活污水、工业废水排放较少,而且受特殊地形地势影响氮的排放明显较他处少;1990年,整个流域的Ⅲ级风险区范围达到最大,占研究区总面积的85.95%,1990-1995年间,有71.73%的Ⅲ级风险区向Ⅳ级风险转化,到2000年,Ⅴ级风险区的范围接近流域总面积的50%。至2005年,各风险级的地区在南四湖流域均有分布,2010年,Ⅵ、Ⅶ级风险区开始转变成较低风险区,TN的输出风险值在全范围内减小,直到2015年才有所增加。

据图3可得,研究区以TN风险为主,TP污染程度较小且波动不大。较1990年,2015年的Ⅲ级以下及Ⅴ级的风险区范围有所扩大、Ⅲ级及Ⅴ级以上风险区的范围有所缩小,各级风险区的变化程度和变化速度均有差异,除Ⅰ级和Ⅵ级风险区变化达10%外,其他区域的范围波动不足5%。在空间分布上,各风险区也有所差异,流域的东部地区风险性较低,主要为Ⅰ级和Ⅱ级风险区,湖区的北部和西部广泛分布了其他各级的输出风险区。

由图2和图3可知,在南四湖流域的东部地区多集中分布了TN、TP风险较低的风险区,流域的西部多为高风险集中区域,该发现同先前对该研究区域面源污染输出风险^[20]

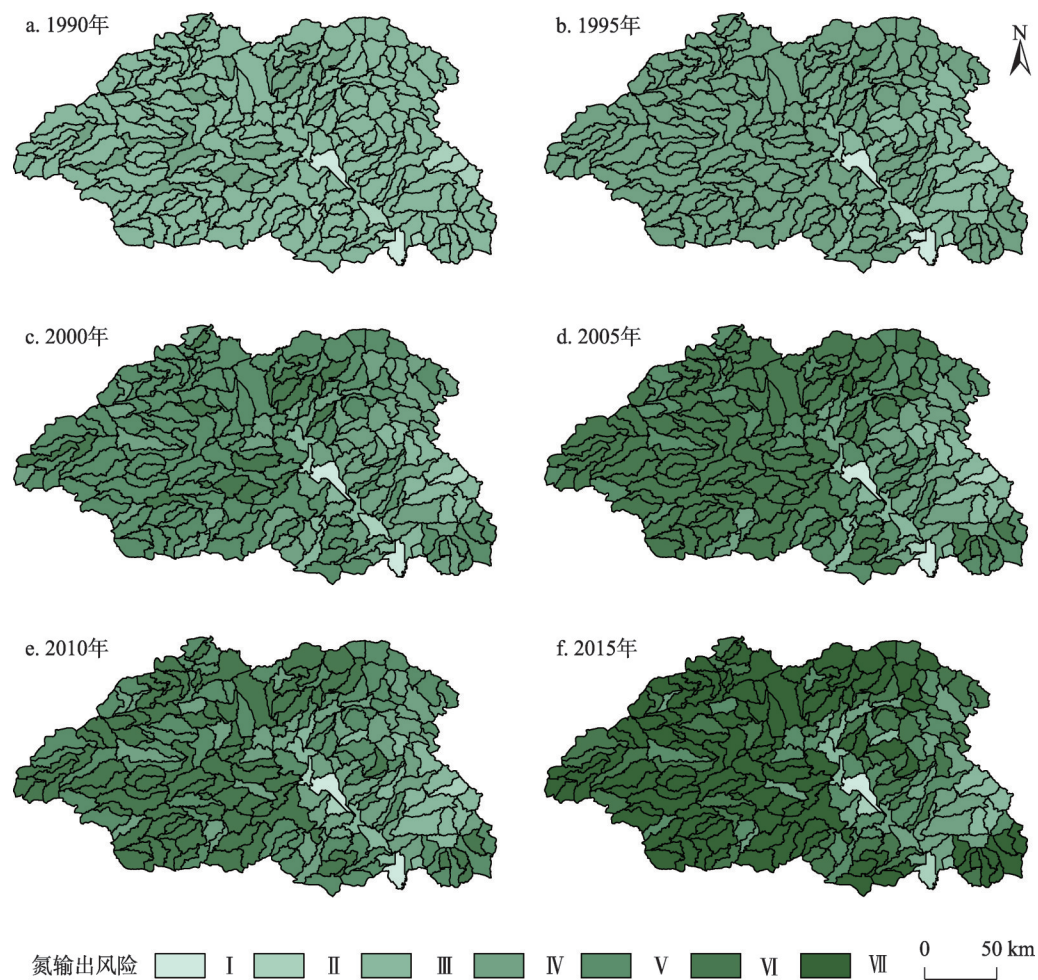


图3 南四湖流域非点源TP污染输出风险空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of TP pollution export risk degree in Nansihu Lake Basin

的研究结果一致。由于研究区域东部多山地、地势较高，西部多平原、地势较低，面源污染物产生量较湖区东部在内的其他地区均高，同时TN、TP数量也较为突出，因此面源污染输出风险的总体空间特点为西多东低，该发现在地形地势分布状况对面源污染输出风险高低关联与否的研究中同张立坤等^[8]、方广玲等^[9]的观点相符。因此，从源头上对污染物排放进行控制是降低面源污染风险的必要环节。

2.3 南四湖流域土地利用演变预测及其风险变化

2.3.1 2015年南四湖流域土地利用演变模拟

运用CA-Markov模型预测2015年的土地利用现状（图4、表4）。通过表4可知据对南四湖流域各土地利用类型时空变化的模拟显示，耕地范围约占研究区域总体的66.02%，比例最大；建设用地也占据一定的比例，其范围约为研究区总体的24.08%；林地的比例最小，约占总面积的1.05%。模拟结果与该流域各用地类型的分布和构成特点大体一致，具体为：耕地>城镇用地>水域>草地>林地>未利用土地。各用地类型的模拟结果在精度上高低不同，耕地的模拟精度高达94.84%，水域的模拟精度更高为

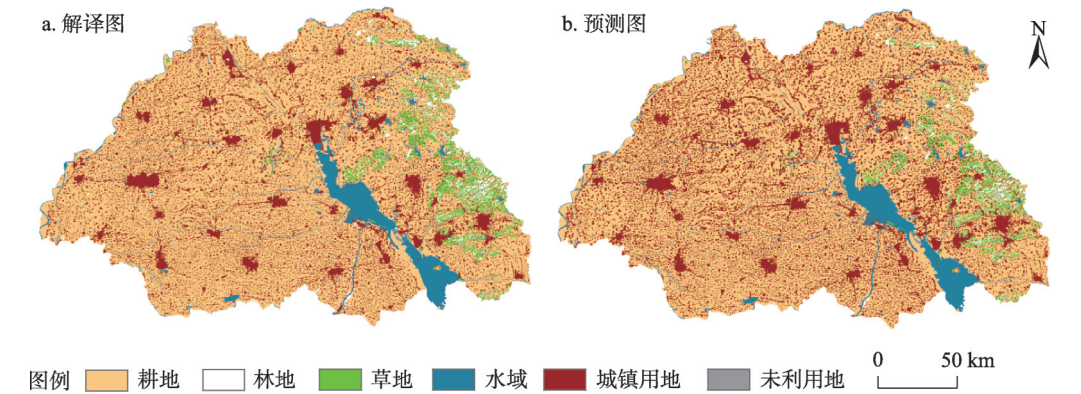


图4 南四湖流域2015年土地利用变化解译与模拟对比

Fig. 4 Land use interpretation and simulation contrast of Nansihu Lake Basin in 2015

表4 南四湖流域2015年土地利用情况模拟及精度检验

Table 4 Simulation and accuracy test of land use in Nansihu Lake Basin in 2015

土地利用 类型	实际土地利用结构		模拟土地利用结构		面积对比	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积差/km ²	精度/%
耕地	22137.54	69.79	20997.98	66.20	1139.56	94.85
林地	541.25	1.71	333.05	1.05	208.20	61.53
草地	1325.96	4.18	935.71	2.95	390.25	70.56
水域	1758.36	5.54	1757.23	5.54	1.13	99.94
城镇用地	5873.51	18.52	7637.94	24.08	-1764.43	76.90
未利用土地	82.38	0.26	57.09	0.18	25.29	69.30

99.93%，未利用土地、草地与林地的模拟精度效果不够理想。如上所述，因主要分布在流域的东部，且受地形影响，很难发现并进一步估算林地的具体演变规律；人为因素对未利用土地和草地干扰较大，故模拟效果不理想。一方面受到自然环境因素的影响较严重，使得精度较低；另外还受两个方面的影响：一是在对地类分布进行时空预测时，ASCII数据与栅格数据前后经历了两次转换，在转换过程中精度损失了一部分；二是在对数据进行处理时计算机与软件存在着系统误差。

2.3.2 南四湖流域土地利用演变预测

利用CA-Markov模块，并以2015年土地利用分布情况图为基础，结合2010年和2015年间的马尔科夫土地利用转移矩阵和适宜性图像集，模拟获得2020年南四湖流域土地利用变化图（图5），2020年土地利用类型的预测数据见表5。

据表5分析，预测至2020年，研究区域的耕地范围将会缩减，建设用地不断代替耕地及其他用地类型表现出增势，这种范围的波动较5年前趋于平缓，未利用土地、草地、林地和水域数量的增减不够明显，增减速度较2015年之前变缓。作为省重点湿地保护区，南四湖流域的土地变化趋势较为独特，这与张晓娟等^[13]的研究相符。其他用地类型的面积变化不大。该发现与三峡地区的实际情况如人口情况、经济发展对工农业以及用地的需求一致；霍明明等^[21]研究发现受区域规划的影响以及对土地政策的响应，林地和农村居民点取代未利用土地和耕地的范围有所扩大；黄鹏等^[12]研究表明土地利用以旅

游生态经济为主导，耕地投入只减不增，城镇化水平依然不高。

随着经济持续发展，南四湖区域城镇化水平不断提高，城镇建设用地不断增加，势必会占用其他类型土地；近年来，地方政府出台一系列政策措施加强对南四湖流域生态环境建设以及开展湿地保护与修复等工作，加大对流域内水域的保护力度，这也必将占用部分耕地。

2.3.3 研究区域面源污染风险预测

将模拟获取的2020年研究区的耕地数量值代入一元回归模型的公式中进行计算，发现2020年该流域氮径流损失量为 $34.86\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ，氮的平均施肥量为 $232.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，氮肥施用折纯量为51.19万t。使用面源污染输出风险模型和耕地中氮素输出系数，得2020年流域内面源TN、TP输出风险的空间布局情况，见图6。

如图6所示，面源磷污染的输出风险最高为11.8%，面源氮污染的输出风险最高达64.14%，N为研究区域最关键的面源污染来源，较2015年，该年份低风险区的范围在不断缩小，高风险区的变化显著：前五级的风险区范围波动较小；第六级的风险区面积不断减少，约9.98%；第七级输出风险区范围扩大约11.21%，其面积占研究区域的67.06%。流域大范围区域均存在中级及以上风险。磷各级风险区的范围波动较小。通过以上发现可得，耕地对面源污染输出风险的高低受耕地范围面积的决定性影响。由于近年来流域的耕地面积不断减少，当地会通过增加化肥施用量的方式促进粮食增产，但由于农药化肥的过度使用，会对生态环境以及耕作土壤产生影响。为提高流域的生态环境质量，实现农业可持续发展，需寻找相应措施来降低面源污染对流域的影响，可控制与减少化肥施用量，提高生产技术，发展绿色农业、生态农业。

3 结论

本研究以南四湖流域为研究对象，首先对研究区1990-2015年土地利用变化现状进行分析；并对研究区25年间面源污染输出风险进行估算；随后运用CA-Markov技术预测2020年南四湖流域土地利用变化情况，并在此基础上进一步预测未来的面源污染输出风险，经研究，可得到以下结论：

(1) 1990-2020年间，南四湖流域的土地利用类型主要为耕地和建设用地，主要表现为耕地面积不断减少、建设用地逐年增加；1990-1995年间，水体面积明显提高，这是因

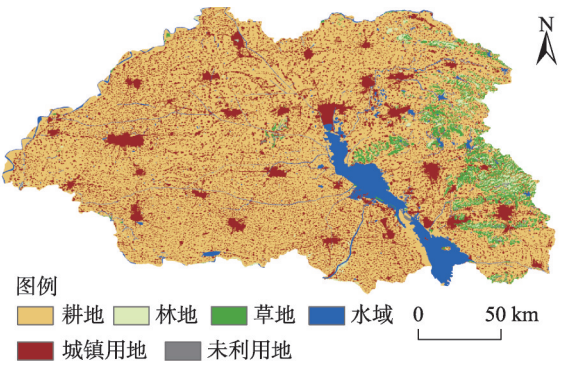


图5 南四湖2020年土地利用类型空间分布模拟
Fig. 5 The simulation results of land use of Nansihu Lake Basin in 2020

表5 南四湖流域2020年土地利用变化情况预测

土地利用类型	2015年土地利用构成		2020年土地利用构成	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
耕地	22137.54	69.79	22025.67	69.44
林地	541.25	1.71	539.22	1.70
草地	1325.96	4.18	1322.68	4.17
水域	1758.36	5.54	1747.72	5.51
城镇用地	5873.51	18.52	6001.23	18.92
未利用土地	82.38	0.26	82.47	0.26

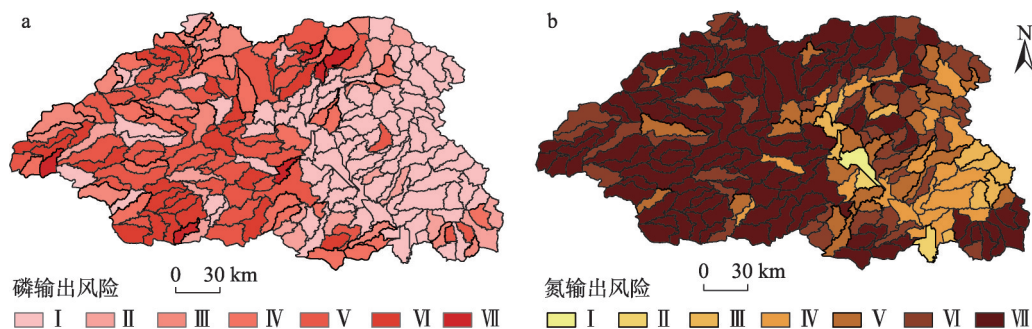


图6 研究区域2020年面源输出风险空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of non-point source pollution export risk degree in the region in 2020

为自1996年以来在当地不断出台的政策(如建立南四湖自然保护区)保护下,使得水域面积保持在相对稳定的水平。林地、草地以及未利用土地数量有轻微的降低,耕地以南四湖流域的西部平原地区分布为主,林地和草地以流域东部的山地分布为主。

(2) 南四湖流域TN面源污染发生的可能性较TP相对高。研究时段内,超过80%的南四湖流域区域TN的输出风险值处于0.47~0.65之间,95%的研究区磷的风险值低于0.10。两种面源污染物输出风险的时空分布特征差异明显,南四湖流域的西部为高风险区,由于平原地区地势平坦,农业活动活跃,用地类型以耕地为主,受面源污染影响较为严重。地势较高的南四湖东部,林地和草地分布广泛,人为活动较少,外界输入的污染物不明显,该地区的面源污染较其他区域轻。土地利用变化引起的TN、TP面源输出风险特征为先上升后下降随后再上升,这与土地利用分布、类型、面积变化有关。

(3) 面源污染输出风险受土地利用变化影响明显。1990-2020年耕地面积不断减少,1990-2005年化肥施用量不断提高,2005年之后施用量开始减少,2010-2020年间又明显提高,面源污染输出风险与化肥施用量呈现出一致的变化特点和趋势。可以发现,研究区面源污染受农业化肥施用数量影响明显,要合理地规划和分配该流域的土地利用类型,控制或减少化肥施用,以绿色肥料代替化肥,最终降低该流域的面源污染输出风险。

参考文献(References):

- [1] 熊兴,江源,任斐鹏,等. 东江下游河网区土地利用变化及其对水体的生态影响. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1320-1331. [XIONG X, JIANG Y, REN F P, et al. Land-use change and its ecological effect to the water in downstream river network area of Dongjiang Basin. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1320-1331.]
- [2] TIM U S, JOLLY R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(1): 25-35.
- [3] 薛利红,杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(4): 755-761. [XUE L H, YANG L Z. Research advances of export coefficient model for non-point source pollution. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(4): 755-761.]
- [4] 郝芳华,杨胜天,程红光,等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375-383. [HAO F H, YANG S T, CHENG H G, et al. The significance difficulty and key technologies of large scale model applied in estimation of non-point source pollution. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(3): 375-383.]
- [5] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modelling approach. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-349.
- [6] RECKHOW K H, BEAULAE M N, SIMPSON J T. Modeling phosphorus loading and lake response under uncertainty:

- A manual and compilation of export coefficients. US EPA/440/5-80/011, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1980: 67-88.
- [7] 刘瑞民, 何孟常, 王秀娟. 大辽河流域上游非点源污染输出风险分析. 环境科学, 2009, 30(3): 663-667. [LIU R M, HE M C, WANG X J. Risk assessment of nitrogen and phosphorus export in upper reach of Daliao River Watershed. Environmental Science, 2009, 30(3): 663-667.]
- [8] 张立坤, 香宝, 胡钰, 等. 基于输出系数模型的呼兰河流域非点源污染输出风险分析. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 148-154. [ZHANG L K, XIANG B, HU Y, et al. Risk assessment of non-point source pollution in Hulan River Basin using an output coefficient model. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(1): 148-154.]
- [9] 方广玲, 香宝, 杜加强, 等. 拉萨河流域非点源污染输出风险评估. 农业工程学报, 2015, 31(1): 247-254. [FANG G L, XIANG B, DU J Q, et al. Risk assessment of non-point source pollution export in Lasahe Basin. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 247-254.]
- [10] 陈学, 朱康文, 雷波. 基于CA-Markov模型的土地利用/覆盖变化模拟. 环境影响评价, 2016, 38(4): 61-65. [CHEN X, ZHU K W, LEI B. Simulation of land use/cover variation based on the CA-Markov model. Environmental Impact Assessment, 2016, 38(4): 61-65.]
- [11] 何丹, 周璟, 高伟, 等. 基于CA-Markov模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2014, 50(6): 1095-1105. [HE D, ZHOU J, GAO W, et al. An integrated CA-Markov model for dynamic simulation of land use change in lake Dianchi Watershed. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6): 1095-1105.]
- [12] 黄鹏, 袁艳斌, 董恒. CA-Markov模型的清江土地利用变化研究. 测绘科学, 2017, 42(10): 102-109. [HUANG P, YUAN Y B, DONG H. Land use change analysis of Qingjiang River based on CA-Markov model. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(10): 102-109.]
- [13] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 等. 基于MCE-CA-Markov的三峡库区土地利用演变模拟及预测. 农业工程学报, 2017, 33(19): 268-277. [ZHANG X J, ZHOU Q G, WANG Z L, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir Area based on MCE-CA-Markov. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 268-277.]
- [14] 孟瑶瑶, 薛丽芳. 南四湖流域土地利用及其景观格局变化分析. 水土保持研究, 2017, 24(3): 246-252. [MENG Y Y, XUE L F. Analysis on landscape pattern change and land use in Nansi Lake Basin. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 246-252.]
- [15] 沈吉, 张祖陆, 杨丽原, 等. 南四湖: 环境与资源研究. 北京: 地震出版社, 2008. [SHEN J, ZHANG Z L, YANG L Y, et al. Study on Environment and Resources of Nansi Lakes. Beijing: Seismologic Press, 2008.]
- [16] WICKHAM J D, RIITERS K H, O'NEILL R V, et al. Land cover as a framework for assessing risk of water pollution. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(6): 1417-1422.
- [17] WICKHAM J D, WADE T G. Watershed level risk assessment of nitrogen and phosphorus export. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37(12/3): 15-24.
- [18] 孟晓云, 于兴修, 泮雪芹. 云蒙湖流域非点源磷污染时空变化研究. 水土保持研究, 2013, 20(4): 91-98. [MENG X Y, YU X X, PAN X Q. Spatio-temporal change of non-point source phosphorous pollution in Yunmeng Lake Watershed. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 91-98.]
- [19] 李怀恩, 王莉, 史淑娟. 南水北调中线陕西水源区非点源总氮负荷估算. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(3): 540-544. [LI H E, WANG L, SHI S J. Estimation of total nitrogen load from non-point sources in Shanxi Province water source area of the central line of South-North Water Diversion Project. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2010, 40(3): 540-544.]
- [20] 荆延德, 张华美, 孙笑笑. 基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染输出风险评估. 水土保持通报, 2017, 37(3): 270-274. [JING Y D, ZHANG H M, SUN X X. Risk Assessment of non-point source pollution in Nansi Lake Basin using an output coefficient model. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 270-274.]
- [21] 霍明明, 张铁莹, 陈伟强. 基于CA-Markov的土地利用变化及预测研究: 以巩义市鲁庄镇为例. 中国农学通报, 2015, 31(12): 279-284. [HUO M M, ZHANG Y Y, CHEN W Q. The land use change and prediction based on CA-Markov model: A case of Luzhuang town, Gongyi city. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(12): 279-284.]

Risk assessment of non-point source pollution output in Nansihu Lake Basin based on LUCC

JING Yan-de^{1,2}, ZHANG Hua-mei^{1,2}

(1. College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Nansi Lake Wetland Ecological and Environmental Protection in Universities of Shandong, Jining 273165, Shandong, China)

Abstract: The land cover change and the non-point source pollution output risk in Nansihu Lake Basin during 1990-2015 were analyzed based on the land use data and statistical data. The method of output risk model, CA-Markov model and Regression Model were used, and combined with GIS technology, the land use pattern and the export risk distribution in 2020 were simulated. The results were as follows. In the 25 years, farmland and arable land were the main land use types in the study area, accounting for more than 85% of the total area. The TN and the TP risk changes were significantly different. The TN output risk value ranged between 0-0.65, and the TP output risk value was 0-0.12. N was the main pollutant. The TN risk increased gradually from 1990 to 2005, decreased significantly during 2005-2005, and increased sharply during 2010-2015. The TP risk decreased gradually during the 25 years. The low risk areas were mainly distributed in the eastern part of Nansihu Lake basin, while the high risk areas were mainly in the west part of the lake basin. The land use change in 2020 was predicted. Compared with 2015, the arable land is increasing, the area of unused land is unchanged, and the other types are reducing to different degrees. The TN risk is reducing slightly. TP risk is unchanged. It is necessary for the local government to focus on improving the agricultural science and technology and reducing fertilizer use so as to control the status quo of non-point source pollution in Nansihu Lake Basin.

Keywords: output risk; land use change; non-point source pollution; CA-Markov; regression analysis; Nansihu Lake Basin