

太湖流域土地利用方式演变及其对 水体氮磷负荷的影响

田甲鸣¹,王延华^{1,2,3},叶 春⁴,张茂恒^{1,2,3},张明礼¹

(1.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)

(2.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京 210023)

(3.南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏 南京 210023)

(4.中国环境科学研究院,北京 100012)

[摘要] 为研究太湖流域的水环境现状和污染特征,通过分析研究区氮磷负荷变化对土地利用方式的响应,对太湖流域各土地利用方式与氮磷负荷特征的相关性及其影响因素进行研究.结果表明:1980 年至 2010 年,太湖流域耕地面积占比由 63.89%降到 47.02%;而建设用地面积占比由 9.70%增加到 25.16%;林地面积微缩小;水域面积微提升;草地和未利用地面积不大且变化可忽略.各土地利用状态指数 D_i 大小依次为:建筑用地>耕地>未利用地>水域>林地>草地.太湖流域由于土地利用方式的转变带来的氮和磷排放对水体总氮(TN)负荷和总磷(TP)负荷的贡献均呈逐年递增趋势. TN 在 1980 年 3.71 万 t 的基础上,2010 年排放量增加了 67.51%. TP 负荷从 0.33 万 t 增加到了 2010 年的 0.85 万 t.

[关键词] 太湖流域,土地利用,转移矩阵,氮磷负荷,影响因子

[中图分类号] X502 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2020)02-0063-07

The Evolution of Land Use Types and Its Effects on the Nitrogen and Phosphorus Loads in the Taihu Lake Basin

Tian Jiaming¹, Wang Yanhua^{1,2,3}, Ye Chun⁴, Zhang Maoheng^{1,2,3}, Zhang Mingli¹

(1.School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

(3.Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(4.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To analyze the present status and pollution characteristics of water environment in the Taihu Lake basin, the response of nitrogen and phosphorus loads in the water body to land use types was investigated. The influencing factors were identified and compared. Results show that during 1980–2010, the percentage of cultivated land in the basin decreased from 63.89% to 47.02%, while that of the constructed land increased from 9.70% to 25.16%. For the forest land, the area decreased slightly, and the water area increased slightly. Both areas of grassland and unused land were small and no obvious change was observed. The order of D_i value of each land use type is as follows: constructed land> cultivated land> unused land> water area> forest land> grassland. The contribution of nitrogen and phosphorus discharged from each land use type to the water loads in the Taihu Lake basin due to the change of land use type is increasing annually. The discharged nitrogen amount increased by 67.51% in 2010 from 37 100 t in 1980. The phosphorus load was also enhanced from 3 300 t to 8 500 t in 2010.

Key words: Taihu Lake basin, land use, transition matrix, nitrogen and phosphorus loads, influencing factor

收稿日期:2019-05-14.

基金项目:国家“十三五”水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-005)、国家自然科学基金项目(41673107).

通讯作者:王延华,博士,教授,博士生导师,研究方向:流域生态环境演变. E-mail:wangyanhua@njnu.edu.cn

改革开放以来,随着经济的飞速发展,长江流域水环境问题日益凸显. 1980—2010 年,长江经济带氮素输入项中系统外源氮素输入比例逐年增加,引起了全社会的广泛关注^[1-2]. 其中,面源排放已经成为水环境污染的首要因子^[3-4]. 太湖流域地处长三角经济发达区,人口密集,水网交织,稻麦轮作. 近几十年来,随着经济、人口和政策的变化,土地利用类型发生了较大转变. 伴生的农业生产和人民生活释放的大量氮和磷,导致当地生态环境氮和磷负荷日益加重,直接或间接地影响流域的发展和生态环境演变^[4-6]. 以往研究聚焦于脱氮除磷技术的研发和工程示范,取得了不错的效果^[7],但是关于土地利用类型的时空变化对水环境污染负荷的影响少有涉及. 研究流域水体氮磷负荷对土地利用方式变化的响应,识别主要影响因子及其影响机制是目前迫切需要解决的问题. 本研究旨在通过对太湖流域 1980—2010 年间土地利用动态变化进行研究,结合同期该区域水体氮磷负荷变化的分析,探讨水体氮磷负荷对土地利用方式变化的响应机制,从而为该流域可持续发展与环境修复提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 图像解译

以 1980 年、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年 5 期太湖流域 1:100 000 的土地利用方式空间矢量数据为基础,利用 ArcGIS10.3 软件的相关分析功能,依据我国土地分类系统标准进行研究区土地利用类型解译. 将太湖流域的土地利用类型分为 6 类:林地、草地、水域、建筑用地、耕地和未利用地.

1.2 动态度与土地利用类型的状态指数计算

单一土地利用动态度分析^[8]能够用来体现太湖流域内某段时间里的土地利用方式的变化,并且对未来太湖流域的土地利用发展趋势具有一定的预测分析功能,计算式^[9]见式(1):

$$C_i = [(V_1 - V_2) / V_1] / T \times 100\%, \quad (1)$$

式中, C_i 是太湖流域某段时间里第 i 类土地利用类型的面积动态度. 若 $C_i > 0$,说明该地类面积在下降,若 $C_i < 0$,则说明该地类面积在上升; V_1 和 V_2 分别代表了研究区初期和末期的第 i 类土地利用类型的面积(km^2); T 代表研究时长,若 T 的设定是年, C_i 就是年动态度.

在土地利用类型的转换研究里,状态指数可以比较清晰、直观地体现土地利用类型的转换趋势. 通过对不同的土地利用类型面积的转化速率的对比,运用公式计算得到该种土地利用类型的状态指数 D_i ^[8,10].

1.3 输出系数模型选择

面源污染是指以非点源形式进入河流水网的各类污染来源^[11-14]. 输出系数法不仅精准度高,且使用起来方便简易,可以较好地与“3S”技术相结合,适用于研究非小尺度下的面源污染^[15-18]. 输出系数模型方程如式(2)所示:

$$L_j = \sum_{i=0}^m E_{ij} A_i. \quad (2)$$

本研究将氮和磷作为目标污染物进行研究. 式(2)中, L_j 为污染物 j 在研究区域的总负荷量,单位 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; i 为太湖流域土地利用种类,合计 m 类; E_{ij} 为污染物 j 在第 i 种土地利用方式下的输出系数,单位 kg/km^2 ; A_i 代表太湖流域里第 i 种土地利用方式的面积,单位 km^2 .

1.4 统计分析

太湖流域氮磷负荷的空间变异往往是多种源汇的综合结果. 为了评估人为和自然因素对太湖流域水环境氮磷负荷的影响,对研究区氮磷面源污染负荷的影响因子进行筛选. 采用 SPSS18.0 软件将相关性较强的因子综合在同一主成分中,各主成分彼此独立,取小残差绝对值和大累计方差百分比,分析主成分与原因子的相关性,相关系数的绝对值越大,表明主成分对该变量因子的代表性也越大. 进行相关性分析的过程中,对数据进行显著性检验.

2 结果与讨论

2.1 1980—2010 年太湖流域土地利用方式转变

2.1.1 数量变化

1980—2010 年总计 5 期 30 m×30 m 的太湖流域土地利用类型的解译图见图 1. 可见,太湖流域建筑用

地面积逐年显著增加,耕地面积减小,这和当地工业发展及城镇化进程有很大关系. 为量化研究区各土地利用类型的转化,计算了解译出来的 6 种土地利用类型的面积占比,结果如图 2 所示.

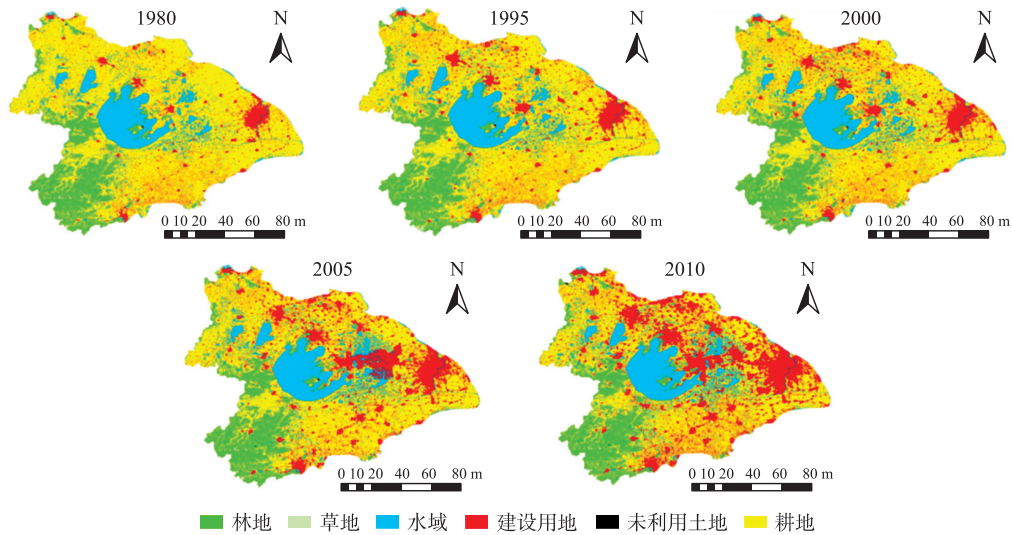


图 1 1980—2010 年太湖流域土地利用类型变化

Fig. 1 Changes of land use types in Taihu Lake basin during 1980–2010

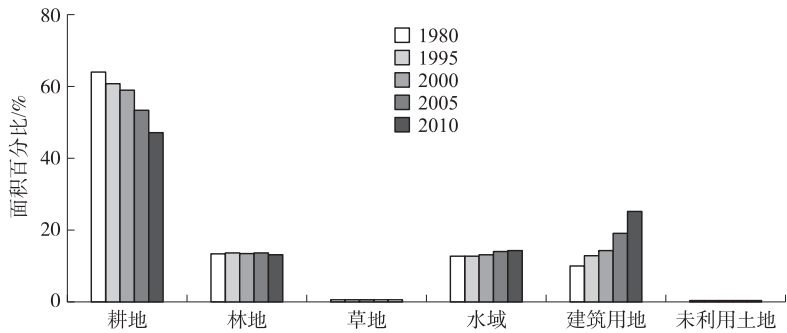


图 2 1980—2010 年太湖流域不同土地利用类型面积年际变化

Fig. 2 The area variation of different land use types in Taihu Lake basin during 1980–2010

由图 2 可知,1980—2010 年间太湖流域的建筑用地和耕地面积变化最为明显. 耕地面积占比由 1980 年的 63.89%减少到 2010 年的 47.02%. 而建设用地的面积占比由 9.70%增加到 25.16%. 图 1 和图 2 的研究结果可互为补充.

2.1.2 动态度变化

基于各期不同土地利用类型的面积,运用式(1)计算得到相对应时期的土地利用类型的动态度,结果见表 1. 由表 1 可知,在 1980—2010 年间,太湖流域不同的土地利用类型变化速率依次为:未利用地>建筑用地>水域>耕地>林地. 耕地(水田和旱地)动态度基本大于 0,说明近 30 年来,太湖流域耕地面积在不断下降. 而建筑用地和水域动态度一直小于 0,表示建筑用地面积和水域面积在不断升高. 未利用地、草地和林地动态度有正有负,总体上三者面积均呈上升趋势,但未利用地和草地占总面积的百分比很小. 1980—2010 年间,太湖流域耕地面积共减少 6 327.33 km²,建筑用地面积增加了 5 878.29 km²,水域面积略微增加. 建筑用地和水域面积的增加主要是占用了耕地. 城市化的发展促进了建筑用地面积的扩张.

表 1 1980—2010 年间太湖流域不同土地利用类型的动态度变化

Table 1 Dynamic degrees of different land use types in Taihu Lake basin during 1980–2010

%

时期	动态度					
	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用土地
1980—1995 年	0.33	-0.03	-0.03	-0.05	-1.99	0.17
1995—2000 年	0.58	0.06	0.36	-0.44	-2.50	0.12
2000—2005 年	1.95	-0.19	0.87	-1.44	-6.73	-3.97
2005—2010 年	2.44	0.66	-1.29	-0.14	-6.40	-48.50
1980—2010 年	0.90	0.07	-0.01	-0.37	-5.26	-9.93

2.1.3 土地利用类型转移矩阵

使用 ArcGIS 的相关功能得到每期的不同土地利用类型的转移矩阵^[19]. 计算出 1980—2010 年各期土地利用类型状态指数 D_i (表 2). 由表 2 可知,1980—1995 年,太湖流域未利用土地和耕地的 D_i 均大于 0,表明这两种土地利用类型的面积在不断减少. 耕地的状态指数为 0.66,说明其面积下降速率相对较快,转出部分主要转向了建筑用地. 林地、草地、水域和建筑用地的 D_i 均为负值,可见其面积都在扩增,其中建筑用地的状态指数为-0.71,增速最快,且主要来自耕地. 1995—2000 年,太湖流域水域和建筑用地 D_i 均为负值,其变化趋势同 1980—1995 年. 林地、草地、未利用土地和耕地的面积都在缩减,且耕地转向建筑用地部分占总转出部分的 63.35%. 2000—2005 年,太湖流域草地和耕地面积在减小,林地、水域、建筑用地和未利用土地的面积在扩增. 其中,建筑用地的土地利用类型 D_i 绝对值最大,说明建筑用地的转换速率最快,且 94.9%来源于耕地. 2005—2010 年,太湖流域林地和耕地的面积在缩减,草地、水域、建筑用地和未利用土地的面积在扩增. 和 2000—2005 年一样,建筑用地的土地利用类型 D_i 为 -0.54,91.0%来自耕地. 可见,1980 年以来的 30 年间,建筑用地 D_i 绝对值最高,面积变化量最大. 林地、水域和建筑用地 90%以上的面积增加都来源于耕地面积的减小.

表 2 1980—2010 年各期土地利用类型转移矩阵及状态指数
Table 2 Transfer matrix and status index of land use types during 1980–2010

时期	地类	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地	耕地	总转出
1980–1995 年	林地	4 863.90	29.73	0.98	5.86	0.50	9.19	46.26
	草地	4.58	156.10	1.32	2.06	0.12	3.81	11.89
	水域	0.93	0.01	4 556.26	5.25	—	71.73	77.92
	建筑用地	3.94	0.01	5.01	3 353.27	—	212.21	221.18
	未利用地	0.94	—	—	—	13.21	0.16	1.11
	耕地	57.82	0.18	108.05	1 274.52	0.13	22 083.95	1 440.70
	总转入	68.22	29.94	115.36	1 287.69	0.75	297.10	1 799.05
	D_i	-0.19	-0.43	-0.19	-0.71	0.19	0.66	—
1995–2000 年	林地	4 878.59	4.61	2.73	32.81	1.17	12.82	54.13
	草地	28.64	155.30	1.03	1.05	0.03	0.04	30.77
	水域	0.91	2.77	4 651.13	11.90	—	9.65	25.22
	建筑用地	3.37	0.09	5.37	4 478.75	—	155.33	164.16
	未利用地	—	0.03	1.28	—	12.65	—	1.31
	耕地	9.46	2.83	116.93	699.72	0.03	21 563.55	828.97
	总转入	42.38	10.33	127.32	745.47	1.23	177.84	1 104.57
	D_i	0.12	0.50	-0.67	-0.64	0.03	0.65	—
2000–2005 年	林地	4 427.05	42.18	16.07	53.33	3.28	372.57	487.43
	草地	46.98	101.48	4.95	2.34	1.04	8.44	63.75
	水域	34.24	5.96	4 479.19	72.06	0.19	189.37	301.82
	建筑用地	35.02	1.30	37.87	4 483.06	0.01	665.29	739.50
	未利用地	1.68	0.20	—	0.30	11.07	0.63	2.81
	耕地	417.02	7.29	577.03	2 369.28	1.04	18 365.06	3 371.66
	总转入	534.93	56.92	635.92	2 497.32	5.56	1 236.30	4 966.96
	D_i	-0.05	0.06	-0.36	-0.54	-0.33	0.46	—
2005–2010 年	林地	4 340.36	52.58	27.25	129.01	23.84	388.67	621.36
	草地	39.90	100.57	2.62	5.55	1.26	8.50	57.82
	水域	11.73	1.41	4791.95	151.87	—	158.10	323.11
	建筑用地	35.06	3.19	38.30	6 029.43	7.82	866.54	950.92
	未利用地	2.54	0.07	0.27	1.62	11.42	0.72	5.22
	耕地	374.43	10.80	306.08	2 898.46	12.63	15 998.92	3 602.39
	总转入	463.66	68.04	374.51	3 186.51	45.56	1 422.52	5 560.81
	D_i	0.15	-0.08	-0.07	-0.54	-0.79	0.43	—
1980–2010 年	林地	4 673.14	16.70	11.98	124.27	24.19	53.11	230.26
	草地	7.35	139.58	6.87	9.26	2.60	1.92	28.01
	水域	1.07	7.13	4 443.39	126.45	0.24	51.59	186.48
	建筑用地	4.79	0.39	10.57	3 478.36	3.93	73.82	93.49
	未利用地	0.92	0.01	1.65	1.23	10.42	0.08	3.90
	耕地	115.53	4.80	682.68	5 474.60	15.59	17 223.66	6 293.19
	总转入	129.67	29.02	713.75	5 735.82	46.54	180.52	6 835.33
	D_i	0.28	-0.02	-0.59	-0.97	-0.85	0.94	—

2.2 不同土地利用方式下氮磷排放的年际变化特征

由表 3 可知,太湖流域不同土地利用方式下 1980 年、1995 年、2000 年、2005、2010 年总氮(TN)排放量均呈逐年持续上升的势头,分别为 3.71 万 t/a、3.73 万 t/a、5.76 万 t/a、5.85 万 t/a、6.15 万 t/a。TN 负荷的最大贡献均来自耕地。林地、草地和未利用地的 TN 负荷变化不大,且草地和未利用地 TN 负荷极少。水域和建筑用地的 TN 负荷逐年持续上升。

表 3 1980—2010 年太湖流域不同土地利用方式下总氮负荷量
Table 3 The TN load in different land use types in Taihu Lake basin during 1980–2010 10⁴ t/a

年份	TN 负荷						
	水田	旱地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
1980	2.39	0.21	0.12	0.01	0.59	0.39	0.00
1995	2.41	0.08	0.12	0.01	0.60	0.51	0.00
2000	3.90	0.24	0.16	0.01	0.61	0.84	0.00
2005	3.53	0.21	0.09	0.01	0.89	1.12	0.00
2010	2.89	0.26	0.03	0.00	1.13	1.84	0.00

太湖流域不同土地利用方式下总磷(TP)排放量也逐年上升(表 4)。1980 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年分别为 0.33 万 t/a、0.33 万 t/a、0.35 万 t/a、0.52 万 t/a、0.85 万 t/a。其中,林地、草地和未利用地排放磷负荷极小且变化不大,耕地的磷负荷每年略微缩小。水域和建筑用地对水体磷负荷的贡献逐年增加。

表 4 1980—2010 年太湖流域不同土地利用方式下总磷负荷量
Table 4 The TP load in different land use types in Taihu Lake basin during 1980–2010 10⁴ t/a

年份	TP 负荷						
	水田	旱地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
1980	0.26	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00
1995	0.25	0.01	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00
2000	0.22	0.02	0.03	0.00	0.02	0.06	0.00
2005	0.20	0.02	0.00	0.00	0.06	0.24	0.00
2010	0.17	0.02	0.01	0.00	0.10	0.55	0.00

由计算结果可知,不同土地利用类型对氮磷输出负荷的影响较为显著。而输出系数法的计算结果是由输出系数与土地利用类型的面积所决定,即某土地利用类型的面积越大或者输出系数越高,其输出的氮磷负荷越高。输出系数又是由降雨强度、地形地貌、气候、土壤类型、植被类型、猪、牛、羊、家禽、农村和城镇人口、居民面源污染的排放和处理情况等因素通过多元线性相关分析所确定^[20]。由此可以得出,推动城市化发展、减少农药及化肥的使用量、提高土壤肥力和利用效率、合理管理农村生活污水和生活垃圾的排放、优化畜禽养殖业的技术水平等是减少太湖流域氮磷负荷量的关键因素。

2.3 土地利用方式变化对流域面源污染的影响

2.3.1 输出系数确定

本研究的输出系数参照了有关区域的统计年鉴以及前人研究的相关成果^[21–27]。其中,耕地的输出系数分为水田和旱地两类,具体见表 5。

表 5 太湖流域不同土地利用类型氮磷输出系数表
Table 5 Output coefficients of TN and TP loads in different land use types in Taihu Lake basin

年份	营养盐	输出系数/(kg/(hm ² ·a))						
		水田	旱地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
1980	TN	19.40	14.70	2.38	8.00	12.75	11.00	1.49
	TP	1.22	0.59	0.15	0.20	0.36	0.91	0.05
1995	TN	19.40	14.70	2.38	8.00	12.75	11.00	1.49
	TP	1.22	0.59	0.15	0.20	0.36	0.91	0.05
2000	TN	12.00	12.00	3.20	3.50	12.75	16.00	1.49
	TP	1.10	1.10	0.60	0.60	0.36	1.20	0.05
2005	TN	12.00	12.00	1.90	3.20	21.90	20.00	1.49
	TP	1.10	1.10	0.05	0.18	1.99	6.00	0.05
2010	TN	18.32	18.32	0.712	2.20	17.33	16.00	1.49
	TP	2.56	2.56	0.18	0.18	1.175	3.45	0.05

2.3.2 影响因素解析

选取人口密度 X_1 、人均 GDP X_2 、城镇化率 X_3 、建筑用地面积占比 X_4 、耕地面积占比 X_5 和污水排放量 X_6 6 个因子,运用 SPSS18.0 软件的主成分分析功能对太湖流域 1980—2010 年的因子数据进行分析,统计结果如表 6 所示. 可见,6 个因子中, X_5 逐年减小, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_6 逐年显著增加. 这也与土地利用方式的解译结果(图 1 和图 2)相一致.

表 6 1980—2010 年各因子变化
Table 6 The data of variables during 1980—2010

年份	变量					
	人口密度 $X_1/(人/km^2)$	人均 GDP $X_2/(万元/人)$	城镇化率 $X_3/\%$	建筑用地面积占比 $X_4/\%$	耕地面积占比 $X_5/\%$	污水排放量 $X_6/(亿 t)$
1980	860	0.34	36	10	64	28.60
1995	987	1.41	55	13	60	45.30
2000	1 054	2.50	67	14	59	53.40
2005	1 230	4.70	73	19	53	60.40
2010	1 563	7.50	78	25	47	63.20

根据表 6 数值,提取出特征值大于 1 的主成分 F_1 ,见表 7. 主成分解释方差的比例越大,表明主成分包含原有变量信息量越多.

$$F_1 = 0.173X_1 + 0.174X_2 + 0.166X_3 + 0.174X_4 - 0.175X_5 + 0.166X_6. \tag{3}$$

F_1 集中了原始变量 94.30% 的信息. 式(3)给出了 F_1 与 6 个因子的相关关系,相关系数无显著差异. F_1 与因子 X_5 (耕地面积占比)负相关,说明随着耕地面积的减小, F_1 增大. 与其余 5 个因子正相关. 研究结果与相关研究者的研究结果具有较好的一致性^[28-30],且符合城市化发展的一般规律.

3 结论

(1)1980—2010 年,随着城市化进程的推进,太湖流域耕地缩小速率较快,2010 年比 1980 年缩小了 16.87%. 林地面积小幅减小. 草地、水域、建筑用地和未利用地面积在扩增且建筑用地面积扩增速率最快(15.46%). 耕地面积缩减速率和建设用地面积扩增速率逐年加快,虽然水域和建筑用地面积的增加主要占据的是耕地,但该区域仍然以耕地面积为主.

(2)1980—2010 年,不同土地利用类型的状态指数大小为:建筑用地>耕地>未利用地>水域>林地>草地. 转移矩阵分析结果显示,1980 年以来的 30 年间,建筑用地 D_i 值偏负, $-0.54 \sim -0.97$,耕地 D_i 值偏正, $0.46 \sim 0.94$,二者面积变化量最大. 林地、水域和建筑用地 90% 以上的面积增加都来源于耕地面积的减小.

(3)输出系数模型计算结果显示太湖流域不同土地利用方式下氮排放对水域 TN 负荷的贡献呈上升趋势,从 3.71 万 t(1980 年)到 6.15 万 t(2010 年). TP 负荷变化趋势与 TN 类似,从 0.33 万 t(1980 年)增加到了 0.85 万 t(2010 年). 人类活动是导致这一变化的关键因素. SPSS 主成分分析说明人口密度、人均 GDP、城镇化率、建筑用地面积变化和污水排放量是主要驱动力.

[参考文献]

[1] 韦雪骐. 太湖流域水环境保护对策研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
[2] 高伟,白辉,严长安,等. 1952—2016 年长江经济带天然与人为氮输入时空演变趋势[J]. 环境科学学报,2019,39(9): 3134–3143.
[3] 牛勇. 太湖入湖河流污染特征及面源污染负荷研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013.
[4] TI C P, XIA Y Q, PAN J J, et al. Nitrogen budget and surface water nitrogen load in Changshu: a case study in the Taihu Lake

- region of China[J]. Nutrient cycling in agroecosystems,2011,91(1):55-66.
- [5] 王丹,王延华,杨浩,等. 太湖流域农田生产-畜禽养殖系统氮素流动特征[J]. 环境科学研究,2016,29(3):47-54.
- [6] 咸义,叶春,李春华,等. 太湖竺山湾缓冲带鱼类资源现状及调控措施研究[J]. 南京师大学报(自然科学版),2016,39(4):86-91.
- [7] 林岚,张彦隆,曹文志,等. 同步脱氮除磷技术研究进展[J]. 工业水处理,2019,39(10):7-13.
- [8] 陈西,王延华,蔡祖聪,等. 常熟市水体氮负荷对土地利用方式的响应[J]. 土壤,2018,50(4):674-680.
- [9] 肖靖,于伟,魏娜,等. 基于 RS 和 GIS 技术的常熟市土地利用动态变化研究[J]. 安徽农业科学,2007(31):10150-10154.
- [10] 仙巍,邵怀勇,周万村. 嘉陵江中下游地区近 30 年土地利用与覆被变化过程研究[J]. 地理科学进展,2005(2):114-121.
- [11] 金洋,李恒鹏,李金莲. 太湖流域土地利用变化对非点源污染负荷量的影响[J]. 农业环境科学学报,2007(4):1214-1218.
- [12] 王与. 模拟土地利用变化对地下水硝酸盐面源污染影响的研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [13] 荆延德,张华美. 基于 LUCC 的南四湖流域面源污染输出风险评估[J]. 自然资源学报,2019,34(1):128-139.
- [14] 朱乾德,孙金华,颜志俊,等. 太湖平原水网区非点源污染模型的适用性研究[J]. 人民长江,2013,44(11):39-45,53.
- [15] 刘奇. 流域农业径流月产污模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [16] 徐嘉兴,李钢,张海荣. 太湖流域土地利用变化及其驱动力定量分析[J]. 国土与自然资源研究,2012,3:19-21.
- [17] 张落成,刘存丽.太湖流域土地利用变化特征与机制分析[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(10):1205-1210.
- [18] 刘瑞民,沈珍瑶,丁晓雯,等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报,2008(2):677-682.
- [19] 潘竞虎,胡艳兴. 疏勒河中下游近 35 年土地利用与景观格局动态[J]. 土壤,2014,46(4):742-748.
- [20] 薛利红,杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志,2009,28(4):755-761.
- [21] 周跃龙,汪怀建,余辉,等. 应用输出系数模型对太湖流域面源污染负荷测算研究[J]. 江西农业大学学报,2014,36(3):678-683.
- [22] 连慧姝. 太湖平原水网区氮磷流失特征及污染负荷估算[D]. 北京:中国农业科学院,2018.
- [23] 李恒鹏,刘晓玫,黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出[J]. 地理学报,2004,59(3):401-408.
- [24] 赵广举,田鹏,穆兴民,等. 基于 PCRaster 的流域非点源氮磷负荷估算[J]. 水科学进展,2012,23(1):80-86.
- [25] 邱凉,罗小勇,程红光. 长江流域大尺度空间非点源污染负荷研究[J]. 人民长江,2011,42(18):81-84.
- [26] 姚玉鑫,张英,周李,等. 南太湖地区农村小流域非点源污染调控研究[J]. 资源科学,2011,33(2):230-235.
- [27] 李根,毛锋. 我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估[J]. 中国水土保持,2008,2:9-11.
- [28] KWANG W J,SANG W L,HA S H,et al. The effects of spatial variability of land use on stream water quality in a costal watershed[J]. Paddy and water environment,2008,6(3):275-284.
- [29] STEHR A,AGUAYO M,LINK O,et al. Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning[J]. Hydrology and earth system sciences,2010,14(10):1963-1977.
- [30] 吴菲,吴俊锋,凌虹,等. 太湖流域土地利用变化研究[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(S1):143-145.

[责任编辑:丁 蓉]