

常熟市水体氮负荷对土地利用方式的响应^①

陈西¹, 王延华^{1,3,4,5*}, 蔡祖聪^{1,3,4,5}, 周伟², 杨浩^{1,3,4,5}

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023; 4 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 5 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

摘要: 为研究水环境变化对土地利用方式的响应, 以常熟地区为例, 利用 ArcGIS10.0 空间分析功能和 SPSS 相关性分析方法, 对常熟市各土地利用类型和水体总氮含量进行了分析。结果表明: 1990—2010 年间常熟地区耕地和水域面积在持续缩减, 建设用地和林地面积在增加; 各土类状态指数(D_i)大小依次为: 建设用地>林地>草地>耕地>水域; 建设用地面积的增加主要占据的是耕地和水域, 水域面积的缩减主要被耕地占用; 耕地面积与水体总氮含量呈显著性负相关关系($r = -0.959^*$, $P < 0.05$), 说明种植型污染贡献比例在下降; 林草地与水体总氮含量无显著相关性; 建设用地与水体总氮含量呈显著性正相关关系($r = 0.929^*$, $P < 0.05$), 说明建设用地造成了点源污染。

关键词: 常熟市; 水体氮负荷; 土地利用类型; 转移矩阵; Pearson 相关分析

中图分类号: X502 文献标识码: A

随着经济发展和城市化进程加快, 生活污水的直接排放和农田大量化肥的投入使得区域环境问题越发严重^[1-3]。近年来, 土地利用方式与水环境质量关系的研究引起学者的广泛关注^[4-8]。不同的流域因土地利用方式及影响因素的不同, 水环境对土地利用方式的响应结果存在差异^[4-5,9]。

据报道, 太湖流域总氮负荷量的 51.3% 来自于农业面源污染, 其中 25.5% 来自于农田种植业^[2]。伴随产业结构调整, 常熟市土地利用方式也发生了相应变化^[10]。近年来, 农作物种植过量施用氮肥, 常熟市农田平均施氮水平为 570 ~ 600 kg/(hm²·a), 化肥利用率仅为 30% ~ 35%^[11], 余下大部分随地表径流和地下渗漏进入水体, 极大增加了肥料的径流损失率和淋溶损失率, 必将加大水体氮负荷。而太湖地区畜禽养殖的突出特点是许多养殖场建于河旁与湖滨地带, 甚至直接建于河湖水体内部, 造成大量氮素盈余于水体^[11]。当地畜禽粪便处理率约为 65%, 在未经处理的畜禽排泄物中, 近 30% 直接进入水体^[12]。如不加以适当调控, 常熟地区氮负荷将增大到什么程度? 识别土地利用方式对水环境

的影响程度, 研究长效调控机制是目前迫切需要解决的问题。本研究旨在通过对常熟市 1990—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负荷变化的分析, 探讨水体氮负荷对土地利用方式变化的响应机制, 从而为该地区经济发展与环境治理提供参考。

1 研究区概况

常熟市位于太湖平原北部, 属苏州市, 地处 120°33'~121°03' E, 31°33'~31°50' N, 北接长江, 东临上海(图 1)。境内地势较低平, 河网交织, 以城区为中心成放射状分布且南密北稀, 主要河湖有常浒河、望虞河、昆承湖和尚湖等。气候温和湿润, 四季分明, 年均降水量约 1 135.4 mm, 年均温 16.2 。截至 2010 年常熟市总面积 1 276 km², 其中建设用地面积 338.9 km², 水域面积 215.47 km², 耕地面积 706.5 km²。主要作物为水稻和小麦, 一年两熟。作物肥料中, 化肥投入量大, 化肥的当季利用效率仅为 30%, 区域水体严重恶化^[11]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273102)、国家重大科学研究计划项目(2014CB953801)和南京师范大学百人计划项目(184080H20181)资助。

* 通讯作者(wangyanhua@njsu.edu.cn)

作者简介: 陈西(1993—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 研究方向为氮素迁移转化对环境的影响。E-mail: chenxi_njsu@126.com

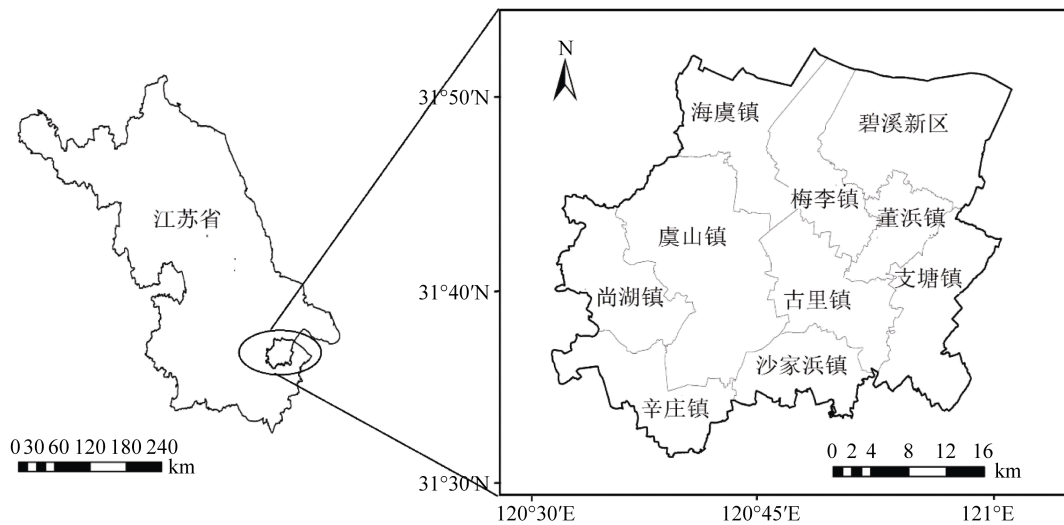


图 1 常熟区位及行政区划
Fig. 1 Location and administrative divisions of Changshu City

2 研究方法

2.1 图像解译

基于 1990 年、2000 年、2005 年和 2010 年 4 期空间分辨率为 30 m × 30 m 的常熟市土地利用类型分布图,借助 ArcGIS 进行前期的几何校正、空间配准、空间分析,并按照全国土地分类系统标准进行解译,将研究区土地利用类型分为 5 大类,分别为草地、水域、耕地、建设用地和林地。后期利用 Adobe Photoshop (CS 5)等软件进行图片处理和完善。

2.2 动态度分析

土地利用类型变化、利用程度变化和变化的区域差异是土地利用动态度研究的 3 个主要方面,其中单一土地利用动态度是土地利用动态度分析的方法之一,可用来描述某区域某时段内某种土地利用类型的变化程度,并对未来该区域的土地利用变化趋势具有

一定的科学预测作用。其表达式^[13]为

$$R_i = [(U_a - U_b) / U_a] / T \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_i 为研究区域的某种土地利用方式在某时段内的动态率, R 为正值, 则该类土地面积有缩小趋势, 反之有增大趋势; U_a 和 U_b 分别为该研究区期初和期末的某种土地利用方式的面积; T 为研究时段长, 当 T 设定为年时, R_i 即为年动态率。

2.3 土地利用类型状态指数获得

在土地利用/覆被变化中, 状态指数可以清楚地反映某土地利用类型的转换趋势和状态, 通过对某土地利用类型的转入和转出速度比较, 利用公式(2)计算该土地利用类型的状态指数 D_i ^[14]。

$$D_i = (v_{out} - v_{in}) / (v_{out} + v_{in}) \quad (-1 < D_i < 1) \quad (2)$$

式中 D_i 为研究区某时段内某土地利用类型的状态指数, 其意义见表 1。 v_{in} 和 v_{out} 表示研究区某时段内某土地利用类型的转入和转出速度。

表 1 参数 D_i 值的不同范围及意义对照表
Table 1 Different ranges and significances of D_i values

参数 D_i 数值范围	意义
-1 D_i 0	研究时段内该土地利用类型的转入速度大于转出速度, 该土地利用类型有规模增大趋势
0 D_i 1	该研究时段内该土地利用类型的转入速度小于转出速度, 有缩小趋势
D_i 趋于 -1	转入速度远大于转出速度, 该类土地面积大量增加
D_i 趋于 1	转入速度远小于转出速度, 该类土地面积大量减小
D_i 趋于 0	该类土地转入和转出速度相当, 基本处于平衡状态

2.4 相关性分析

基于解译后常熟市土地利用方式数据和常熟市氮负荷监测数据, 运用 SPSS 和 Excel 等软件对数据进行处理, 从而对该区域水体氮负荷对土地利用方式变化的响应程度进行分析。首先对研究区水体总氮含量的影响因子进行选取^[22], 再进行曲度估计, 选取

适合的函数对数据进行分析。曲度估计结果显示各影响因子和水质数据呈现线性关系, 因此, 本文采用的是皮尔逊(Pearson)相关性分析^[14], 其是一种度量两个变量间相关程度的统计学方法, 相关系数用 r 表示。在用 SPSS 软件进行相关性分析过程中, 对所有数据进行显著性检验。

3 结果与讨论

3.1 土地利用数量变化特征

运用 ArcGIS10.0 软件的空间分析和统计功能分别解译获得 1990 年、2000 年、2005 年、2010 年常熟市各类土地利用类型分布图,并计算得到各土地利用类型的面积比例,结果见图 2。由图 2 可知,1990—2010 年间常熟市耕地和建设用地的变化幅度最大,耕地面积比例由 1990 年的 68.93% 降到 2010 年的 55.33%,而建设用地面积比例由 1990 年的 11.36% 升高到 2010 年的 26.54%。2005—2010 年间,常熟市耕地和建设用地的变化幅度最大,这和该地区的城市化进程有很大关系。其他用地类型,在 1990—2010 年间,草地面积比例较低且基本保持不变,林地面积比例略有增加。水域面积在 1990—2000 年期间比例增高,而在 2000—2010 年间比例下降,总体水域面积比例呈下降趋势,可能是城市化建设和围湖造田等原因导致^[10]。

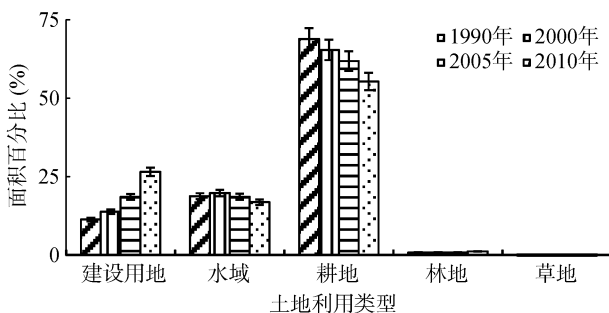


图 2 1990—2010 年间常熟市各土地利用类型年际变化
Fig. 2 Changes of land use types from 1990 to 2010 in Changshu City

3.2 土地利用时空变化特征

3.2.1 土地利用类型动态变化特征 根据 1990—2010 年各期土地利用类型的面积(表 2),由公式(1)计算可得出相应时期土地利用类型动态度(表 3)。由表 2 和表 3 可知,在 1990—2010 年间,常熟市土地利用类型变化速度依次为:建设用地>草地>林地>耕地>水域,并且耕地动态度一直为正值,说明近 20 a 来,常熟市耕地面积在不断减少;而建设用地动态度一直为负值,表示建设用地面积在不断扩加。草地和林地动态度有正有负,总体上二者面积呈扩大趋势,但占总土地面积比例很小。水域动态度在 1990—2000 年间为负值,水域面积略有增加,而在 2000—2010 年间,水域面积在缩小。1990—2010 年间,常熟市耕地面积共减少了 173.64 km²,水域面积减少了 24.54 km²,建设用地面积增加了 193.84 km²。可基本

说明建设用地面积的增加主要是占用了耕地和水域;城市化的发展促使了建设用地面积的扩张,并且扩张的速度在加快,但总体上常熟地区土地利用类型仍然以耕地为主。

表 2 1990—2010 年常熟各土地利用类型面积(km²)
Table 2 Areas of land use types from 1990 to 2010 in Changshu City

类型	1990 年	2000 年	2005 年	2010 年
耕地	880.14	835.75	790.03	706.50
林地	10.97	10.98	11.00	15.04
草地	0.66	0.65	0.96	0.95
水域	240.01	252.67	237.67	215.47
建设用地	145.05	176.80	237.18	338.89

表 3 1990—2010 年常熟各土地利用类型的土地利用动态度(%)
Table 3 Dynamic degrees of land use types from 1990 to 2010 in Changshu City

时期	耕地	草地	林地	水域	建设用地
1990—2000 年	5.04	0.15	-0.01	-5.28	-2.19
2000—2005 年	1.09	-9.54	-0.04	1.19	-6.83
2005—2010 年	2.11	0.21	-7.35	1.87	-8.58
1990—2010 年	0.99	-2.20	-1.86	0.51	-6.68

3.2.2 土地利用类型转移矩阵 利用 ArcGIS10.0 空间分析功能计算每期各土地利用类型转移矩阵^[17],再利用公式(2)计算 1990—2010 年各期土地利用类型状态指数 D_i (表 4)。由表 4 数据可以得出:

1) 1990—2000 年,常熟市水域和建设用地状态指数为负值,表明二者土地面积不断增加,其中建设用地状态指数为 -0.40,增速较快,增加了约 55.52 km²,主要来自于耕地。水域状态指数为 -0.23,增速较慢,转入部分也主要来自于耕地,原因一方面是由于农业结构调整,水产养殖业的兴起,另一方面是“八五”期间常熟市政府总结洪涝灾害经验教训,掀起大干水利热潮并取得显著成效^[10]。草地、耕地和林地状态指数皆为正值,表明其占地面积都在缩小。耕地状态指数为 0.36,面积缩减速度最快,缩减了约 84.54 km²,转出部分主要转向了水域和建设用地。主要原因可能是常熟市加强城乡规划,进行老城区改造,全面开展招商引资,从而促使了建设用地面积的扩张^[10]。

2) 2000—2005 年,常熟市草地、林地和建设用地面积都在增加,水域和耕地面积在缩减。建设用地面积的增加主要来自于耕地和水域,增加了约 84.75 km²。耕地面积主要转移到水域和建设用地,缩减了约 92.45 km²。水域转出部分主要转向了耕地,缩减了约 32.63 km²,其中转向耕地部分占总转

出部分的 76.62%。林地、草地面积的增加主要是常熟市加大了城镇景观改造、绿化建设和防护林及经济林建设的力度。

3)2005—2010 年,常熟市建设用地和林地面积在增加,水域、耕地和草地面积在缩减。建设用地状态指数达到 -0.96,说明在此期间,建设用地面积扩展速度较快。建设用地的转入部分主要来自于耕地,约占总转入部分的 92.97%。耕地转出部分

主要转向了建设用地和水域,其中转向建设用地部分占总转出部分的 83.97%。水域转出部分主要转向了耕地,共缩减了 37.62 km²。在此期间,除了草地,其他土地利用类型状态指数绝对值均达到最大,表明常熟市各土类转换速度加快,也间接地说明研究期间常熟市的城市化速度在加快,林地面积的增加说明 1999 年以来的退耕还林国策取得一定的成效。

表 4 1990—2010 年各期土地利用类型转移矩阵及状态指数
Table 4 Transfer matrixes and status indices of land use from 1990 to 2010

研究时期	土类	草地	水域	耕地	建设用地	林地	总转入
1990—2000 年	草地	0.53	0.01	0.05	0.04	-	0.11
	水域	0.02	218.10	32.08	2.40	0.005	34.50
	耕地	0.05	18.63	797.83	21.07	0.16	39.91
	建设用地	0.05	3.08	52.23	119.05	0.16	55.52
	林地	-	0.008	0.18	0.13	10.66	0.32
	总转出	0.12	21.73	84.54	23.64	0.33	130.36
	D_i	0.06	-0.23	0.36	-0.40	0.01	-
2000—2005 年	草地	0.55	0.03	0.05	0.33	-	0.41
	水域	0.01	219.97	15.33	2.23	0.01	17.58
	耕地	0.03	24.99	745.21	21.32	0.15	46.49
	建设用地	0.05	7.59	76.94	150.55	0.17	84.75
	林地	-	0.01	0.18	0.16	10.66	0.34
	总转出	0.09	32.63	92.50	24.04	0.32	149.57
	D_i	-0.65	0.30	0.33	-0.56	-0.03	-
2005—2010 年	草地	0.94	-	0.007	0.002	-	0.008
	水域	0.01	199.92	15.07	0.23	0.007	15.32
	耕地	-	33.74	671.77	2.15	0.002	35.89
	建设用地	0.003	3.84	100.84	232.94	0.03	104.71
	林地	-	0.05	3.99	0.03	10.96	4.07
	总转出	0.01	37.62	119.91	2.41	0.04	159.99
	D_i	0.27	0.42	0.54	-0.96	-0.98	-
1990—2010 年	草地	0.62	0.01	0.01	0.31	-	0.33
	水域	0.01	183.77	31.12	0.33	0.01	31.46
	耕地	0.003	42.16	663.39	2.08	0.002	44.24
	建设用地	0.0	13.81	183.82	139.89	0.06	197.71
	林地	-	0.05	3.96	0.09	10.92	4.11
	总转出	0.03	56.04	218.91	2.81	0.07	277.85
	D_i	-0.85	0.28	0.66	-0.97	-0.97	-

4)1990—2010 年,常熟市草地、建设用地和林地的面积在增加,水域和耕地面积在缩减。其中,草地、林地的面积比例较小,总变化面积相对较小。建设用地面积变化量最大,建设用地面积的增加主要占用的是耕地,原因是城市化的发展促使城镇用地的扩张而占用了大量的耕地资源。水域面积减少的原因主要是被耕地占用,原因可能是人口增加,耕地资源紧

张,占用部分水域造田或局部地区农业结构调整、农田规划导致。

对比 1990—2010 年间 3 期各土地利用类型转化量累和与总转化量,发现前者大于后者,说明常熟市各土地利用类型在此期间有重复转化的现象,即一种土地转化成其他土类后可能在另一时段中再转回本类,也间接表明政府阶段性的政策调整。例如:1990

—2000 年间,耕地转入水域面积 32.08 km²,而水域转入耕地只有 18.63 km²,是因为在此期间兴修水利、退田还湖和水产养殖占用不少耕地;而 2000—2005 年间,耕地转入水域量在减少而水域转入耕地量在增多,一方面是人口增加耕地资源紧张围湖造田,另一方面是水产养殖业的结构调整,为提高养殖效率而退湖还田^[10]。

表 5 1990—2010 年各因子与水体总氮含量相关性

Table 5 Correlation coefficients between each factor and total nitrogen content of water from 1990 to 2010

	单位面积农 业收入	单位面积非 农业收入	单位面积氮 肥投入量	人口	林草地面积	耕地面积	建设用地 面积
总氮	0.895	0.861	0.993**	0.934*	0.805	-0.959*	0.929*
COD _{Mn} ^[18-19]	-0.703	-0.667	-0.949*	-0.824	-0.585	0.879	-0.836
总磷 ^[18-21]	0.991**	0.998**	0.828	0.940*	0.999**	-0.913*	0.934*

注:**表示在 $P < 0.01$ 水平(单侧)极显著相关; *表示在在 $P < 0.05$ 水平(单侧)显著相关; COD_{Mn} 表示用高锰酸钾测定的化学需氧量。

由表 5 可知,在 1990—2010 年间,影响因子中的建设用地面积和单位面积氮肥投入量与水体总氮含量呈显著性正相关关系,耕地面积与水体总氮和总磷含量呈显著负相关关系。其中,林草地面积与水体总磷含量呈极显著正相关关系,与总氮含量无显著相关关系,与其他学者研究结果有差异^[4-7]。原因一方面可能是常熟的林草地面积比例较小且总面积增幅较缓;另一方面,从常熟市各土地利用类型分布图上可以看出,林草地基本上集中在虞山国家森林公园,其他区域较少,对该市总的水质调节作用有限。此外,耕地面积与 COD_{Mn} 含量、化肥投入量与总磷含量都无显著相关关系,可能是该研究时间跨度长,受政策等其他因素影响较大。例如,2010 年常熟地区水体总氮为 2.77 mg/L,较 2006 年水质改善^[19]。近些年来常熟市政府重视环境治理与保护,特别是 2007 年“无锡供水危机事件”后加强了对尚湖、昆承湖等区域的水环境修复和生态建设,取得了一定成效,短期内水质有改善趋势,这对相关性分析结果有较大影响。但,该区域水质整体上仍在劣 V 类级别,水环境污染严重,水治理刻不容缓。

常熟市水体总氮含量和单位面积化肥投入量(折纯量)呈极显著正相关关系($r = 0.993^{**}$, $P < 0.01$),说明常熟市农业化肥的过量投入是造成水体总氮含量增加的一个重要因素。而根据表 5 可知,耕地面积与水体总氮含量呈负相关关系($r = -0.959^{*}$, $P < 0.05$),可能是常熟市城市化率由 1990 年的 17.20% 增长到 2005 年 62.30%^[10],城市化比例大大增加,促使了建设用地面积的扩张,一方面促使农村人口流入城市,农村劳动力减少;另一方面,建设用地占用了大量的

3.3 水质对土地利用方式的响应

对影响水质的相关因子进行筛选,保留了耕地面积、建设用地面积、林草地面积、单位面积农业产值、单位面积非农业产值、人口和单位面积氮肥投入量^[8] 7 个因子,统计了研究区内文献中的水质数据,利用 SPSS18.0 软件对研究区 1990—2010 年的数据进行了分析,结果见表 5。

耕地,二者都使得农村耕地总面积在缩减,从而使耕地面积和水体总氮含量呈现了负相关关系,但这种单位面积的化肥高投入方式对水体总氮浓度的贡献不容忽视。

农业面源污染仍然是太湖流域水体污染的主要来源,而农业面源污染中,畜禽养殖、种植业和生活用水占主要部分^[2]。据统计年鉴^[10]知(表 6),该区域单位面积化肥投入量在不断增加,且高于全国其他地区^[22],但自 2010 年以来,总施肥量基本保持稳定不变^[10]。鉴于耕地面积缩减且缩减速度加快,随着畜禽养殖量、淡水养殖量和人均污水排放量的增加^[25],种植型污染对水体氮负荷的贡献比例可能会降低,而生活型和人畜排放型污染比例可能会增加。由于人口的迅速增加,城市建设用地的扩张,不注重环保以及不完善的污水处理系统^[26,29]等因素,使得水体中的氮负荷越来越重,并且污染源也呈现出生活污水型和人畜排放型特征^[19],这也解释了耕地面积与总氮的负相关关系,并且与张大伟等^[6]、Jung 等^[23]的研究结果相同。

由图 3 可知,常熟市水体总氮含量和年单位面积

表 6 单位面积化肥投入、淡水养殖产量及生活污水排放量

Table 6 Inputs of chemical fertilizer, productions of fresh water aquaculture and discharges of domestic sewage

年份	单位面积化肥 投入(N, t/km ²)	单位面积淡水 养殖量(t/km ²)	人均生活污水 排放量(t/a)
1990	0.06	1 800	34
2000	0.18	1 940	38
2005	0.23	2 030	77
2010	0.33	2 110	85

淡水养殖量变化具有良好的一致性。常熟地区养殖业的突出特征在许多养殖场建于河旁与湖滨地带,甚至直接建于河湖水体内^[28]。在常熟畜禽养殖氮素流动系统中,约83.6%的氮素由禽畜粪尿排出,约52%的氮素进入水体^[24]。而当地畜禽粪便处理率约为65%,在未经处理的禽畜排泄物中,近30%直接进入水体,造成了大量氮素盈余于水体。随着人口的增加,畜禽养殖的需求加大和不完善的粪便处理系统,将使得进入水体的氮素进一步富集^[27,30]。

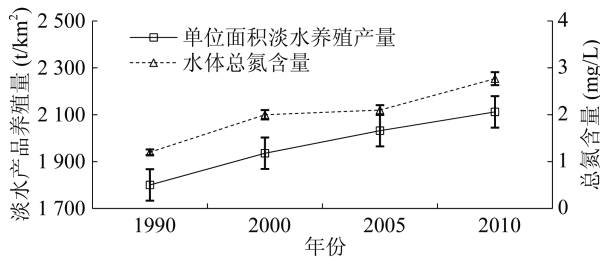


图3 1990—2010年间常熟市水体总氮含量和单位面积淡水水产养殖量^[10]

Fig. 3 Fresh aquaculture productions and total nitrogen contents of water from 1990 to 2010 in Changshu city

4 结论

1)1990—2010年,常熟市耕地和水域面积在缩小,建设用地和林地面积在增加。耕地面积缩减速度和建设用地面积增加速度逐年加快,而该区域仍然以耕地面积为主。

2)1990—2010年,各土地利用类型状态指数(D_i)大小依次为:建设用地>林地>草地>耕地>水域;其中,变化量最大的两种土地类型为建设用地和耕地。根据转移矩阵数据分析可知,建设用地面积的增加主要占据的是耕地和水域,水域面积的缩减主要被耕地占用。

3)由相关性分析可得:水体总氮含量与建设用地面积、化肥投入量以及养殖业呈显著正相关关系,与耕地面积呈显著负相关关系,说明不合理的土地利用方式、种植业导致的农业面源污染以及养殖业带来的地表径流加重了当地水体富营养化。

参考文献:

[1] 彭春瑞. 农业面源污染防治理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 15-19
 [2] 洪燕婷, 仇蕾. 太湖流域农业面源污染防治措施研究分析[J]. 环境科学与技术, 2015, 28(3): 17-21
 [3] 孔繁翔, 胡维平, 范成新, 等. 太湖流域水污染控制与生态修复的研究与战略思考[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 193-198

[4] 官宝红, 李君, 曾爱斌, 等. 杭州市城市土地利用对河流水质的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(6): 857-863
 [5] 郭青海, 马克明, 张易. 城市土地利用异质性对湖泊水质的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 776-787
 [6] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 等. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1775-1783
 [7] 刘倩, 刘永杰, 余辉, 等. 太湖流域土地利用与河流水质污染状况的相关性研究[J]. 环境科技, 2016, 34(8): 11-17
 [8] 杜习乐, 吕昌河, 王海荣. 土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究进展[J]. 土壤, 2011, 43(3): 350-360
 [9] 钟飞, 田苗苗, 赵言文, 等. 常熟沿江湿地植物群落多样性与水质的关系[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(5): 995-1000
 [10] 常熟市统计局. 1990—2010年常熟统计年鉴[M]. 江苏常熟: 常熟市统计局, 1991-2010
 [11] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 87-90
 [12] 万晓红, 王海芹. 江苏太湖流域农业面源污染及防治对策措施分析[J]. 农业环境与发展, 2008, 25(3): 69-71
 [13] 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, 35(31): 10150-10154
 [14] 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, 24(2): 114-121
 [15] 王鹏, 况福明, 邓育武, 等. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 168-172
 [16] 张宇镭, 党琰, 贺平安. 利用Pearson相关系数定量分析生物亲缘关系[J]. 计算机工程与应用, 2006, 41(33): 79-82
 [17] 潘竟虎, 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
 [18] 邢光熹, 施书莲, 杜丽娟, 等. 苏州地区水体氮污染状况[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 540-546
 [19] 朱东新, 韩恕, 杨玉兵, 等. 常熟地区水质监测与分析[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(1): 62-63
 [20] 谢迎新, 邢光熹, 熊正琴, 等. 常熟地区河湖水体的氮污染源研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 766-771
 [21] 徐慧, 韩青. 常熟市望虞河西岸地区排水通道问题[J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 72-75
 [22] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324
 [23] Jung K W, Lee S W, Hwang H S, 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
 [24] 张宁, 王延华, 杨浩, 等. 常熟市食物链系统氮素生产-消费平衡及环境负荷特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1797-1806
 [25] 高晓兰, 郭一令. 常熟市农村生活污水处理设施的调查研究[J]. 资源环境, 2013, 24(4): 13-15
 [26] 顾俊. 常熟市统筹推进城乡生活污水治理实践[J]. 小城镇建设, 2016, 10(8): 25-29

- [27] 徐建荣, 韩曜平, 郁达, 等. 常熟地区河蟹池塘养殖现状与发展前景调查分析[J]. 常熟理工学院学报, 2005, 19(4): 54–57
- [28] 段华平, 孙勤芳, 王梁, 等. 常熟市农业和农村污染的优先控制区域识别[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 911–917
- [29] 章晓芳. 常熟市尚湖镇农村水环境现状及思考[J]. 水资源开发与管理, 2015, 3(3): 34–36
- [30] 王丽香, 庄舜尧, 吕家珑, 等. 常熟农村不同水体氮磷污染状况[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 55–59

Responses of Nitrogen Load in Water Body to Land Use Types in Changshu City

CHEN Xi¹, WANG Yanhua^{1,3,4,5*}, CAI Zucong^{1,3,4,5}, ZHOU Wei², YANG Hao^{1,3,4,5}

(1 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing 210023, China; 4 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 5 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Changshu City was taken as the study area to explore the response of water quality variation to land use patterns. GIS space technology and SPSS correlation analysis were used to compare land use patterns and total nitrogen (TN) contents in the water body. Results showed that from 1990 to 2010, the areas of farm land and water body decreased continuously, while the areas of construction land and forest land increased. The status index(D_i) of land use pattern was in an order of constructed land>forest>grass land>farmland>water area. The increase in construction land was mainly come from cultivated land and water area, and the reduction of water area is mainly occupied by cultivated land. The area of cultivated land was significantly negatively correlated with the total nitrogen content of the water body ($r = -0.959^*$, $P < 0.05$), indicating that the proportion of pollution derived from crop-farming was declining. There was no significant correlation between the areas of forest land and grassland and the TN content of the water body. There was a significant positive correlation between the area of construction land and the TN content of the water body ($r = 0.929^*$, $P < 0.05$), indicating that the construction land caused point source pollution.

Key words: Changshu City; Nitrogen load in the water body; Land use type; Transfer matrix; Pearson correlation analysis