

太湖平原河流水质时空演变 及其驱动因素

张 鹏¹, 高 斌^{2*}, 施红怡¹, 龚来存³, 姜红梅³, 陈 鑫⁴

(1. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029; 2. 南京大学, 江苏 南京 210023;
3. 江苏省水文水资源勘测局南京分局, 江苏 南京 210008; 4. 江苏省水文水资源勘测局镇江分局, 江苏 镇江 212001)

摘要:根据 2003、2009 和 2015 年江苏太湖平原地区的水质数据分析其变化情况, 并采用 Spearman 秩相关方法探讨了城镇用地对河流水质的影响。结果表明:江苏太湖平原地区城镇化进程迅速, 且大部分为农用地转换而来; 该地区河流水质整体呈现好转趋势; 城镇用地占比与 DO、TN 质量浓度的相关系数在 2015 年最大, 其中与 DO 质量浓度相关系数达到 -0.633 , 城镇用地对水质整体状况有较大影响, 且在 2015 年影响最大。

关键词:土地利用变化; 河流水质; 太湖平原; 土地利用类型影响

中图分类号: X52 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839(2021)11-0001-05

Spatio-temporal evolution and driving factors of river water quality in Taihu Plain

ZHANG Peng¹, GAO Bin^{2*}, SHI Hongyi¹, GONG Laicun³,
JIANG Hongmei³, CHEN Xin⁴

(1. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;

2. Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. Nanjing Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China;

4. Zhenjiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: According to the water quality data of Taihu Plain in Jiangsu Province in 2003, 2009 and 2015, the changes were analyzed, and the influence of urban land on river water quality was discussed by Spearman rank correlation method. The results showed that the urbanization process in Taihu Plain of Jiangsu Province was rapid, and most of them were converted from agricultural land. The river water quality in the region showed an overall improvement trend. The correlation coefficient between the proportion of urban land and DO, TN concentration was the largest in 2015, and the correlation coefficient with DO concentration reached -0.633 . Urban land had a great impact on overall situation of water quality, and the impact was the largest in 2015.

Key words: change of land use; river water quality; Taihu Plain; influence of land use type

收稿日期: 2021-08-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508201); 国家自然科学基金项目(41771032); 江苏省水利科技项目(2019028)

作者简介: 张鹏(1973—), 男, 研究员级高级工程师, 博士, 主要从事水利规划工作。E-mail: pierrezhang@hotmail.com

通信作者: 高斌(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为水资源水环境与遥感水文。E-mail: gaogisstudy@163.com

太湖流域是我国城镇化进程最为迅速的地区之一。城镇化的快速发展,改变了地表水循环过程和污染源特征,对江苏太湖平原地区水环境保护造成压力。水环境安全问题是该地区长期以来的热点问题,虽然在投入大量的资金用于太湖流域水环境治理后水质在很大程度上得到改善,但是水环境压力仍然较大,因此探讨河流水质变化特征和影响因素,对河流水环境保护具有一定指导意义^[1]。土地利用类型变化是人类活动的一个重要特征,其中城镇用地和农田是对河流水质影响最大的用地类型^[2],这两种土地利用带来的污染类型包括工业污水、生活污水和农业污水等。

已有众多学者开展了土地利用类型对河流水质的影响研究,常见的研究方法包括统计方法和模型模拟方法两类。整体上模型方法更能反映不同因素对河流水质影响的机理,但是其需要包括水文过程要素在内的大量数据,常露等^[3]利用 MIKE 模型在梁溪河耦合模拟了水量和水质的状况。统计方法需要的数据则较为简单,并且能够反映多种类型要素对河流水质的影响。常采用的方法包括了相关分析^[4]、地理加权回归^[5]、冗余分析^[6]、灰色关联^[7]等。同时在不同尺度上,土地利用等要素对河流水质的影响也存在一定差异,常采用的尺度包括子流域^[8]、河岸带缓冲区^[9-10]和站点缓冲区^[11]等。在江苏太湖平原地区快速城镇化导致土地利用变化的情况下,开展土地利用对河流水质影响研究,可以为水环境保护提供参考。

1 研究区概况

研究区为太湖流域的平原地区,主要包括两个水利片区,分别为阳澄淀泖区和武澄锡虞区,它们都位于江苏省境内,包括了常州市的中心城区、无锡市辖区、江阴市以及苏州市的大部分区域。该地区基本为平原,区域内河流水系发达,呈现网状特征,2010 年不同区域的河网密度范围在为 1.58 ~ 4.90 km/km²。由于区域内的平原特征,早期农业活动较为发达,同时该区域又适合城市发展,这些都为区域水环境状况带来一定压力。

2 研究方法

本研究收集了研究区 2003 年、2009 年和 2015 年的 20 个站点的水质数据(图 1),包含 DO、TN、COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP。其他用地类型主要包括城镇用地、农用地(水田和旱地)和其他用地(包括林

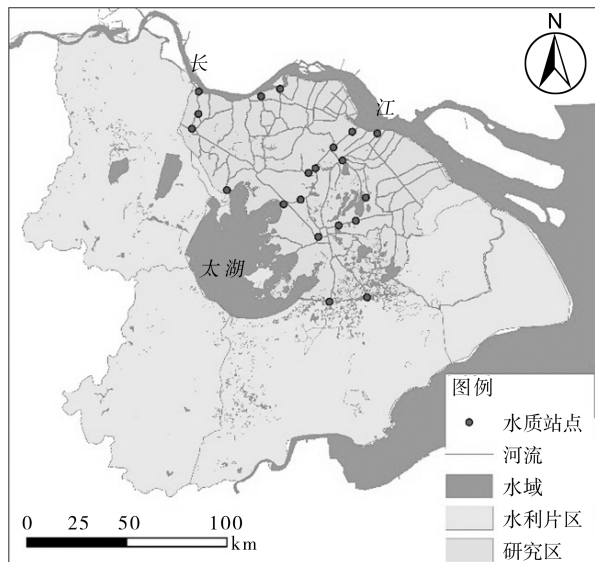


图 1 研究区位置和水质站点

地和水域等)类型。下载 Landsat TM 影像用于解译,考虑不同季节地物存在的差异,比较特定季节影像质量差异,分别选取了 2002 年、2010 年、和 2015 年的遥感影像用于解译,分别对应水质的 2003 年、2009 年和 2015 年。采用监督分类方法解译研究区土地利用类型,分类包括城镇用地、水田、旱地、水域、林地和其他用地类型,分类精度分别达到 87.54%、85.35% 和 87.72%。后根据研究需要和研究区实际状况将各用地类型合并为城镇、农田和其他用地类型,针对性地分析城镇用地和农田用地变化对河流水质指标的影响。以水质站点为圆心,分别提取其 500 m、1 000 m、1 500 m 和 2 000 m 圆形缓冲区以内的土地利用情况,计算不同用地类型的占比。

主要采用斯皮尔曼秩相关方法分析不同时期不同土地利用类型对河流水质的影响,该方法相较于皮尔逊相关适用范围广泛,对变量的分布形态、样本容量大小要求较低,适合本研究使用。该相关系数的取值范围为 $[-1, 1]$,当结果小于 0 时表示二者负相关,结果大于 0 时表示二者正相关,结果为 0 则表示二者不相关。

3 结果与讨论

3.1 快速城市化下太湖平原地区下垫面时空演变特征

城镇用地和其他类型用地面积在 20 世纪初至 2015 年间都呈现上升趋势,而农田面积则表现为减少的趋势(图 2)。城镇用地面积在 2 个阶段分别增加了 52.94% 和 27.39%,在第一个阶段增加的相对

幅度较大。但是比较 2 个阶段城镇用地面积减少的绝对值,可以发现后一阶段的城镇化发展速度高于前一阶段,城镇化的进程加快了,分别达每年 133.16 km²和 168.55 km²,城镇用地扩张迅速见表 1。

农田面积在 2 个阶段分别减少了 22.38% 和 27.68%,在研究时间段内稳步下降。从 20 世纪初至 2015 年间共减少了约 2 358 km²。农田面积减少的过程同时还伴随着区域内传统农业活动的减少或转移,以及农业种植方式的变化^[12],共同减少了区域内农业面源污染。区域内其他类型用地面积在该阶段增加了约 450 km²,主要包括区域的水域

表 2 土地利用转换方式			单位:km ²
时间	城镇	农田	其他用地
2002—2010 年		1 830.15	145.02
	779.35		208.19
	107.12	326.02	
2010—2015 年		1 887.26	135.52
	720.89		117.29
	496.22	557.91	

表 1 土地利用变化						
年份	城镇面积/ km ²	城镇用地扩张 速度/%	农田面积/ km ²	农田用地扩张 速度/%	其他用地 面积/km ²	其他用地扩张 速度/%
2002 年	2 012.18		5 374.30		949.66	
2010 年	3 077.44		4 171.44		1 087.26	
2015 年	3 920.20		3 016.65		1 399.29	
2002—2010 年		52.94		-22.38		14.49
2010—2015 年		27.39		-27.68		28.70
2002—2015 年		94.82		-43.87		47.35

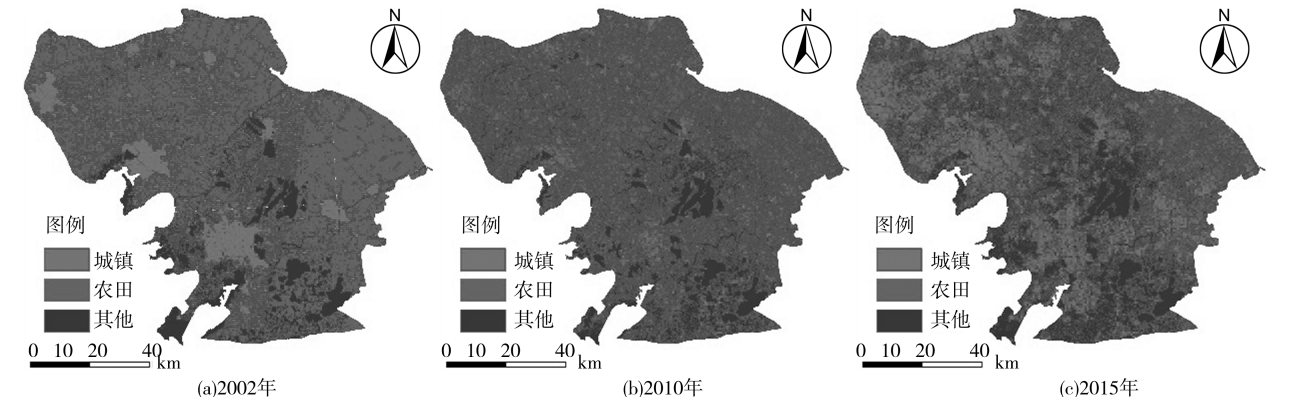


图 2 不同时期土地利用

和林草地,这对研究区内的生态环境保护具有重要作用。

从转移矩阵的结果来看(表 2),研究区内的不同阶段的土地利用变化转出最多的为农田,转入最多的土地利用类型则为城镇。在城镇化发展过程中,大量的农田用地被征用转换为城镇用地,用于居民生活、生产活动,研究区内农业污染来源减少的同时,生活污水和工业污水来源增加,污染物的类型和来源途径发生一定变化。农田也有一定的规模转换为了其他用地,说明在该地区退耕还林、

还湖有一定的进展,部分农田转为了林地和水域。同时研究区域内水产养殖活动是居民生产和收入来源的重要方式之一,也会在一定程度上导致农田的减少和其他类型用地的增加。

平原地区的土地利用变化主要以城镇用地扩张为驱动,其他类型用地基本围绕城镇用地扩张和农田减少而发生变化,同时城镇用地承载的生活污水和工业污水是水体污染的最主要来源^[13],因此研究城镇用地变化对水质的影响对该高速城镇化区域具有重要意义。

3.2 城市化下太湖平原地区河流水质时空演变特征

整体上研究区内的水质状况呈现好转趋势,具体表现为 DO 质量浓度 2003—2015 年上升了,其他水质指标的质量浓度则都下降了(图 3)。这表明江苏太湖平原地区整体的河流水环境状况好转,河流水质治理取得了一定的进展,但是目前的河流水质指标状况仍然不容乐观。

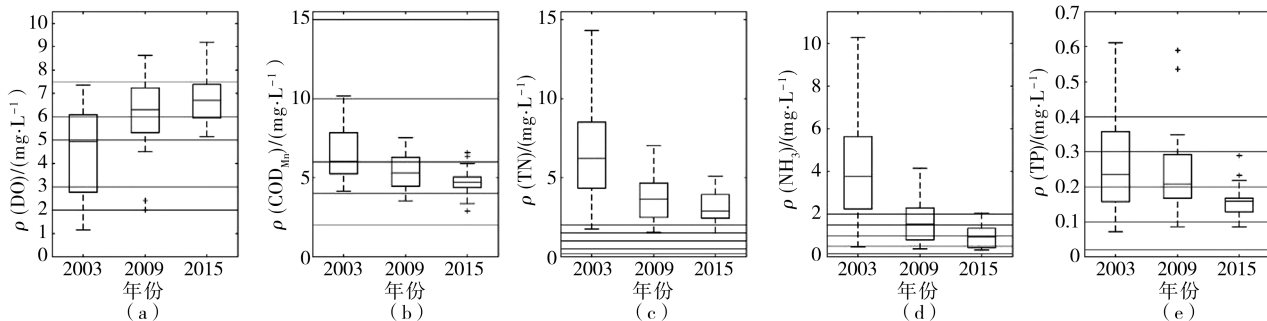


图 3 区域水质变化(图中横线代表不同水质的类别限值)

根据我国(GB3838-2002)《地表水环境质量标准》要求,采用单指标评价法对研究区水质进行评价,可以发现研究区内的河流水质整体较差,在 2003 年 95% 的站点为劣 V 类水质,2009 年有 85% 的站点为劣 V 类水质,2015 年仍然有 85% 的站点为劣 V 类水质,总氮指标是制约水质等级的重要指标。然后在不考虑 TN 指标的情况下,研究区内达到 V 类水质标准要求的站点从 2003 年的 25% 达到 2015 年的 95%,此时氨氮成为制约该区域水质等级最主要的指标,因此氮污染是太湖平原地区最主要的污染物。在氮污染质量浓度下降的同时,河流总磷质量浓度也有明显的下降趋势,到 2015 年时所有站点的总磷质量浓度都达到 IV 类水质标准。在治理氮污染的背景下,控制磷污染也是太湖流域治理河流水环境的重要措施。

DO 质量浓度仅在 2003 年有 15% 的站点未达到 V 类水质标准,在 2003—2015 年间 DO 的质量浓度不断上升,在 2015 年所有站点的 DO 质量浓度都达到了 III 类水质标准,研究区的水生态环境不断改善。高锰酸盐指数在 2003—2015 年间都没有低于 V 类水质的要求,研究区内的有机物污染相对较低,同时其质量浓度在研究时间段内呈现明显的下降趋势,到 2015 年高锰酸盐指数质量浓度基本达到 III 类水质标准,研究区内有机物污染状况改善明显。因此太湖流域平原的水环境治理主要需围绕氮磷污染治理开展,这也能有效遏制蓝藻的生长与暴发。

3.3 太湖平原地区河流水质演变驱动因素分析

在不同年份的不同土地利用尺度条件下,城镇

用地的占比与 DO 质量浓度的相关性最为显著,相关系数整体最高(表 3)。城镇用地占比与 TP 质量浓度相关的显著性略弱于 DO 质量浓度,与 TN 质量浓度的相关性只在 2015 年显著,而城镇用地占比与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 质量浓度相关性不显著,但是与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的相关系数整体大于 COD_{Mn} 。城镇用地整体上与 DO 质量浓度呈现负相关关系,而

其他水质指标质量浓度皆呈现正相关关系,说明城镇用地较大会导致水体 DO 质量浓度较小,不利于水生态发展。城镇用地与其他水质指标质量浓度则都为正相关,这说明城镇用地占比较大的地区,水污染指标的质量浓度也较高,城镇发展会对水污染防治造成更大的压力。

在 500 m 半径的缓冲区尺度上,城镇用地与水质指标间基本不存在显著的相关关系。而在 1 000 ~ 2 000 m 缓冲区尺度上,不同年份城镇用地与 DO 质量浓度呈现出显著的相关关系,整体上尺度较大时相关性更强。城镇用地占比与其他指标的相关性在空间尺度上大部分呈现相似的规律,即 500 ~ 1 000 m 空间尺度上相关性较差,在 1 500 ~ 2 000 m 尺度上相关性较强,说明城镇用地与水质指标质量浓度的关系具有较为明显的空间尺度效应,在一定大小的空间尺度上二者具有较好的相关性。

从时间变化上来看,城镇用地占比与 DO 质量浓度及氮污染指标质量浓度的相关性在 2015 年最好,尤其 TN 质量浓度与城镇用地关系从早期的不显著,到 2015 年表现为显著正相关。说明随着城镇化发展,城镇用地占比对河流水质的影响逐渐增强,因此需要控制城市污染排放,并合理规划城市布局,降低城镇用地的污染来源。2003 年、2009 年和 2015 年城镇用地占比都在一定空间尺度上与 TP 质量浓度呈现出显著的正相关关系,但是磷污染质量浓度与城镇用地在 2003 年后与城镇用地相关性不显著或显著性下降,可能是受到 19 世纪末太湖流域“禁磷”措施的影响,伴随着“禁磷”措施的逐渐严

表 3 城镇用地占比与水质指标的相关关系

年份	缓冲区半径/m	DO	TN	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP
2003 年	500	-0.365	0.345	0.187	0.241	0.511 *
	1 000	-0.502 *	0.371	0.200	0.235	0.591 * *
	1 500	-0.571 * *	0.424	0.229	0.302	0.620 * *
	2 000	-0.602 * *	0.438	0.235	0.332	0.630 * *
2009 年	500	-0.392	0.090	0.137	0.198	0.126
	1 000	-0.552 *	0.269	0.095	0.353	0.346
	1 500	-0.591 * *	0.354	0.077	0.427	0.435
	2 000	-0.543 *	0.344	0.006	0.395	0.475 *
2015 年	500	-0.516 *	0.287	-0.014	0.260	0.326
	1 000	-0.621 * *	0.523 *	0.062	0.403	0.475 *
	1 500	-0.633 * *	0.580 * *	0.190	0.430	0.462 *
	2 000	-0.623 * *	0.609 * *	0.205	0.426	0.448 *

格实施,磷污染的来源和与土地利用的关系发生改变。

河流水质变化是多种因素共同作用的结果,污染来源及其稀释、运移、降解是影响河流水质的直接因素。其中污染物的来源包括点源污染与面源污染受土地利用变化的影响较大。随着城镇用地扩张与占比增加,引起了生活污染、工业污染、交通污染等多个方面的问题^[14],如居民垃圾、车辆污染、建筑场地、工厂污染排放等,共同导致区域河流污染加剧。周海丽等^[15]的研究认为城市用地比例是影响河流综合污染指数的主要因素。此外农田的化肥与农药施用^[16]是重要的面源污染来源,但是农田对河流水质的影响并非单一的,作为特殊的植被或湿地系统,其会对部分污染物起到吸附、吸收、滞留的作用^[17],在一定程度上可以改善区域水质。此外自然因素中的降雨、温度也会对河流水质产生重要影响,其中降雨一方面对区域地表形成冲刷,将地表污染物运移至河流加剧污染^[18-19],另一方面则会稀释污染物质量浓度,对河流水质影响具有不确定性^[20]。因此不同因素对河流水质的影响机制较为复杂,还需要更深层次的机理研究来量化不同因素的影响机制。

4 结 论

太湖流域的城镇用地增加最为明显,农田面积

减少最多,区域内最主要的土地利用转变类型即为农田转换为城镇用地。

太湖流域的河流水质 2003—2015 年逐渐改善,但是污染问题仍然严峻,氮污染是导致该区域水质等级较差的最主要因素。城镇用地在不同年份与 DO 质量浓度都显著相关,相关系数在 2015 年最大为 -0.633,城镇用地对区域的水质整体状况有重要影响。城镇用地与 TN 质量浓度的相关关系在 2015 年达到显著水平,随着城镇化发展,可以发现城市用地对 TN 的影响增加。

城镇用地与河流水质的相关性在缓冲区半径为 1 500~2 000 m 时较大,缓冲区半径在 1 000 m 以下时相关性相对较小,因此在分析不同因素对河流水质的影响时需要注意尺度效应。在城镇化进程中需要注重城镇用地的规划,在河流周边控制城镇用地的占比,可以有效降低河流污染。

参考文献:

[1] 程曦,李小平,陈小华. 苏州河水质和底栖动物群落 1996~2006 年的时空变化[J]. 生态学报, 2009(6): 3278-3287.

[2] 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, 2008(4):16-20.

[3] 常露,柳莹,周敏,等. 基于 MIKE 模型的梁溪河水 (下转第 18 页)