

常州市河流水质对滨岸带土地 利用响应的初步分析

王雪松¹ 李琪² 高俊峰² 黄佳聪²¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所,

流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008)

【摘要】: 以 2018 年常州市 50 个水质监测断面的 5 个水质指标($\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、 BOD_5 、TN 和 TP)为基础数据, 利用 SPERAMAN、RDA 等多种数学统计方法, 从不同地形(丘陵和平原)和不同空间尺度的河流滨岸带缓冲区(25、50、200、500 和 1000m)探究水质指标对滨岸带土地利用类型的响应, 以期为水环境管理提供科学建议。结果显示: (1) 丘陵区水质指标对土地利用类型的响应更强。丘陵区在 25 和 200m 缓冲带上土地利用类型对水质指标的解释度较高, 而平原区在 50m 缓冲带上土地利用类型对水质指标的解释度较高; (2) 不同土地利用类型对水质指标的影响不同。林地、园地和水质指标呈显著正相关, 耕地、住宅用地和水质呈显著负相关。上述研究表明, 在面向水质目标的水环境管理中, 丘陵区应注重优化距离滨岸带 200m 范围以内的土地利用类型, 而平原区至少在距离滨岸带 50m 以内要加强对土地利用类型的控制。

【关键词】: 滨岸带 土地利用 水质指标 统计分析 常州市

【中图分类号】: X522;K903 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)12-2915-10

随着经济的快速发展, 人类活动对河流的干扰不断增强, 围垦利用、污水排放等人类活动使河流水质不断下降, 导致河流及滨岸带环境的恶化、生态服务功能减弱甚至丧失等问题越发严峻^[1]。河流滨岸带作为水陆生态交错区, 是能量流动和物质循环的重要通道^[2], 不仅承载了大量的人类活动, 为鱼类和鸟类提供栖息地, 也是水体保护的最后一道屏障^[3]。大量研究表明, 人为因素驱动下土地利用类型的改变, 不仅改变了下垫面特征, 对水分和物质的输移产生极大的影响^[4], 也是影响河流水质的重要因素^[5, 6, 7, 8, 9, 10]。因此, 分析不同空间尺度上滨岸带土地利用类型的变化特征, 探讨水质指标对滨岸带土地利用变化的响应, 对维持河流生态系统健康、优化滨岸带土地利用结构具有重要意义。

围绕不同空间尺度, 国内外学者探讨了土地利用类型和水质的相关性。如 Kaline 等^[11]基于不同空间尺度分析了巴西全域土地利用对水质的影响; Clément 等^[12]基于农业流域分析了土地利用和水质的关系; Huang 等^[13]基于鄱阳湖不同滨岸带缓冲区尺度,

作者简介: 王雪松(1964~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为水文水资源与水质监测评价。E-mail: 945568791@qq.com; 李琪 E-mail: liqi203@mails.ucas.ac.cn

基金项目: 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23020201); 江苏水利科技项目(2019025, 2020042, 2020032)

分析了土地利用类型和水质的相关性；Ding 等^[14]基于东江流域、河岸带缓冲区、站点缓冲区等不同空间尺度上开展了土地利用与水质变化的研究；由于土地利用的空间格局差异，基于土地利用方式的河流水质研究存在不确定性，哪个尺度能够更好的解释土地利用类型和水质的关系也存在一定争议。如田皓予等^[15]认为缓冲区尺度的土地利用格局能够更好地解释蒙河水质变化，其中水质指标与 5km 缓冲区空间尺度下土地利用的关系最为显著；张微微等^[16]认为在河岸小尺度缓冲区土地利用对水质影响表现得更明显，对水质 TN 和 TP 空间分布解释的最佳尺度分别为 300 和 100m 河岸缓冲区；方娜等^[11]认为缓冲区尺度的土地利用方式对水质的解释度要高于小流域尺度；吕乐婷等^[17]认为集水区尺度与河流水质的相关性好于缓冲区尺度。可以看出，在分析河流水质与土地利用关系时，不同流域适宜的空间分析尺度不同。

我国长三角地区工业化程度高，经济发展迅猛，人类活动强烈，对流域水质的影响较大^[18]。常州市作为长三角地区的重要城市、太湖流域重要的湖泊通道，其基于土地利用类型和水质的相关研究还存在空白。自 2001~2019 年，常州市 GDP 由 672.9 增加至 7400.86 亿元，人口由 341.5 上升至 473.6 万人，区内不透水面积增加近 2 倍，人类的强烈活动给予生态的压力越发凸显^[19]。表征人类活动强度的方法有人类足迹方法、环境扰动指数方法、土地利用变化、生态系统服务变化、多种状态因子变化等^[20]。作为全国土地利用强度较高的城市之一^[21, 22, 23, 24, 25]，本次研究以土地利用类型作为代表人类活动强度的指标，分析水质对人类活动强干扰下的响应，以期为合理管控滨岸带土地利用结构，改善水质状况提出科学的建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

常州市位于江苏省南部、太湖流域上游，东与无锡相邻，西与南京、镇江接壤，南与无锡、安徽宣城交界，现辖金坛、武进、新北、天宁、钟楼 5 区，代管溧阳市¹，主要地貌类型为高沙平原，总体上西高东低，区内多年平均降雨量约为 1106mm²，枯水期平均水位约 3.4m，丰水期平均水位约 4m^[19]。河流大体为西北至东南方向流动，是典型的平原河网地区^[26]。但由于区内为感潮河网，河流多受闸泵控制、相互贯通，水动力系统复杂，影响水质的因素繁多且相互叠加作用。区内主要用地类型为耕地、住宅用地和水域湿地，仅耕地和水域面积占到区域总面积的 50%以上，其中耕地为总面积的 34%，水域面积为总面积的 17%³ (图 1)。

1.2 数据

研究所用到数据为高分辨率遥感影像、DEM、水文部门提供的监测断面水质数据、国土部门提供的土地利用类型分布数据以及统计年鉴、水资源公报、环境质量公报等。

具体包括利用 2018 年高分一号卫星 (GF1) 和资源三号卫星 (ZY3) 号 2m 分辨率影像作为提取河流宽度 30m 以上水体信息的基础遥感影像；水质指标数据来源为江苏省水文水资源勘测局常州分局 2018 年 1~12 月每月水质指标监测数据，共计 53 个监测断面，选取 50 个具有完整数据的监测断面进行分析，其中 46 个为重点监测断面，4 个为一般监测断面，监测断面覆盖常州市 36 条重点河流；取各监测断面平均值进行数据统计分析，评价标准采用国家标准《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)，选取国际国内常用的水质监测指标氨氮 (NH₃-N)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、五日生化需氧量 (BOD₅)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 作为分析目标；采用 2009 年 ALOS12.5m 分辨率 DEM 地形数据产品，将监测断面分为 6 个丘陵区监测点和 44 个平原区监测点，参考相关研究^[27, 28, 29]，对 50 个监测断面所在河流滨岸带向两侧分别延伸 25、50、200、500 和 1000m 5 种不同缓冲尺度的范围作为滨岸带土地利用类型的研究范围 (图 1)；结合 2016 年国土资源调查数据，根据国家标准《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017) 将土地类型按照一级土地分类进行整合，针对不同区域，分别在丘陵区选择耕地、住宅用地、园地和林地作为分析的主要土地类型，平原区选择耕地、住宅用地和园地作为分析的主要用地类型。其中耕地包括旱田和水田，住宅用地包括城镇用地和农村用地，园地包括茶园、果园和其他园地，林地包括有林地、灌木林和其他林地。

1.3 方法

利用 ENVI5.0 对 GF1 和 ZY3 进行河流信息提取；运用 ArcGIS10.6 对 DEM 进行镶嵌等影像处理，利用 BufferWizard 工具沿监测点所在河流两侧分别生成 25、50、200、500 和 1000m 种不同尺度的带状缓冲区，叠加土地利用类型分布，共计产生 250 个缓冲作用区；对不同空间尺度滨岸带土地利用类型面积比例数据和监测断面水质指标数据进行反正弦和对数标准化处理，利用空间联合分析，获得水质指标空间分布特征，因水质指标数据不符合正态分布，因此选用 SPERAMAN 相关性分析方法对土地利用类型面积比例和水质指标进行分析；最后利用 CANOCO5.0 对土地利用类型和水质指标进行 RDA 分析，获得各类土地利用类型对水质指标的贡献度。

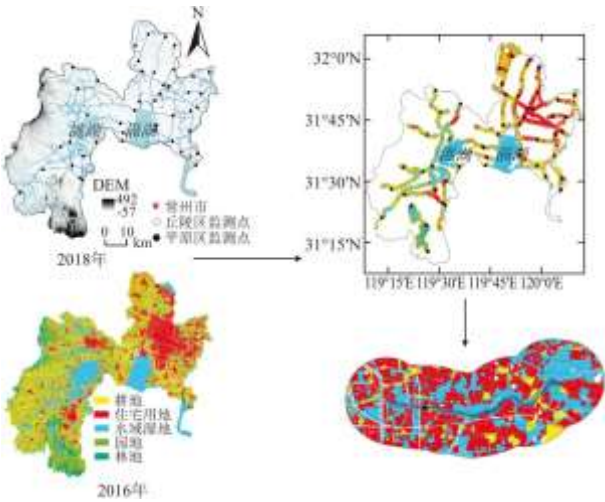


图 1 研究区水质监测断面及土地利用类型分布

2 结果与分析

2.1 多尺度滨岸带土地利用类型分布特征

丘陵区和平原区土地利用类型差异显著。由图 1 可知，耕地、住宅用地和水域湿地为常州市主要用地类型，占区域总面积的 76%以上。其中林地主要分布在丘陵区，即常州市西南部，住宅用地集中分布在常州市中心，耕地则遍布在整个平原区。按照丘陵区、平原区分别统计不同空间尺度主要用地类型面积比例变化，由图 2 可知，丘陵区主要以耕地为主，耕地面积比例在 50m 缓冲区时超过 50%，林地和园地面积比例在 200m 缓冲区范围以上无明显变化，分别为 12%和 22%左右，住宅用地比例随着缓冲区范围增加而减小；平原区主要以住宅用地和耕地为主，面积比例均超过 40%，耕地比例则随着缓冲区范围增加而增加，住宅用地比例则逐渐减小，园地比例在 50m 缓冲区范围以上逐渐减小，随后比例趋于 5%左右。土地利用类型分布可以看出，常州市土地利用人工痕迹分布广泛，人为干扰影响土地格局的作用较大。

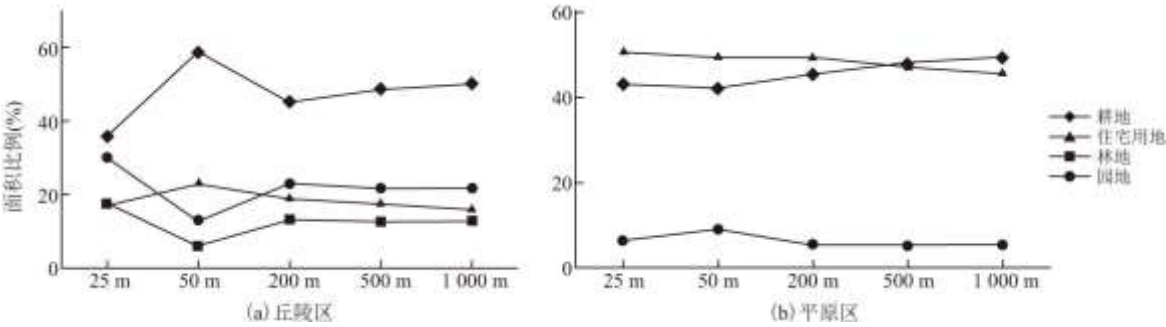


图 2 土地利用面积在 5 个缓冲带变化

2.2 区域水质指标的空间分布特征

将 50 个监测断面 5 项水质指标监测值对照《地表水质量标准》(GB3838-2002)进行评价, 50 个监测断面中达到 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类水质标准的水功能区分别有 2、2、13、29 和 4 个, 各监测断面水质情况如图 3。结果如下: 常州市水质指标空间分布差异显著, TN 污染严重。其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超过 III 类以上的值较多, 超过 III 类的值多出现在住宅用地密度较集中区域; TP 基本都处于较低含量, 仅在住宅用地集中区域出现个别 V 类值; TN 明显超标, 均为劣 V 类; BOD_5 多处于 III 类值水平, 覆盖整个常州市; COD_{Mn} 含量均在 III 类值以上, 为 5 项水质指标中最优指标。将 5 项水质指标按照污染程度由大到小进行排列, $\text{TN} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{BOD}_5 > \text{TP} > \text{COD}_{\text{Mn}}$ 。

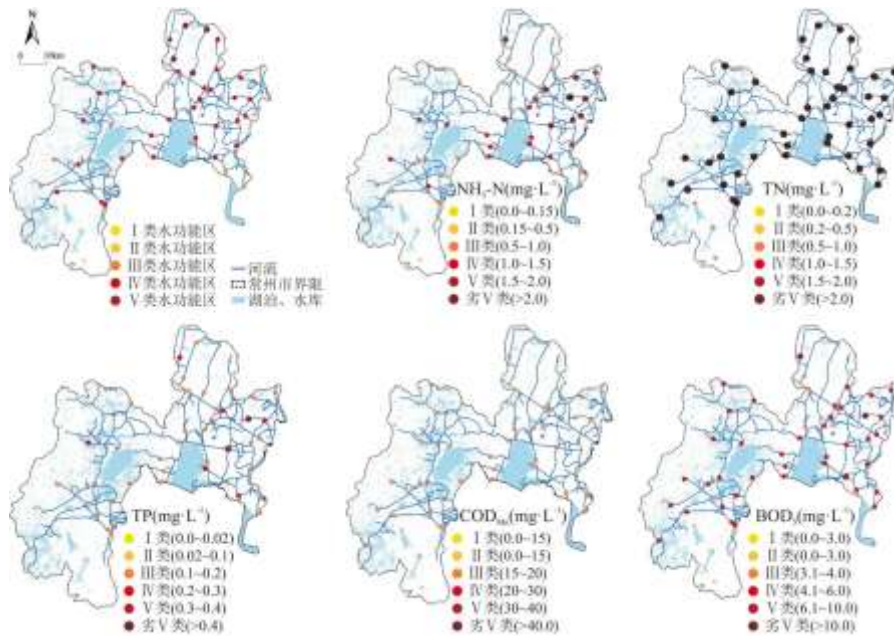


图 3 水功能区及水质指标空间分布

丘陵区水质整体较平原区水质好。初步判断一是由于丘陵区人为活动较少, 多为林地和园地, 对污染物的截留和吸收转化作用较强; 二是丘陵区地形坡度大, 水动力强, 污染物难以滞留和堆积。反之, 平原区人为活动强烈, 工农业活动聚集且频繁, 加上平原河网水动力系统的复杂性, 即使对工业污水和城市生活污水进行了标准化处理, 农业、养殖和农村地区污水的非点源污染依然会带来严重的水质污染。

2.3 多尺度滨岸带土地利用类型和水质指标的相关性

针对丘陵区监测断面和平原区监测断面分别对 5 种缓冲区土地利用类型和水质指标进行相关性分析, 结果如图 4、图 5 所示。丘陵区在 25m 缓冲带上, BOD_5 和园地呈显著负相关 ($p < 0.05$), 相关系数为 -0.83, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和住宅用地呈显著正相关 ($p < 0.05$), 相关系数为 0.83, TP 和园地呈显著负相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 -0.99; 200m 缓冲带上, COD_{Mn} 和耕地呈显著正相关性 ($p < 0.05$), 相关系数为 0.83, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和住宅用地呈显著正相关性 ($p < 0.05$), 相关系数为 0.83, TP 和园地呈显著负相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 -0.93; 500m 缓冲带上, BOD_5 和住宅用地呈显著正相关 ($p < 0.01$), 系数为 0.94, TN 和住宅用地显著正相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 0.94, COD_{Mn} 与住宅用地和耕地呈显著正相关 ($p < 0.05$), 相关系数分别为系数为 0.89、0.83, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和住宅用地呈显著正相关

($p < 0.01$), 系数为 1, TP 和住宅用地呈显著正相关 ($p < 0.05$), 相关系数为 0.81; 50m 缓冲区和 25m 缓冲区结果类似, 1000m 缓冲带和 500m 缓冲区结果类似。

平原区 25m 缓冲带上, COD_{Mn} 和住宅用地呈显著负相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 -0.45, TP 和园地、住宅用地呈显著正相关 ($p < 0.01$ 、 $p < 0.05$), 相关系数为 0.46、0.37; 50m 缓冲带上, COD_{Mn} 和住宅用地呈显著正相关 ($p < 0.05$), 相关系数为 0.3, TP 和住宅用地呈显著正相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 0.32; 200m 缓冲带上, COD_{Mn} 分别和住宅用地、耕地呈显著负相关、正相关 ($p < 0.01$ 、 $p < 0.05$), 相关系数为 -0.42、0.32, TP 和园地、住宅用地呈显著正相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 0.5、0.52; 500、1000m 缓冲带和 200m 缓冲带结果类似。

从置信区间角度看 ($p < 0.01$ 、 $p < 0.05$) 丘陵区和平原区的土地利用类型对水质指标均存在显著相关性; 从相关系数大小分析看, 丘陵区土地利用类型和水质指标呈强相关性, 相关系数多大于 0.5, 而平原区土地利用类型和水质指标呈弱相关性, 相关系数多小于 0.5。丘陵区地形起伏明显, 提高了地表径流速度和侵蚀能力, 使土地利用利用效应对河流水质指标的效应更加突出。丘陵区林地、园地和 5 类水质指标均呈负相关, 体现出林地和园地对地表径流中的污染物有截留和吸收作用; 耕地和住宅用地和 5 类水质指标均呈正相关, 表明高强度的人类活动导致的大量农业化肥和生活污水进入水体, 加剧河流污染。这一结果和大多数学者的研究结果相吻合^[30, 31, 32]。

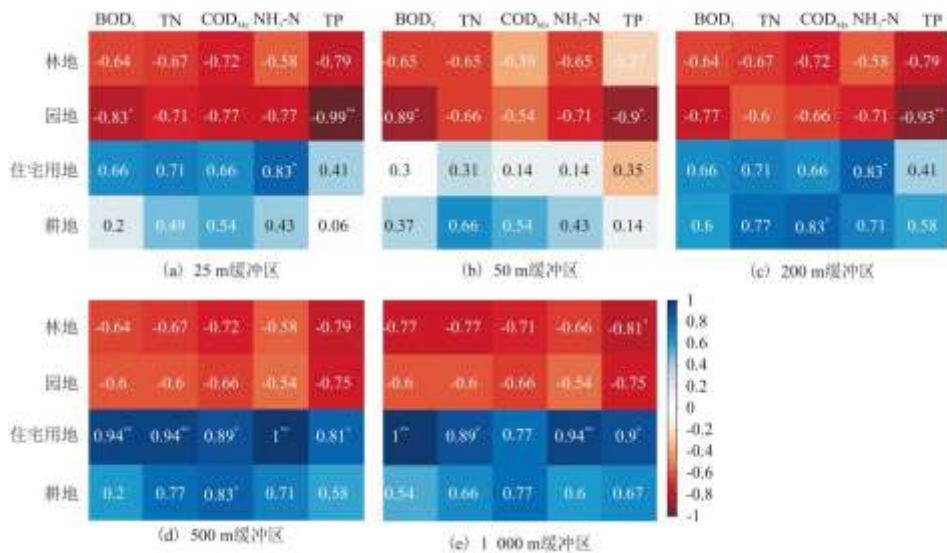


图 4 丘陵区土地利用类型和水质指标的相关性分析

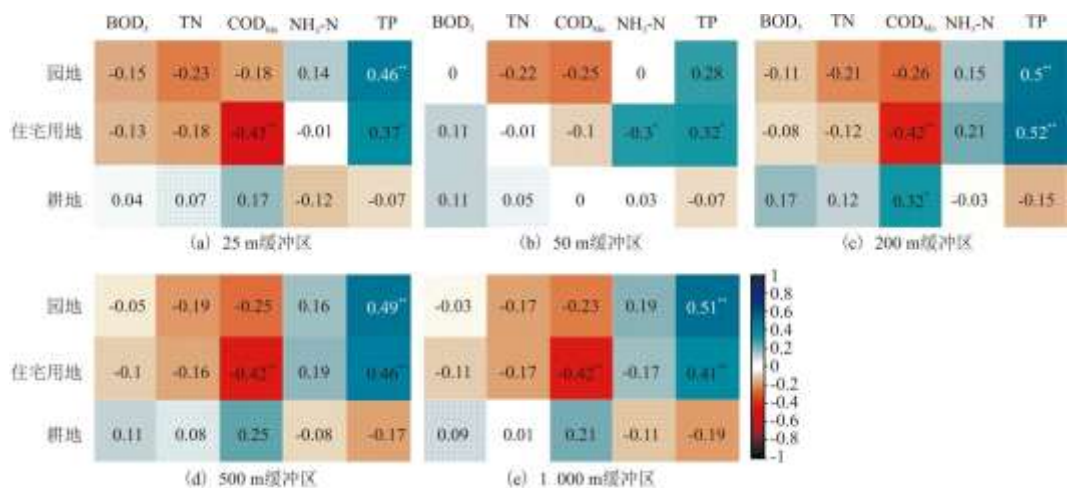


图 5 平原区土地利用类型和水质指标的相关性分析

与部分研究结果不同^[33, 34, 35], 平原区 TN、COD_{Mn}、BOD₅和园地、住宅用地呈负相关, TP、NH₃-N 和耕地呈负相关, TP、NH₃-N 和园地、住宅用地呈正相关, TN、COD_{Mn}、BOD₅和耕地呈正相关。耕地对 NH₃-N 的作用不明显, 而是 TN 污染物的主要来源, 住宅用地对 TN 的作用不显著, 而是 TP 污染物的主要来源, 这一结果和部分学者的研究结果一致^[27, 36], 分析其原因: (1)可能是对于高度城市化的河段或耕地较密集的河段, 部分土地利用类型对河流水质指标的影响会在一定程度上被其他土地利用类型所掩盖; (2)平原区河网汇流较为复杂, 植物尤其是农作物在平原河网地区对污染物吸附、滞留作用更强。

2.4 多尺度滨岸带土地利用类型对水质指标空间分异的 RDA 结果

在相关分析的基础上, 进一步利用冗余分析获得不同空间尺度土地利用类型对水质指标的解释度。如表 1、图 6, 结果表明: 丘陵区, 在 25、200m 缓冲带土地利用类型对水质指标综合解释度较高, 即对水质的作用非常显著。其中在 25m 缓冲带, 林地对水质指标的作用更显著; 在 50m 缓冲带, 园地对水质指标的作用更显著; 在 200~500m 缓冲带, 耕地对水质指标的作用更显著; 在 1000m 缓冲带, 住宅用地对水质指标的作用更显著。平原区, 由于河网汇流较复杂, 土地利用类型对水质指标的解释度整体较低, 在 50m 缓冲带土地利用类型对水质指标综合解释度最高, 即对水质的作用最显著。其中在 25m 缓冲带, 耕地对水质指标的作用更显著; 在 50~1000m 缓冲带, 住宅用地对水质指标的作用更显著; 同时在 500~1000m 缓冲带, 园地对水质指标的作用逐步增强。

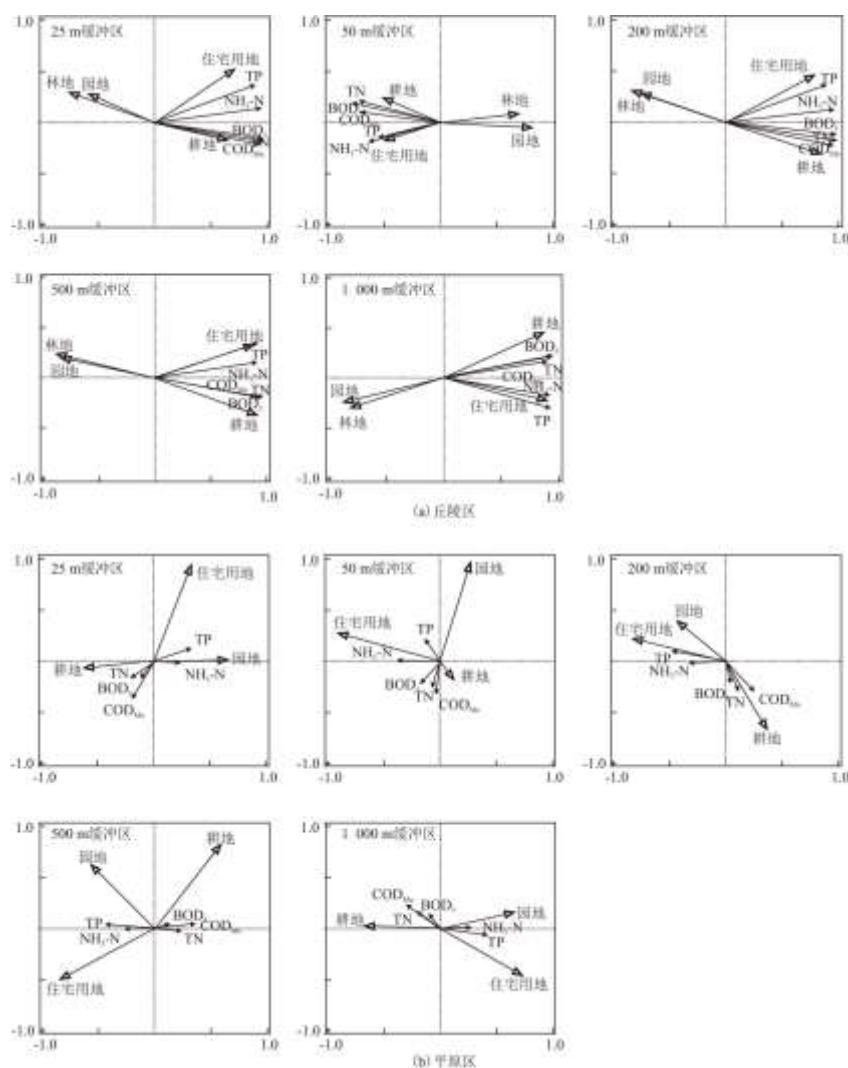


图 6 土地利用类型与水质指标冗余分析排序图

表 1 土地利用类型对水质指标空间分异的解释度 (%)

缓冲区	丘陵区				平原区		
	耕地	住宅用地	园地	林地	住宅用地	园地	耕地
25m	2.1	32.7	5.9	56.2	0.6	2.3	3.5
50m	2.9	17.8	30.3	1.9	11.7	1.4	1.9
200m	64.5	13.2	5.7	13.1	7.5	1.3	3.0
500m	70.6	16.6	1.1	4.2	5.4	2.3	0.1
1000m	2.4	72.4	17.2	1.0	4.4	3.7	0.8

可以看出，丘陵区林地和园地对污染物的截留和吸收在小尺度缓冲区发挥作用显著，耕地则在中尺度缓冲带对水质指标影响发挥明显作用，住宅用地在大尺度缓冲带对水质指标作用明显；而在平原区，耕地在小尺度缓冲带对水质指标影响作用明显，而住宅用地则在中尺度、大尺度缓冲带对水质指标作用显著。我们也发现，丘陵区 25、200m 缓冲带土地利用类型对水质指标综合解释度较高，这也体现出了丘陵区由于其地势的原因，地表径流对水质的影响范围更广泛。而在 50m 缓冲带出现解释度的波谷，这一点与丘陵区耕地和住宅用地面积比例变化完全吻合，说明丘陵区耕地和住宅用地对水质指标的影响显著；而在平原区，在 50m 缓冲带土地利用类型对水质指标综合解释度最高，这一点也和耕地在平原区的面积比例完全吻合，说明平原区耕地对水质指标的影响非常显著。总体来说，丘陵区土地利用类型对水质指标的解释度更大，而在平原区由于人类活动的复杂性，影响水质的因素较多，仅从土地利用角度分析不足以充分证明对水质的影响。但是也能够看到耕地和住宅用地是导致常州市水质污染的重要用地类型，这一结论对于丘陵和平原区同样适用并且和相关性分析结果一致。

3 结论

(1) 利用空间分析、SPERAMAN 和 RDA 统计方法分析常州市水质指标对土地利用类型的响应是可行的，得到的研究结果也是可信的。河流滨岸带土地利用类型分布与水质指标的空间分布结果相对应，土地利用类型和水质指标的相关性结果与其 RDA 分解结果相一致，并且得到的水质指标对土地利用类型的响应与众多学者的研究结论一致，但在常州市具有地区差异。

(2) 水质指标对土地利用类型的响应与地形关系密切。与平原区相比，丘陵区土地利用类型和水质指标相关关系更强，平原区水质污染更严重。丘陵区，在 25 和 200m 缓冲带上土地利用类型对水质指标的解释度较高；平原区，在 50m 缓冲带上土地利用类型对水质指标的解释度最高。

(3) 土地利用类型对水质指标的影响关系较复杂，不同的土地利用类型与水质指标呈现不同的关系。在不同区域、不同空间尺度下，土地利用类型与水质指标的相关关系具有差异性。林地、园地和水质指标呈负相关，住宅用地、耕地和水质指标呈正相关；耕地和住宅用地是常州市水质污染的重要土地利用类型。

在面向水质目标的水环境管理中，丘陵区和平原区滨岸带的管控范围和重点有所不同。丘陵区应关注距离滨岸带 25 和 200m 缓冲区土地利用类型，平原区需注意距离滨岸带 50m 缓冲区土地利用类型管控，适当提高林地、园地比例，严格控制住宅用地和耕地占比，优化耕作方式是常州市水污染防治的关键之一。

参考文献:

- [1]方娜,刘玲玲,游清徽,等.不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J].环境科学,2019,40(12):5348-5357.
- [2]黄凯,郭怀成,刘永,等.河岸带生态系统退化机制及其恢复研究进展[J].应用生态学报,2007,18(6):1373-1382.
- [3]魏雯,李哲惠,黄贞珍.城市河岸带土地利用和景观格局演变研究[J].生态环境学报,2018,27(11):2127-2133.
- [4]夏睿,李云梅,王桥,等.基于遥感的无锡市土地利用与过境水质响应关系的研究[J].地理科学,2010,30(1):129-133.
- [5]赵霏,郭逍宇,赵文吉,等.城市河岸带土地利用和景观格局变化的生态环境效应研究——以北京市典型再生水补水河流岸带为例[J].湿地科学,2013,11(1):100-107.
- [6]蔡莹,杨旭,万鲁河,等.北方寒冷地区冻融期河岸缓冲区土地利用结构对河流水质的影响[J].环境科学学报,2019,39(3):679-687.
- [7]王鹏,齐述华,陈波.赣江流域土地利用方式对河流水质的影响[J].生态学报,2015,35(12):4326-4337.
- [8]王慧亮,陈开放,张汪寿,等.淮河流域土地利用变化对湖库水质的影响[J].水电能源科学,2020,38(8):41-45.
- [9]李昆,王玲,孙伟,等.城市化下景观格局对河流水质变化的空间尺度效应分析[J].环境科学学报,2020,40(1):343-352.
- [10]刘鹏飞,许有鹏,周才钰,等.平原集水区城镇化对暴雨洪水影响研究——以常州市双桥浜为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):2082-2089.
- [11]KALINE D M, RICARDO H T, FELIPE R D P, et al. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 270: 1-16.
- [12]FRANCIS C, JULIE R, MARCO A, et al. Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 627-639.
- [13]HUANG W Q, MAO J Q, ZHU D J, et al. Impacts of land use and land cover on water quality at multiple buffer-zone scales in a Lakeside City[J]. Water, 2020, 12(47): 1-12.
- [14]DING J, JIANG Y, LIU Q, et al. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: A multi-scale analysis [J]. Science of the Total Environment, 2016, 551(1): 205-216.
- [15]田皓予,佟玲,余国安,等.不同空间尺度河流水质与土地利用关系分析——以泰国蒙河流域为例[J].农业环境科学学报,2020,39(9):2036-2047.
- [16]张微微,李晓娜,王超,等.密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应[J].应用生态学报,2020,41(11):4895-4904.

-
- [17]吕乐婷,高晓琴,刘琦,等.东江流域景观格局对氮、磷输出影响研究[J].生态学报,2021,41(5):1-8.
- [18]高凤,邵美玲,曹昌丽,等.城镇化流域氮、磷污染特征及影响因素——以宁波北仑区小浞江为例[J].湖泊科学,2019,31(3):689-699.
- [19]王雅竹,段学军,杨清可,等.近30年江苏省建设用地扩张的时空特征、模式与驱动因素研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1531-1540.
- [20]刘采,张海燕,李迁.1980-2018年海南岛人类活动强度时空变化特征及其驱动机制[J].地理科学进展,2020,39(4):567-576.
- [21]YAN H,LIU F,LIU J,et al.Status of land use intensity in China and its impacts on land carrying capacity [J].Journal of Geographical Sciences,2017,27(4):387-402.
- [22]刘芳,闫慧敏,刘纪远,等.21世纪初中国土地利用强度的空间分布格局[J].地理学报,2016,71(7):1130-1143.
- [23]韩增林,孟琦琦,闫晓露,等.近30年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J].生态学报,2020,40(8):2555-2566.
- [24]孙菲菲,张增祥,左丽君,等.土地利用强度研究进展、瓶颈问题与前景展望[J].草业科学,2020,37(7):1259-1271.
- [25]路中,雷国平,郭一洋,等.不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J].生态学报,2021,41(5):1894-1906.
- [26]赵轩,薛祥山,徐速,等.常州市平原环状河网水环境改善方案情景模拟[J].环境工程学报,2015,9(10):4637-4642.
- [27]刘剋,郭畅,王玉静,等.基于高分二号的白洋淀土地利用与水质响应关系研究[J].中国农村水利水电,2019,8:186-191.
- [28]徐启渝,王鹏,舒旺,等.土地利用结构与空间格局对袁河水质的影响[J].环境科学学报,2020,40(7):2611-2620.
- [29]杨强强,徐光来,杨先成,等.青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响[J].生态学报,2020,40(24):1-11.
- [30]WEI W,YONGNIAN G,JIACONG H,et al.Exploring the effect of basin land degradation on lake and reservoir water quality in China [J].Journal of Cleaner Production,2020,268:1-12.
- [31]蔡红,何政伟,安艳玲,等.基于遥感和GIS的赤水河水质对流域土地利用的响应研究[J].长江流域资源与环境,2015,25(2):286-291.
- [32]汪昱坤,程锐辉,曾鹏,等.上海地区河网水质空间分异及对河岸带土地利用的响应[J].生态与农村环境学报,2019,35(7):925-932.
- [33]杨莎莎,汤萃文,刘丽娟,等.流域尺度上河流水质与土地利用的关系[J].应用生态学报,2013,24(7):1953-1961.

[34] 于兴修, 杨桂山. 典型流域土地利用/覆被变化及对水质的影响——以太湖上游浙江苕溪流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(3):211-217.

[35] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 九龙江流域土地利用/景观格局——水质的初步关联分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1):64-72.

[36] JIAO D, YUAN J, LAN F, et al. Impacts of land use on surface water quality in a subtropical River Basin: A case study of the Dongjiang River Basin, Southeastern China[J]. Water, 2015, 7:4427-4445.

注释:

1 2 3 数据来自常州市人民政府网. http://www.changzhou.gov.cn/ns_class/zjcz_01_01, 2020-03-18