

无人机多光谱遥感在社渚港污染溯源中的应用

吕学研, 张甦, 张咏, 尤佳艺, 向一铭, 郭仁庆, 董圆媛

(江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210019)

摘要: 污染溯源是环境治理的基础。为厘清太湖主要入湖河流—社渚港的污染来源情况, 利用遥感监测同步性较好的优点, 开展污染溯源监测研究。结果表明: 社渚港沿线污染源集中分布特征明显; 邻近社渚港的鱼塘水体中的 TN、TP、NH₃-N 和 COD_{Mn} 浓度均显著高于社渚港; 沿河道水流方向, 人类活动较强的工厂区和居民区河段水体主要水质指标均显著高于农田区河段, 凸显人类生产、生活对河道水质的潜在影响。遥感解译结果还显示, 太湖西岸分布大量鱼塘, 虽然监测期间未发现鱼塘排水现象, 但是鱼塘水体具有较高的污染指标浓度, 一旦进入河道水体, 势必造成河道水体水质下降。

关键词: 水体污染; 污染溯源; 多光谱遥感; 无人机; 社渚港; 太湖

中图分类号: X832; X87

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0018-06

Pollution source tracing of Shedugang River using multi-spectral remote sensing of unmanned aerial vehicles

LÜ Xueyan, ZHANG Su, ZHANG Yong, YOU Jiayi, XIANG Yiming,

GUO Renqing, DONG Yuanyuan

(Jiangsu Environmental Monitoring, Nanjing 210019, China)

Abstract: Pollution source tracing is the basis for the protection and management of the environment. Taking the advantage of remote sensing for its simultaneous monitoring, we traced the pollution source in Shedugang River, a major inflow river of Taihu Lake. It is shown that the pollution sources in Shedugang River are concentrated to certain areas. Transversely, the concentration of TN, TP, NH₃-N and COD_{Mn} of the neighboring fish ponds are obviously higher than that in Shedugang River. Along the river channel, the water quality indices in the water bodies of industrial and residential areas, which are strongly affected by human activities, are remarkably higher than those of agricultural areas, showing the potential effect of human activities on the water quality of the river channel. According to the remote sensing results, there is a large number of fish ponds scattered along the west coast of Taihu Lake. Limited by the monitoring time, we did not find the discharge of waste water from fish ponds to the river; however, highly polluted fish pond water is a potential pollution source once discharged into river.

Key words: water pollution; pollution source tracing; multi-spectral remote sensing; unmanned aerial vehicle(UAV); Shedugang River; Taihu Lake

1 研究背景

遥感作为一种技术手段, 可实现人类活动^[1]、景观格局^[2]、河流物理生境^[3]、水质^[4]、土地利用变化^[5]以及其他生态要素^[6-7]的同时段、大区域监测, 在流域污染演变、生态环境管理等方面已有较多应

用^[8-9]。随着无人机技术应用范围的不断扩展, 利用无人机搭载数码相机、光谱仪等成像设备, 在农业活动中使用较多^[10-13], 在水生态环境监测方面也得到了长足的发展^[14-15]。

入湖河流是影响太湖湖体水质变化的重要因素^[16-18]。太湖西部沿岸是入湖河流主要集中分布

收稿日期: 2020-11-10; 修回日期: 2021-03-31

基金项目: 江苏省太湖水环境综合治理科研课题(TH2019401)

作者简介: 吕学研(1984-), 男, 江苏宿迁人, 博士, 高级工程师, 主要从事水污染控制及环境与生态水力学研究。

通讯作者: 张甦(1981-), 男, 江苏淮安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境监测与管理研究。

区,这些河流的水质污染一般较为严重^[19-20],水质改善压力较大。“治湖先治河”是太湖水环境治理实践中总结出来的有效手段,而河道污染来源识别则是河流水质改善策略制定的基础。

社渚港为江苏省省政府确定的 15 条主要入湖河流之一,位于江苏省无锡市宜兴境内,西起武宜运河,东入太湖。数据显示,社渚港主要水质指标高锰酸指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃—N)、总磷(TP)和总氮(TN)年均值自 2014 年以来持续未能达到《江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案(2013 年修编)》中的控制目标。

为进一步厘清社渚港河道周边的潜在污染来源及河流水质空间变化特征,本文以该河道为研究对象,采用无人机多光谱遥感监测手段开展河道沿线潜在污染源调查分析,并建立 TN、TP、NH₃—N 和 COD_{Mn}等主要水质指标的无人机多光谱遥感反演模型,分析河流水质空间变化特征,以期为河流污染的溯源监测与水质管理措施的制定提供借鉴。

2 设备与方法

本文多光谱遥感监测采用 Finder 系列多光谱相机。该相机主要工作波段在可见光至近红外范围,具有 6 通道多光谱图像实时采集能力,光谱波段分别为 490 nm(B1)、550 nm(B2)、620 nm(B3)、660 nm(B4)、820 nm(B5)和 900 nm(B6)。其中,前 4 个通道(B1 ~ B4)属于可见光波段,后 2 个通道(B5 ~ B6)属于近红外波段。

2019 年 11 月 18 日至 20 日,对社渚港开展低空无人机载多光谱影像采集工作,获取 6 个光谱通道的多光谱影像。在执行无人机载多光谱影像采集工作的同时,沿社渚港布设 38 个采样点(南岸采样点按照 1[#]~37[#]奇数顺序编号,北岸采样点按照 2[#]~38[#]偶数顺序编号),在每个采样点采集水质样品,并记录各采样点的坐标位置。采样完毕后,将水质样品带至实验室开展水质参数分析测试,测试结果如表 1 所列。

表 1 社渚港沿线各采样点水质参数测定结果 mg/L

编号	TN	TP	NH ₃ —N	COD _{Mn}	编号	TN	TP	NH ₃ —N	COD _{Mn}
1 [#]	2.75	0.45	0.09	4.08	20 [#]	3.43	0.25	0.71	5.15
2 [#]	1.56	0.22	0.09	2.75	21 [#]	3.84	0.27	0.34	6.48
3 [#]	2.54	0.24	0.11	4.08	22 [#]	3.50	0.18	0.44	5.15
4 [#]	2.68	0.30	0.11	4.08	23 [#]	3.46	0.26	0.35	5.68
5 [#]	3.25	0.68	0.25	5.95	24 [#]	3.56	0.26	0.37	5.41
6 [#]	2.81	0.29	0.11	4.35	25 [#]	4.28	0.32	0.37	6.75
7 [#]	4.18	0.22	0.17	5.15	26 [#]	3.83	0.33	0.27	5.68
8 [#]	3.80	0.32	0.24	5.41	27 [#]	3.49	0.71	0.30	10.21
9 [#]	4.14	0.30	0.19	5.68	28 [#]	3.31	0.31	0.35	4.35
10 [#]					29 [#]	3.33	0.37	0.41	5.41
11 [#]	3.72	0.35	0.31	5.68	30 [#]	2.94	0.26	0.30	4.61
12 [#]	3.69	0.27	0.38	6.21	31 [#]	3.47	0.35	0.40	5.95
13 [#]	3.72	0.28	0.37	6.48	32 [#]	2.85	0.25	0.44	4.88
14 [#]	4.86	0.37	2.25	6.48	33 [#]	2.97	0.27	0.36	4.61
15 [#]	3.52	0.23	0.48	5.68	34 [#]	2.98	0.27	0.44	4.61
16 [#]	3.25	0.26	0.54	5.68	35 [#]	3.04	0.28	0.35	4.35
17 [#]	3.67	0.30	0.56	5.68	36 [#]	2.15	0.10	0.12	3.81
18 [#]	3.40	0.24	0.57	5.41	37 [#]	2.24	0.11	0.10	3.28
19 [#]	3.28	0.21	0.58	5.15	38 [#]	2.80	0.19	0.42	3.81

注:由于道路封闭无法抵达,无 10[#]编号样品。

3 结果与分析

3.1 污染源分布监测结果

遥感影像解译结果(图 1)显示,社渚港沿线疑

似污染源集中分布特征明显,主要分为 4 个类别,分别为堆场、工矿企业、水田和鱼塘,具体数量分别为堆场 6 处、工矿企业 6 处、水田 140 个地块和鱼塘 16 个,总面积为 102.681 hm²,约占整个监测范围面积

的 59%, 污染源分布广泛, 充分反映了该区域的高开发强度。

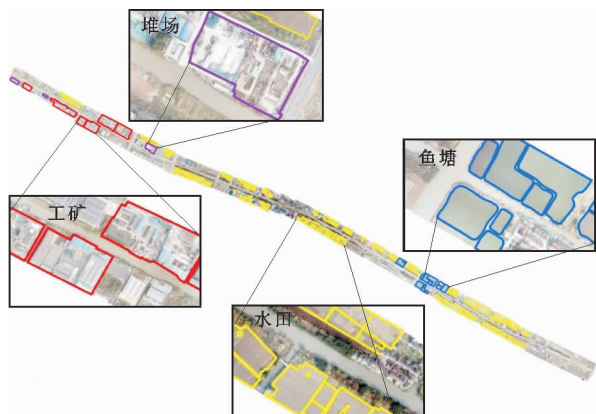


图 1 社渚港沿线疑似污染源遥感解译分布图

3.2 多光谱遥感水质反演模型建立

半经验法是当前使用较多且反演精度较高的遥感水质反演模型构建方法。该方法依据选定水质参数的光谱特性分析以及遥感图像的敏感性判定, 并以敏感波段或波段组合为变量构建水质反演模型。线性回归模型、指数模型、幂函数模型、多项式模型是使用较多的备选模型。由于线性回归模型结构简单, 变量关系简单明了, 一般情况下作为首选模型, 本文也优选线性回归方法。在光谱特征上, 水体 TP、TN、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 和 COD_{Mn} 浓度的不同最终体现在光谱反射率的数据差异上, 利用各通道不同的校正系数, 计算得到每个通道影像的反射率值。以现场实测水质数据与对应监测点位的光谱反射率数据建立一元或多元线性回归模型, 根据模型反演出监测点的水质参数值, 并以相关系数来检验模型的精度。

模型构建的具体过程为: 第 1 步, 在各个采样点位置附近多光谱遥感影像上选取一定区域, 计算得到的该区域的平均反射率值作为该采样点的反射率值; 第 2 步, 选取 30 个采样点的数据作为建模样本, 基于一元或多元线性回归方法构建水质参数反演模型, 并作相关性分析; 第 3 步, 将剩余 7 个采样点的数据作为检验样本代入反演模型计算得到检验样本水质参数的估算值, 将其与水质参数实测值作相关性分析, 将相关性最高的模型选作最佳, 用于后续水质反演。

表 2 为社渚港 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 和 COD_{Mn} 等 4 项水质参数多光谱水质模型拟合结果。由表 2 可看出, 多元线性回归模型对社渚港 TN 与光谱反射率关系的反映效果最好, 以 B2、B5 和 B6 波段反射率为因变量的多元线性回归模型效果最佳; 社渚港 TP 与本次

多光谱遥感监测 6 个波段的反射率之间均存在线性关系, 以 6 个波段反射率的多元线性回归方程对社渚港 TP 的拟合结果最好; 社渚港 $\text{NH}_3\text{—N}$ 对光谱的选择性较高, 但与 B3 和 B6 反射率的一次线性回归方程的拟合结果最好, 其建模及检验相关系数高达 0.88、0.86, 均高于其他 3 个模型模拟结果; 社渚港 COD_{Mn} 与本次多光谱遥感监测的 6 个波段的反射率之间也均存在线性关系, 以 6 个波段反射率的多元线性回归方程对社渚港 COD_{Mn} 的拟合结果最好。

不同水质指标多光谱反演模型构建结果显示, 指标不同, 对光谱的响应关系也不同。以 TN 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的差异最为明显, TN 的特征波段为 B2、B5 和 B6, $\text{NH}_3\text{—N}$ 的特征波段为 B3 和 B6。从文献资料来看, 这种差异在应用遥感技术水质监测中普遍存在, 造成这种差异的原因也较多。光谱源、水体特征, 甚至同一水体的不同时间均可展现出一定的差异。在水质反演模型上, 目前尚缺少一个统一的通用模型, 仍需要具体问题具体分析。这一缺陷, 严重制约了遥感监测在水质监测中的统一应用。

3.3 社渚港水质多光谱反演结果

图 2 为社渚港沿线不同特征河段水体 TN 多光谱反演结果。图 2 显示, 在农田区河段, 社渚港周边鱼塘水体的 TN 浓度显著高于社渚港水体 (图 2(a))。沿河流方向, 相对于农田区来说, 人类生产、生活比较活跃的工厂区 (图 2(b)) 和居民区 (图 2(c)) 水体 TN 的浓度要高一些, 尤其是居民区的水体 TN 明显高于农业区, 充分体现了人类生产、生活对社渚港水体 TN 的影响。卢少勇等^[21] 2009 年的调查也发现, 人类生产、生活对社渚港沉积物 TN 的影响显著。由此可见, 虽然经过近 10 年的治理, 人类生产、生活活动对社渚港水体水质的影响依然存在, 但是已有显著下降。

社渚港沿线不同特征河段水体 TP 多光谱反演结果 (图 3) 显示, 在农田区河段 (图 3(a)), 社渚港周边鱼塘水体的 TP 浓度显著高于社渚港水体 TP 浓度。沿河流方向, 相对于农田区来说, 人类生产、生活比较活跃的工厂区 (图 3(b)) 和居民区 (图 3(c)) 河段水体 TP 的浓度更高一些, 充分体现了人类生产、生活对社渚港水体 TP 的影响。

无人机多光谱遥感对水体 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的反演结果 (图 4) 显示, 社渚港沿线不同特征河段水体 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的差异较为明显。在农田区河段, 社渚港周边鱼塘水体的 $\text{NH}_3\text{—N}$ 浓度显著高于社渚港水体。沿河流方向, 相对于农田区河段 (图 4(a)) 来说, 人类生

产、生活比较活跃的工厂区(图 4(b))和居民区(图 4(c))河段水体 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的浓度要高一些,尤其以工厂区河段水体的 $\text{NH}_3\text{—N}$ 浓度最高。

社渚港不同特征河段水体高锰酸盐指数(COD_{Mn})无人机多光谱遥感反演结果(图 5)显示,在农田区河段(图 5(a)),社渚港周边鱼塘水体的 COD_{Mn} 浓度显著高于社渚港水体。沿河流方向上,相对于农田区河段来说,人类生产、生活比较活跃的工厂区(图 5(b))和居民区(图 5(c))河段水体 COD_{Mn} 的浓度要高一些,尤其以居民区河段水体的 COD_{Mn} 浓度为最高。

表 2 社渚港及附近水域水体 4 项水质参数多光谱水质模型拟合结果

水质指标	序号	模型拟合方程	R_f	R_r
TN	1	$11.538 - 516.708B6 - 16.116B2 + 207.707B5 + \varepsilon$	0.78	0.74
	4	$11.296 + 12.784B1 - 18.865B2 - 9.394B3 + 10.038B4 + 198.016B5 - 510.606B6 + \varepsilon$	0.76	0.64
	2	$16.918B6 + 2.4001 + \varepsilon$	0.39	0.28
	3	$0.1B6/B5 + 1.9 + \varepsilon$	0.32	0.22
TP	1	$0.241 + 0.705B1 - 0.113B2 - 0.916B3 + 0.494B4 - 0.997B5 + 5.058B6 + \varepsilon$	0.60	0.58
	4	$0.007(B3 - B6)/(B3 + B6) + 0.18 + \varepsilon$	0.36	0.31
	2	$-0.0296B4/B6 + 0.4657 + \varepsilon$	0.50	0.47
	3	$0.353 - 0.157B3 + \varepsilon$	0.52	0.49
$\text{NH}_3\text{—N}$	1	$-2.101 + 98.068B6 - 7.46B3 + \varepsilon$	0.88	0.86
	2	$3.11B2/B4 - 2.77 + \varepsilon$	0.31	0.27
	3	$-8.64(B1 - B5)/(B1 + B5) + 2.17 + \varepsilon$	0.55	0.51
	4	$6.18B5/B1 - 3.69 + \varepsilon$	0.79	0.71
COD_{Mn}	1	$12.564 + 6.972B1 - 23.313B2 + 9.804B3 - 15.354B4 + 214.803B5 - 469.86B6 + \varepsilon$	0.76	0.73
	2	$0.00134B6 + 0.06 + \varepsilon$	0.08	0.04
	3	$-0.1B1/B5 + 2.03 + \varepsilon$	0.73	0.69
	4	$-0.03(B1 - B5)/(B1 + B5) + 0.37 + \varepsilon$	0.71	0.68

注:表中 ε 为拟合残差, R_f 为建模相关系数, R_r 为检验相关系数。

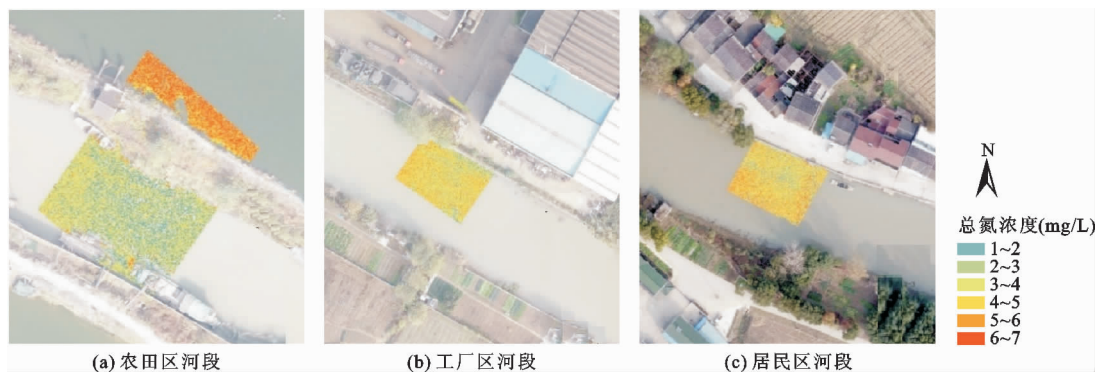


图 2 社渚港不同河段正射影像及总氮(TN)反演结果

3.4 太湖西部区域鱼塘水体分布特征

多光谱遥感监测结果显示,在农田区河段,河道岸边鱼塘水质显著劣于河道水体。包含社渚港在内的典型区域遥感解译结果(图 6)显示,区域内共有农田(水田)图斑 7 431 个,总面积为 124.021 km^2 ,占解译总面积的 23.6%;鱼塘图斑 4 260 个,总面积为 53.589 km^2 ,占解译总面积的 10.2%。空间上,鱼塘主要分布在溁湖南岸 4 km 范围内和沙塘港附近;农田主要分布在区域的中部区域和 S48 沪宜高速沿线。与河流空间位置关系上,在河流 100 m 缓冲区内共解译出 2 506 个图斑,总面积为 43.765 km^2 ,占解译总面积的 24.7%,其中农田图斑 1 109 个,面积为 21.26 km^2 ,占农田解译总面积的 17.1%,鱼塘图斑 1 397 个,面积为 22.504 km^2 ,占鱼塘解译总面积的 42.0%。在河流 500 m 缓冲区内共解译出 6 451 个图斑,总面积为 99.67 km^2 ,占解译总面

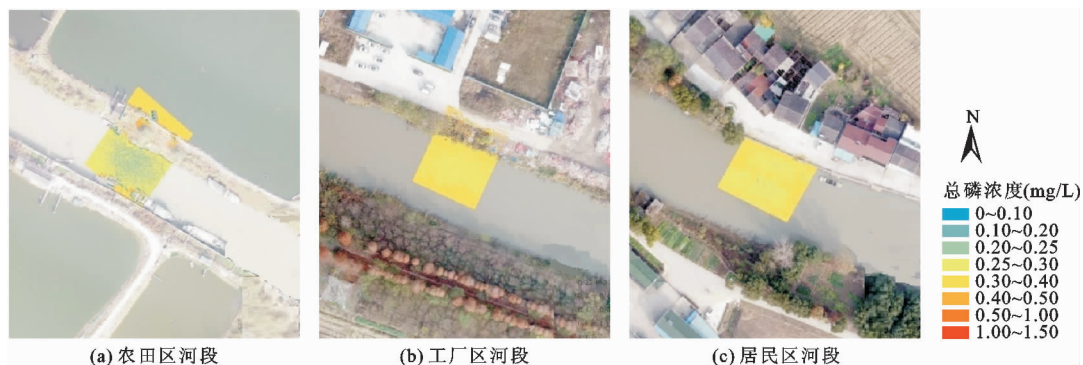


图3 社渚港不同河段正射影像及总磷(TP)反演结果

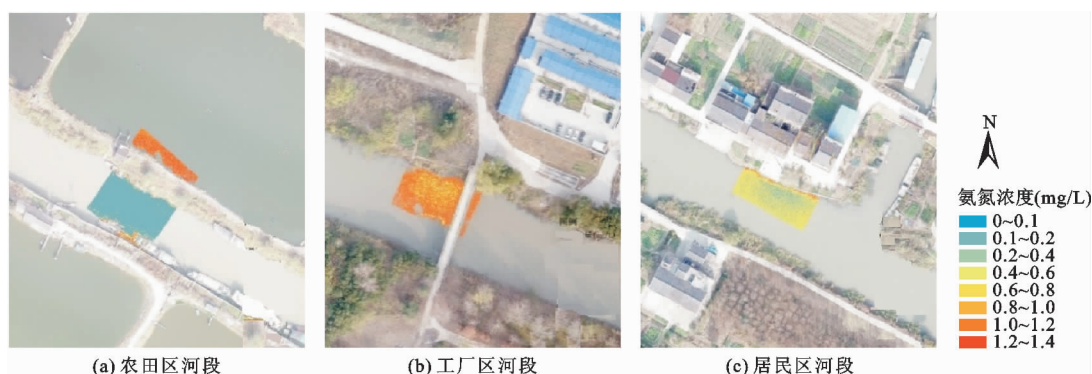
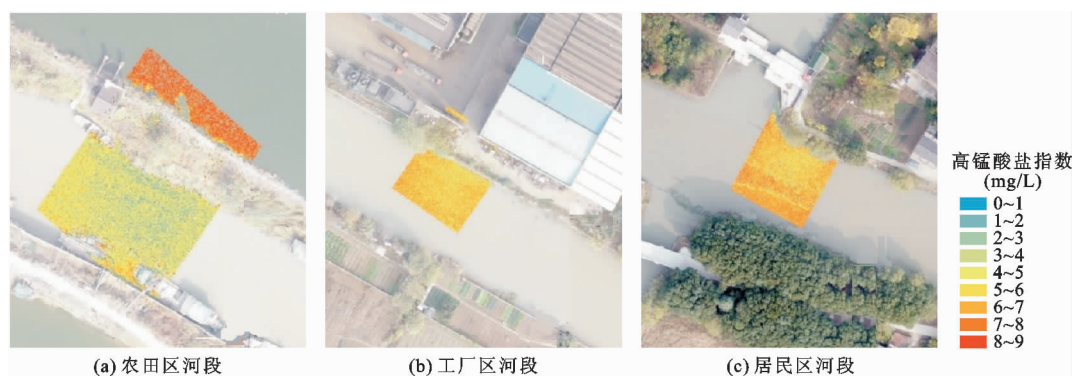
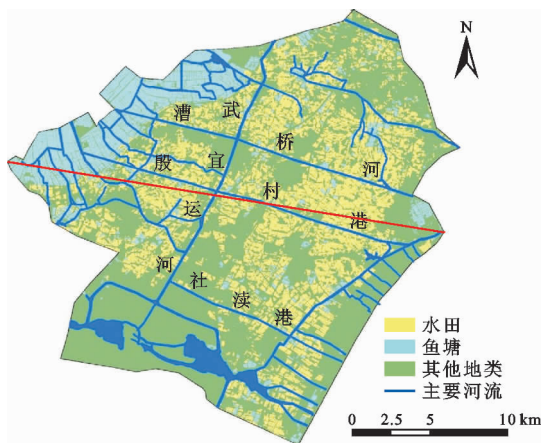
图4 社渚港不同河段正射影像及氨氮(NH₃-N)反演结果图5 社渚港不同河段正射影像及高锰酸盐指数(COD_{Mn})反演结果

图6 太湖西部包含社渚港在内的典型区域遥感解译结果

积的56.25%,其中农田图斑3 476个,面积为58.81 km²,占农田解译总面积的47.4%,鱼塘图斑2 975个,面积为40.86 km²,占鱼塘解译总面积的76.3%,表明大部分鱼塘与入湖河流距离很近,容易对入湖河流造成水质污染。

受监测时间限制,未发现鱼塘向河道排水的情况。但是,根据鱼塘养殖规律,鱼塘换水期必然有大量鱼塘废水进入河道,从而造成河道水体水质下降。

4 结 论

本文利用遥感监测同步性较好的优点,以社渚港为典型河流,采用无人机多光谱数据开展入湖河

流污染源监测研究,并以遥感影像解译太湖西部农田、鱼塘分布特征,得到以下初步结果:

(1)社渚港沿线岸边集中分布着不同类型的疑似污染源,主要包括堆场、鱼塘、水田和工矿企业,面积占整个监测范围的59%,凸显区域开发强度高。

(2)水质多光谱遥感解译证实,沿河流方向,人类活动较强的工厂区河段和居民区河段水体TN、TP、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 和 COD_{Mn} 浓度较农田区河段显著增大,受人类活动影响明显。在农田区河段,河道岸边鱼塘水质显著劣于河道水体。

(3)包含社渚港在内的典型区共解译到鱼塘图斑4 260个,总面积为53.589 km²,占解译总面积的10.2%。在河流100 m缓冲区内,共解译出鱼塘图斑1 397个,面积为22.504 km²,占鱼塘解译总面积的42.0%;在河流500 m缓冲区内,共解译出鱼塘图斑2 975个,面积为40.86 km²,占鱼塘解译总面积的76.3%,表明大部分鱼塘与入湖河流距离很近,容易对入湖河流造成水质污染。

(4)受光谱源、水体特征等多种因素影响,在水质遥感反演模型上,目前尚缺少一个统一的通用模型,仍需要具体问题具体分析。这一缺陷,严重制约了遥感监测在水质监测中的统一应用。

参考文献:

- [1] 孔梅,孟祥亮,高洁,等. 山东省省级自然保护区人类活动遥感监测与评价[J]. 环境监控与预警, 2020, 12(1): 16–19.
- [2] 侍昊,李旭文,牛志春,等. 金坛区景观格局时空变化及驱动力分析[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(4): 5–9+15.
- [3] 吴传庆,殷守敬,王楠,等. 河流物理生境遥感监测研究与应用分析[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 28–32.
- [4] 刘彦君,夏凯,冯海林,等. 基于无人机多光谱影像的小微水域水质要素反演[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1241–1249.
- [5] 金浩宇,鞠琴,曲珍,等. 长江源区1980–2010年土地利用变化及影响分析研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 78–85.
- [6] 李兆鑫,丘仲锋,李旭文,等. 基于机器学习遥感算法的大型漂浮藻面积提取方法研究[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 46–51.
- [7] 谢娅,李俊生,李景宜,等. 湖库水生植被光学遥感监测研究进展和展望[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 52–58.
- [8] 李思,崔晨风,梁宁. 基于遥感技术的陕西省渭河流域污染演变研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 127–128.
- [9] 朱利,李家国,李凯云,等. 遥感技术在水生态环境管理的应用与前景[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 22–27.
- [10] 冯珊珊,梁雪映,樊风雷,等. 基于无人机多光谱数据的农田土壤水分遥感监测[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 74–81.
- [11] 王帅,郭治兴,梁雪映,等. 基于无人机多光谱遥感数据的烟草植被指数估产模型研究[J]. 山西农业科学, 2021, 49(2): 195–203.
- [12] 奚雪,赵庚星. 基于无人机多光谱遥感的冬小麦叶绿素含量反演及监测[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 119–126.
- [13] 谭丞轩,张智韬,许崇豪,等. 无人机多光谱遥感反演各生育期玉米根域土壤含水率[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 63–74.
- [14] ZANG Wenqian, LIN Jiayuan, WANG Yangchun, et al. Investigating small-scale water pollution with UAV remote sensing technology [C] // World Automation Congress, IEEE, 2012.
- [15] 胡震天,周源. 基于低空多光谱遥感的城市水质监测方法研究[J]. 地理空间信息, 2020, 18(7): 4–8+141.
- [16] 陈洁,朱广伟,许海,等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4924–4931.
- [17] 李晓虹,雷秋良,周脚根,等. 降雨强度对洱河流域凤羽河氮磷排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5375–5383.
- [18] DU Chenggong, LI Yunmei, WANG Qiao, et al. Tempo-spatial dynamics of water quality and its response to river flow in estuary of Taihu Lake based on GOCI imagery[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 28079–28101.
- [19] 卢少勇,远野,金相灿,等. 7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1497–1502.
- [20] 吕学研,张咏,徐亮,等. 典型入湖河流夏–秋季氮素污染变化特征[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 9–15.
- [21] 卢少勇,焦伟,王强,等. 环太湖河流水质时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1220–1225.