

太湖流域养殖池塘的氮磷污染负荷估算

徐贵茗^{1,2,3} 崔桢^{2,3} 高俊峰^{2,3} 李国柱¹ 黄佳聪^{2,31}

(1. 吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000;

2. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

3. 中国科学院 流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008)

【摘要】:太湖流域平原区河网密集、渔业发达,其中池塘养殖是渔业的主要模式,而养殖池塘的污水排放是其周边河湖富营养化与蓝藻水华的重要原因之一,因此,精细化估算流域养殖池塘的氮磷污染负荷,对区域氮磷污染来源的精准解析与科学防控具有重要意义。以太湖流域养殖池塘为研究对象,通过解译 2019 年的高分辨率遥感影像,获取养殖池塘的空间分布,同时发展了基于归一化植被指数区分养殖池塘类型的方法,估算了两种类型养殖池塘(鱼塘和虾蟹塘)的面积与分布;采用氮磷污染排放系数法,估算了养殖池塘的氮磷污染负荷,分析其空间差异。研究结果表明:2019 年,太湖流域养殖池塘总面积为 1308.6km²,其中鱼塘 872.6km²,虾蟹塘 436.0km²,养殖池塘氮排放量为 11013.5t,磷排放量为 1626.8t。养殖池塘污染负荷空间分布和养殖池塘规模分布比较一致,太湖南部的湖州市辖区、吴江市和德清县是养殖池塘氮磷污染较为严重地区,其氮污染负荷分别为 1214.8、1004.4 和 792.2t,磷污染负荷分别为 179.7、146.3 和 117.7t,主要原因是当地池塘养殖业发达,并且氮磷污染负荷系数大于虾蟹塘的鱼塘比例较高。

【关键词】:池塘 营养盐 归一化植被指数 虾蟹

【中图分类号】:X52 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2022)01-0148-08

自中央国务院 1985 年发出“加速发展水产养殖业”指示以来^[1],我国池塘养殖业发展迅速,池塘养殖产量从 1985 年的 1.8×10^6 t 增长到 2018 年的 2.5×10^7 t。截至 2018 年底,我国水产养殖面积达 71895.2km²,其中淡水池塘养殖面积 26668.4km²,占全国淡水养殖面积的 51.8%^[2,3]。太湖流域是我国淡水养殖业极其发达的地区,养殖池塘和湖泊围网养殖是主要养殖模式,养殖面积占内陆养殖总面积的 85%以上,其中六大城市(上海、苏州、无锡、常州、湖州和嘉兴)2018 年的养殖池塘面积占淡水养殖面积的 83%以上^[4]。太湖流域的养殖池塘以鱼塘和虾蟹塘为主,鱼塘主要养殖青、草、鲢、鳙、鲤、鲫和鳊等鱼类,虾蟹塘主要养殖河蟹、青虾、南美白对虾等甲壳类动物^[5]。

随着水产养殖业的快速发展,水环境污染问题也日益突出,大量研究表明:部分养殖户为提高养殖产量投入过量的饵料、残饵和粪便,这些养料经过分解产生大量的氮磷,并随换水和排泥等过程排放到周边河流与湖泊^[6,7,8]。据《第二次全国污染源普查公报(2020 年)》,2017 年水产养殖业总氮总磷排放量分别占农业污染源排放量的 7%和 7.6%,占全国排放总量的 3.3%和 5.1%,与

作者简介:徐贵茗(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为区域可持续发展.E-mail:xzmon2r@163.com;李国柱 E-mail:jlulnlgzh@126.com;黄佳聪 jchuang@niglas.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1700600);国家自然科学基金项目(41971138);中国科学院青年创新促进会项目(2019313);中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23020201);江苏省水利科技项目(2019025, 2020042, 2020032, 2021036)

2007 年(《第一次全国污染源普查公报(2010 年)》)相比,氮磷排放增长率大于 60%,淡水养殖污染排放问题十分突出,是导致周边河湖富营养化与蓝藻水华的重要原因之一。2018 年,太湖水质状况总磷为Ⅳ类,总氮为Ⅴ类,其中竺山湖、西部沿岸区总氮浓度高于 2.0mgL^{-1} (劣Ⅴ类)^[9,10],导致近年来太湖蓝藻水华规模与频次仍然居高不下^[11,12]。

以往研究中养殖池塘面源污染负荷的估算方法主要包括:(1)调查分析与资料收集法:利用统计年鉴与产污系数计算污染负荷^[13,14,15];(2)调研法:实地开展典型区域调研,确定污染负荷估算的关键参数,进而量化区域的污染负荷^[16,17];(3)遥感提取法:基于遥感数据提取面源污染相关信息,进而估算氮磷污染负荷^[18]。上述方法耗时费力,研究精度往往受限于资料的完整性与准确性,并且多集中在小尺度地区或典型池塘,缺乏在大尺度区域的适用性探究^[19],亟需在大尺度流域开展养殖池塘氮磷的精细化研究。本研究以太湖流域为研究区,提出了一种基于归一化植被指数区分养殖池塘类型的方法,估算了养殖池塘的污染负荷及其时空分布,为太湖流域氮磷污染来源的精准解析与科学防控提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

本研究通过解译哨兵 2 号影像数据,提取养殖池塘,获取太湖流域养殖池塘水体空间分布,并通过归一化植被指数(NDVI)区分养殖池塘类型(鱼塘和虾蟹塘),通过统计数据对比与无人机现场调研等手段校验遥感解译结果的精度;以此为基础,采用氮磷污染负荷系数法,分别估算鱼塘和虾蟹塘的氮磷污染负荷及其空间分布特征。技术路线如图 1 所示,关键数据与技术环节分述如下。

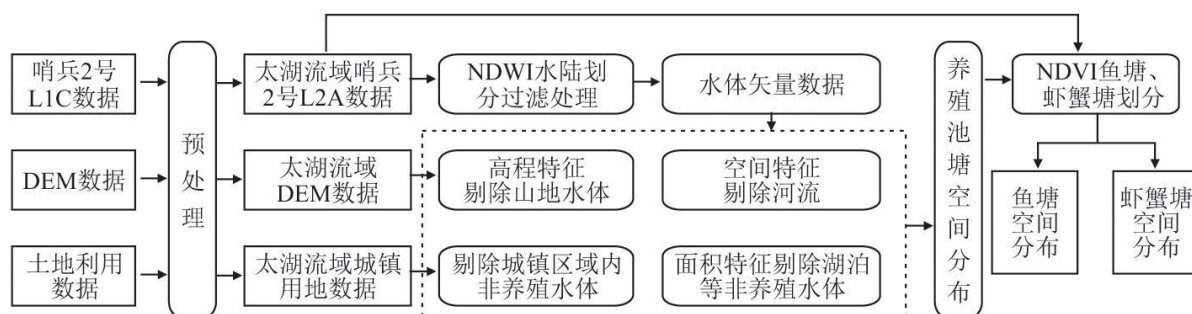


图 1 太湖流域鱼塘与虾蟹塘空间分布提取技术路线图

1.1 研究区域

太湖流域(图 2)地处长江下游末端与钱塘江、杭州湾之间,西依天目山、茅山,东临东海,地形呈西高东低,四周高中间低,西部主要为山地丘陵,其余为平原。太湖流域属亚热带季风气候,四季分明,降水丰富,多年平均气温为 $14.9^{\circ}\text{C}\sim 16.2^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量为 1177mm ,流域内水网密布,主要水系包括苕溪、南河、洮滆、黄浦江、杭州湾水系等。太湖流域总面积 36895km^2 ,跨江苏、浙江、安徽和上海三省一市,人口密度大,农业耕作强度大,是我国经济发展最具活力的地区之一^[20]。

1.2 养殖池塘空间分布的遥感解译

1.2.1 数据及其预处理

本研究涉及的数据包括高分辨率遥感卫星影像、高程数据(Digital Elevation Model, DEM)、土地利用、流域边界等数据。其中卫星影像数据来自欧洲航天局的高分辨率多光谱成像卫星(哨兵 2 号卫星),该卫星携带一枚多光谱成像仪,高度为 786km ,幅宽达 290km ,覆盖 13 个光谱波段。

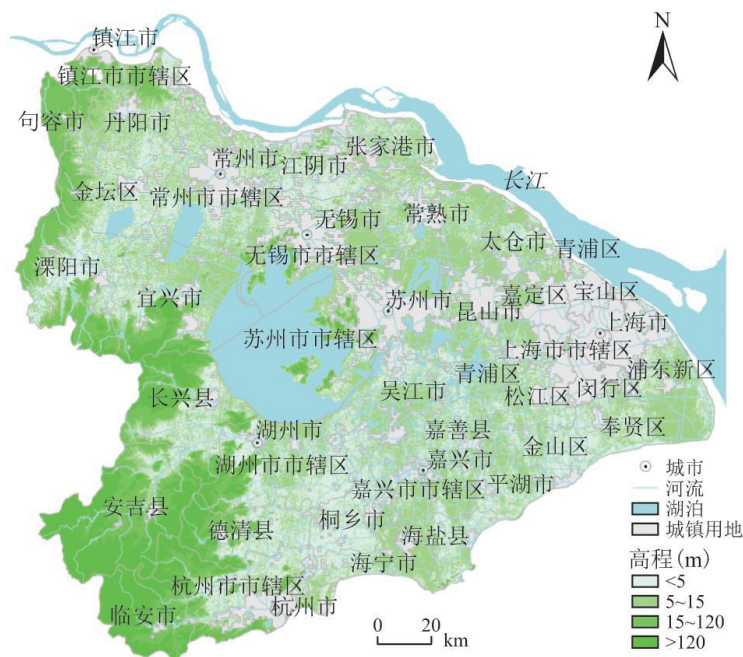


图 2 太湖流域及其河流、湖泊与城镇用地分布

红绿蓝与近红外的地面分辨率均为 10m, 包括两颗卫星 (2A 与 2B)。本研究采用 2019 年 8 月 17 日的 10 景原始影像 (2A 卫星的 L1C 级影像), 编号分别为 50SQA、51STR、51SUR、50RPV、50RQV、51RTQ、51RUQ、50RQV、51RTP 和 51RUP, 覆盖了太湖流域地区。DEM 来自于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台, 数据集名称为 GDEMDEM30m 分辨率数字高程数据 (<http://www.gscloud.cn>)。该数据集利用 ASTERDEM 的第一版本数据加工, 是全球空间分辨率为 30m 的数字高程数据产品, 本研究选用覆盖北纬 30°、东经 119° 高程数据产品的 9 景数据。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心的 2018 年中国土地利用遥感监测数据, 分辨率为 1km (<http://www.resdc.cn>)。太湖流域边界来自水利部太湖流域管理局 (<http://www.tba.gov.cn>)。

哨兵 2 号 L1C 影像是经过正射校正和几何精校正的大气表现反射率产品, 并没有进行大气校正。因此, 采用欧空局发布的 Sen2cor2.8 插件开展辐射定标和大气校正 (http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/sen2cor_v2-8), 生成经过大气校正的大气底层反射率的哨兵 2 号 L2A 数据, 对影像镶嵌并选用太湖流域矢量边界裁剪。基于 DEM 和土地利用数据分别提取了太湖流域平原区和城镇用地, 按太湖流域边界进行裁剪, 并对 DEM 数据在平原区存在的异常峰值进行去峰处理。

1.2.2 养殖池塘提取

利用多光谱波段进行比值运算, 进一步扩大波段间差异, 从而达到在影像上突出显示感兴趣地物的目的。1996 年, 美国学者 Mcfeeters^[22]提出了归一化水体指数 (NDWI), 公式如下:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

式中: Green 代表绿光波段; NIR 代表近红外波段。在哨兵 2 号卫星遥感影像中, Green 代表第三波段, NIR 代表第八波段。经反复测试分析, 采用 -0.1 作为 NDWI 阈值区分水陆, 将研究区影像水体指数小于 -0.1 的部分剔除, 得到研究区水陆划分的结果图。

由于 NDWI 提取的水体存在面积很小的水体斑块与孤岛, 故采用 ENVI5.3 中的过滤功能处理 (Sieve), 解决分类图像中出现的孤岛问题, 使用斑点分组方法来消除这些被隔离的分类像元。类别筛选方法通过分析周围的 4 个或 8 个像元, 判定一个像元是否与周围像元同组。如果一类中被分析的像元数少于输入的阈值, 这些像元就会被从该类中删除, 删除的像元归为未分类像元。经过测试分析, 选取水体的过滤阈值为 10, 陆地的过滤阈值为 100, 分别对水体和陆地的分类像元进行过滤处理。上述方法可以剔除细小的水体斑块与孤岛。

养殖池塘在高分辨率遥感图像上呈现出清晰的格网状或团块状排列的分布特征, 而河道呈现出细长弯曲的空间分布特征, 本文尝试采用 ArcGIS10.2 中的最小边界几何功能, 生成各水体要素的最小边界几何, 以要素面积和要素的最小边界几何的比值 n 来判断要素的狭长弯曲程度, 计算公式如下:

$$n = S_1 / S_2 \quad (2)$$

式中: S_1 代表要素面积; S_2 代表要素所对应的最小边界几何面积。经过多次测试, 选取阈值 0.3, 剔除 $n < 0.3$ 的要素。验证结果表明该方法与阈值可以有效去除狭长水体, 比如河流与圩区内部河道。太湖流域平原区面积大, 但也存在山地丘陵, 山地内广泛分布天然小型湖泊和水库, 因此利用 DEM 数据, 剔除高程超过 15m 的水体, 保留高程在 15m 以下的平原区池塘。经过高程筛选后仍存在较大湖泊和河流, 通过计算各个水体的面积, 发现湖泊面积多大于 0.3 km^2 , 故将此部分湖泊水体剔除。最后利用土地利用数据将城镇用地中的非养殖水体剔除, 最终得到养殖池塘水体空间分布。

1.2.3 养殖池塘分类

与鱼塘不同, 虾蟹在养殖过程中需要在池塘中种植大量沉水植物, 基于这一典型特征, 采用归一化植被指数 (NDVI) 区分鱼塘与虾蟹塘, 公式如下:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (3)$$

式中: Red 代表红光波段; NIR 代表近红外波段。在哨兵 2 号卫星遥感影像中, Red 代表第四波段, NIR 代表第八波段。利用 ArcGIS10.2 的分区统计功能 (Zonal Statistics) 计算每块养殖池塘的 NDVI 值, 经过多次测试, 选取 0.1 作为区分鱼塘 ($NDVI \leq 0.1$) 与虾蟹塘 ($NDVI > 0.1$) 的阈值。

1.3 氮磷污染负荷估算

通过文献调研太湖流域不同类型养殖池塘的污染负荷系数^[5], 通过计算太湖流域苏州地区各类型的代表性池塘均值, 得到氮磷污染负荷系数 (鱼塘氮 $115.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷 $16.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 虾蟹塘氮 $21.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷 $4.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。与彭凌云等^[21]、张玉珍等^[17]、李丽芬等^[23]现有研究对比, 本研究采用的鱼塘氮磷污染负荷系数来源于草鱼、青鱼以及混养池塘污染负荷系数, 与上述研究获得的污染系数均值 (氮 $97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷 $11.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 相近。与陈家长等^[24]、戴捷等^[25]、宋学宏等^[16]研究相比, 本研究采用的虾蟹塘氮磷污染负荷系数, 与其他各研究所得结果较为接近, 且虾塘氮磷排放较低, 因此本研究所采用的虾蟹塘总污染负荷系数较小。各研究养殖池塘污染负荷系数见表 1。

表 1 现有研究采用的养殖池塘氮磷污染负荷系数

地点	养殖类型	污染负荷 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)	参数来源
----	------	--	------

		氮	磷	
江苏省苏州市东太湖周边	河蟹	18.8	2.1	[5]
	青虾	15.2	6.1	
	南美白对虾	30.1	5.0	
	青鱼	93.9	6.2	
	草鱼	86.6	10.2	
	混养鱼塘	166.1	32.9	
太湖流域	鱼	69.5	1.6	[21]
	虾	3.0	0.1	
	蟹	6.4	0.2	
江苏省苏州市东山镇	河蟹	21.3	2.3	[16]
福建省九龙江五小川小流域	罗非鱼、草鱼	172.5	26.4	[17]
江苏省宜兴市殷村港	混养鱼塘	49.0	6.2	[23]
太湖流域	河蟹	27.1	7.9	[24]
洪湖流域	河蟹	27.6	7.3	[25]

根据遥感解译得到的鱼塘和虾蟹塘面积，分别计算养殖池塘氮磷污染负荷，公式如下：

$$P_i = \sum_j K_i \times S_j / 1\ 000 \tag{4}$$

式中：P_i为第 i 种污染负荷(t) ;K_i为第 i 种污染负荷系数(kg • hm⁻²) ;S_j为 j 类养殖池塘面积(hm²)。

2 结果与分析

2.1 养殖池塘规模及空间分布

遥感解译结果表明：2019 年，太湖流域的养殖池塘总面积为 1308.6km²，其中鱼塘 872.6km²，虾蟹塘 436km²。通过收集整理太湖流域各地市级统计年鉴(2018 年),得到太湖流域内 23 个县级行政区的养殖池塘面积统计数据，与其进行对比，得出遥感解译精度为 91.3%，(图 3a)。按照鱼塘和虾蟹塘的分类结果随机选取 6 个鱼塘和 6 个虾蟹塘通过无人机拍摄航拍相片验证，得出鱼塘和虾蟹塘分类的总体分类精度为 83.3%，Kappa 系数为 0.7(图 3b)。

2019 年，太湖流域中的养殖池塘呈现出西北与东南多、西部少的空间格局，且养殖池塘在溇湖，长荡湖周边以及太湖南部河网密集地区较为集中(图 4)。太湖流域虾蟹养殖在溇湖与长荡湖周边集中程度较高，宜兴市、金坛区、溧阳市、镇江市市辖区、

丹阳市和句容市的虾蟹塘面积均占总养殖池塘面积的 50%以上。养殖池塘面积大于 50km² 的区域有湖州市市辖区、宜兴市、吴江市、溧阳市、常州市市辖区、金坛区、常熟市、苏州市市辖区和杭州市市辖区，以上区域的养殖池塘面积占太湖流域养殖池塘总面积的 64%。其中，湖州市市辖区的养殖池塘面积和鱼塘面积均最大，养殖池塘面积为 146km²，鱼塘面积为 95.9km²，宜兴市的虾蟹塘面积最大，面积为 53.4km²，杭州市市辖区的鱼塘面积占比最大，占当地养殖池塘总面积的 81%，溧阳市的虾蟹塘占比最大，占当地养殖池塘总面积的 63%。

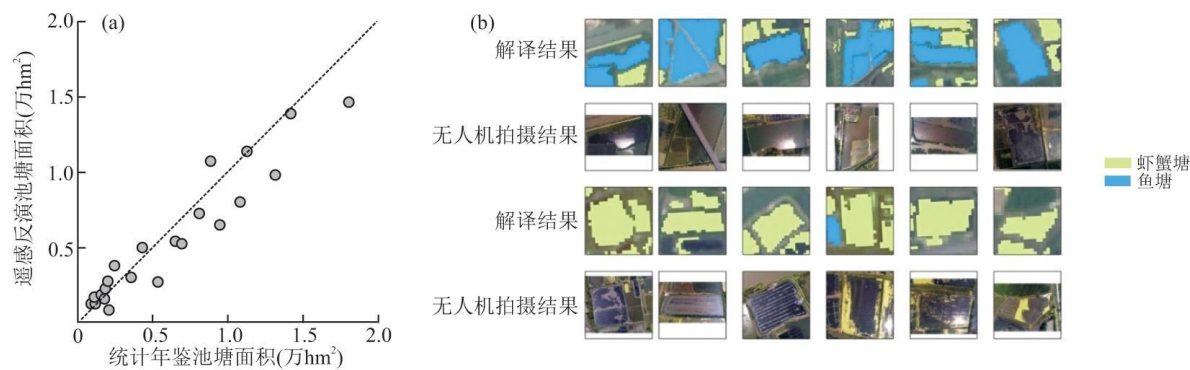


图 3 太湖流域各县市养殖面积验证 (a) 及无人机航拍验证结果 (b)

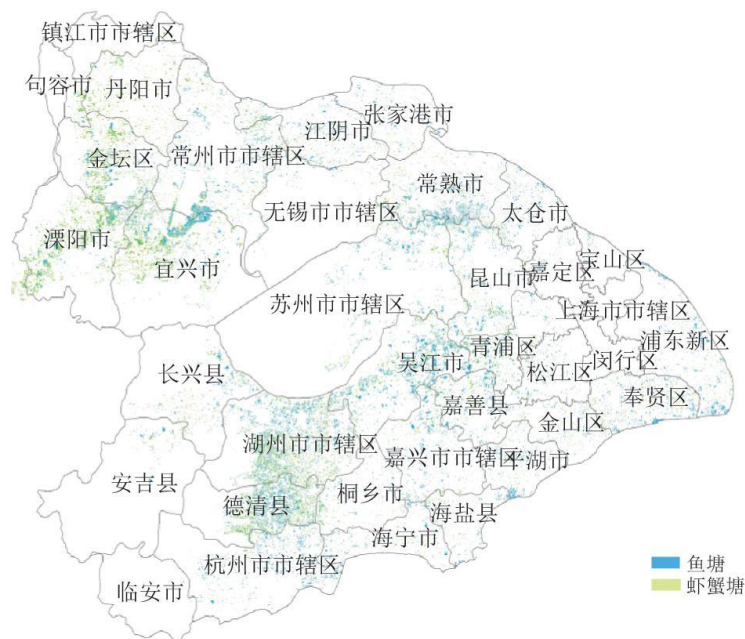


图 4 太湖流域养殖鱼塘与虾蟹塘空间分布

2.2 养殖池塘氮磷污染负荷

根据两类养殖池塘面积数据及其污染负荷系数, 计算出 2019 年太湖流域养殖池塘氮排放量为 11013.5t, 磷排放量为 1626.8t。太湖流域养殖池塘氮、磷排放量的空间分布特征大致相同(图 5), 位于太湖西北部的宜兴市、常州市市辖区、及溧阳市, 太湖南部的湖州市市辖区、吴江市、德清县及杭州市市辖区, 太湖东部的常熟市、苏州市市辖区、昆山市, 这 10 个行政区养殖池塘氮污染负荷较高, 均超过了 400t。上述氮污染负荷超过 400t 的 10 个行政区的磷污染负荷均较高(>50t), 另外金坛区、浦东新区、

嘉兴市市辖区及奉贤区的磷污染负荷也均超过了 50t。位于太湖流域北部的镇江市市辖区和句容市，太湖流域东部的宝山区、闵行区和上海市市辖区，太湖流域西南部的临安市养殖池塘氮磷污染负荷均较低，氮污染负荷小于 50t，磷污染负荷小于 10t，另外嘉定区的磷污染负荷也小于 10t。氮磷污染负荷最大的区域是湖州市市辖区，氮污染负荷为 1214.8t，磷污染负荷为 179.7t。太湖流域养殖池塘污染负荷最小的是上海市市辖区，氮污染负荷为 4.9t，磷污染负荷为 0.7t。在太湖流域内的地级市及直辖市中，养殖池塘氮磷污染负荷从大到小依次为苏州市、湖州市、常州市、上海市、嘉兴市和无锡市，其中最大的苏州市氮污染负荷 2823.7t，磷污染负荷 411t；最小的无锡市氮污染负荷 1181.7t，磷污染负荷 177.1t。

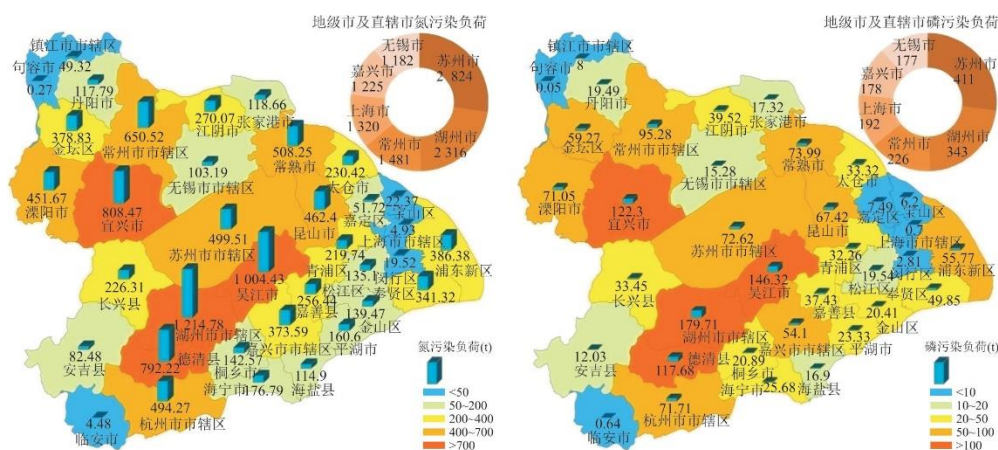


图 5 太湖流域养殖池塘污染负荷

3 讨论

(1) 鱼塘与虾蟹塘的区分：

本研究利用遥感影像 NDVI 指数区分了鱼塘与虾蟹塘，根据遥感影像解译结果，太湖流域中鱼塘总计 872.6km²，虾蟹塘总计 436km²。前人通过遥感影像获取养殖池塘空间信息并将养殖池塘分类，多通过遥感解译规则按照水域类型分为大水面、水库山塘、小型池塘等类型^[26, 27]，本研究尝试通过遥感手段将养殖池塘分为鱼塘和虾蟹塘，可解决对于县级及更加精细化的养殖池塘类型统计数据较难获取的问题。以往池塘污染负荷估算多通过计算相对应的养殖池塘污染排放系数平均值再结合养殖池塘面积数据计算，无法细化养殖池塘类型得到更准确的污染排放^[21]，结果具有不确定性。通过对鱼塘和虾蟹塘的区分，得到两种类型的养殖池塘空间信息，依据不同养殖品种的污染负荷系数，可以更加精确地计算出养殖池塘的污染负荷。本方法可以将养殖池塘类型进一步细化，获得类型更加丰富的养殖池塘的空间分布特征，具有一定的借鉴意义与广阔应用前景。但本研究提出的方法仍存在一定的局限性，体现在：1) 现实中存在少部分虾蟹池塘养殖不投放沉水植物，无法准确识别；2) 通过归一化水体指数提取水体排除了夏季被水稻和荷叶覆盖的稻田和藕塘，未将稻田和藕塘套养水产计算在内；鉴于上述不足，未来需要通过更精细的遥感影像获取不同类型养殖池塘的光谱特征，提升辨识精度，减少评估结果的不确定性。

(2) 养殖池塘规模空间分布：

通过 2019 年太湖流域遥感影像的解译，得出养殖池塘总面积为 1308.6km²。太湖流域养殖池塘空间分布总体呈现为环太湖平原河网区多，中心和边界少，养殖池塘多集中于太湖西北部的江苏省宜兴市、溧阳市、金坛区和常州市市辖区；太湖南部的浙江省湖州市市辖区、德清县、杭州市市辖区、嘉兴市市辖区、江苏省吴江市；太湖东部的江苏省常熟市、苏州市市辖区、昆山市、上海市的浦东新区和奉贤区。太湖流域的虾蟹养殖在太湖的西北部，长荡湖和滆湖周边的宜兴市、溧阳市、金坛区和常州市市辖区较为集中。因长荡湖周边地区青虾河蟹养殖历史悠久，溧阳市青虾养殖和金坛区河蟹养殖已经形成规模产业化和地方品牌化

优势, 并已建成多个标准示范产业园区。湖州市市辖区的养殖池塘面积在太湖流域最大, 因地势平坦, 河网密布, 养殖池塘较多。

(3) 养殖池塘氮磷污染负荷空间分布:

2019 年太湖流域养殖池塘氮排放量为 11013.5t, 磷排放量为 1626.8t, 养殖池塘污染负荷空间分布和养殖池塘规模分布较为一致, 湖州市市辖区、吴江市、宜兴市和德清县是太湖流域养殖池塘氮磷污染最为严重的地区, 氮污染负荷均超过 700t, 磷污染负荷均超过 100t。养殖密度过大, 投放饵料多是养殖池塘污染负荷高的主要原因, 湖州市市辖区作为太湖流域养殖池塘面积最大的地区, 水产养殖所造成的氮磷污染负荷也最大。地处太湖南部的平原河网密集区的湖州市市辖区、吴江市和德清县养殖池塘规模大, 养殖池塘类型又以鱼塘为主, 因鱼塘养殖产量相比虾蟹塘产量高, 饲料投入多, 所以鱼塘的氮磷污染负荷要远大于虾蟹塘, 氮污染负荷约为虾蟹塘的 5 倍, 磷污染负荷约为 4 倍, 这就造成太湖南部的氮磷污染负荷较大。相比于养殖池塘规模同样发达的长荡湖地区, 溧阳市和金坛区虾蟹养殖比例较高, 相比太湖南部氮磷污染负荷较小。

4 结论

本研究基于太湖流域的高分辨率遥感影像, 创新发展了基于归一化植被指数区分养殖池塘类型的方法, 精细化估算了太湖流域养殖池塘的氮磷污染负荷及其空间分布。研究结果表明: 2019 年, 太湖流域养殖池塘的总面积为 1308.6km², 其中鱼塘 872.6km²、虾蟹塘 436km², 养殖池塘氮排放量为 11013.5t, 磷排放量为 1626.8t, 太湖南部及西北部养殖池塘发达地区的氮磷污染负荷均较大, 与养殖池塘规模分布特征较为一致。这一研究实现了基于高分辨率遥感影像的养殖池塘类型区分, 随着未来更高时空分辨率与更丰富光谱信息的遥感影像出现, 提出的研究方法有望进一步精细化区分养殖池塘类型, 可为区域氮磷污染的来源精准解析与科学减排提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 韩杨. 1949 年以来中国海洋渔业资源治理与政策调整[J]. 中国农村经济, 2018(9):14-28.
- [2] WANG J, BEUSEN A H W, LIU X, et al. Aquaculture production is a large, spatially concentrated source of nutrients in Chinese freshwater and coastal seas[J]. Environ Sci Technol, 2020, 54(3):1464-1474.
- [3] 农业农村部渔业渔政管理局. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019:21, 51.
- [4] 高月香, 张毅敏, 王伟民, 等. 太湖流域江苏地区代表性水产养殖排污系数测算研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1330-1336.
- [5] 戴修赢. 苏州地区七种养殖池塘水质及其氮、磷收支研究[D]. 苏州大学, 2010.
- [6] GUO L, LI Z. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China[J]. Aquaculture, 2003, 226(1-4):201-212.
- [7] ISLAM M S. Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: Review and analysis towards model development[J]. Mar Pollut Bull, 2005, 50(1):48-61.
- [8] SCHNEIDER O, SERETI V, EDING E H, et al. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2005, 32(3-4):379-401.

-
- [9]QIN B, XU P, WU Q, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1):3-14.
- [10]水利部太湖流域管理局. 2018 太湖健康状况报告[R]. 2019.
- [11]HUANG J, ZHANG Y, ARHONDITSIS G B, et al. The magnitude and drivers of harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs: A national-scale characterization[J]. *Water Research*, 2020, 181:115902.
- [12]QIN B, PAERL H W, BROOKES J D, et al. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6):354-356.
- [13]TI C, XIA Y, PAN 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.
- [14]刘庄, 李维新, 张毅敏, 等. 太湖流域非点源污染负荷估算[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(S1):45-48.
- [15]马国霞, 於方, 曹东, 等. 中国农业面源污染物排放量计算及中长期预测[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2):489-497.
- [16]宋学宏, 郭培红, 孙丽萍, 等. 苏州市东山镇池塘养蟹面源污染现状及控制[J]. *水资源保护*, 2011, 27(1):63-66, 72.
- [17]张玉珍, 洪华生, 陈能汪, 等. 水产养殖氮磷污染负荷估算初探[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2003(2):223-227.
- [18]李嘉薇, 管旭, 王国强, 等. 基于遥感的饮用水源地农业面源污染负荷估算[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12):3382-3392.
- [19]高波, 颜晓元, 姜小三, 等. 太湖地区农业源污染核算研究进展[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(6):822-828.
- [20]王艳艳, 王静, 胡昌伟, 等. 太湖流域应对特大洪水防洪工程效益模拟[J/OL]. *水科学进展*: 1-11[2020-09-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200519.1140.012.html>.
- [21]彭凌云, 逄超普, 李恒鹏, 等. 太湖流域池塘养殖污染排放估算及其空间分布特征[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1):70-78.
- [22]MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7):1425-1432.
- [23]李丽芬, 徐云强, 苏保林, 等. 池塘养殖污染负荷核算方法研究及比较分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(9):2174-2183.
- [24]陈家长, 胡庚东, 瞿建宏, 等. 太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究[J]. *农村生态环境*, 2005(1):21-23.
- [25]戴捷, 李传岭, 邓楚洲, 等. 洪湖流域半封闭池塘河蟹养殖氮磷污染负荷研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(5):169-172.
- [26]刘尊雷, 张寒野, 袁兴伟, 等. 基于遥感影像的江西省水体资源和水产养殖结构空间异质性分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(10):1833-1846.

[27] 袁兴伟, 刘尊雷, 张辉, 等. 基于遥感数据的山西省水产养殖经济效益探索性空间分析[J]. 渔业信息与战略, 2018, 33(3):165-172.