

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.03.008

引用格式:黄顺生,许伟伟,何培良,等.江苏省淮安市典型湿地底泥营养盐分布特征及污染评价[J].华东地质,2023,44(3):323-332.(HUANG S S,XU W W,HE P L,et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of nutrient salts in typical wetland sediment in Huai'an, Jiangsu Province[J].East China Geology, 2023, 44(3):323-332.)

江苏省淮安市典型湿地底泥营养盐分布特征及污染评价

黄顺生^{1,2},许伟伟^{1,2},何培良³,周强^{1,2},李文博^{1,2},贺新星^{1,2}

(1.自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心,江苏 南京 210018;
2.江苏省地质调查研究院,江苏 南京 210018;3.河北省地质工程勘察院,河北 保定 071051)

摘要:江苏淮安具有丰富的湿地资源。文章基于区内典型湿地底泥调查结果,开展营养盐含量特征及污染评价研究。结果表明:湿地底泥总氮、总磷、有机质含量分别为0.26~6.51 g/kg、0.36~3.98 g/kg、0.52%~10.17%,具有较大变异性;总体来看,公园池塘、湖泊底泥的营养盐含量最高,沟渠、水产养殖场底泥中营养盐含量次之,河流水系沉积物中营养盐含量最低。湿地底泥有机碳、总氮、总磷含量之间均呈显著正相关,反映它们的来源、迁移转换过程具有一定的相似性。其中,湖泊底泥C/N平均值(8.6)较小,有机物主要来源于湖泊内水生藻类植物;公园池塘、河流、沟渠、水产养殖场底泥具有较大的C/N平均值(9.9~11.9),有机物来源主要受陆源物质影响。底泥中有机氮、有机指数和污染指数的评价结果显示,研究区底泥受到不同程度的污染,成因与区内畜禽养殖、农田施肥等农业活动密切相关。建议推进研究区畜禽养殖污染和粪污资源化利用,实施科学施肥,减少化肥使用量。

关键词:湿地底泥;营养盐;污染评价;江苏淮安

中图分类号:X82;X524

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2023)03-323-10

湿地作为一种独特的生态系统在维护全球生态平衡中发挥着极其重要的作用,它是氮、磷等营养盐地表循环的重要场所,具有一定的调节或改变环境功能。但湿地环境中氮、磷的循环作用也会很大程度影响着湿地生态系统的结构和功能,被认为是湿地生态系统主要制约因素,成为衡量湿地富营养化程度的重要指标^[1]。近些年来,强烈的人类活动(农业活动、工业生产、生活排污等)导致湿地碳、氮、磷输入增加且呈现出明显累积的态势,造成了全球范围的水体营养盐失衡^[2]。淮安市是江苏省乃至长江中下游湿地重要分布区,湿地资源非常丰富,除湖泊湿地外,还分布大量的河流、库塘、沟渠等湿地,它们受农业活动、畜禽养殖、生活排污等人

为活动影响更大,这些湿地沉积物中氮、磷、有机质的累积状况及富营养化风险目前尚不清楚。盛路遥等^[3]系统调查了洪泽湖湖滨带表层沉积物,发现局部地段存在轻度污染;李强等^[4]分析了白马湖表层沉积物的氮、磷含量状态,发现也存在一定的污染。2018—2021年实施的淮安城市地质调查项目系统调查了淮安市典型地区湖泊、河流、水产养殖场、公园池塘、沟渠等湿地沉积物中氮、磷与有机质含量,本文基于此次调查结果开展研究,旨在揭示研究区湿地污染现状及主要影响因子,以为流域水污染控制和水生态修复提供依据。

1 研究区概况

研究区位于江苏省中北部,地处淮河下游,坐落于古淮河与京杭大运河交点。行政辖区包括淮

* 收稿日期:2023-04-13 修订日期:2023-07-07 责任编辑:袁静

基金项目:江苏省地质调查专项资金“江淮生态经济区核心地带(淮安)地质调查(编号:苏财建[2018]96号)”和江苏省地质调查资金“淮安市富硒土地详查与开发利用示范(编号:苏财资环[2022]27号)”项目联合资助。

第一作者简介:黄顺生,1975年生,男,正高级工程师,硕士,主要从事生态地球化学调查与评价工作。Email:geohuangss@163.com。

安区、淮阴区、清江浦区、经济开发区、涟水县(限于陈师镇、梁岔镇、岔庙镇、朱码镇)。研究区位于北亚热带和暖温带过渡地带,光照充足、雨水充沛、区内河湖交错、水网纵横,主干河流有京杭大运河、淮沭新河、苏北灌溉总渠、淮河入江水道、淮河入海水道、废黄河、盐河、六塘河、淮河等 9 条,县级河流更是多达 40 余条,纵贯横穿研究区。区内还分布洪泽湖、白马湖等浅水型湖泊,发育的水网构成了典型的“平原水乡”。

基于第三次全国土壤普查结果,发现研究区湿地主要有 3 类 5 型(不含稻田/冬水田)(表 1),总面积为 59 178.99 hm^2 ,占全区面积的 17.80%,其中河流湿地、湖泊湿地面积分别为 8 562.71 hm^2 、6 016.83 hm^2 ,人工湿地包括库塘、水产养殖场、运河/输水河等,其中运河/输水河面积为 26 755.94 hm^2 ,占全区湿地总面积的近二分之一。面积最小的为水产养殖场,面积 3 853.26 hm^2 ,占全区湿地总面积的 6.51%。

表 1 研究区湿地面积统计表

Table 1 Statistics of wetland area in the study area

湿地类	湿地型	面积/ hm^2	比例/%
河流湿地	永久性河流	8 562.71	14.47
湖泊湿地	永久性淡水湖	6 016.83	10.17
人工湿地	库塘	13 990.25	23.64
	水产养殖场	3 853.26	6.51
	运河/输水河	26 755.94	45.21
总计		59 178.99	100

2 研究方法

2.1 样品采集方法

本次湿地底泥样品主要采集于湖泊、河流、公园池塘、水产养殖场、农田沟渠,样点布设时按照代表性、均匀性和合理性原则,避开人为污染的地段。利用自制的拖曳式筒状取样器,取表层 0~10 cm 底泥物质,去除杂物,装入塑料袋中。为保证样品的代表性,采样点附近 30 m 范围内 3 个分样均匀组合成 1 件样品。全区样品采集于 2018 年 10 月完成,共计采集 152 件底泥样品。

2.2 样品处理与测试

底泥样品置于阴凉处自然风干、剔除植物残

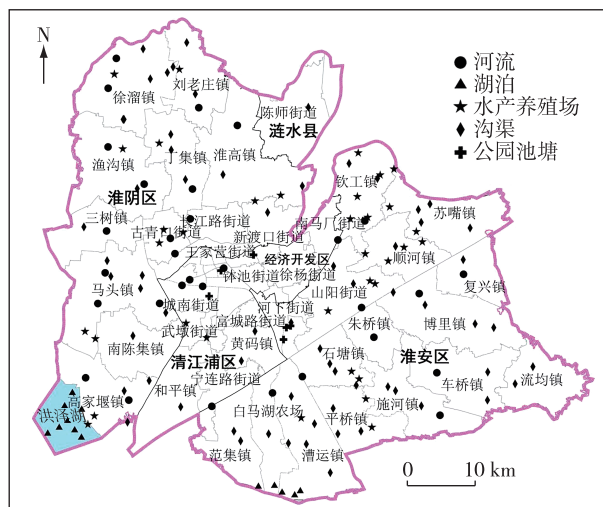


图 1 研究区湿地底泥采样点位图

Fig. 1 Sampling locations of wetland sediment in the study area

骸、贝壳及砾石等杂质,粉碎过 10 目孔径筛,按对角线四分法取 200 g 送至实验室分析,样品分析方法参照《DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》^[5]、《DD2005—03 生态地球化学评价样品分析技术要求》^[6]。样品研磨后过 60 目孔径筛,采用燃烧氧化-非分散红外法分析有机质含量;样品研磨后过 200 目孔径筛,采用容量法测定总氮,采用 X 射线荧光光谱法测定总磷。样品分析测试在国土资源部南京矿产资源监督检测中心完成。测试过程中采取严格的外部 and 内部质量监控,利用国家一级标准物质进行准确度和精密度监控,各项指标合格率 100%。实验室异常点抽取和内部检查的合格率 > 95%,密码样抽查检查合格率 100%。

2.3 数据处理与综合研究

2.3.1 评价方法与评价标准

本研究采用前人^[7-8]常用的有机指数、有机氮评价淮安湿地碳、氮的污染状况。有机指数法常常被用来评价沉积物的营养状况,而有机氮则是判断沉积物氮污染程度的重要指标(表 2),计算方法和评价标准如下:

$$\text{有机指数} = \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%) \quad (1)$$

式中:有机碳(%) = 有机质(%) ÷ 1.724;有机氮(%) = 总氮(%) × 95%(其中总氮需换算成百分比单位形式,即 1 g/kg = 0.1%)。

表 2 研究区湿地底泥有机指数、有机氮评价分级标准
Table 2 Evaluation grade of organic index and organic nitrogen in wetland sediments in the study area

类型等级	有机指数/%	分级	有机氮/%	分级
I	<0.05	清洁	<0.033	清洁
II	0.05~0.2	较清洁	0.033~0.066	较清洁
III	0.2~0.5	尚清洁	0.066~0.133	尚清洁
IV	≥0.5	有机污染	≥0.133	有机氮污染

本次采用污染指数法^[9]评价淮安湿地磷的污染状况。污染指数法常常用于评价各个污染因子的污染状况,计算方法和评价标准如下:

$$P = \frac{C_i}{C_B} \quad (2)$$

式中: P 为磷污染指数; C_i 为沉积物中总磷含量实测值; C_B 为研究区总磷背景值。根据 P 值分级如下: $P < 0.5$ (I-清洁); $0.5 \leq P < 1.0$ (II-轻度污染); $1.0 \leq P < 1.5$ (III-中度污染); $P \geq 1.5$ (IV-重度污染)。

2.3.2 湿地底泥背景值确定

湿地底泥背景值的确定是评价湿地环境污染程度和制定污染防治措施的基础,因此本次湿地底泥背景的合理确定显得尤为关键。一般来说,底泥环境背景值是指基本上未受到明显的人类活动影响下沉积物的化学组成或元素含量状态^[10]。确定底泥背景值的方法通常有参考全球页岩^[11]、借鉴区内土壤背景值^[12],以及估算底泥沉积柱深部元素含量平均值等^[13]。由于研究区为第四系冲积平原,参考全球页岩没有实际意义;受区域农业生产影响,难以获取未受人类活动影响的土壤,借鉴土壤背景值亦欠合理。因此,本次研究通过估算底泥沉积柱深部元素含量平均值作为其背景值,利用在研究区采集的 9 个底泥柱元素分析数据作图,根据 P 元素的垂直分布特征(图 2)可知,除个别底泥柱由上至下 P 含量有一定降低趋势,大部分底泥柱 P 元素含量均相对稳定。不同的底泥柱 P 含量存在一定差异,可能与冲积平原的物质来源的复杂性和多期性有关。本次选择含量稳定的 30~60 cm 深度段的 P 元素含量均值作为背景值,最终获得本次研究的湿地底泥背景值为 0.71 g/kg (0.71 ± 0.12 g/kg)。

2.3.3 数据处理与分析

数据处理及元素含量相关性分析采用 Excel 2007 与 SPSS 19.0 软件;采样点位与营养盐含量空间分布图编制则采用 ArcGis 10.2 软件。

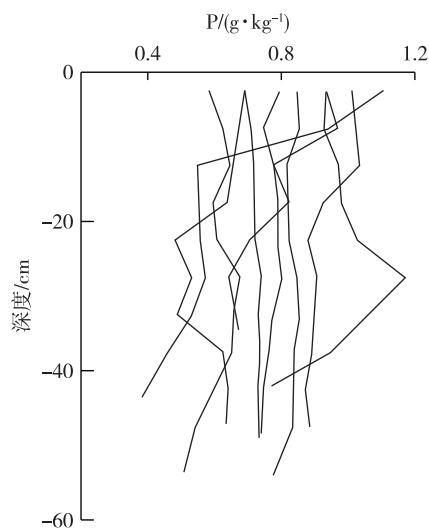


图 2 研究区底泥柱磷元素含量分布图

Fig. 2 The distribution of P contents in core sediments in the study area

3 结果与讨论

3.1 湿地底泥营养盐总体特征及空间分布

碳、氮、磷是湿地底泥中主要营养元素,对上覆水体的富营养化起着至关重要的作用。研究区底泥样品测试结果列于表 3,湿地底泥的总氮、总磷、有机质含量分别为 0.26~6.51 g/kg、0.36~3.98 g/kg、0.52%~10.17%,各类湿地总氮、总磷、有机质含量的最大值是最小值的几倍、十几倍甚至几十倍,可见各采样点营养元素含量的差异较大。不同湿地底泥营养元素的变异系数主要集中于 60%~100%,表明空间上各营养元素均存在中等程度变异。从不同营养元素含量变异程度来看,有机质变异程度相对较弱,氮、磷变异程度则相对较强,比如公园池塘底泥中氮、磷变异系数分别达到了 114.75%、98.80%,说明城市公园池塘底泥氮、磷营养盐受人为活动影响较大。然而公园池塘有机质具有最小的变异系数(55.50%)与最高的含量平均值(4.29%),表明有机质含量较高且空间分布均匀,这缘于公园池塘流动性较差,底泥有机质主要来源于内源的水生植物及岸边的观赏花木等枯落物。前人相关研究^[14-15]表明,公园池塘等水体沉积物中所含有机质主要受水生动植物残体沉积影响,在湿地生物作用下,这些有机体不断分解、矿化及与水体发生交换作用,最终沉积和埋藏于底泥中。

表 3 研究区不同湿地类型营养元素含量参数统计特征

Table 3 Parameters statistics of nutrient element content in different types of wetland in the study area

湿地类型(样品数/个)	统计参数	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	有机质/%
河流(31)	最小值	0.26	0.52	0.52
	最大值	2.35	1.26	8.29
	平均值	0.92	0.82	2.19
	变异系数%	75.90	95.45	77.19
湖泊(13)	最小值	0.79	0.57	0.98
	最大值	3.78	0.96	6.58
	平均值	2.15	0.71	3.40
	变异系数%	91.39	95.84	70.47
沟渠(65)	最小值	0.36	0.36	0.59
	最大值	6.51	2.99	13.86
	平均值	1.80	1.00	2.92
	变异系数%	80.79	88.86	65.52
水产养殖场(36)	最小值	0.38	0.54	0.53
	最大值	4.70	2.01	14.45
	平均值	1.24	0.97	3.29
	变异系数%	76.40	92.2	58.28
公园池塘(7)	最小值	0.48	0.49	1.17
	最大值	0.52	3.98	10.17
	平均值	3.03	1.72	4.29
	变异系数%	114.75	98.80	55.50
全省湖泊 ^[16]	平均值	764	481	1.02

由表 3 还可以看出,淮安各类湿地底泥总氮含量的分布规律为:公园池塘>湖泊>沟渠>水产养殖场>河流;总磷含量的分布规律为:公园池塘>沟渠>水产养殖场>河流>湖泊;有机质含量的分布规律为:公园池塘>湖泊>水产养殖场>沟渠>河流。总体来看,公园池塘、湖泊底泥具有最高的营养盐含量,沟渠、水产养殖场底泥具有中等营养盐含量,而河流底泥营养盐含量则相对较低。

江苏省尚未开展系统的湿地底泥调查工作,因此将本研究的湿地底泥营养盐含量与全省湖泊营养盐平均值相比^[16],不难看出,同为湖泊湿地底泥,本次调查的淮安各类型湿地底泥的营养盐含量明显偏高,总氮、总磷、有机质分别是全省湖泊均值的 2.8 倍、1.5 倍和 3.3 倍。

由研究区湿地底泥总氮含量分布图(图 3)可以看出,总氮的强低值区、低值区零星分布,高值区主要分布于河下街道的公园池塘,比如东湖、月湖、楚

秀园等。此外,淮沭河、废黄河、苏北灌溉总渠、京杭大运河等区域性河流底泥总氮含量普遍较低,反映这些河流水流量大、流速快,受沿岸的人为活动影响相对较小。而跨乡镇的县级河道受沿岸农业生产、居民生活等影响,相对具有较高的总氮含量。

由研究区湿地底泥总磷含量分布图(图 4)可以看出,总磷的强低值区、低值区主要分布于洪泽湖、白马湖,其次在全区零星分布。总磷的强高值区主要分布于河下街道的公园池塘,其次分布于山阳街道的水产养殖场。总磷在河流底泥中的分布规律总体与总氮的分布规律非常相似,也表现为区域性河流低、县级河道高的分布特征。

3.2 湿地底泥碳、氮、磷相关性分析

区内各湿地底泥有机碳含量与总氮含量($r=0.95, P<0.01$)、有机碳含量与总磷含量($r=0.62, P<0.01$)以及总氮含量与总磷含量($r=0.58, P<0.01$)均呈显著正相关。其中有机碳含量与总氮含

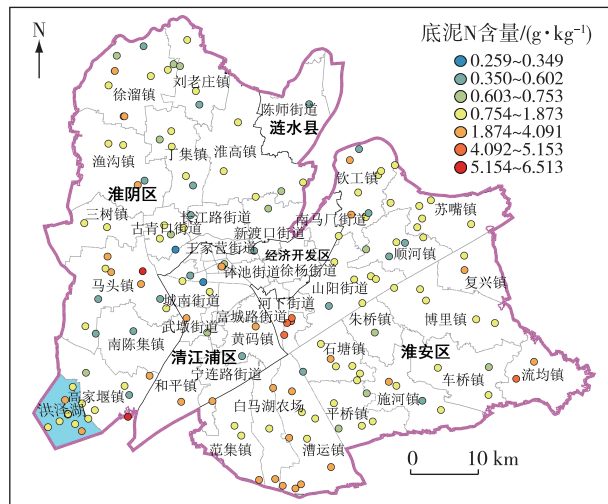


图3 研究区湿地底泥总氮含量分布图

Fig. 3 Spatial distribution of TN contents in wetland sediments in the study area

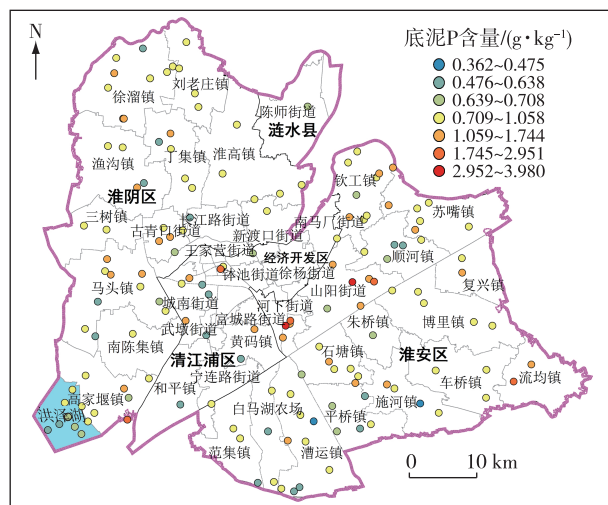


图4 研究区湿地底泥总磷含量分布图

Fig. 4 Spatial distribution of TP contents in wetland sediments in the study area

量的相关性最好,拟定的线性方程系数 R^2 高达 0.91(图5)。尽管有机碳含量与总磷含量相关性相对较弱,但两者拟定的线性方程系数 R^2 也达 0.39(图5)。盛路遥等^[3]研究洪泽湖湖滨带沉积物中营养盐分布发现,有机碳含量和总氮含量也呈极显著正相关性;王纬奇等^[17]的研究也指出不同湿地土壤有机碳含量与总氮含量呈显著正相关性。这些都与本研究结果具有一致性。营养盐的显著正相关性表明它们的形态、来源及其在水中的迁移转换过

程具有一定相似性^[18]。

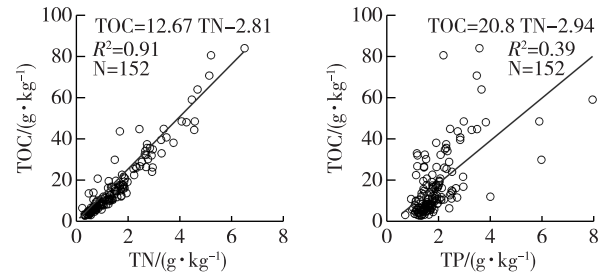


图5 研究区湿地底泥有机碳与总氮、总磷的协变图

Fig. 5 Covariant relation between organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in wetland sediment in the study area

3.3 湿地底泥污染评价

从整个研究区来看(表4),湿地底泥样点有机氮、有机指数和污染指数的评价结果较为一致,43.4%样点达到了有机氮污染,21.7%样点达到了有机污染,中度—重度污染样点则达到了77.0%。表明全区湿地底泥受到不同程度的污染。

有机氮评价结果显示,76.9%的湖泊样点和67.8%的公园池塘样点属于IV,而仅有19.4%的河流样点达到IV,说明污染等级由高值低依次为湖泊、公园池塘、沟渠、水产养殖场、河流,这与杨洋等^[19]对太湖流域的研究结果基本一致。有机指数评价方法综合了有机碳、有机氮,其评价结果显示,湖泊、公园池塘采样点具有较高的污染比例,其次为沟渠、水产养殖场,河流污染点位占比最低,这与有机氮评价等级顺序大致相同。基于总磷开展的污染指数评价结果显示,除湖泊(38.5%)外,本区其他类型湿地底泥(74.2%~100.0%)样点污染等级达到了III—IV。

3.4 底泥物质的来源判定

湿地底泥 C/N 比值是辨识环境的一个重要指标,也是判定底泥中有机污染来源的重要依据。陆生高等植物为维管束植物,通常富含纤维素(含大量的C)而不含蛋白质(含大量的N),水生藻类植物不含纤维素却富含蛋白质。因此,陆生植物的 C/N 比值一般 >20 ,藻类的 C/N 值一般为4~10, C/N 值愈大,说明陆源输入的有机成分愈大^[20]。相关研究^[21]表明,湖泊底泥 C/N 值为6~14。本次研究结果显示,洪泽湖、白马湖底泥 C/N 值为6.8~10.8,平均值为8.6。其中,公园池塘和河流底泥 C/N 值

最大,平均值分别为 11.9 和 11.3,前者主要与沿岸分布大量的高等陆生植物的枯落物有关,后者往往有更多的陆源物质输入。相比于湖泊,沟渠和水产

养殖底泥也具有相对较高的 C/N 值(平均值分别为 10.4 和 9.9),成因上与受人为扰动作用较大而产生大量陆源物质输入有关。

表 4 研究区湿地底泥污染评价结果
Table 4 Pollution evaluation of wetland sediment in the study area

评价方法	污染等级	样点数(百分比)					
		湖泊	公园池塘	水产养殖场	沟渠	河流	全区
有机氮	I	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	2(6.5)	2(1.3)
	II	0(0)	1(16.6)	10(27.8)	5(7.6)	13(41.9)	29(19.1)
	III	3(23.1)	1(16.6)	14(38.9)	27(40.9)	10(32.2)	55(36.2)
	IV	10(76.9)	4(67.8)	12(33.3)	34(51.5)	6(19.4)	66(43.4)
有机指数	I	1(7.7)	1(16.6)	14(38.9)	9(13.6)	15(48.4)	40(26.3)
	II	3(23.1)	1(16.6)	11(30.6)	23(34.8)	11(35.4)	49(32.2)
	III	4(30.8)	0(0)	7(19.4)	16(24.2)	3(9.7)	30(19.3)
	IV	5(38.4)	4(67.8)	4(11.1)	18(27.2)	2(6.5)	33(21.7)
污染指数	I	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
	II	8(61.5)	0(0)	8(22.2)	11(16.7)	8(25.8)	35(23.0)
	III	5(38.5)	0(0)	17(47.2)	35(53.0)	19(61.3)	76(50.0)
	IV	0(0)	6(100)	11(30.6)	20(30.3)	4(12.9)	41(27.0)

3.5 畜禽养殖、农田施肥等农业活动的影响

畜禽养殖业是农业和农村经济的重要组成部分,但其引起的粪便污染问题已引起人们的普遍关注^[22-23]。畜禽粪便、尿液富含大量的氮和磷的化合物,不正确的处置方式通常会造成相当一部分氮、磷进入水体,导致水环境污染。一般来说,畜禽粪便不会远距离运输,就近施用于周围的农用地,常常因局部施用的畜禽粪便量超出农田承载容量导致土壤的污染。第一次全国污染源调查资料显示,农业生产(含农业与畜禽养殖业)的氮排放量占各种生产氮排放总量的 1/2 以上。淮安是江苏省农业大市,改革开放以来,人们消费观念的转变和膳食结构的调整极大地调动了农民养殖的积极性,使得淮安市的畜禽养殖业高速稳步发展。淮安区、淮阴区和涟水县曾荣获 2014 年度“全国生猪调出大县”称号。经多年发展,淮安市已成为江苏省重要的畜禽生产区和外调基地。据淮安 2018 年统计年鉴,家禽出栏数由 1990 年的 2 565 万只增加到了 2018 年的 6 665 万只,猪、羊、兔的出栏数也分别达到了 180.06 万头、20.11 万只、24.42 万只。如此庞大的畜禽养殖量对土壤、水环境产生了巨大的压力。根

据目前国内外的常用方法^[24],选择可比性较强又符合实际的畜禽粪便猪粪当量负荷来统计研究区的畜禽粪便负荷量。结果表明,研究区农用地畜禽粪便氮负荷量平均值高达 3 039 kg/hm²^[25],该值是欧盟限量标准(170 kg/hm²)^[26]的近 18 倍,表明研究区农用地畜禽粪便载荷量非常大。近些年来,为贯彻《畜禽规模养殖污染防治条例》,淮安市在促进畜禽养殖业向集约化、规模化方向迅速发展等方面作出很大的成效,但农户小规模散养、分布不均衡,畜禽粪便随意排放现象依然存在。在野外调查过程中,仍然看到不少农田旁沟渠简单地围栏养殖鸭、鹅等现象,而且下游水体中氨氮含量普遍偏高^[25],进一步说明了畜禽粪便对水环境的影响。在 2022 年 4 月出台的《淮安市畜禽养殖污染治理和粪污资源化利用专项行动实施方案》背景下,区域亟需采取切实有效的措施处理畜禽养殖污染物,劝退已严重影响周边环境的非规模养殖场(户)。强化种植业、养殖业经营主体对接,建立粪污消纳长期合作机制,支持养殖经营主体在田间地头配套建设粪污管网,解决粪污还田“最后一公里”问题。加快畜禽粪污集中处理中心建设,以有效控制和管控区域的

畜禽养殖对周边湿地环境的污染。

长期以来,通过大量施用化肥获得高产的现象在中国粮食生产中相当普遍。淮安市是江苏省粮食主产区与全国商品粮生产基地,自改革开放以来,粮食稳定增产在一定程度上得益于化肥的施用。据淮安市统计年鉴资料可知,淮安市农用化肥施用量(折 t)从 1990 年的 16.11 万 t 增长到 2018 年的 34.43 万 t,2018 年每公顷耕地化肥施用量(总化肥施用量/总耕地面积)也达到了 697 kg,是国际公认的化肥施用安全上限(225 kg/hm²)的 3.1 倍。刘钦普^[27]通过分析江苏省环境安全的化肥施用量,建议江苏省平均化肥施用量不宜超过 600~650 kg/hm²。显然,淮安地区化肥施用量也是明显超过江苏省建议值,反映研究区化肥施用量处于高位。相关研究^[28]表明,当季作物施肥中氮仅有 35% 被吸收,通过地表径流进入地表水体的约有 5%,绝大部分还残留于农田土壤。本研究区域年降水量集中在 906~1 007 mm,且年内的降水量分布也极不均匀,通常 6—8 月的降水量占全年降水量的 68% 左右,集中的强降雨会使农田排水量大,致使面源污染严重,面源污染物越来越成为导致江河湖库富营养化的主要原因之一。本次对比了不同湿地水质分析结果(表 5),农田沟渠水体的总氮、氨氮以及总磷含量均居各湿地类型首位。农田沟渠作为农田与河流的过渡系统,不仅具有排灌水的作用,而且能够通过物理、化学和生物作用拦截泥沙、滞留和转化氮、磷等营养物质,因此富含氮磷的农田土壤颗粒随自然排水或雨水冲刷进入沟渠,从而致使沟渠水体及底泥都具有较高的营养盐含量且受到了污染。该结果与夏品华等^[29]研究贵州草海湿地农田渠系水质调查及影响因素取得的认识一致。

表 5 研究区不同湿地水质营养盐平均含量对比

Table 5 Comparison of average nutrient content in different water quality in the study wetland

湿地类型	总氮/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)
河流	1.58	0.49	0.38
湖泊	0.77	0.089	0.06
沟渠	2.97	0.73	0.50
水产养殖场	1.96	0.66	0.48
公园池塘	1.35	0.31	0.21

4 结论

(1) 淮安市典型湿地底泥的总氮、总磷、有机质

含量分别为 0.26~6.51 g/kg、0.36~3.98 g/kg、0.52%~10.17%。总体上来看,公园池塘、湖泊底泥具有最高的营养盐含量;沟渠、水产养殖场底泥具有中等营养盐含量,而河流底泥营养盐含量则相对较低。与全省湖泊营养盐平均值相比,研究区各类型湿地底泥的营养盐含量明显偏高。

(2) 湿地底泥有机碳、总氮、总磷之间均呈显著正相关性,反映它们的来源、迁移转换过程具有一定的相似性。湖泊底泥物质主要来源于湖泊内水生藻类植物,同时也受陆源物质输入影响;而公园池塘、河流、沟渠、水产养殖场底泥则主要受陆源物质影响。

(3) 基于有机氮、有机指数和污染指数的评价比较一致,评价结果显示:研究区湿地底泥 43.4% 样点达到了有机氮污染;21.7% 样点达到了有机污染;77.0% 样点达到了中度—重度污染,表明全区湿地底泥受到不同程度的污染,与区内畜禽养殖、农田施肥等农业活动有密切成因关系。

参考文献

- [1] MITSH W J, GOSSELIN T G. Wetlands[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 2000: 89-125.
- [2] 龚小杰,王晓锋,刘婷婷,等.流域场镇发展下三峡水库典型入库河流水体碳、氮、磷时空特征及富营养化评价[J].湖泊科学,2020,32(1):111-123.
GONG X J, WANG X F, LIU T T, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in a typical river of Three Gorges reservoir under the development of field towns[J].Journal of Lake Sciences,2020,32(1): 111-123.
- [3] 盛路遥,魏佳豪,兰林,等.洪泽湖湖滨带表层沉积物氮、磷、有机质分布及污染评价[J].环境监控与预警,2022,14(3):13-18.
SHENG L Y, WEI J H, LAN L, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments in littoral zone of lake Hongze[J].Environmental Monitoring and Forewarning,2022,14(3):13-18.
- [4] 李强,韩成银,戴小琳,等.白马湖西北部湖区表层沉积物氮、磷形态分布特征及污染评价[J].江苏水利,2019(12):11-17,22.

- LI Q, HAN C Y, DAI X L, et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of nitrogen and phosphorus forms in surface sediments in the northwest lake area of Baima lake[J]. Jiangsu Water Resources, 2019(12):11-17, 22.
- [5] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)[S].2014. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey(1:250 000) [S].2014.
- [6] 中国地质调查局. DD2005—03 生态地球化学评价样品分析技术要求[S].2005. China Geological Survey. DD2005—03 Technical requirements for analysis of ecological geochemical evaluation samples[S].2005.
- [7] 邱祖凯,胡小贞,姚程,等.山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J].环境科学,2016,37(4):1389-1396. QIU Z K, HU X Z, YAO C, et al. Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei reservoir in Fujian, China [J]. Environmental Science, 2016, 37 (4):1389-1396.
- [8] 吕豪朋,申丽娜.天津于桥水库流域河流表层沉积物中碳、氮、磷分布及污染评价[J].安徽农业科学,2017,45(27):98-102. LÜ H P, SHEN L N. Distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorous of river surface and pollution status evaluation of sediments in Yuqiao reservoir basin, Tianjin[J].Journal of Anhui Agricultural Sciences,2017,45(27):98-102.
- [9] 张为,胡园,陶晶祥,等.洋澜湖沉积物中磷的分布及污染评价[J].长江科学学院院长报,2021,38(9):35-39. ZHANG W, HU Y, TAO J X, et al. Distribution and pollution assessment of phosphorus in sediment of Yanglan lake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2021,38(9):35-39.
- [10] 朱鑫,汪实,陈恩.雷州半岛土壤地球化学基准值研究[J].华东地质,2021,42(4):429-437. ZHU X, WANG S, CHEN E, et al. Study on soil geochemical reference value in Leizhou Peninsula[J]. East China Geology,2021,42(4):429-437.
- [11] HUANG S S, TU J, JIN Y, et al. Contamination assessment and source identification of heavy metals in river sediments in Nantong, Eastern China[J]. International Journal of Environmental Research, 2018, 12 (3):373-389.
- [12] 张婧,王淑秋,谢琰,等.辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J].环境科学,2008,29(9):2413-2418. ZHANG J, WANG S Q, XIE Y, et al. Distribution and pollution character of heavy metals in the surface sediments of Liao River[J]. Environmental Science, 2008,29(9):2413-2418.
- [13] 邴海健,吴艳宏,刘恩峰,等.长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价[J].湖泊科学,2010,22(5):675-683. BING H J, WU Y H, LIU E F, et al. The accumulation and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediment of different lakes within the middle and lower reaches of Yangtze River[J].Journal of Lake Sciences,2010,22(5):675-683.
- [14] 李文朝.东太湖沉积物中氮的积累和水生植物沉积[J].中国环境科学,1997,17(5):418-421. LI W C. Nitrogen accumulation in the sediment of East Taihu Lake and biological sedimentation of aquatic plants[J].China Environmental Science,1997,17(5):418-421.
- [15] 王书锦,刘云根,张超,等.洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J].湖泊科学,2017,29(1):69-77. WANG S J, LIU Y G, ZHANG C, et al. Distribution and pollution risk assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in inlet rivers of Erhai Basin[J]. Journal of Lake Sciences,2017,29(1):69-77.
- [16] 江苏省地质调查研究院.江苏省 1:250 000 多目标区域地球化学调查报告[R].南京:江苏省地质调查研究院,2007. Geological Survey of Jiangsu Province. 1:250 000 multi-target regional geochemical survey report in Jiangsu Province[R].Nanjing:Geological Survey of Jiangsu Province,2007.
- [17] 王伟奇,仝川,曾从盛.不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征[J].中国环境科学,2010,30(10):1369-1374. WANG W Q, TONG C, ZENG C S. Stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and anaerobic carbon decomposition of wetland soil of different texture[J].China Environmental Science,2010,

- 30(10):1369-1374.
- [18] 苗慧,沈铮,蒋豫,等.巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J].生态环境学报,2017,26(12):2120-2125.
- MIAO H, SHEN Z, JIANG Y, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu lake[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(12): 2120-2125.
- [19] 杨洋,刘其根,胡忠军,等.太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J].环境科学学报,2014,34(12):3057-3064.
- YANG Y, LIU Q G, HU Z J, et al. Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3057-3064.
- [20] MEYES P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. Chemical Geology, 1994, 114(3): 289-302.
- [21] TALBOT M. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates [J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1990, 80(4): 261-279.
- [22] CAMBRA-LÓPEZ M, AMINK A J A, ZHAO Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of all air pollution problem[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(1): 1-17.
- [23] 杨飞,杨世琦,诸云强,等.中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J].农业工程学报,2013,29(5):1-11.
- YANG F, YANG S Q, ZHU Y Q, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 1-11.
- [24] 沈根祥,汪雅谷.上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J].上海农业学报,1994(A1):6-11.
- SHEN G X, WANG Y G. Loading amounts of animal feces and their alarming values and classification grades in Shanghai suburbs[J]. Acta Agricul Turae Shanghai, 1994(A1): 6-11.
- [25] 江苏省地质调查研究院.淮安城市地质调查土地资源调查与评价专题报告[R].南京:江苏省地质调查研究院,2021.
- Geological Survey of Jiangsu Province. Special report on land resources investigation and evaluation of Huai'an urban geological survey [R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province, 2021.
- [26] 阎波杰,赵春江,潘瑜春,等.大兴区农用地畜禽粪便氮负荷估算及污染风险评价[J].环境科学,2010,31(2):437-443.
- YAN B J, ZHAO C J, PAN Y C, et al. Estimation of livestock manure nitrogen load and pollution risk evaluation of farmland in Daxing district [J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 437-443.
- [27] 刘钦普.江苏省化肥使用的时空变化及环境安全使用量探讨[J].江苏农业科学,2012,40(10):7-9.
- LIU Q P. Discussion on the spatiotemporal changes and environmental safety usage of fertilizer in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(10): 7-9.
- [28] 朱兆良, DAVID NORSE, 孙波.中国农业面源污染控制对策[M].北京:中国环境科学出版社,2006.
- ZHU Z L, DAVID N, SUN B. Countermeasures for controlling agricultural non-point source pollution in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [29] 夏品华,薛飞,孔祥亮,等.贵州草海湿地农田渠系水质空间分异特征及影响分析[J].环境化学,2012,31(8):1201-1207.
- XIA P H, XUE F, KONG X L, et al. Spatial characteristics and impact of water quality in agricultural ditch systems of Caohai wetland in the Guizhou plateau, China[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(8): 1201-1207.

Distribution characteristics and pollution evaluation of nutrient salts in typical wetland sediment in Huai'an, Jiangsu Province

HUANG Shunsheng^{1,2}, XU Weiwei^{1,2}, HE Peiliang³, ZHOU Qiang^{1,2}, LI Wenbo^{1,2}, HE Xinxing^{1,2}

(1. *Technology Innovation Center for Ecological Monitoring & Restoration Project on Land (Arable)*,

Ministry of Natural Resources, Nanjing 210018 Jiangsu, China;

2. *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018 Jiangsu, China;*

3 *Hebei Geological Engineering Exploration Institute, Baoding 071051 Hebei, China*)

Abstract: There is abundant wetland resource in Huai'an, Jiangsu Province. The distribution characteristics and pollution evaluation of nutrient salts in typical wetland sediment in the study area have been analyzed, and the results show that the concentration of total nitrogen, total phosphorus, and organic matter has wide range between 0.26~6.51 g/kg, 0.36~3.98 g/kg, 0.52%~10.17% respectively, indicating great spatial variability of the nutrient salts. Overall, park ponds and lakes have the highest contents of nutrient salts, followed by ditches and aquaculture farms, and rivers have the lowest contents of nutrient salts. There are significant positive correlations among the contents of organic matter, total nitrogen, and total phosphorus in wetland sediment, which implies a certain similarity in their sources, migration and transformation processes. The lake sediments have relatively lower ratios of C/N (8.6) and their organic matters mainly sourced from aquatic algae and plants. However, sediments in park ponds, rivers, ditches and aquaculture farms have much higher mean ratios of C/N (9.9~11.9) and their organic matters are mainly affected by terrestrial materials in origin. The evaluation results of organic nitrogen, organic index, and pollution index on nutrient salts in sediments are relatively consistent, which implies that the wetland sediment in the study area have been polluted to some extent, closely associated with the local agricultural activities such as livestock and poultry breeding and farmland fertilization. It is suggested to promote resource utilization by transforming the waste of livestock and poultry breeding into fertilizers, so as to implement scientific fertilization and reduce the usage of chemical fertilizers in the study area.

Key words: wetland sediment; nutrient salts; pollution evaluation; Huai'an, Jiangsu Province