

## 洪泽湖湖西湿地根区氮磷与水体富营养化特征探究

沈汇超<sup>1,2</sup>, 周思聪<sup>1,2\*</sup>, 赵宇<sup>1,2</sup>, 何卿<sup>1</sup>

(1. 江苏省环境工程重点实验室, 江苏省环境科学研究院, 江苏南京 210036; 2. 江苏省环科院环境科技有限责任公司, 江苏南京 210036)

**摘要** 为了解洪泽湖湖西湿地枯水期环境状况, 选取 10 个监测点, 于 2019 年 2 月、3 月和 4 月分别进行采样, 利用数理统计和综合比较的方法对水生植物根区底泥氮、磷含量和水体富营养化指数进行空间分布特征研究, 对底泥和上覆水中氮磷含量进行相关性分析研究。结果表明, 根区底泥的 N、P 含量处于中等水平, 且具有西低东高, 北高南低的空间分布特征。整个湖区富营养化水平为中营养。洪泽湖湖西湿地的污染主要来源于外源负荷。

**关键词** 根区; 富营养化; 空间分布特征; 洪泽湖

中图分类号 X52 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)24-0075-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.24.022



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### A Probe into the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Root-zone and Eutrophication Level of Wetland in the Western Part of Hongze Lake

SHEN Hui-chao<sup>1,2</sup>, ZHOU Si-cong<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu<sup>1,2</sup> et al (1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing, Jiangsu 210036; 2. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210036)

**Abstract** To investigate the environmental condition of wetland in the western part of Hongze Lake during the dry period, samples from ten sites were collected and detected monthly from February to April in 2019. The spatial characteristics of nitrogen and phosphorus contents in plant root-zone and water eutrophication level were analyzed. The correlation of nitrogen and phosphorus contents in plant root-zone and in overlying water was explored. The results showed that the nitrogen and phosphorus contents were at a medium level, which were low in the west and south, and high in the east and north. The eutrophication has already reached to the middle class, it might mainly comes from exogenous loadings.

**Key words** Plant root-zone; Eutrophication; Spatial distribution characteristics; Hongze Lake

我国幅员辽阔, 湖泊数量众多, 类型全、分布广, 面积在 1 km<sup>2</sup> 以上的天然湖泊就有 2 800 多个, 总面积约 9 万 km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>。近年来, 随着区域气候环境变化和人类活动干扰加剧, 众多湖泊生态系统逐渐退化, 水体富营养化的问题越来越突出<sup>[2]</sup>。

洪泽湖位于江苏省西北部, 地跨淮安、宿迁 2 个地级市, 水域面积 1 597 km<sup>2</sup>, 是我国第四大淡水湖, 主要入湖河流有淮河、怀洪新河、濉河、新汴河等, 出湖河流有入江水道、苏北灌溉总渠、入海水道等, 整个流域面积约 1.4 万 km<sup>2</sup><sup>[3-4]</sup>。洪泽湖湿地植被资源丰富, 据 2013 年科考调查结果, 有 3 个湿地植被型、8 个植被亚形、50 个群系、76 个群丛, 共记录维管植物 79 科 234 属 336 种。但近几十年来, 洪泽湖接纳了大量农业、生活、工业污水, 底泥中已经蓄积了大量的有机物、氮、磷等污染物。作为湖泊养分循环的蓄积库, 研究表明一定条件下, 底泥中的氮磷是限制湖泊生产率关键营养物, 是湖泊富营养化的主导因子<sup>[5-8]</sup>。

为深入了解洪泽湖的水质状况, 选取宿迁与安徽宿州交界处洪泽湖湖西湿地为研究对象, 对 2019 年枯水期根区底泥中的氮磷及富营养化状态进行分析, 探索水生植物根区底泥中的氮磷空间分布特征及其与水体富营养化潜在关系。

## 1 研究方法

**1.1 样点布设** 研究区域为洪泽湖湖西湿地, 研究区域面积约为 53.58 km<sup>2</sup>。调查选取 10 个采样点, 采样时间为 2019 年枯水期(2—4 月), 采样频率为每月一次。采样点点位见图 1。

**1.2 水样的采集与保存** 水样的采集和保存均依据《生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存》(GB/T 5750.2—2006)。利用特制的采泥器钻取连续完整的湿地底泥样品。水样和底泥样品 4℃ 冷藏保存, 运送至实验室进行分析。

**1.3 试验方法** 底泥样品的测定项目包括全氮和总磷, 分别按照《土壤质量 全氮的测定 凯氏法》(HJ 717—2014) 和《土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法》(HJ 632—2011) 进行检测; 水质样品的测试指标有总氮, 总磷、透明度、叶绿素 a, 按照《地面水环境质量标准》(GB 3838—2002) 进行检测。

**1.4 富营养化指数** 水体的富营养化现象主要由氮、磷等营养物质含量超过一定的限值<sup>[9]</sup>, 引起藻类异常增殖所致, 叶绿素 a 是反映藻类数量多少的综合指标<sup>[10]</sup>, 常常作为评价水体富营养化状况的主导因子<sup>[11-13]</sup>, 但由于湖泊的富营养化过程异常复杂, 叶绿素 a 的变化又常常与 TP、TN、高锰酸盐指数等污染指标存在着密切关联<sup>[14]</sup>。因此该研究参照综合营养状态指数法, 选择 Chl a、TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub> 5 个参数评价洪泽湖湖西区水体的营养状态<sup>[15-16]</sup>。

$$TLI(\Sigma) = \sum W_j \times TLI(j) \quad (1)$$

式中, TLI(Σ) 表示综合营养状态指数, 其分级标准见表 1; W<sub>j</sub> 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; TLI(j) 代表第 j 种参数的营养状态指数。

**基金项目** 江苏省环境工程重点实验室开放课题(ZX2017008); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208007)。

**作者简介** 沈汇超(1992—), 男, 江苏启东人, 硕士, 工程师, 从事水污染治理与生态恢复研究。\* 通信作者, 工程师, 硕士, 从事水环境治理与富营养化研究。

**收稿日期** 2020-04-28

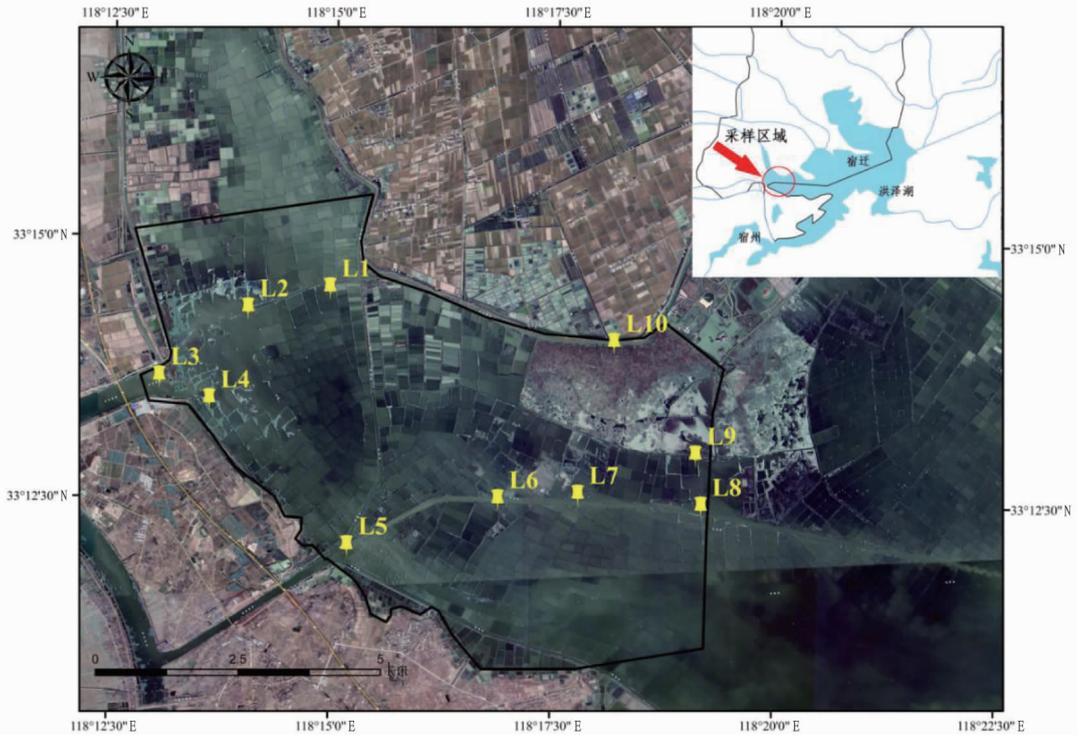


图1 监测点布设

Fig.1 Sampling sites in the western part of Hongze Lake

表1 营养状态分级

Table 1 Nutritional status scale

评分值 Score value	营养状态 Nutritional status	定性评价 Qualitative evaluation
TLI(Σ)<30	贫营养	优
30≤TLI(Σ)≤50	中营养	良好
50<TLI(Σ)≤60	轻度营养化	轻度污染
60<TLI(Σ)≤70	中度营养化	中度污染
TLI(Σ)>70	重度营养化	重度污染

(1)评价因子选择 Chl a、TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub> 5 个参数进行评价,营养状态指数 TLI 计算公式

$$T(\text{Chl a}) = 10[2.5 + 1.086 \ln p(\text{Chl a})] \quad (2)$$

$$T(\text{TP}) = 10[9.436 + 1.624 \ln p(\text{TP})] \quad (3)$$

$$T(\text{TN}) = 10[5.453 + 1.694 \ln p(\text{TN})] \quad (4)$$

$$T(\text{SD}) = 10[5.118 - 1.94 \ln p(\text{SD})] \quad (5)$$

$$T(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10[0.109 + 2.661 \ln p(\text{COD}_{\text{Mn}})] \quad (6)$$

(2)相关权重计算公式:

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2 \quad (7)$$

式中, $r_{ij}$ 为第  $j$  种参数与基准参数 Chl a 的相关系数; $m$  为评价因子个数,具体见表 2。

表2 中国湖泊(水库)的 Chl a 与其他参数之间的相关关系

Table 2 The relationship of Chl a with other parameters of Chinese lakes( reservoirs)

变量 Variable	Chl a	TP	TN	SD	COD <sub>Mn</sub>
$r_{ij}$	1	0.840 0	0.820 0	-0.830 0	0.830 0
$r_{ij}^2$	1	0.705 6	0.672 4	0.688 9	0.688 9

## 2 结果与分析

洪泽湖湖西区枯水期水质、底泥监测结果见表 3,底泥中氮磷含量及富营养化指数平均值见表 4。

### 2.1 洪泽湖湖西湿地枯水期底泥氮磷及富营养化比较分析

**2.1.1 枯水期根区底泥全氮含量比较及空间分布特征分析。**由表 3 可知,3 次采样各点位全氮数值波动不大,但各点位均值均超过 1 g/kg,说明整个区域根区底泥的氮含量整体较高。利用 ArcGIS 软件对区域全氮含量进行空间插值分析,如图 2 所示,结果显示 3 次采样和枯水期平均值均呈现类似的变化趋势,空间分布呈现高低值交替,西北向东部及中部增高的趋势。采样点 L6、L10 片区为高值区域,采样点 L4、L3 片区为低值区域,其中 L6 点全氮含量最高,为 1.59 g/kg,其中 L3 点全氮含量最低,为 0.88 g/kg。原因可能是入湖河流位于湖西湿地的西岸,大量营养物质随着入湖河流冲刷到洪泽湖湿地中东部<sup>[17]</sup>。

**2.1.2 枯水期根区底泥总磷含量比较及空间分布特征分析。**枯水期湖西湿地的总磷含量范围在 0.57~0.98 g/kg,随着时间推移,总磷值出现大幅度升高趋势,4 月各点位根区底泥总磷均值较 2 月增加 52.3%。其主要原因可能与上覆水中的总磷含量陡升有关,4 月各点位上覆水总磷均值含量较 2 月升高了 242%。采样点 L10 底泥磷含量最高,为 0.98 g/kg,可能原因是湖区中东部分布着一片芦苇荡,冬季植物腐败释放的大量营养物质为该区域提供了丰富的营养源<sup>[18-19]</sup>,导致根区底泥总磷含量呈现区域波状分布和非均一化特征。受沉积环境、根区底泥的氧化还原环境及水动力条件变化等多种因素共同影响,根区底泥磷含量沿水流方向总体呈现从西到东

增大的趋势(图 3),表明了沉积环境和水动力条件的变化对

磷在底泥中累积有一定影响<sup>[20]</sup>。

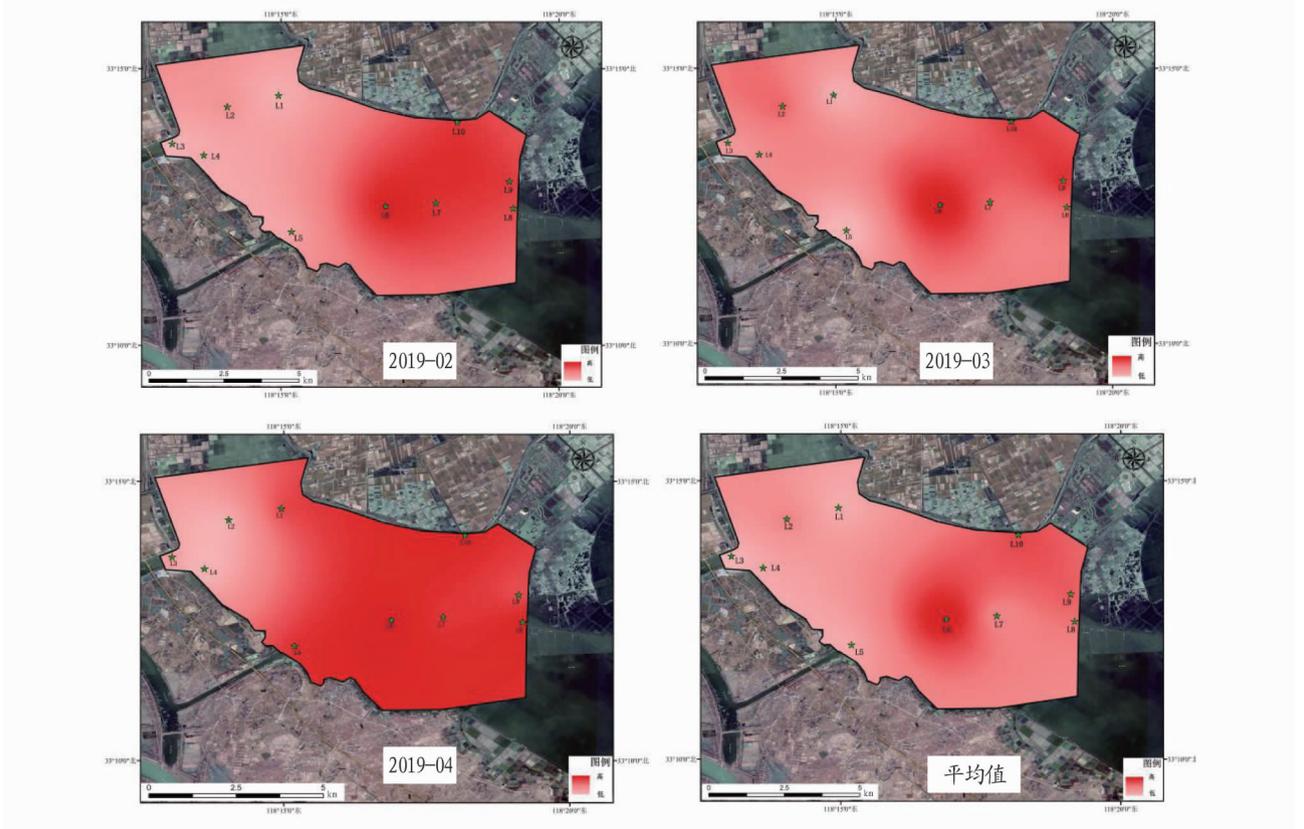


图 2 洪泽湖湖西湿地枯水期底泥全氮空间分布

Fig.2 The spatial distribution characteristics of nitrogen of root-zone during the dry period of wetland in the western part of Hongze Lake

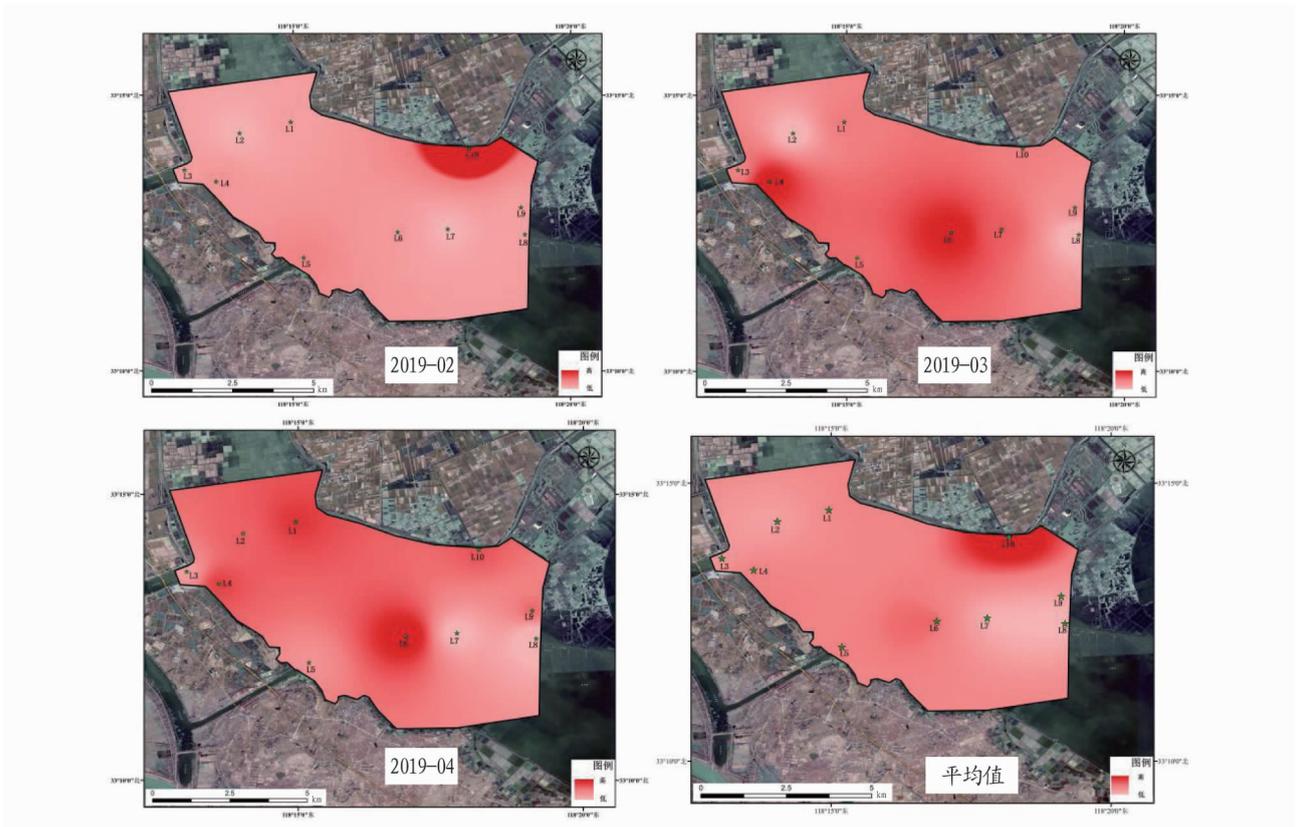


图 3 洪泽湖湖西湿地枯水期底泥总磷空间分布

Fig.3 The spatial distribution characteristics of phosphorus of root-zone during the dry period of wetland in the western part of Hongze Lake

表3 洪泽湖湖西区枯水期水质、底泥监测结果

Table 3 The results of water and sediments monitoring during the dry period in the western part of Hongze Lake

监测时间 Monitoring time	点位 Point	上覆水 Overlying water					底泥 Sediments	
		COD <sub>Mn</sub> //mg/L	SD//cm	TN//mg/L	Chl a// $\mu$ g/L	TP//mg/L	TN//g/kg	TP//g/kg
2019-02	L1	4.4	86.5	0.90	5.69	0.09	0.66	0.58
	L2	5.0	86.5	1.07	14.10	0.06	1.39	0.41
	L3	5.5	91.5	1.39	8.73	0.05	0.68	0.57
	L4	5.1	86.5	1.13	5.76	0.05	1.09	0.67
	L5	4.8	96.5	0.86	10.40	0.05	0.77	0.81
	L6	3.8	63.5	0.97	5.85	0.06	1.78	0.62
	L7	4.6	74.5	0.76	6.28	0.04	1.11	0.39
	L8	5.1	64.5	0.52	10.60	0.04	1.25	0.55
	L9	6.1	78.5	0.36	9.44	0.04	1.37	0.57
	L10	3.8	62.5	1.17	7.18	0.05	1.38	1.38
2019-03	L1	4.5	56.5	0.90	11.00	0.05	0.82	0.51
	L2	5.0	61.5	0.86	10.20	0.05	1.37	0.44
	L3	5.6	50.5	1.43	6.04	0.04	1.00	0.50
	L4	5.1	43.5	1.13	9.17	0.10	1.09	0.59
	L5	4.9	48.5	0.86	13.70	0.05	0.79	0.52
	L6	3.8	32.5	0.97	10.40	0.06	1.61	0.59
	L7	4.8	43.5	0.76	9.24	0.05	1.12	0.53
	L8	5.2	56.5	0.52	15.20	0.08	1.15	0.43
	L9	6.0	66.5	0.36	13.30	0.04	1.46	0.49
	L10	3.9	46.5	1.17	7.15	0.04	1.38	0.51
2019-04	L1	3.9	46.5	0.86	3.74	0.04	1.26	1.12
	L2	3.7	36.5	0.89	18.60	0.08	0.77	1.04
	L3	4.6	41.5	0.76	22.10	0.05	0.96	0.88
	L4	4.9	44.5	0.85	11.00	0.52	0.71	1.10
	L5	3.8	59.5	0.90	17.40	0.13	1.29	0.92
	L6	4.2	48.5	0.80	10.70	0.11	1.37	1.24
	L7	4.3	42.5	0.71	15.70	0.24	1.21	0.80
	L8	4.9	41.5	0.86	28.20	0.03	1.37	0.74
	L9	5.1	74.5	0.86	13.10	0.06	1.12	1.02
	L10	4.4	51.5	0.78	93.80	0.55	1.34	1.06

表4 洪泽湖湖西湿地枯水期根区底泥中氮磷含量及富营养化指数平均值

Table 4 Nitrogen and phosphorus contents in plant root-zone and water eutrophication index during the dry period of wetland in the western part of Hongze Lake

监测时间 Monitoring time	全氮 TN g/kg	总磷 TP g/kg	富营养化 指数 SD
2019-02	1.15	0.65	32.34
2019-03	1.18	0.52	33.16
2019-04	1.14	0.99	36.26
枯水期平均值 Average dry season	1.16	0.72	33.92

**2.1.3 富营养化水平比较。**由表1和表3可知,枯水期湖西湿地水体的现状营养状态为中营养,处于良好水平,3次采样10个监测点的综合营养状态指数波动平稳,均未超过轻度富营养化下限标准50。从空间分布分析,采样点L10和L4区域富营养化指数最高,采样点L1和L9富营养化指数最低,见图4。原因可能是湖西湿地入湖口水流动性相对较好,一定程度上抑制了水体中藻类的生长。

**2.2 根区底泥氮、磷与其上覆湖水氮、磷含量相关性分析** 枯水期湖西湿地根区底泥全氮和上覆湖水的总氮浓度呈负相关,但相关性并不显著,相关系数分别为0.053 2、0.042 5、0.028 5和0.127 1,见图5。原因可能是洪泽湖上覆

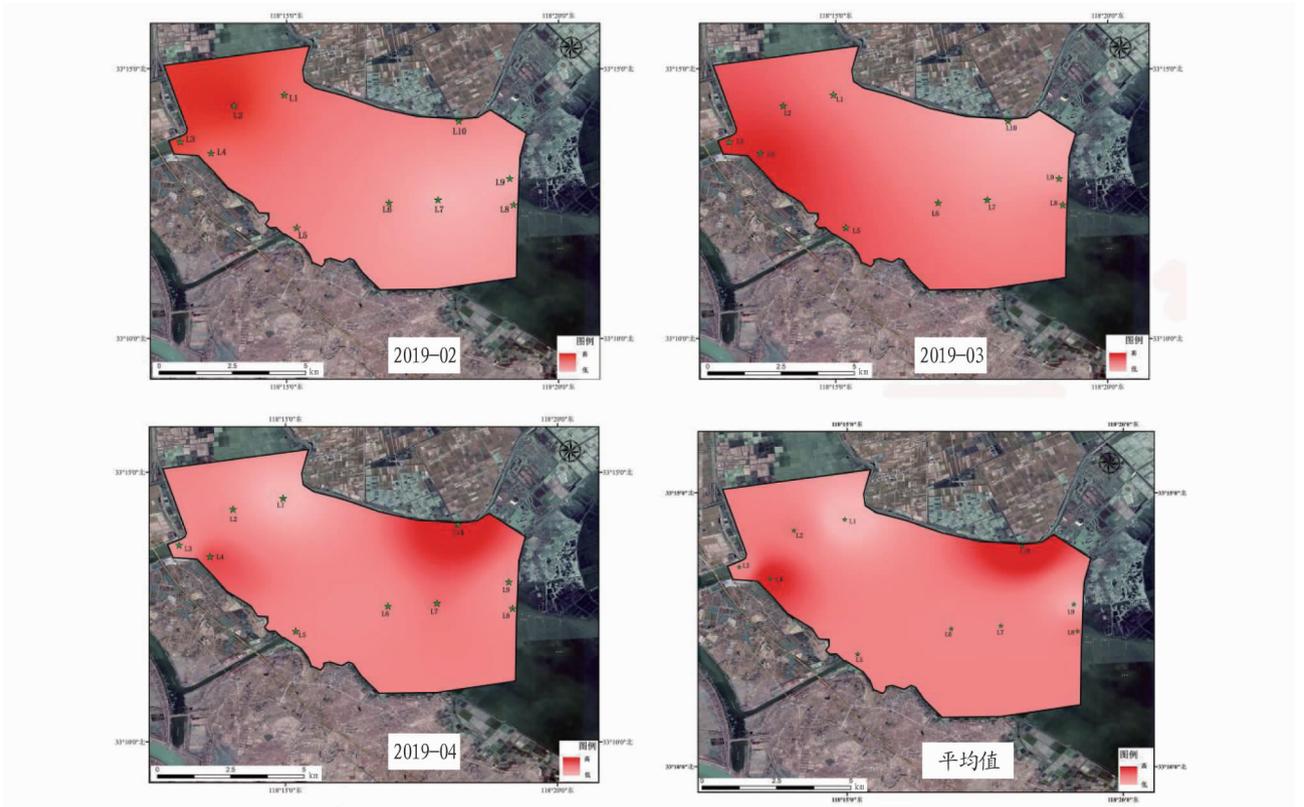


图 4 洪泽湖湖西湿地枯水期富营养化指数空间分布

Fig.4 The spatial distribution characteristics of eutrophication of the water during the dry period of wetland in the western part of Hongze Lake

湖水中的总氮主要是流域内生活污水和农业废水直接排放带来的,而根区底泥中全氮主要是由沉积的腐殖质造成的。

这一现象也从侧面反映出洪泽湖湖西湿地水体总氮污染仍以外源污染为主。

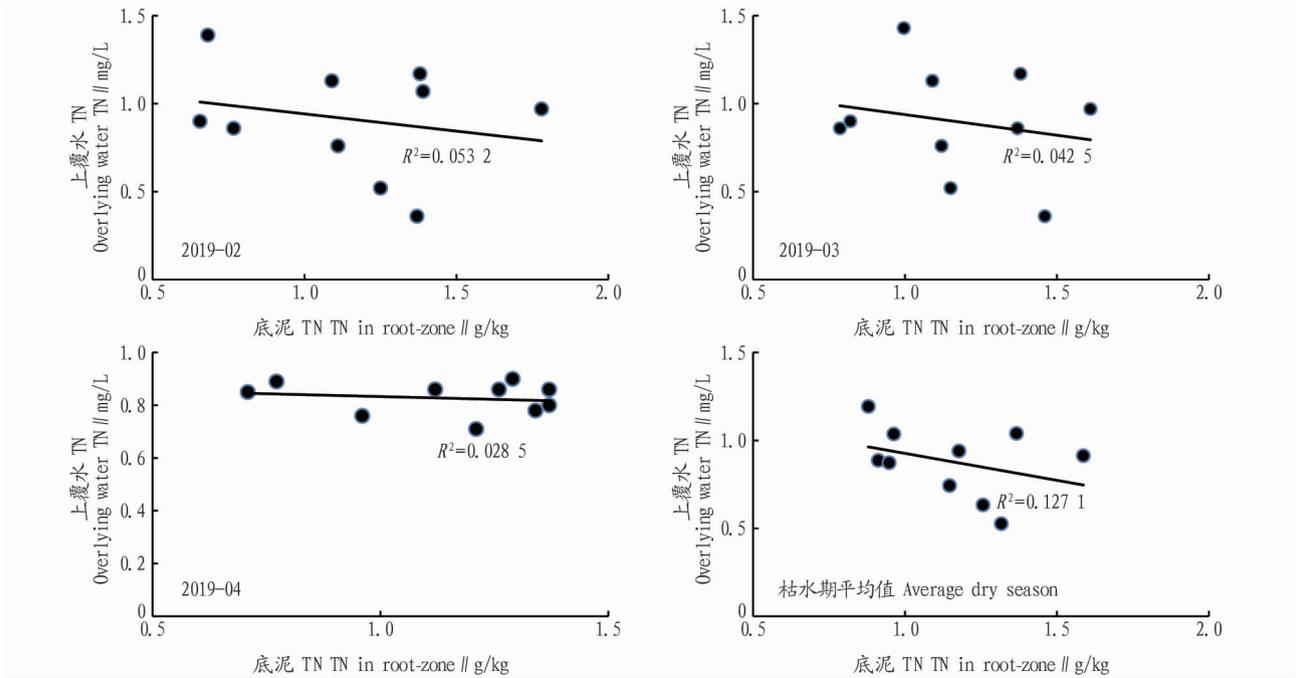


图 5 洪泽湖湖西湿地枯水期根区底泥全氮与上覆水总氮含量相关性分析

Fig.5 The relationship between nitrogen contents in root-zone and overlying water of wetland in the western part of Hongze Lake

枯水期湖西湿地根区底泥总磷和上覆湖水的总磷浓度呈正相关,相关性不显著,相关系数分别为 0.001、0.086 3、0.05 3和 0.417 1,见图 6。这是因为湖水中的总磷主要是流

域内生活污水和农业废水直接排放带来的,而根区底泥中的总磷通过逐年沉积于释放达到一个动态平衡。这一结果显示,洪泽湖西部湖区水体总磷污染仍以外源污染为主。

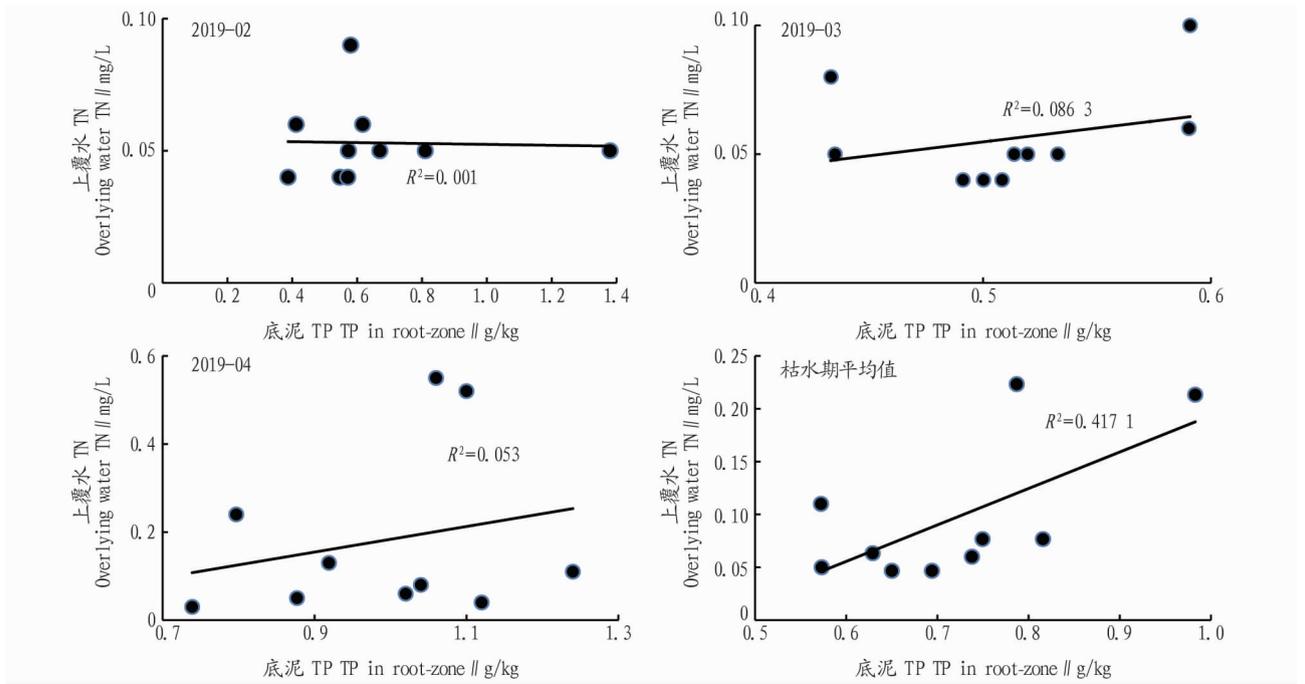


图6 洪泽湖湖西湿地枯水期根区底泥总磷与上覆水总磷含量相关性分析

Fig.6 The relationship between phosphorus contents in root-zone and overlying water in the western part of Hongze Lake

### 3 结论

枯水期洪泽湖湖西湿地根区底泥的 N、P 含量处于中等水平,且具有西低东高、北高南低的分布特征,整个湖区富营养化水平为中营养。根据根区底泥氮磷和上覆水氮磷的相关性分析,得出洪泽湖的内源污染负荷不大,污染物质主要来源于外源污染。

### 参考文献

- [1] 朱正伟.洪泽湖富营养化现状及防治对策[J].江西化工,2014(3):104-106.
- [2] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J].湖泊科学,2010,22(6):799-810.
- [3] 李吉平,徐勇峰,陈子鹏,等.洪泽湖地区麦稻两熟农田和杨树林地氮磷径流流失特征研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(1):98-104.
- [4] 张利民,刘伟京,尤本胜,等.洪泽湖流域生态环境问题及治理对策[J].环境监测管理和技术,2010,22(4):30-35,39.
- [5] 张晓辉,崔建宇,曹奇光,等.高羊茅和结缕草对地下渗滤系统中氮磷的去除研究[J].环境工程,2012,30(6):52-54,59.
- [6] 陈如海,詹良通,陈云敏,等.西溪湿地底泥氮、磷和有机质含量竖向分布规律[J].中国环境科学,2010,30(4):493-498.
- [7] 陈永川,汤利,张德刚,等.滇池沉积物总磷的时空分布特征研究[J].农业环境科学学报,2007,26(1):51-57.
- [8] 史静,于秀芳,夏运生,等.影响富营养化湖泊底泥氮、磷释放的因素[J].水土保持通报,2016,36(3):241-244.

- [9] 储超.表面活性剂对浮萍治理富营养化水体作用影响研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [10] 林珊.太湖水体叶绿素 a 混合光谱分解算法研究[D].南京:南京大学,2012.
- [11] 李勇,王超,朱亮,等.长荡湖底泥污染特征及水体富营养化状况[J].环境科学与技术,2005,28(2):38-40,116.
- [12] 毛旭锋,魏晓燕.富营养化湖泊叶绿素 a 时空变化特征及其影响因素分析[J].中国环境监测,2015,31(6):65-70.
- [13] 鄢昭,刘婷,付婷,等.磁湖叶绿素 a 时空分布特征及环境因子影响分析[J].环境科学与技术,2015,38(8):123-126,149.
- [14] 黄慧琴,侯进菊,翁辰,等.崇明岛典型河道水体中叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的相关分析[J].生态环境学报,2016,25(8):1369-1375.
- [15] 鲍广强,尹亮,余金龙,等.基于综合营养状态指数和 BP 神经网络的黑河富营养化评价[J].水土保持通报,2018,38(1):264-269.
- [16] 李慧.黑河流域水质评价及变化趋势分析[D].兰州:兰州理工大学,2014.
- [17] 张双双.南四湖底泥有机质、氮磷及重金属空间分布特征分析[D].青岛:青岛理工大学,2014.
- [18] 谢理,杨浩,渠晓霞,等.滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究[J].环境科学,2013,34(9):3458-3466.
- [19] 赵旭光.挺水植物对富营养化湖泊水体中氮磷循环的影响[D].天津:天津大学,2011.
- [20] 崔松波.湿地表层底泥磷的分布及影响因素研究[D].北京:华北电力大学,2014.