

长江沿岸河道污染底泥内源监测解析研究

何宁¹ 谢伟¹ 刘富来¹ 陈慧¹ 余京轩²

1. 南水北调江苏生态环境有限公司, 中国·江苏 南京 210000

2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 中国·江苏 南京 210000

摘要: 本研究响应长江生态大保护战略, 针对江苏长江沿岸南通市海门区常乐镇河网片区乡镇河道官公河进行了深入的底泥和水体监测分析。研究针对性在春季和夏季对选定的四个代表性断面 S1、S2、S3 和 S4 进行了采样, 旨在评估底泥中碳氮磷污染物的含量和通量释放特征, 以及水质状况。通过多点混合法采集样品, 并采用标准分析方法检测关键指标, 如总有机碳 (TOC)、总氮 (TN)、氨氮、总磷 (TP) 和 (SRP)。污染评价采用了内梅罗综合指数法和单因子指数法, 全面评估了底泥污染程度。此外, 研究还分析了水体中的碳氮磷污染物分布特征, 以及它们的季节性变化和波动性。结果为长江流域的生态保护和水质持续改善提供了科学依据, 并对河流污染修复和底泥治理提供了定量依据。

关键词: 乡镇河道; 水体; 底泥; 底泥碳氮磷; 污染评价

Monitoring and Analysis of Internal Pollution Sources in Riverbed Sediment along the Yangtze River

Ning He¹ Wei Xie¹ Fulai Liu¹ Hui Chen¹ Jingxuan Yu²

1. South-to-North Water Diversion Jiangsu Eco-environment Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

2. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract: This study responds to the Yangtze River Ecological Protection Strategy by conducting an in-depth monitoring and analysis of sediment and water bodies in the rural river section of Guan Gong River in Changle Town, Haimen District, Nantong City, along the Jiangsu section of the Yangtze River. The study specifically targeted four representative cross-sections, S1, S2, S3, and S4, for sampling during the spring and summer seasons, aiming to assess the content and flux release characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus pollutants in the sediment, as well as the water quality conditions. Samples were collected using the multipoint mixing method, and key indicators such as Total Organic Carbon (TOC), Total Nitrogen (TN), ammonia nitrogen, Total Phosphorus (TP), and Soluble Reactive Phosphorus (SRP) were detected using standard analytical methods. Pollution assessment employed the Nemerow Comprehensive Index Method and the Single-Factor Index Method to comprehensively evaluate the degree of sediment pollution. In addition, the study analyzed the distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus pollutants in the water body, as well as their seasonal variations and fluctuations. The results provide a scientific basis for the ecological protection of the Yangtze River basin and the continuous improvement of water quality, and also offer quantitative support for river pollution repair and sediment management.

Keywords: rural river channels; water bodies; sediment; sediment carbon, nitrogen, and phosphorus; pollution assessment

0 前言

在全球范围内, 水环境的保护与治理已成为各国政府和科研机构关注的焦点。中国提出的长江生态大保护战略, 标志着对长江流域生态保护修复和综合治理的重视程度达到了前所未有的高度。长江作为中国的母亲河, 其流域的生态健康状况直接关系到区域经济的可持续发展和数亿人民的生活质量。随着经济的快速发展, 江苏沿长江两岸地区的人口数量急剧增加, 随之而来的是生活和工业污水的排放量不断上升, 导致水体污染负荷的增加。尽管一些镇区已经采取了外源性控源截污等措施, 有效阻断和削减了污染物的直接排放, 但历史积累在河流底泥中的污染物仍然对水质构成

威胁。这些内源性污染物的释放, 不仅会导致水质恶化, 还可能引发一系列生态问题。

河流底泥作为水体污染的重要内源之一, 其污染程度和释放特性直接影响着水环境的健康状况。长期以来, 由于缺乏有效的监测和治理, 底泥中积累的污染物逐渐向水体释放, 成为制约水质改善的关键因素。在当前外源污染得到初步控制的背景下, 开展河流底泥污染治理显得尤为迫切。在外源污染得到控制的基础上开展河流底泥污染治理对河流水质持续改善非常必要, 但底泥治理的工程往往十分的复杂且成本昂贵, 在进行底泥工程前, 为了实现科学治理, 必须首先对底泥污染状况进行全面评估, 量化底泥内源对水质的

影响，为河流污染修复提出定量依据。

本研究于 2023 年对江苏长江沿岸的南通市海门区常乐镇河网片区乡镇河道官公河进行了底泥的监测与分析，分析了河道和水体中碳氮磷污染物的含量和通量释放特征，评估底泥污染程度，为河流污染修复提供定量依据，科学量化底泥内源的贡献，从而为长江流域的生态保护和水质持续改善提供科学支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区域与样品采集

常乐镇地处长江入海口北岸是传统工业重镇，镇境内河网密布，水资源丰富，从北向南依次为通吕运河、通启运河和海门河，为境内最主要的三条河流。常乐镇境域的污染物大都通过附近河道汇入这三条主要河流，并最终汇入长江，境内区域良好的水生态环境将对长江大保护成果起到有效的维护作用。常乐镇人工水系发达，但由于长期疏于管理，污水入河，多数河道淤积严重，同时在老百姓无序利用下，部分河道、生态沟渠的连通性差，水质为劣 V 类，淤泥厚度 0.6~1.8m。

在乡镇河道的污染监测研究中，精选了 S1、S2、S3 和 S4 四个具有代表性的断面进行春季和夏季采样（见图 1）。利用标杆精确测量并标记河道底泥深度，我们采用多点混合法，每个采样点采集 5~6 个平行样本，覆盖 2m×2m 的区域，确保样本的代表性和均匀性。水样在水面下约 20cm 处采集，使用 1 升聚乙烯瓶，并在采集前进行 3~4 次润洗以避免污染。底泥样品则使用活塞式柱状采样器采集 0~20cm 深度的泥样，随后现场混匀并低温保存于聚乙烯密封袋中，以维持样品的原始状态。

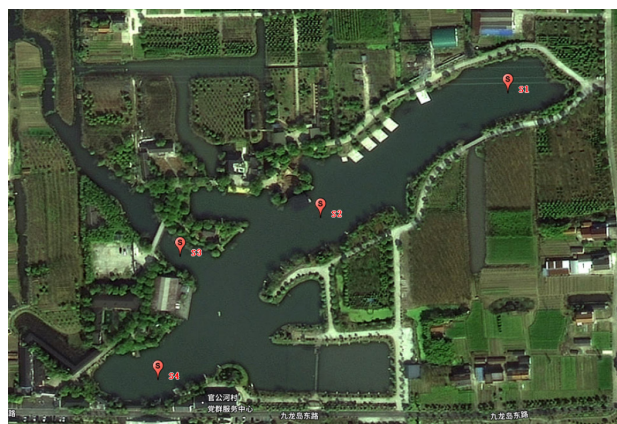


图 1 采样点位示意图

1.2 分析方法

样品采集后冷藏运输，依照相应标准分析方法检测各指标，底泥样品在（105±5）℃烘干至恒重后 1℃~5℃冷藏备用，水样以 0.45m 滤膜过滤后 1℃~5℃冷藏保存待检。底泥监测指标包括：总有机碳（TOC，GB/T19145-2003）、TN（LY/T1228-2015）、氨氮（H634-2012）、TP（H632-2011）及有效磷（NY/T1121.7-2006）。水体监测指标包括：TOC（GB/

T19145-2003）、生化需氧量（BOD5，HW505-2009）、化学需氧量（COD，H1828-2017）、TN（HJ636-2012）、氨氮（HW536-2009）、凯氏氮（GB11891-89）、TP（GB11893-89）及磷酸盐（GB/T5750 5-2006（7））。

1.3 底泥评价

底泥的污染评价采用了综合污染指数评定。单项污染指数（Si）和综合污染指数（F）的计算见式（1）和式（2）^[1]。沉积物氮、磷污染物污染程度分级标准见表 1。

$$S_i = \frac{C_i}{C_s} \tag{1}$$

$$F = \sqrt{\frac{S_{AVE}^2 + S_{MAX}^2}{2}} \tag{2}$$

式中：Ci 为评价因子 i 的实测值，mg/kg；Cs 为评价因子 i 的标准值，mg/kg，其中总氮（TN）、总磷（TP）的标准值分别为 670mg/kg、440mg/kg；SAVE 为 Si 平均值；SMAX 为 Si 最大值。

表 1 沉积物综合污染程度分级标准

污染程度	S _{TN}	S _{TP}	FF	等级
未受污染	< 1.0	< 0.5	≤ 1.0	1
轻度污染	1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	2
中度污染	1.5~2.0	1.0~1.5	1.5~2.0	3
重度污染	≥ 2.0	≥ 1.5	≥ 2.0	4

1.4 河道水质评价

对于水体中的碳氮磷污染物评价，采用了综合污染指数法。水体样品的监测指标包括总有机碳（TOC）、生化需氧量（BOD5）、化学需氧量（COD）、总氮（TN）、氨氮、总磷（TP）和 SRP。我们依据地表水环境质量标准，为这些指标设定了浓度限值。通过对各监测点的水质参数进行单因子污染指数计算，并综合这些指数，我们得到了水体的综合污染指数（P）。这一指数不仅反映了水体中碳氮磷污染物的当前浓度水平，还揭示了水体污染的潜在风险，为水质管理和污染控制提供了科学依据。

2 结果与讨论

2.1 官公河营养盐的时空分布

官公河四个代表性断面水体中营养盐的时空分布见图 2。官公河水体 TP 范围为 0.01~0.19mg/L，TN 范围为 0.50~3.45mg/L，而且在不同月份有所变化，夏秋季 TP、TN 含量高于春冬季节，表现出一定的季节性特征。氨氮和硝态氮作为氮循环的关键组分，其浓度变化则更能反映水环境中微生物活动和氮素转化的情况。官公河氨氮含量年平均Ⅲ类水（河流），其间表现出较大的波动，最高值为 1.13mg/L，而最低值为 0.05mg/L，平均浓度为 0.37mg/L，标准差为 0.25mg/L。官公河 NO3--N 含量最高值为 2.21mg/L，而最低值为 0.06mg/

L, 平均值为 0.69mg/L, 标准差为 0.48mg/L。由于官公河为劣 V 类水质, 而水体在缺氧条件下, 反硝化作用可以导致

NO₃-N 转化为氮气而逸出水面, 减少水体中的氮浓度, 这与官公河夏秋时 NO₃-N 浓度越来越低相符合。

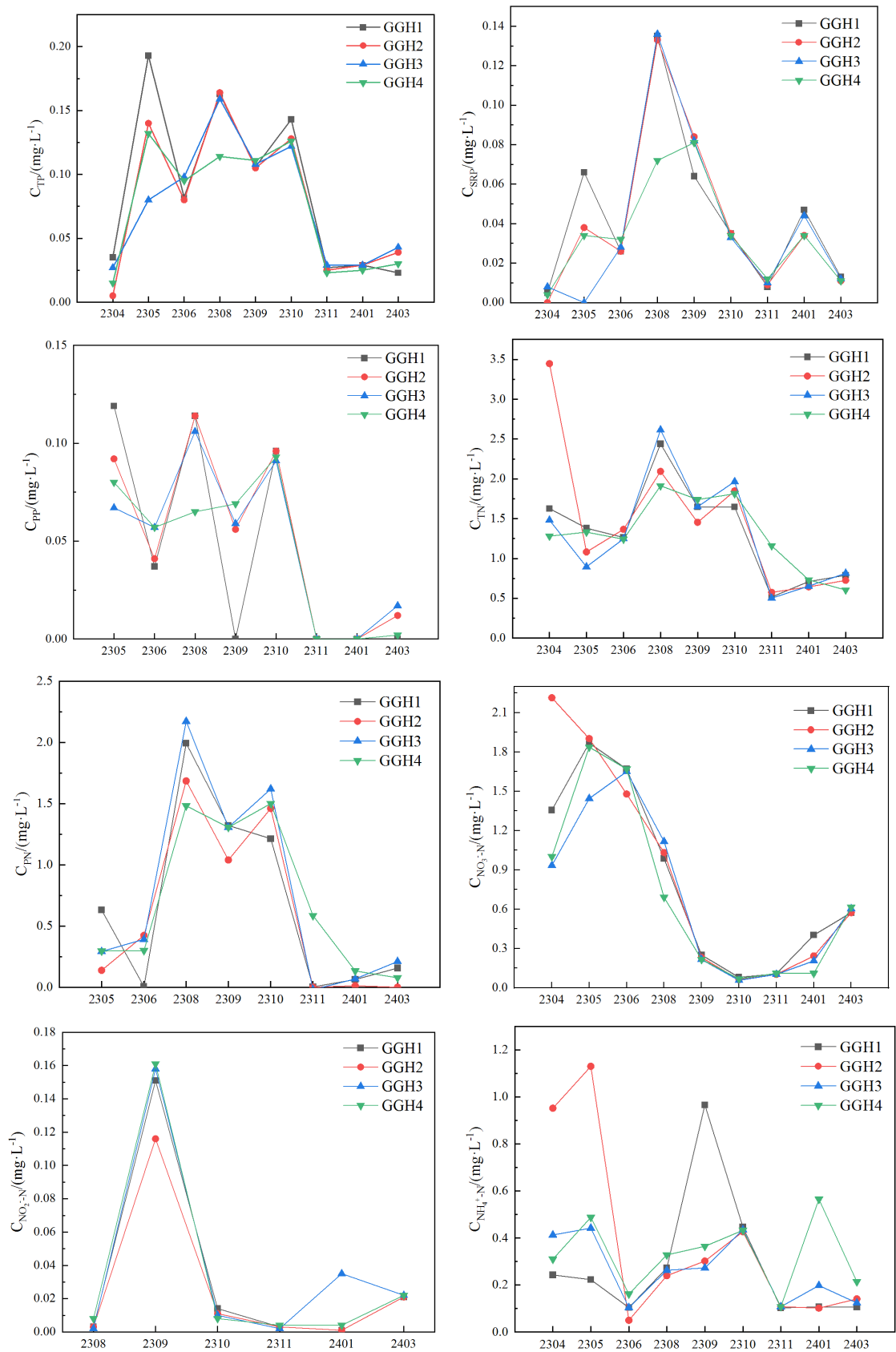


图 2 官公河各断面表层水体中营养盐的时空分布

2.2 官公河底泥营养盐时空分布特征

官公河底泥营养盐时空分布如图 3 所示。官公河 TN 范围为 1654.55~2407.50mg/kg，均值为 2089.48mg/kg。TP 含量为 432.50~518.18mg/kg。显然，夏季官公河表层沉积物的 TN 含量降低而 TP 含量相对增加，这可能与河道水温上升，加速了微生物的代谢活动，特别是反硝化作用，导致 TN 含量的降低。同一时期，官公河 2 号和 4 号采样点的 TN、TP 含量均高于 1、3 号采样点，这可能是 2 和 4 号采样点位于排污的源头，再加上河道淤积严重，导致水流减慢，增加了沉积物中营养盐的积累。

官公河沉积物 SRP、NH₄⁺-N 静态释放结果如图 4。官公河在 4 月 SRP 静态释放速率为正值（均值为 0.02），而

在 7 月释放为负值（均值为 -0.24），原因可能是在官公河沉积物以铁铝形态的磷为主，沉积物中的金属氧化物如氧化铁和氧化铝等具有较高的吸附能力，它们可以吸附溶解在水中的磷，将其转化为颗粒态磷，从而降低 SRP 的浓度。官公河氨氮静态释放速率均为正值（均值为 0.42），这与官公河背景调查的水质为劣 V 类有关，劣 V 类水质往往意味着水体中溶解氧含量低，这种缺氧条件会促进微生物通过厌氧呼吸作用分解有机氮，产生氨氮。同时，老百姓无序利用河道，可能导致沉积物发生扰动，进一步促进沉积物 - 水界面的物质交换，增加氨氮的释放。官公河 2 和 4 号点的氨氮静态释放速率比 1 和 3 号点高可能是河道淤积，水体流动性降低。

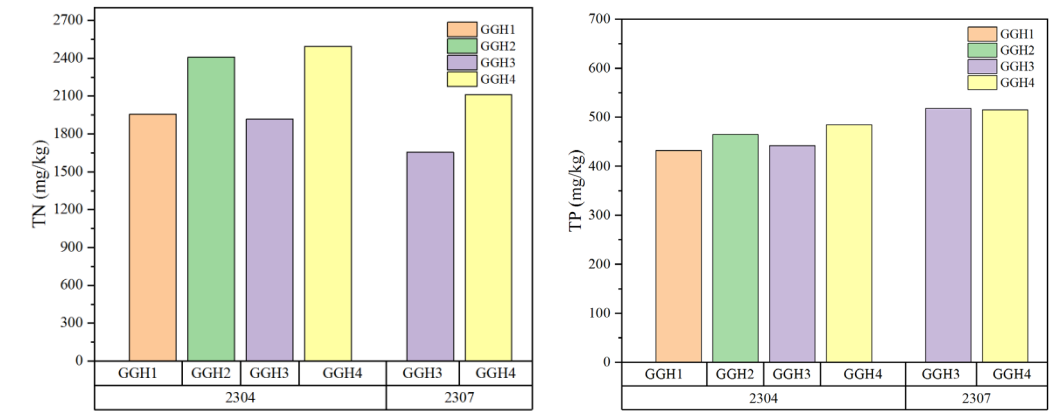


图 3 官公河底泥营养盐时空分布

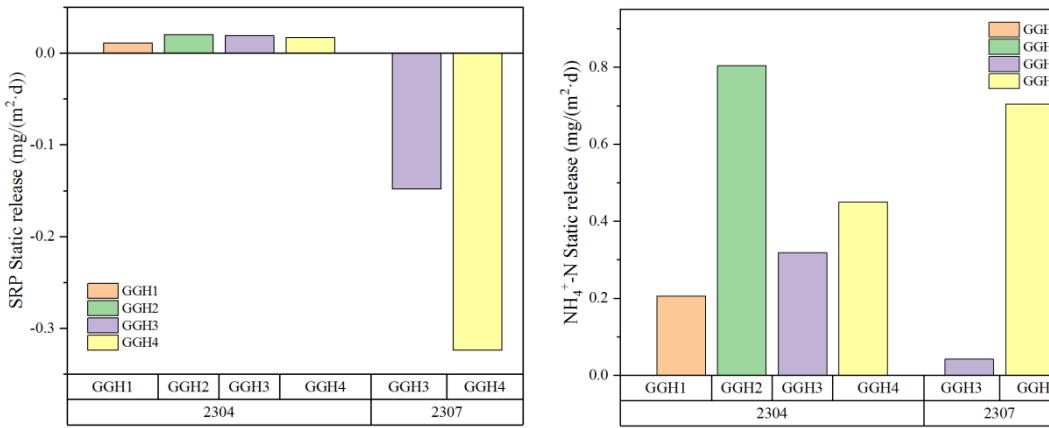


图 4 官公河底泥 SRP、NH₄⁺-N 静态释放

2.3 水体和底泥污染状况评价

氮磷比（TN/TP）是重要的水环境指标，常用于表征营养盐结构。Guildford 等^[2]提出了水体中营养物质的限制性标准，当 N/P ≤ 9 时（质量比），N 为限制性因子，当 9 < N/P < 22.6 时，适合藻类的生存的，N/P ≥ 22.6 时，为磷限制性因子。官公河全年各采样点的 TN/TP（质量比）空间分布见图 5。总体而言，官公河多处于 N、P 共同限制状态，官

公河 TN/TP 总体介于 7.15~689.20，平均值为 40.22。从 2023 年 4 月至 2024 年 3 月期间官公河水体的 TN/TP 变化趋势上看，2023 年 4 月 TN/TP 值最高，其均值为 218.97，2023 年 5 月 TN/TP 值最低均值为 9.04。说明 4 月官公河水体变化极大，若有突发磷污染，极易造成富营养化爆发，而其他地方发生富营养化的风险较低。总之，官公河水体夏秋季节表现为氮磷共同限制性状态，春冬季节表现为磷限制性状态。

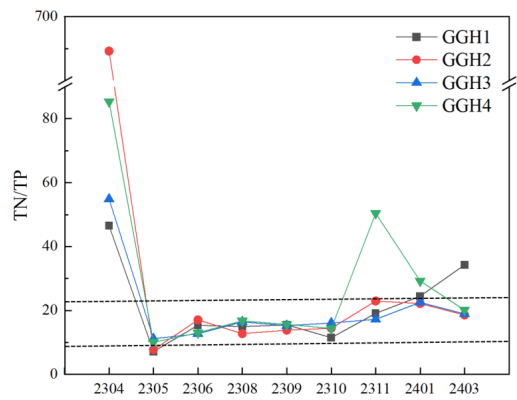


图 5 官公河水体 TN/TP

采用综合污染指数评价表层沉积物中 TN、TP 的污染程度。官公河表层沉积物氮、磷污染水平见表 2。官公河所有采样点的 TN、FF 单项污染指数均大于 2，属于重度污染。官公河东部采样点（GGH1）的 TP 单项污染指数（0.98）属于中度污染，其余全部为重度污染。

表 2 官公河表层沉积物综合污染程度评价

研究区域	TN 评价指数		TP 评价指数		综合污染指数	
	S _{TN}	等级	S _{TP}	等级	FF	等级
GGH1	2.92	4	0.98	2	2.48	4
GGH2	3.59	4	1.06	3	3.03	4
GGH3	2.86	4	1.01	3	2.44	4
GGH4	3.73	4	1.10	3	3.13	4

3 结论

- ①官公河水体夏秋季 TP、TN 含量高于春冬季节，NO3-N 浓度越来越低。表现出一定的季节性特征。
- ②官公河河道淤积严重，其 TN 范围为 1654.55~2407.50mg/kg，均值为 2089.48mg/kg。TP 含量为 432.50~518.18mg/kg。官公河 SRP、NH4+-N 静态释放结果也表明，清淤可以有效改善官公河水质。
- ③官公河水体夏秋季为 N、P 共同限制。官公河表层沉积物 TP 单项评价指数除了东部为中度污染采样点外，其余全部为重度污染。

参考文献：

[1] 黄廷林,刘飞,史建超.水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]环境科学,2016,37(1):166-72.

[2] GUILDFORD S J, HECKY R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship?[J]. Limnology and Oceanography,2000,45(6): 1213-23.

作者简介：何宁（1980-），男，中国江苏宝应人，在职研究生，高级工程师，从事涉水资源开发、水生态水环境治理等方面的研究。

课题项目：长江沿岸河网河道污染底泥内源贡献解析与控源方案评估研究及示范项目（项目编号：SSY-STHJ-2023-F-23）。