

城市河道水体富营养化污染特征分析

纪桂霞¹, 任振兴¹, 杨继柏²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 青谊生态环境科技有限公司, 上海 201799)

摘要: 通过对上海市某河道水质的实测调查数据, 分析了河水富营养污染因子的时空分布特征, 采用综合营养状态指数法对水体富营养污染程度进行了评价, 结果表明: 河水水质指标 *Chla*, *TN*, *COD_{Mn}* 均呈现夏季高、冬季低的变化规律, 而 *SD* 冬季高、夏季低, *TP* 随季节变化不显著。7月水体污染最严重, 水体的 *COD_{Mn}*, *TN* 平均浓度均超V类水质标准约2倍, *Chla* 与 *SD* 处于劣V类水平, *TP* 处于V类水平, 该河道氮和有机物污染严重。冬季, 水体主要为轻度富营养状态, 春、秋季, 水体主要处于中度富营养状态, 夏季6月, 在4~6河段出现了重度富营养状态, 7~8月水体整体呈现重度富营养状态, 河道易暴发水华。控制外源污染物排入, 并加强河道水质监测、评价和富营养状态预报, 是防治河流黑臭水华, 实现城市碧水的关键。

关键词: 城市河水; 富营养因子; 时空分布特征; 综合营养状态指数

中图分类号: X 703 文献标志码: A

Analysis on the characteristics of eutrophication pollution of water bodies in urban river

Ji Guixia¹, REN Zhenxing¹, YANG Jibai²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Qingyi Ecological Environment Technology Co., Ltd., Shanghai 201799, China)

Abstract: Through the measured survey data of the water quality of a river in Shanghai, the space-time distribution characteristics of eutrophic pollution factors in river water were analyzed, and the eutrophic pollution degree of the water body was evaluated by the comprehensive nutrient status index method. Results show that the river water quality indexes of *Chla*, *TN*, and *COD_{Mn}* all presented high values in summer and low values in winter, while *SD* was high in winter and low in summer, and *TP* did not change significantly with the seasons. The water pollution was the most serious in July. Both the average concentrations of *COD_{Mn}* and *TN* in the water body were about 2 times higher than the water quality standard of class V. *Chla* and *SD* were at the inferior class V level, and *TP* was at the class V level. The river water was seriously polluted by nitrogen and organic matter. The water body mainly presented mild eutrophic state in winter. In spring and autumn, the water body was mainly in moderate eutrophic state. Severe eutrophication occurred in the segment 4~6 of the river in summer (June). From

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD1100502-01)

第一作者: 纪桂霞(1966-), 女, 副教授。研究方向: 雨水、污水处理利用与河流、湖泊富营养化治理。

E-mail: shjiguixia@163.com

July to August, the water body presented severe eutrophication, and the eutrophication bloom of the whole river was prone to burst out. Controlling the discharge of exogenous pollutants, strengthening the monitoring and evaluation, and forecasting eutrophic state of the river water were the keys to control the black smelly eutrophication of river water and realize urban water clarity.

Keywords: urban river water; eutrophic factors; space-time distribution characteristics; comprehensive eutrophic status index

随着城市的不断建设和经济的迅猛发展, 城市河道污染日趋严重, 河道水体黑臭, 水华频繁暴发, 严重影响了城市景观环境, 并危害居民的身体健康^[1-4]。江河湖泊水华已成为全球重点关注的环境问题之一^[5-8]。目前, 国内外专家学者^[9-12]对江河湖泊的富营养化进行了广泛研究。近年来, 我国非常重视城市河流的污染治理, 并投入了大量的人力、物力和财力, 决心使“水变绿、山变青、天变蓝”。

上海作为国际化大都市, 在经济迅速发展的同时, 城市河道水体富营养化污染更为严重^[1, 13]。本文以上海市某一黑臭较严重的河道作为研究对象, 通过对河水春、夏、秋、冬四季的水质实测调查, 研究了河水富营养污染因子的时空分布特征, 并采用综合营养状态指数法对水体富营养污染程度进行评价, 分析了该水体富营养化的成因, 并提出了防治水华暴发的有效措施, 为城市河水污染的有效管理提供理论依据, 也为实现城市河道黑水变碧水提供科学方法和有效对策。

1 材料与方法

1.1 河道概况与监测点布置

上海市某河道是一条非潮汐河流, 全长约 7 km, 平均河宽 30~40 m, 枯水期低水位为 0.8~1.8 m, 汛期高水位为 3.9~4 m, 水域面积约 20 多万 m²。

该河道流经区域内有纺织、印染、食品加工以及餐饮等企业, 河水污染严重, 水华暴发较频繁^[14]。本研究沿河道水流自上、中、下游共设置 6 个采样点, 分别位于过河桥处, 依次编号为 1—6, 如图 1 所示。

1.2 样品采集与分析方法

从 4 月份开始到下一年 3 月, 历时春夏秋冬 12 个月, 每月在 6 个采样点水深 0.5 m 处同时采样一次, 并测定各水样的主要富营养化污染指标: 叶绿素 a(*Chla*)、总氮(*TN*)、总磷(*TP*)、高锰酸盐指数(*COD_{Mn}*)和透明度(*SD*)。水质监测分析方法采用国家标准, 水体透明度现场测定, 其他水质指标在实验室进行测定。

1.3 数据分析与处理方法

1—6 采样点, 连续 12 个月的水质监测共 72 个数据组, 使用 Origin 软件对监测数据绘制污染物时空分布图, 对水体富营养污染物的时空分布特性进行分析, 并采用富营养化综合营养状态指数法进行评价^[15-16], 其综合营养状态指数计算公式为

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$

(1)

式中: *TLI*(Σ)为综合营养状态指数; *W_j*为第 *j* 个指标的相关权重; *TLI*(*j*)为第 *j* 个指标的营养状态指数。

以 *Chla* 作为基准参数, 则第 *j* 种参数归一化的相关权重计算公式为

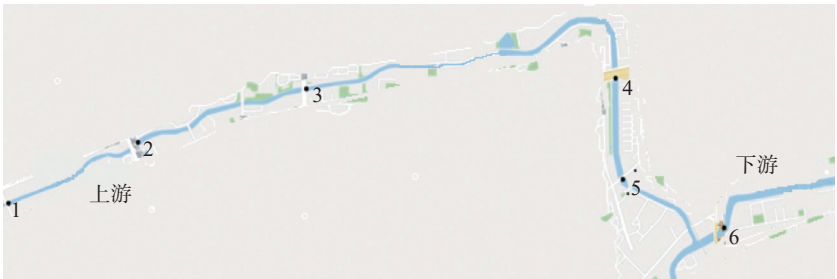


图 1 监测点分布图
Fig.1 Distribution of monitoring sites

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

(2)

式中： r_{ij} 为第 j 个指标与 i 基准参数的相关系数； m 为评价指标的个数。

各指标的营养状态指数计算公式为

$$TLI(Chla) = 10 \times (2.5 + 1.086 \times \ln Chla)$$

(3)

$$TLI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.624 \times \ln TP)$$

(4)

$$TLI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.694 \times \ln TN)$$

(5)

$$TLI(SD) = 10 \times (5.118 - 1.94 \times \ln SD)$$

(6)

$$TLI(COD_{Mn}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \times \ln COD_{Mn})$$

(7)

式中： $Chla$ 单位为 mg/m^3 ； SD 单位为 m ；其他指标单位均为 mg/L 。

综合营养状态指数计算结果、污染程度分级和评价标准如表 1 所示。

表 1 营养状态分级

Tab.1 Classification of eutrophic status

综合营养状态指数	营养状态分级	定性评价
$TLI(\Sigma) < 30$	贫营养	优
$30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$	中营养	良
$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$	轻度富营养	轻度污染
$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$	中度富营养	中度污染
$TLI(\Sigma) > 70$	重度富营养	重度污染

注：在同一营养状态下，指数越高，其营养程度越重。

2 结果与分析

2.1 河道水体富营养因子时空动态分布特征

2.1.1 总氮的时空动态分布特征

1—6 测点水体的总氮浓度及其月均值随时空动态变化规律如图 2 所示。

由图 2 可见，河水的 TN 波动范围为 $2.33 \sim 5.19 > 2 \text{ mg}/\text{L}$ ，均超 V 类水质标准，处于劣 V 类水平。从时间变化来看，夏季 6~7 月水体 TN 浓度较大，6 月，4 测点 TN 浓度最大，为 $5.19 \text{ mg}/\text{L}$ ，超 V 类水质标准约 2.6 倍，其次是 5 测点 TN 浓度为 $4.9 \text{ mg}/\text{L}$ ，超标约 2.5 倍；6 月，水体 TN 月均浓度值为 $4.04 \text{ mg}/\text{L}$ ，7 月，为 $4.17 \text{ mg}/\text{L}$ ，均超 V 类水质标准 2 倍多。7 月后 TN 月均浓度值呈下降趋势，冬季 11 月至下一年 1 月 TN 浓度的月均值都小于 $3 \text{ mg}/\text{L}$ ；1 月以后，水体 TN 月均值浓度

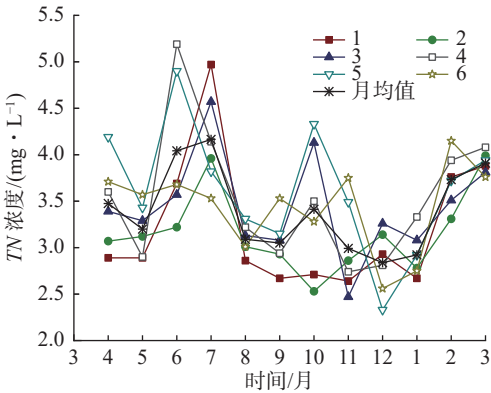


图 2 总氮的时空动态分布

Fig. 2 Space-time dynamic distribution of total nitrogen in the urban river water

逐渐升高。由此可见，水体中 TN 浓度呈现夏季高、冬季低的现象。因夏季温度较高，微生物及水生动物活性及繁殖速度加强，对有机物的分解作用增强，水中动物的排泄物增多，同时底泥含氮营养盐释放量增加^[17]，使河道含氮量增高。

从空间分布看，1，2 测点 TN 浓度年均值分别为 3.21 ， $3.16 \text{ mg}/\text{L}$ ，3—6 河段的 TN 浓度年均值在 $3.44 \sim 3.63 \text{ mg}/\text{L}$ 之间，其中，4 测点 TN 年均值为 $3.53 \text{ mg}/\text{L}$ ，5 测点 TN 年均值为 $3.63 \text{ mg}/\text{L}$ 。由此可见，下游水体总氮污染严重，3—6 河段污染较 1—2 河段严重，其中，4—5 河段氮的污染最为严重。尤其 6 月，4 测点上游一泵站不定期将污水排入水体，致 4 测点 TN 浓度增加较大。因此，加强混合污水排放的管控，防止 4—5 河段夏季高氮引起的水华暴发。

2.1.2 高锰酸盐指数的时空动态分布特征

COD_{Mn} 的测试结果如图 3 所示。各监测点的 COD_{Mn} 浓度在 7~9 月份均大于 $15 \text{ mg}/\text{L}$ ，处于劣 V 类水平，且各测点 COD_{Mn} 浓度在 7 月均达到最大，其中，4—6 河段的 COD_{Mn} 浓度为 $26.6 \sim 29.3 \text{ mg}/\text{L}$ ，超 V 类标准约 1.8~2 倍，该河段有机污染最严重。7 月后 COD_{Mn} 月均浓度逐渐降低，冬季 1 月 COD_{Mn} 月均浓度值最低，为 $13.3 \text{ mg}/\text{L}$ ，2 月开始回升， COD_{Mn} 浓度随时间呈现夏季高、冬季低的显著变化规律。夏季，大量藻类等生物生长繁殖及死亡分解，底泥中有机质的大量释放，是 COD_{Mn} 月均浓度升高的主要原因。此外，4 测点上游泵站在汛期混合污水排放量较大，混合污水中有机污染物及油含量高，河道水面经常出现油状薄膜，造成 4~6 河段 COD_{Mn} 浓度急剧升高。因此，加强泵站排污管理是防止河道黑臭的关键。

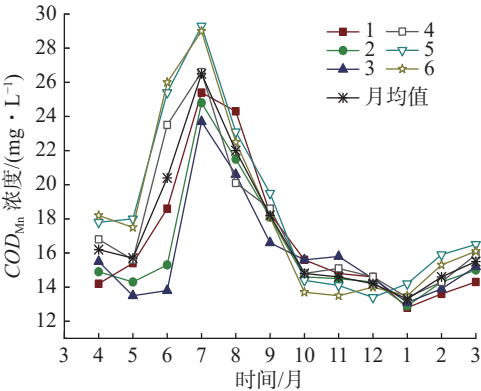


图3 COD_{Mn} 的时空动态分布

Fig. 3 Space-time dynamic distribution of COD_{Mn} in the urban river water

2.1.3 总磷的时空动态分布特征

各监测点的 TP 浓度随时间及空间变化规律如图4所示。

由图4可见,总磷全年上下波动,随季节变化规律不显著。3月,5测点 TP 浓度最大,为0.5 mg/L,6月4测点、7月1,2测点总磷浓度较高,分别为0.45, 0.48, 0.49>0.4 mg/L, 略超V类水质标准。其他测点总磷浓度处于Ⅲ-V类水平,3月1测点 TP 浓度最小,为0.02 mg/L,处于Ⅱ类水质水平,总磷超V类水质标准并不严重。

由空间分布可知,1—2河段总磷浓度年均值小于0.2 mg/L,3—4河段总磷浓度年均值大于0.2 mg/L,5—6河段磷污染较重,总磷浓度年均值大于0.25 mg/L,河道由上游至下游总磷浓度逐渐增大。这与泵入外源污水、沿岸餐饮及洗车废水的直接排入有关。

2.1.4 $Chla$ 时空动态分布特征

$Chla$ 浓度时空分布如图5所示。 $Chla$ 指标夏季6~8月较高,7月, $Chla$ 月均浓度值达到72.98>65 $\mu\text{g/L}$,4测点 $Chla$ 浓度最高,为112.2 $\mu\text{g/L}$,超V类水质标准约1.7倍,表明河道水华易暴发。7月后 $Chla$ 月均浓度值逐渐降低。冬季11月至下一年2月份 $Chla$ 月均浓度值均小于10 $\mu\text{g/L}$,处于Ⅲ类水平;3月, $Chla$ 月均浓度值有所回升。春、秋季 $Chla$ 月均浓度值小于30 $\mu\text{g/L}$,处于Ⅳ水平。 $Chla$ 浓度值呈现夏季高、冬季低的变化规律。

从空间分布看,由于4测点上游泵入外源污染物,水体富营养污染程度增大,4测点 $Chla$ 的浓度年均值最大,为28.57 $\mu\text{g/L}$,其他测点 $Chla$ 浓度年均值相差不大,均在20 $\mu\text{g/L}$ 左右。由于浮游藻类沿河面飘移扩散, $Chla$ 沿河道空间变化不显著。

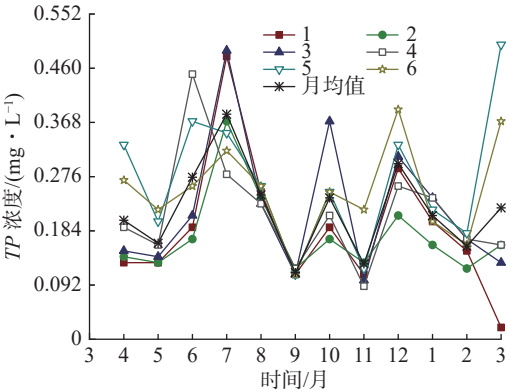


图4 总磷的时空动态分布

Fig. 4 Space-time dynamic distribution of total phosphorus in the urban river water

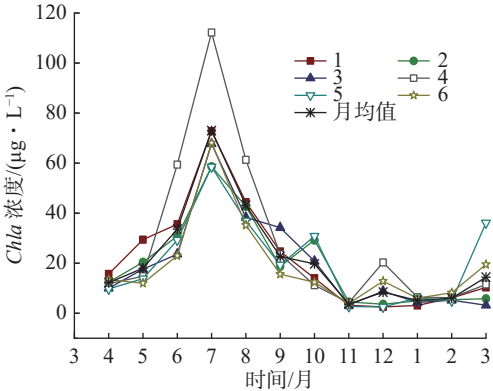


图5 $Chla$ 的时空动态分布

Fig. 5 Space-time dynamic distribution of $Chla$ in the urban river water

2.1.5 透明度的时空动态分布特征

水体透明度 SD 的时空动态分布如图6所示。

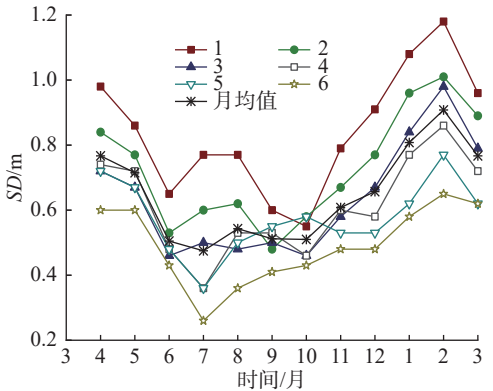


图6 SD 的时空动态分布

Fig. 6 Space-time dynamic distribution of SD in the urban river water

由图6可知,水体透明度呈现夏季低、冬季高的变化规律,空间上 SD 沿河道由上而下逐渐减小, SD 的时空变化规律与上述其他指标变化相反。冬季1,2月1测点 SD 分别为1.08, 1.18 m,

2月2测点的 SD 为1.01 m,其他测点的 SD 值均小于1.0 m。7月,4~6河段 SD 值仅为0.26~0.36 m,其中,因6测点上游有一小支流汇入搅动河水,6测点 SD 值最小,为0.26 m。

2.2 河道水体的富营养化评价

根据水质监测数据与上述分析结果,采用综合营养状态指数评价方法^[15-16],用 $Chla$, TN , TP , COD_{Mn} 和 SD 这5个指标,对水体富营养污染程度进行评价,得到各指标与 $Chla$ 的相关系数及权重

值(表2)和各测点的综合营养状态指数及富营养分级结果(表3)。

表2 水质指标与叶绿素a的相关系数及权重值
Tab.2 Correlation coefficient and weight value of water quality index and $Chla$

项目	$Chla$	TN	TP	COD_{Mn}	SD
r_{ij}	1.000	0.399	0.51	0.807	-0.468
r_{ij}^2	1.000	0.159	0.260	0.651	0.219
W_j	0.437	0.069 5	0.114	0.284	0.095 7

表3 综合营养状态指数值及富营养分级结果

Tab.3 Comprehensive eutrophic status index values and eutrophic classification results

日期	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6
4月	61.31 中度富营养	61.05 中度富营养	60.86 中度富营养	62.71 中度富营养	63.47 中度富营养	64.99 中度富营养
5月	65.14 中度富营养	63.14 中度富营养	62.46 中度富营养	62.7 中度富营养	64.19 中度富营养	63.75 中度富营养
6月	68.99 中度富营养	66.84 中度富营养	65.57 中度富营养	75.74 中度富营养	72.53 中度富营养	70.79 中度富营养
7月	76.49 中度富营养	74.99 中度富营养	76.36 中度富营养	79.09 重度富营养	77.05 重度富营养	78.04 重度富营养
8月	71.95 重度富营养	71.22 重度富营养	70.83 重度富营养	72.72 重度富营养	71.73 重度富营养	71.81 重度富营养
9月	65.88 重度富营养	65.17 重度富营养	67.20 重度富营养	66.28 重度富营养	65.55 重度富营养	64.66 重度富营养
10月	63.17 中度富营养	65.78 中度富营养	67.12 中度富营养	62.54 中度富营养	67.27 中度富营养	62.81 中度富营养
11月	54.06 中度富营养	56.23 中度富营养	55.02 中度富营养	55.68 中度富营养	54.12 中度富营养	56.92 中度富营养
12月	54.44 轻度富营养	55.81 轻度富营养	61.18 轻度富营养	64.96 轻度富营养	54.76 轻度富营养	63.45 轻度富营养
1月	53.35 轻度富营养	55.43 轻度富营养	56.05 中度富营养	58.36 中度富营养	58.66 轻度富营养	58.07 中度富营养
2月	56.73 轻度富营养	56.25 轻度富营养	56.63 轻度富营养	58.06 轻度富营养	57.98 轻度富营养	60.36 轻度富营养
3月	56.28 轻度富营养	57.94 轻度富营养	55.00 轻度富营养	62.05 轻度富营养	70.10 轻度富营养	66.38 中度富营养
	轻度富营养	轻度富营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养	中度富营养

由表3评价结果可见,水体的综合营养状态指数介于53.35~79.09之间,均处于富营养污染状态。春季4~5月,水体均为中度富营养状态;夏季6月,4—6河段出现重度富营养状态;7~8月,水体的综合营养状态指数均大于70,河道水体处于重度富营养状态。7月开始,大量灰绿色藻类漂浮水面,水体散发腐臭气味,河道黑臭水华暴发现象已初显,如图7(a)所示。秋季9~10月,河道水体均处于中度富营养状态。11月,水体呈现轻度富营养状态,水质较好无水华,如图7(b)所示。冬季12月至下一年2月,水体以轻度富营养状态为主,从3月开始,随气温回升,4—6河段出现中度富营养状态。由此可见,该河道水体富营养程度随季节变化明显,7月4测点水体综合富营养状态指数最大,为79.09,富营养污染程度最为严重。

2.3 河道水体富营养化成因分析

通过上述分析及研究成果总结^[17-18],本河道水体营养化的主要影响因素如下:

- a. 水力条件的影响。本河道属中小型非潮汐城市河流,水域面积小,水体环境容量较小,水流量较小,流速缓慢,水流对污染物的迁移扩散能力较差。
- b. 气候因素的影响。夏季25~35℃的水温最适宜藻类生长繁殖,7~8月水体富营养化最严重。
- c. 外源污染物输入的影响。4测点上游混合污水的排入,尤其夏季暴雨时污水排入量较大,以及河道沿岸餐饮污水、洗车废水的直接排入,降雨水径流中污染物的输入,也增大了水体有机物、氮、磷的污染。
- d. 内源污染物的影响。河床底泥中含有氮、磷、有机污染物等,在风力搅动和降雨水流冲刷

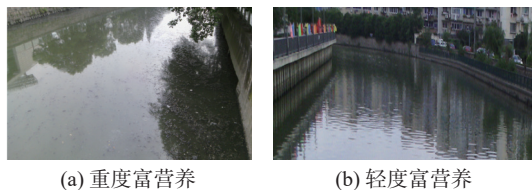


图7 水体的富营养化程度照片

Fig. 7 Photo of eutrophication degree of the water body

时,底泥中污染物的释放量会随风力和雨强的增大而增大。

鉴于上述原因,在“河长负责制”科学管理下^[19],控制该河道外源污水的排入,加强河道水质监测、评价和富营养状态预报等各方面工作,以减轻河道黑臭现象,防治水华暴发。

3 结 论

通过对上海市某河道水质的监测、评价及富营养特性和成因分析,得到如下结论:

a. 河水水质指标 $Chla$, TN , COD_{Mn} 均呈现夏季高、冬季低的变化规律, SD 随时间季节的变化则相反,总磷随季节变化不显著。7月 $Chla$, TN , COD_{Mn} , TP 的平均浓度均达到最高, SD 平均值达到最小。 TP 处于V类水平, TN , COD_{Mn} 平均浓度均超V类水质标准约2倍,氮和有机污染较严重。

b. 河道水质指标 TN , $Chla$ 的最高值出现在4测点, COD_{Mn} , TP 最大值出现在5测点, SD 最小值出现在6测点,表明上游1—3河段水质污染程度较轻,下游4—6河段水质污染较重。

c. 综合营养状态指数评价结果显示,河道水体均处于富营养污染状态。11月及以后的冬季水体主要表现为轻度富营养污染状态;3~5月及9~10月春秋季节,水体属中度富养状态;夏季6月,4—6河段首先出现重度富营养,该河段易暴发水华;7~8月,水体均处于重度富营养状态,该河流整体易暴发水华。

参考文献:

- [1] 李珍明,蒋国强,朱锡培. 上海地区黑臭河道治理技术分析[J]. 净水技术, 2010, 29(5): 1-3, 45.
- [2] 廖晶新,施泽明,黄鹤飞,等. 水体富营养化的来源、危害及治理研究[J]. 四川有色金属, 2012(3): 46-48.
- [3] WANG J, LIU X D, LU J. Urban river pollution control and remediation[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1856-1862.
- [4] 曹承进,陈振楼,黄民生. 城市黑臭河道富营养化次生灾

害形成机制及其控制对策思考[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(2): 9-20.

- [5] KUMAR S, JHA P, BAIER K, et al. Pollution of ganga river due to urbanization of Varanasi: adverse conditions faced by the slum population[J]. *Environment and Urbanization ASIA*, 2012, 3(2): 343-352.
- [6] HALDAR S, MANDAL S K, THORAT R B, et al. Water pollution of Sabarmati River—a Harbinger to potential disaster[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(4): 2231-2242.
- [7] SIKDER M T, KIHARA Y, YASUDA M, et al. River water pollution in developed and developing countries: judge and assessment of physicochemical characteristics and selected dissolved metal concentration[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2013, 41(1): 60-68.
- [8] 孙玉平,于恒国,周钦,等. 典型富营养化城市河流——浙江温瑞塘河的浮游植物群落类型与季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 375-384.
- [9] 刘超,李如忠,吴小龙. 不同污染水平城市河流有机质降解速率及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3578-3585.
- [10] 张运林,秦伯强,朱广伟. 过去40年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1348-1359.
- [11] SCHINDLER D W, HECKY R E, FINDLAY D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [12] 周海东,轩玉梅,胡涛等. 氮磷形态对铜绿微囊藻的生长影响[J]. 能源研究与信息, 2020, 36(1): 1-8.
- [13] 路金霞,柏杨巍,傲德姆,等. 上海市黑臭水体整治思路、措施及典型案例分折[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 541-549.
- [14] 上海市环境保护局. 2013年上海环境状况公报[R]. 上海:上海市环境保护局, 2014.
- [15] 张永生,李海英,吴雷祥. 三峡水库草堂河营养状态变化特征与影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(10): 2060-2069.
- [16] 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.
- [17] 张海春,胡雄星,韩中豪. 黄浦江水系水质变化及原因分析[J]. 中国环境监测, 2013, 29(4): 55-59.
- [18] 俞晓蓓,庄惠生. 苏州河长宁段氮磷季节变化特征及其成因分析[J]. 广州化工, 2014, 42(15): 180-181.
- [19] 王克磊,宿昕,李丽. 基于河长制的河道保护管理系统设计[J]. 山东水利, 2018(5): 24-25.