

述评与讨论

## 雾霾亦可诱发水体富营养化

郝晓地, 罗玉琪, 曹达启, 李爽

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中—荷未来污水处理技术研发中心, 北京 100044)

**摘要:** 近年来,我国水体富营养化现象较为严重,不仅影响人体健康,加剧水资源短缺,同时也给养殖业、旅游业等相关产业带来了巨大的经济损失。虽然政府投入大量财力、物力和人力进行了“综合”治理,但收效甚微,太湖、滇池、巢湖等湖泊蓝藻暴发现象频频。相关文献调研表明,大气环流对营养物循环作用不可忽视,特别是在雾霾等极端污染天气情况下。监测数据显示,无论是干沉降还是湿沉降(降雨),从大气进入地表水体的氮、磷负荷可能高于城市污水点源排放浓度。在地表水体富营养化还未得到有效控制的情况下,来自大气的“天然”营养物污染源会使得水体富营养化现象不断加剧。可见,根除水体富营养化不仅需要治理水污染,还需大力治理大气污染方可有效。

**关键词:** 雾霾; 水体富营养化; 可吸入颗粒物 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>; 大气环流; 干/湿沉降; 氮/磷负荷

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)06-0012-05

### Induction of Haze to Eutrophication of Surface Water

HAO Xiao-di, LUO Yu-qi, CAO Da-qi, LI Shuang

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In recent years, the eutrophication in some surface water is serious in China, which not only affects peoples' health and exacerbate water shortage, but also brings huge economic loss to aquaculture, tourism and other related fields. Although governments have put great efforts on manpower, materials and finance to control eutrophication, the effect has been proven little, and the cyanobacteria's blooming still occurs frequently in such famous lakes as Taihu Lake, Dianchi Lake and Chaohu Lake. The literature's review indicates that the influence of atmospheric circulation on the nutrient cycle could not be ignored, especially under some extreme weather conditions like haze. Some detected data indicate that the loadings of nitrogen and phosphorus entering into surface water from atmosphere are even higher than those from wastewater discharge. Under the condition where eutrophication has not been fully controlled, the nutrients naturally contributed from atmosphere would make eutrophication even worse.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578036); 北京“未来城市设计高精尖中心”项目(2017)

Therefore, the effective extinguish of eutrophication requires simultaneous control of water pollution and air pollution.

**Key words:** haze; eutrophication; PM10/PM2.5; atmospheric circulation; dry/wet deposition; nitrogen/phosphorus loadings

近年来,我国水体富营养化情况较为严重,黑臭水体普遍存在;滇池、太湖、巢湖等湖泊虽经大规模治理,但蓝藻暴发现象未曾中断<sup>[1]</sup>,这种久治而不见其效的状况令人尴尬。事实上,导致水体富营养化的主要元凶——氮、磷等营养物质不仅有人为源,也存在天然源,人为源多是显性的,而天然源往往是隐性的。治理富营养化首先是阻断外源氮、磷进入,然后才能跟进其他技术措施。然而,在阻断外源方面,关注较多的是人为源这样的显性源(农业面源、污水点源、城市面源等),很少注意到天然源(岩石侵蚀、浮尘下沉、雾霾降水等)那样的隐性源。欧洲地表水中磷的来源分析表明,岩石侵蚀进入水体中的磷负荷(10%)与洗衣粉产生的磷负荷(11%)相当。因此,即使杜绝了含磷洗衣粉的使用,仅岩石侵蚀这种通过天然途径进入水体的磷在其他适宜环境(氮、硅酸盐等含量与温度、阳光、水流等物理条件)下足以导致水体富营养化,因为判断水体富营养化国际标准为  $TN = 0.5 \sim 1.2 \text{ mg/L}$ ,  $TP = 0.03 \sim 0.1 \text{ mg/L}$ 。

另一方面,大气环流和降雨在水体营养物质循环中也扮演着一定角色;不降雨时会出现浮尘干沉降,而降雨时则会把难沉降的细颗粒物洗涤沉降。显然,清洁的空气很少触动营养物循环,而污浊的空气,特别是雾霾出现时不论是否降雨都必定诱发营养物循环。问题是,雾霾出现时在干、湿沉降下是否会产生导致水体富营养化的氮、磷水平。如果是,这种营养物来源表面上似乎应归属于“天然”源,因此是隐性的,应该像岩石侵蚀一样引起广泛关注。研究表明,大气传输过程不仅能大量使陆源物质进入水体,而且其通量可能接近于因点源输送注入水体的污染物质通量<sup>[2]</sup>。因此,很有必要探讨雾霾与水体富营养化的关系。

## 1 雾霾特征与组成

雾霾即雾(由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统)和霾(主要组成成分为二氧化硫、氮氧化物以及可吸入颗粒物;前两者为气态污染物,后者颗粒物则是加重雾霾污染天气

的罪魁祸首)的合称,用来表示大气污染的状态。表示近地空气中各种可吸入细颗粒物含量的综合指标有 PM10 (Particulate Matter 10) 和 PM2.5 (Particulate Matter 2.5) 两种常用表述方法(单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  空气)。PM10 和 PM2.5 分别指空气动力学当量直径  $\leq 10 \mu\text{m}$  和  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  的可吸入人体的细颗粒物,是雾霾的“元凶”。根据定义,PM2.5 应包含在 PM10 内,平均为 PM10 的 70%。PM10 主要来自自然扬尘、道路及施工场地扬尘、煤烟尘、工业企业排放的烟粉尘和机动车排放的尾气等,而 PM2.5 来源除自然和人为形成的细颗粒物外,还来自于环境空气中硫氧化物、氮氧化物、挥发性有机化合物及其他化合物相互作用形成的细小颗粒物<sup>[3]</sup>。

通过分析雾霾来源可知,雾霾中氮氧化物普遍存在,所以氮源干、湿沉降进入水体的机会很大,而且下降后进入水体的浓度应该很高。上述有关雾霾化学成分中虽然未明确提及磷的成分,但不难推断,只要空气中存在扬尘、浮土,磷也应该包含其中,只是随干、湿沉降进入水体的浓度是否可达导致水体富营养化的水平。因此,需要辨析或分析雾霾干、湿沉降中氮磷含量及进入水体的营养物负荷,以确定它们能否在大气环流或降雨时诱发水体富营养化现象。

## 2 雾霾致水体中氮、磷含量

大气环流作用对地表水体中氮、磷含量的贡献涉及环境学、大气科学中的干/湿沉降概念;干沉降表示不降水时,大气中的污染物质被植被吸附或重力沉降到地面的现象;发生降水时(雪、雾、露、雹等)高空雨滴吸附包含污染物继而下降的现象即为湿沉降。

太湖近年来一直受水体富营养化现象的困扰。2007 年、2015 年和 2017 年先后出现了大规模蓝藻暴发的现象。2002 年 7 月—2003 年 6 月期间,有学者针对太湖周边地区 8 个站/点大气 TN、TP 沉降通量和降水化学组成进行观测表明,太湖水面直接受纳的大气 TN、TP 污染物分别占到环湖河道年输入氮、磷污染物总量的 48.8% 和 46.2%<sup>[2]</sup>。

2009年8月—2010年7月期间,研究人员在太湖流域不同区域选取10个采样点收集降水样品230多个<sup>[4]</sup>。水样分析结果表明,湿沉降中 $\rho(\text{TN})$ 年均值为2.41~3.82 mg/L,年均值平均为3.16 mg/L; $\rho(\text{TP})$ 年均值为0.03~0.13 mg/L,年均值平均为0.08 mg/L<sup>[4]</sup>。而较早之前,2007年太湖水体 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 的年均值分别为2.81 mg/L和0.101 mg/L<sup>[4]</sup>。在远、近距离大气污染物传输的影响下,太湖水体每年从大气沉降途径受纳的TN和TP分别为9 881 t/a和715 t/a,其中,经湖面降雨、雾(霾)等湿沉降途径分别带入7 852 t/a的TN、203 t/a的TP,分别占太湖TN、TP大气总沉降量(包括环湖雨水径流)的79.5%和28.4%<sup>[2]</sup>。这些实时监测数据表明,在太湖水体中氮、磷含量已超富营养化标准的情况下,大气降水中的氮和磷沉降会使太湖水质每况愈下,因此,其富营养化状况显然难以一时消除。

长江口水域富营养化形成机理研究结果显示,TN中有25%来自大气的干/湿沉降,远远超过城市生活污水点源排放贡献率(17%)和工业废水排放贡献率(9%),且进行检测时还没有出现雾霾等极端空气污染现象<sup>[5]</sup>。可见,若出现雾霾时,大气环流带入水体的氮、磷含量将远远超过检测值,雾霾对水体富营养化的作用可见一斑。

乌梁素海位于内蒙古自治区西部巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,是我国八大淡水湖之一,总面积约300 km<sup>2</sup>。有研究显示,乌梁素海大气氮沉降以干沉降为主(降雨量较小)。根据不同来源的氮输入量对比分析发现,监测期内排水干渠、干管(排水干管)等输入湖泊的TN负荷为971.4 t/a,而大气氮沉降总输入量高达364.1 t/a<sup>[6]</sup>。监测期内排水干管输入湖泊的TP为148.7 t/a,而通过大气沉降方式向湖泊输入的TP为54.06 t/a。其中,每年6月和7月大气沉降TN、TP量远高于排水干管输入量,分别是排水干管入湖量的1.09倍和1.97倍<sup>[6]</sup>。显然,大气沉降(干沉降)方式是湖泊获取氮、磷元素的重要来源。

城市景观水体多数处于封闭状态,水体流动性差,水体自净能力弱,更易反映出大气环流作用对水体水质的影响。2008年1月—7月,研究人员历时180 d分别对上海城区5个代表5种不同类型环境区域的水体采样分析表明,在不考虑水体自净能力

的前提下,对仅受大气降尘影响、水深为0.5~2 m的景观水体(处于地表水V类)进行检测,经过28~214 d后检测水体即可转变为劣V类水质<sup>[7]</sup>,详细水质检测数据如表1所示。

表1 2008年上海受检测水体N、P月累积量及水质转化时间

Tab.1 Monthly accumulations of N,P and the deteriorating period of water quality in Shanghai in 2008

水深/ m	TN		TP		水质恶化 历时/d
	月累积量/ (mg·L <sup>-1</sup> · 月 <sup>-1</sup> )	水质变化 历时/d	月累积量/ (mg·L <sup>-1</sup> · 月 <sup>-1</sup> )	水质变化 历时/d	
0.5	0.27	28	0.028	54	28
1.0	0.14	54	0.014	107	54
1.5	0.09	83	0.009	167	83
2.0	0.07	107	0.007	214	214

水质检测数据显示,即使在干沉降情况下,由大气进入地表水体的氮、磷含量在很多情况下足以诱发水体富营养化现象。若遇极端雾霾天气和降雨,湿沉降对大气的“清洗”作用将对地表水体产生更大的富营养化威胁。

### 3 大气中氮、磷转移至水体途径

上述检测数据显示,氮、磷从大气转移至地表水体中通常有两种途径,即干沉降和湿沉降。一般情况下,磷多来源于干沉降,氮在湿沉降时含量则会更高。

太湖2002年7月—2003年6月间监测数据显示,太湖受纳大气氮污染的主要途径是湿沉降,而大气磷污染则主要通过气溶胶等固体物质的干沉降形式进入水体<sup>[2]</sup>。

2004年3月—5月研究人员对上海暴雨径流进行了采样分析。随时间推移,径流中TP虽有所衰减(初期降雨时最高可达2~4 mg/L),但最终含量依然十分可观,最高时仍可达1~2 mg/L<sup>[8]</sup>。相较于上述太湖大气湿沉降TP数据,上海降雨中磷含量甚至高于太湖地区1~2个数量级。这应该是降雨径流将前期干沉降积累或路面垃圾冲刷后产生的结果。

美国研究人员2014年对佛罗里达州某低密度居民区进行了连续监测。综合25次降水事件分析得出,该区域降水中TN含量为0.09~2.32 mg/L(均值为0.8 mg/L),雨水径流中TN含量为0.04~2.49 mg/L(均值为0.96 mg/L),证实了大气湿沉



降、积累的大气干沉降和来自不透水层的冲刷物均可能增加大气中氮向水体的转移<sup>[9]</sup>。同年6月—11月,为研究雨水径流中磷对城市水质的影响,综合29次降雨数据得出,该地区降雨中TP含量为0.12~0.75 mg/L(均值为0.25 mg/L);雨水径流中TP含量为0.11~0.57 mg/L(均值为0.29 mg/L)<sup>[10]</sup>。对比数据显示,该地区降水与雨水径流中TN、TP含量相差并不是很大,说明干沉降累积与地面冲刷形成的氮、磷负荷甚微,揭示该地区大气中的氮、磷主要以降雨湿沉降方式进入水体。从另一侧面亦暗示着,被监测地区的空气质量应该很好,地面亦较为干净。

在形成降水过程中,易溶于水的铵盐、硝酸盐等含氮化合物会随降雨而降落地面,因此,氮在湿沉降时往往含量较高,特别是雾霾等极端污染天气下。磷在正常情况下通常以浮尘颗粒形式存在<sup>[11]</sup>,大气环流气溶胶中含磷颗粒污染物在气团输移过程中较容易通过重力、粒子间的碰并作用而沉降,从而离开气团<sup>[2]</sup>。也就是说,大气中的磷主要通过干沉降的方式降落水体或地面(随后通过降雨径流再进入水体)。有实验表明,由风导致的颗粒物(如雾霾等)传播是大气磷沉降的主要来源,含量大致占全部大气磷沉降的90%<sup>[12]</sup>。

#### 4 结语

雾霾是由可吸入细颗粒物组成的混合型污染物,成分复杂、结构多变,亦可作为其他污染物的传播载体,其化学成分中除含有对人体不利的化学成分外,也存在较多氮、磷成分。从可能诱发水体富营养化角度来说,雾霾中的氮、磷应该属于“隐性”污染源,所以,很少受到关注。然而,许多监测数据显示,因大气环流导致的污染物干沉降和湿沉降中往往含有很多氮、磷成分,特别是在雾霾等极端污染天气出现的情况下。太湖等地非极端天气下监测数据表明,无论是干沉降还是湿沉降,进入地表水体的氮、磷负荷甚至高于城市污水点源排放,其量已足以诱发水体富营养化现象。

因此,雾霾可诱发水体富营养化现象这一观点基本可以定论,特别是在地表水体富营养化还未完全消除的情况下。可见,在对各种地面源采取防治水体富营养化措施(源头截留、水体自净、污水处理)时,对雾霾这种“隐性”污染源却没有给予足够

的重视。为此,根除水体富营养化需要将水污染和大气污染双管齐下治理方能得到有效控制。这也可能是太湖、滇池、巢湖等著名淡水湖泊久治不愈的原因所在,或原因之一。

#### 参考文献:

- [1] 万蕾. 我国湖泊富营养化问题与治理现状[J]. 生态经济:学术版,2011,(1):378-381.  
Wan Lei. Present situation of lake eutrophication and control in China[J]. Ecological Economy, 2011, (1): 378-381 (in Chinese).
- [2] 杨龙元,秦伯强,胡维平,等. 太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究[J]. 海洋与湖沼,2007,38(2):104-110.  
Yang Longyuan, Qin Boqiang, Hu Weiping, et al. The atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(2): 104-110 (in Chinese).
- [3] 郝晓地,吴宇涵,李季. 黑臭水治理程序辨析[J]. 中国给水排水,2016,32(14):1-4.  
Hao Xiaodi, Wu Yuhuan, Li Ji. Discrimination and analysis on procedures for treating black smelly water[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(14): 1-4 (in Chinese).
- [4] 余辉,张璐璐,燕姝雯,等. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率[J]. 环境科学研究,2011,24(11):1210-1219.  
Yu Hui, Zhang Lulu, Yan Shuwen, et al. Atmospheric wet deposition characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake and contributions to the lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(11): 1210-1219 (in Chinese).
- [5] 江涛. 长江口水域富营养化的形成、演变与特点研究[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所,2009.  
Jiang Tao. Study on the Formation, Evolution and Characteristic of the Eutrophication of the Yangtze River Estuary[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2009 (in Chinese).
- [6] 尹琳琳. 乌梁素海大气氮、磷营养盐及重金属沉降的分异规律与入湖量核算[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.  
Yin Linlin. Spatial-temporal Distribution and Atmospheric Nutrient and Heavy Metals into the Wuliangsuhai Lake[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014 (in Chinese).

(下转第21页)