

湖库型水源天然有机物来源与特性及其 对水处理工艺影响研究进展

李 凯, 王晓东, 黄廷林

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 水源水中天然有机物(NOM)的含量和性质既关系到饮用水的色、嗅、味等感官性状及其生物和化学安全性, 又对水处理工艺的运行有重要影响。湖泊和水库是目前许多城市的主要水源, 深入认识湖库型水源中 NOM 的来源、性质及其处理特性对水源的优化调度和水处理工艺的运行具有重要意义。本文从湖泊和水库的水力特征出发, 分析了湖库型水源中 NOM 主要来源及其迁移转化过程, 结合相关文献总结了外源输入、内源产生以及光化学降解、生物降解等对 NOM 特性和水处理工艺的影响, 并对今后的研究方向进行了展望。

关键词: 湖库型水源; 天然有机物; 藻类; 饮用水处理

中图分类号: TU 991.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0588-06

Review on the origin, characteristics and treatability of natural organic matter in lakes and reservoirs

LI Kai, WANG Xiaodong, HUANG Tinglin

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Quantity and quality of natural organic matter (NOM) in the source water determines not only the aesthetic properties of drinking water, such as the color, taste and order, but also the bio-stability and chemical security of drinking water. Moreover, it plays an important role in the operation of water treatment process. Lakes and reservoirs are main water sources of many cities, and therefore a deep understanding of the origin, properties and treatability of NOM in lakes and reservoirs are of great significance in the selection of water source and optimal operation of water works. This paper analyzed the main sources and migration-transformation process of NOM based on the hydraulic characteristics of lakes and reservoirs. Combined with relevant literature, the effects of exogenous input, endogenous generation, photochemical degradation and biodegradation on NOM characteristics and water treatment process were summarized, and the future research directions were also prospected.

Key words: lakes and reservoirs; natural organic matter; algae; drinking water treatment

天然有机物(NOM)普遍存在于各种地表水体中, 其来源非常广泛, 既有陆生动植物残骸经微生物等分解形成的陆源有机物, 又包括水中微生物(如细菌、藻类等)新陈代谢产生的内源有机物^[1]。NOM 是导致水体色度和嗅味的重要因素, 是饮用水消毒过程中有害副产物的主要前驱物, 且部分 NOM 在饮用水输配过程中能够作为营养物质促进微生物的繁殖, 降低水的生物安全性, 因此, NOM 的去除已成为饮用水处理工艺的主要目标之一^[2]。另一方面, NOM 与水中的无机颗粒、病原微生物、微量污染物、重金属等杂质以及混凝剂、吸附剂、氧化剂、分离膜等水处理药剂和

设备之间存在复杂的相互作用, 对其他污染物的去除和混凝、吸附、氧化、消毒、膜过滤等水处理单元的效率有重要影响^[3]。因此, 对水源水中 NOM 来源、特性及其变化规律的深入认识对于饮用水处理工艺的设计和运行管理至关重要。

随着城市人口的快速增加, 地下水过量开采引发了一系列环境和地质问题, 许多大中城市的地下水资源开发利用受到限制, 湖库型水源逐渐成为许多城市的主要饮用水水源^[4]。与河流相比, 湖泊和水库通常具有较大的容积和水面面积, 水流缓慢, 水体滞留时间长, 水深较大, 大多存在季节性热分层现象。湖泊和水库特殊的水动力条

件使其水质演变过程与同一流域的河流有明显差异,除污染物随入流和出流的迁移外,湖库内部还发生着复杂的污染物迁移转化过程,如表层水体中浮游植物的光合作用和污染物光化学转化过程,底部水体中溶解氧变化引起的污染物氧化-还原、沉淀-溶解过程等^[5]。目前对于湖泊和水库中 NOM 的来源、特性和转化过程已有较多研究,但大多是从环境地球化学和生态学等的角度展开的,而对于湖库型水源中 NOM 的迁移转化对相应的饮用水处理工艺的影响关注较少^[6]。

本文从湖泊和水库的水力特征出发,分析了湖库型水源中 NOM 主要来源及其迁移转化过程,总结了湖库型水源中 NOM 迁移转化过程对其分子结构、分子量分布、亲疏水性、荷电性、生物可利用性等与饮用水处理过程密切相关的特性的影响,并对今后的研究趋势进行了展望。

1 湖库型水源 NOM 来源及其在湖库内的迁移转化过程

湖库型水源中 NOM 的含量和性质是外源输入、内源产生、湖库内迁移转化等多个过程动态平衡的结果,湖库型水源中 NOM 来源与迁移转化的主要过程如图 1 所示。

入湖(库)径流携带的有机物是湖库型水源中 NOM 的重要来源,这部分有机物由流域内陆地生态系统产生,并在径流形成过程中由土壤进入水体,最终汇入湖泊和水库。入湖(库)径流携带的 NOM 的含量和性质与流域内地形、土壤特性、土地利用情况、植被覆盖条件、水文气象条件等密切相关^[7-8]。

藻类等浮游植物通过光合作用合成的有机物是湖库型水源中 NOM 的另一重要来源^[9]。湖泊和水库水面面积大,水流缓慢,水力条件非常适合藻类的繁殖,在适宜的温度和光照条件下,当入流氮、磷等营养盐含量较高时极易出现藻类的爆发。藻类生长过程中会以胞外有机物的形式向水中分泌有机物,而当藻类进入衰亡期后胞内有机物和构成细胞结构本身的有机物均会分解进入水中^[10-11]。

无论是外源 NOM 还是内源 NOM,在湖库中均会发生复杂的迁移转化过程,包括物理作用下的沉降与扩散释放、化学和生物作用下的氧化还原与矿化、部分随出水流出湖库等。上游径流进入湖泊和水库之后水流速度显著降低,颗粒态有机物逐渐沉降,特别是降雨期间,径流对地面的

冲刷作用会使入湖(库)径流中颗粒态污染物大大增加;同时,季节性大量繁殖的藻类等浮游植物死亡后细胞分解也会形成颗粒态有机物,据估算,虽然湖泊、水库、河流等内陆水体的面积远小于海洋,但其中沉积的有机物与海洋中沉积的有机物数量相当^[12]。在颗粒态有机物沉降的同时,微生物的分解作用、生物或化学作用下铁锰氧化物等矿物颗粒还原溶解等会将部分颗粒态有机物转化为溶解态,使沉积物孔隙水中溶解性有机物(DOM)浓度增加,通过扩散作用向上覆水体释放^[13]。

湖泊和水库中的微生物呼吸作用、光化学降解等会引起 NOM 结构和性质的变化,并使部分 NOM 转化为 CO₂ 或 CH₄ 并最终进入大气。研究表明,在外源有机物持续输入下,除部分富营养化湖泊外,大多数湖泊的微生物呼吸作用大于光合作用^[12]。湖泊和水库的水面面积较大,表层水体能接受充足的光照,水体中的有色可溶性有机物(CDOM)能够吸收波长 300~800 nm 的光子的能量生成羟基自由基、单线态氧、超氧游离基等活性氧组分,从而引起 NOM 分子结构的改变甚至矿化^[14]。

深水型湖泊和水库的季节性分层对 NOM 的迁移转化有重要影响。深水型湖泊和水库水体分层期底部水体处于低温和低溶解氧环境,这一方面会使好氧微生物的数量减少,活性降低,抑制微生物对 NOM 的降解和矿化作用,另一方面,缺氧或厌氧条件会促进沉积物中颗粒态有机物向溶解态的转变和向上覆水体的释放,此外,水体分层期沉积物中氮磷等营养盐的释放会增加水体的富营养化程度,促进藻类的繁殖和内源 NOM 的产生。

气候变化对湖库型水源中 NOM 来源和迁移转化的影响不容忽视。气候变化条件下温度升高使陆地生态系统的初级生产力提高,同时降雨量的年内变化更加剧烈,暴雨频率增加,因此随暴雨径流进入湖泊和水库的外源有机物也相应增加,目前北半球的许多湖泊和水库已观察到了溶解性有机碳(DOC)浓度升高的现象^[12]。气候变化的另一重要影响是加剧藻类繁殖,气温升高、大气中 CO₂ 浓度增加、极端天气增加等都会促进藻类特别是蓝藻的爆发,从而造成藻源有机物的增加^[15-16]。此外,气温升高会使深水型湖库水体热分层时间延长,分层稳定性增加^[17],进而影响微生物对 NOM 的矿化和降解以及水-沉积物界面有

机物的转化与释放。

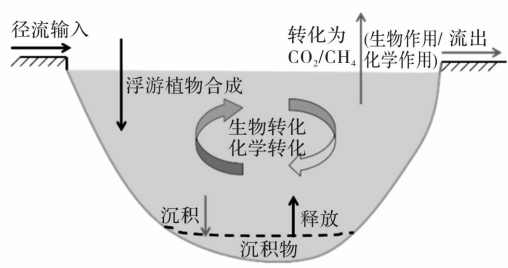


图1 湖库型水源中 NOM 来源与迁移转化过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the origin, migration and transformation of NOM in lakes and reservoirs

2 外源输入有机物特征及其对水处理工艺影响

湖泊和水库中外源输入 NOM 的主要成分是陆源腐殖质。腐殖质是一类结构和官能团相似的有机物的统称,分子中含有较多的苯环和双键等不饱和结构,疏水性较强,比紫外吸光度(SUVA)较高,分子量分布范围较宽,既有分子量较小的富里酸,又有分子量较大的腐殖酸,且相对较小的腐殖质分子能通过氢键、疏水作用等弱作用力结合形成超大分子。腐殖质分子中含有较多的羧基、酚羟基等官能团,通常被看做是弱阴离子聚合电解质,在中性条件下带负电。

腐殖质较强的疏水性和较大的分子量使其易于被混凝去除,常用的金属盐混凝剂对其去除率可达 50% 以上,但在高寒地区低温条件下混凝沉淀对小分子富里酸的去除效果往往较差,导致出水色度较高;混凝剂消耗量方面,腐殖质浓度越高,腐殖质分子的电荷密度越大,混凝剂消耗量越大。腐殖质较强的疏水性有利于其在活性炭等吸附剂上的吸附,但尺寸排阻效应会阻碍大分子腐殖质在微孔内的吸附;在重金属和微量有机污染物的去除方面,腐殖质可能通过对吸附点位的直接竞争、与目标污染物的络合作用以及对吸附剂扩散通道的堵塞等不同机理影响吸附效果。臭氧、高锰酸钾等氧化剂能破坏腐殖酸分子中的苯环和共轭双键等不饱和结构,使其分子量减小,亲水性增强,可生化性提高;同时,腐殖质对氧化剂的消耗会降低微量污染物的氧化去除效率。腐殖质是膜法水处理工艺中膜污染的重要原因,不同分子量的腐殖质能够通过吸附、膜孔堵塞、滤饼层形成等不同机理造成膜污染。在消毒过程中,腐殖质是卤代消毒副产物的主要前体物质,三卤甲烷和卤乙酸的生成势与芳香族和酚羟基结

构含量有较好的相关性。

降雨是影响湖泊和水库外源输入有机物含量和性质的主要因素。对美国东部地区 30 个小型森林覆盖流域的大数据分析表明,超过 86% 的 DOC 负荷是在暴雨和融雪期间产生的^[8]。Chen 等^[18]利用尺寸排阻色谱-有机碳检测(SEC-OCD)对水库入库径流中 DOM 含量和性质的逐月监测发现,DOC 浓度和大分子腐殖酸组分的含量变化与降雨量呈正相关,暴雨径流能够携带大量的芳香族土壤腐殖质进入水库。Raeke 等^[7]采用超高分辨率傅里叶变换离子回旋共振质谱仪(FT-ICR-MS)和 C14 同位素分析研究了不同径流量条件下水源水库上游不同分子结构 DOM 的迁移特性及其混凝去除特性,发现暴雨径流期间 DOM 迁移性增强,DOC 浓度升高,而这部分 DOM 通常能被混凝有效去除。Nguyen 等^[19]考察了暴雨期间 Kyungan 河中 DOM 特性的变化,发现暴雨径流使水中土壤 DOM 增多,腐殖酸和富里酸类荧光组分增加,蛋白质类荧光组分减少,同时 DOM 的平均分子量由 1100 Da 增至 1510 Da。暴雨径流进入水库后通常发生等密度潜流,使潜流影响区域内 DOM 的浓度、光谱性质等与其他区域明显不同^[20-21]。Zhou 等^[22]对不同入湖流量下千岛湖 CDOM 组成和特性的原位监测分析表明,入湖 CDOM 的浓度和分子尺寸随入流量增大而明显增加,光谱特征参数分析表明雨季入湖 CDOM 以大分子腐殖质类为主。

湖泊和水库上游的植被条件和土地利用情况对 NOM 的性质和处理特性有一定影响。在以森林为主的流域,分子量较大的含氧不饱和分子更易迁移,而在草原和农业比例较大的流域,地表径流中含硫和含氮有机物所占比例较高,相比较而言,以森林为主的流域径流中 DOM 在混凝过程中去除率较高^[7]。当湖库上游存在较多的人类活动时,湖泊和水库进水会受到污水排放等的影响含有一定量的非腐殖质类有机物^[23]。

3 藻源有机物特征及其对水处理工艺影响

湖泊和水库的水力条件有利于藻类生长繁殖,藻类通过光合作用合成的有机物是湖库型水源 NOM 的重要来源。藻类新陈代谢不同阶段会向水中释放不同的有机物,包括生长过程中分泌到水中的胞外有机物、藻细胞破裂时释放到水中的胞内有机物以及藻细胞衰亡分解后的细胞有机物等,从化学组成上来讲,藻源有机物包括糖类、含氮

有机物(氨基酸、多肽、蛋白质、核酸)、脂质以及多种有机酸等, 同时还包括受到广泛关注的藻毒素和臭味物质等。与陆源腐殖质相比, 藻源有机物的亲水性较强, 多糖、低分子羧酸、氨基酸、氨基糖、多糖等亲水性组分的比例一般在60%以上, 芳香结构和共轭双键含量较少, SUVA值较低。分子量分布范围从数百 Da 至数百 kDa, 其中低分子量组分主要是醛类、烃类、胺类、氨基酸、多肽、单糖与低聚糖等中间代谢产物, 而大分子量组分(>10 kDa)主要是酶等多肽类, 此外还有一定比例的分子量大于100 kDa的蛋白质、多糖等生物聚合物。多数藻源有机物分子中有较多的羧基、氨基等官能团, 在较宽的 pH 范围内分子整体带负电, 其电荷密度随藻的种类和生长阶段而存在一定差异。

藻源有机物混凝的主要机理是吸附电中和作用, 其中分子量较大、荷负电的组分混凝去除效果较好, 而小分子组分不易被混凝去除; 藻源有机物除了直接消耗混凝剂外, 还能够与金属混凝剂形成溶解性络合物抑制混凝过程; 但也有研究表明一定浓度的大分子胞外有机物能够通过吸附架桥作用促进藻细胞和无机颗粒的混凝^[24], 且藻源有机物中的蛋白质分子与水中腐殖质分子间的疏水作用、偶极作用、静电作用等相互作用能提高混凝效果, 降低混凝剂消耗量^[25]。活性炭吸附对藻源有机物中大分子、亲水性组分去除效果很差, 但能够有效去除其中的小分子组分, 对于藻毒素和臭味物质也有一定的去除效果。

藻源有机物造成的膜污染是近年来饮用水处理工艺研究的热点。Her 等^[26]的研究表明相同 DOC 浓度条件下藻源有机物造成的膜污染明显高于腐殖酸, 特别是其中的强亲水性、电中性、低 SUVA 组分是造成膜污染的主要原因。从亲疏水性的角度来看, 目前的研究普遍认为藻源有机物中的亲水性组分, 特别是中性亲水组分是主要的膜污染物质; 分子量方面, 一般认为大分子组分, 如生物大分子类, 对膜污染的贡献最大^[27-29]。此外, 藻类的生长阶段、营养条件等会改变藻源有机物的组成和含量而影响其膜污染势, 水中的钙、镁等离子则会通过与藻源有机物的羧基等官能团的相互作用影响膜污染^[30]。

藻源有机物作为消毒副产物(DBPs)前体物对饮用水安全的影响也是近年来的研究热点。在含碳消毒副产物(C-DBPs)生成势方面, 藻源有机物的卤乙酸(HAAs)生成势通常高于三卤甲烷

(THMs)生成势, 而溴离子的存在会促进 THMs 的生成而使二者相当; 总体而言, 藻源有机物的总体 C-DBPs 生成势低于外源有机物^[9], 例如 Fang 等^[31]发现反应时间 3 d 条件下典型外源有机物的 THMs 生成势为 72 $\mu\text{g}/\text{mg C}$, 是蓝藻有机物的 4 倍。但在对水质安全威胁更大的含氮消毒副产物(N-DBPs)生成势方面, 藻源有机物的影响高于外源有机物, 这与藻源有机物中较高浓度的溶解性有机氮有关。

4 湖库中 NOM 迁移转化对其性质和水处理工艺的影响

湖泊和水库中水体滞留时间长, 在物理、化学、生物等多种综合作用下, NOM 会发生一系列迁移转化过程, 导致其性质和处理特性的变化。Rosario-Ortiz 等^[23]比较了美国西南部大型水库 Mead 湖出流与入库支流中 DOM 的芳香性、分子尺寸、极性和荧光特性等的差异, 发现入库支流中 DOM 呈现出明显的外源有机物特征, 但出流水的 SUVA 值明显低于入库支流, 出流水中 DOM 的分子尺寸最小, 疏水性最弱, 且微生物源荧光组分含量最高, 上述 DOM 特性的变化使水库出水的混凝、吸附、膜过滤特性和 DBPs 生成势等与上游河水有明显差异。

湖泊和水库中水-沉积物界面是 NOM 迁移转化的重要场所。沉积物既是入流和内源产生的颗粒态有机物的主要“汇”, 又是上覆水体中 DOM 的重要“源”^[13]。腐殖质类是沉积物中有机质的最主要组分, 在部分湖泊中能够占到沉积物总有机碳的 60%~90%, 但对湖库水质影响最大的是沉积物中的 DOM, 特别是孔隙水中的 DOM; 与上覆水相比, 沉积物中 DOM 的 SUVA 通常较高, 分子量较大, 腐殖化指数也较高, 且含有更多的含氮和含硫有机物^[32]。

微生物呼吸作用是天然水体生物自净的重要机理, 该过程能够使部分有机物矿化或降解, 从而降低水中 DOM 的含量, 特别是常规水处理工艺难以有效去除的小分子有机物含量, 进而降低 DBPs 生成势、提高饮用水生物稳定性。光化学降解主要使芳香族和非饱和结构转变为羧基化和羟基化产物, 而光辐射强度和波长随水深的变化使不同水深处的光化学降解作用存在明显差异, 因此会造成 NOM 性质随水深的变化, 对海水不同深度 NOM 性质的研究表明光化学降解作用使表层水体中脂肪族化合物较多, 而光化学降解作用很弱的

深水中芳香族化合物较多^[33]。此外,湖库中的光化学降解过程对于生物降解有一定的影响,且对不同来源的 NOM 影响不同,以腐殖质类为主的外源有机物经光化学降解后更易于被细菌利用,而对于藻源有机物,光化学降解可降低其生物可利用性^[34]。

5 结语

湖库型水源中的 NOM 既有来源于陆地生态系统的外源有机物,又有藻类等合成的内源有机物。外源有机物以陆源腐殖质为主,具有分子量较大、疏水性较强、富含芳香族结构等特点,易于通过混凝和吸附去除,C-DBPs 生成势较高;而内源有机物分子量分布范围较宽、亲水性组分较多,仅大分子组分易被混凝去除,小分子组分可被吸附去除,对低压膜的污染较为严重,N-DBPs 生成势较高。光化学降解和微生物降解作用使 NOM 的分子量减小,亲水性增强,而沉积物释放的 NOM 通常分子量较大,腐殖化程度较高。

气候变化条件下湖泊和水库中藻类的爆发会更加频繁,目前关于藻类胞外有机物的性质已有较多研究,但对于藻类衰亡过程中胞外和胞内有机物以及藻细胞残骸在湖库内的迁移转化过程及其对水质的影响关注较少;此外,藻源有机物与陆源腐殖质及其他污染物间的相互作用对水处理工艺的影响有待深入研究。研究手段方面,高分辨率质谱等分析方法的应用有助于从分子水平上认识 NOM 的来源和迁移转化过程。

参考文献 References

- [1] LEENHEER J A, CROUÉ J P. Characterizing Aquatic Dissolved Organic Matter [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(1): 18A-26A.
- [2] 乔春光,魏群山,王东升,等. 典型南方水源溶解性有机物分子量分布变化及去除特性 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(2): 195-200.
QIAO Chunguang, WEI Qunshan, WANG Dongsheng, et al. Molecular weight distribution and removal characters of DOM in the typical source water in south of China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 195-200.
- [3] FABRIS R, CHOW C W, DRIKAS M, et al. Comparison of NOM character in selected Australian and Norwegian drinking waters [J]. *Water Res*, 2008, 42(15): 4188-96.
- [4] 许铁夫,崔崇威,李妍,等. 东北地区某水源湖库特征及控制策略研究 [J]. *给水排水*, 2014, 50(4):

31-37.

- XU Tiefu, CUI Chongwei, LI Yan, et al. Characteristics and control strategy of a source water reservoir in Northeast China [J]. *Water & wastewater engineering*, 2014, 50(4): 31-37.
- [5] 黄廷林. 水源水库水质污染原位控制与改善是饮用水水质安全保障的首要前提 [J]. *给水排水*, 2017, 43(1): 1-3, 69.
HUANG Tinglin. In-situ control of water pollution and improvement of water quality in water source reservoirs is the primary precondition for the safety of drinking water [J]. *Water & wastewater engineering*, 2017, 43(1): 1-3, 69.
- [6] WEI Q S, FENG C H, WANG D S, et al. Seasonal variations of chemical and physical characteristics of dissolved organic matter and trihalomethane precursors in a reservoir: a case study [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 150(2): 257-64.
- [7] RAEKE J, LECHTENFELD O J, TITTEL J, et al. Linking the mobilization of dissolved organic matter in catchments and its removal in drinking water treatment to its molecular characteristics [J]. *Water Res*, 2017, 113: 149-159.
- [8] RAYMOND P A, SAIERS J E. Event controlled DOC export from forested watersheds [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 100(1-3): 197-209.
- [9] PIVOKONSKY M, NACERADSKA J, KOPECKA I, et al. The impact of algogenic organic matter on water treatment plant operation and water quality: A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 46(4): 291-335.
- [10] 马晓雁,唐凯,陈晨,等. 非严格厌氧环境中高藻水次生臭味污染特征 [J]. *中国给水排水*, 2013, 29(21): 50-54.
MA Xiaoyan, TANG Kai, CHEN Chen, et al. Release and distribution characters of odorous contaminants in high algae laden water under non-strict anaerobic conditions [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(21): 50-54.
- [11] 尚丽霞,柯凡,李文朝,等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究 [J]. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 47-54.
SHANG Lixia, KE Fan, LI Wenchao, et al. Laboratory research on the contaminants release during the anaerobic decomposition of high-density cyanobacteria [J]. *J Lake Science*, 2013, 25(1): 47-54.
- [12] TRANVIK L J, DOWNING J A, COTNER J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2298-2314.
- [13] CHEN M, KIM S H, JUNG H J, et al. Dynamics of

- dissolved organic matter in riverine sediments affected by weir impoundments: Production, benthic flux, and environmental implications [J]. *Water Res*, 2017, 121: 150-161.
- [14] GONSIOR M, HERTKORN N, CONTE M H, et al. Photochemical production of polyols arising from significant photo-transformation of dissolved organic matter in the oligotrophic surface ocean [J]. *Marine Chemistry*, 2014, 163: 10-18.
- [15] ELLIOTT J A. Is the future blue-green? A review of the current model predictions of how climate change could affect pelagic freshwater cyanobacteria [J]. *Water Res*, 2012, 46(5): 1364-71.
- [16] HAVENS K E, PAERL H W. Climate change at a crossroad for control of harmful algal blooms [J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49 (21): 12605-12606.
- [17] JEZNACH L C, TOBIASON J E. Future climate effects on thermal stratification in the wachusett reservoir[J]. *Journal - American Water Works Association*, 2015, 107: E197-E209.
- [18] CHEN M, HE W, CHOI I, et al. Tracking the monthly changes of dissolved organic matter composition in a newly constructed reservoir and its tributaries during the initial impounding period [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 23 (2): 1274-1283.
- [19] NGUYEN H V M, HUR J, SHIN H S. Changes in spectroscopic and molecular weight characteristics of dissolved organic matter in a river during a storm event [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 212(1-4): 395-406.
- [20] KIM B, CHOI K, KIM C, et al. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea [J]. *Water Res*, 2000, 34(14): 3495-3504.
- [21] HUR J, JUNG N C, SHIN J K. Spectroscopic distribution of dissolved organic matter in a dam reservoir impacted by turbid storm runoff [J]. *Environ Monit Assess*, 2007, 133(1/3): 53-67.
- [22] ZHOU Y, ZHANG Y, JEPPESEN E, et al. Inflow rate-driven changes in the composition and dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a large drinking water lake [J]. *Water Res*, 2016, 100: 211-221.
- [23] ROSARIO-ORTIZ F L, SNYDER S A, SUFFET I H. Characterization of dissolved organic matter in drinking water sources impacted by multiple tributaries [J]. *Water Res*, 2007, 41(18): 4115-28.
- [24] WANG L, QIAO J, HU Y, et al. Pre-oxidation with KMnO_4 changes extra-cellular organic matter's secretion characteristics to improve algal removal by coagulation with a low dosage of polyaluminium chloride [J]. *J Environ Sci (China)*, 2013, 25(3): 452-459.
- [25] PIVOKONSKY M, NACERADSKA J, BRABENEC T, et al. The impact of interactions between algal organic matter and humic substances on coagulation [J]. *Water Res*, 2015, 84: 278-285.
- [26] HER N, AMY G, PARK H-R, et al. Characterizing algogenic organic matter (AOM) and evaluating associated NF membrane fouling [J]. *Water Res*, 2004, 38(6): 1427-1438.
- [27] 李甜, 董秉直, 刘铮. 藻类有机物的特性以及对超滤膜的污染 [J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 318-323.
LI Tian, DONG Bingzhi, LIU Zheng. Characteristic of algogenic organic matter (AOM) and its effect on UF membrane fouling [J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (2): 318-323.
- [28] QU F, LIANG H, WANG Z, et al. Ultrafiltration membrane fouling by extracellular organic matters (EOM) of *Microcystis aeruginosa* in stationary phase: Influences of interfacial characteristics of foulants and fouling mechanisms [J]. *Water Res*, 2012, 46 (5): 1490-1500.
- [29] LI K, QU F, LIANG H, et al. Performance of mesoporous adsorbent resin and powdered activated carbon in mitigating ultrafiltration membrane fouling caused by algal extracellular organic matter [J]. *Desalination*, 2014, 336(1): 129-137.
- [30] LY Q V, MAQBOOL T, HUR J. Unique characteristics of algal dissolved organic matter and their association with membrane fouling behavior: a review [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2017, 24 (12): 11192-11205.
- [31] FANG J, YANG X, MA J, et al. Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor (am) ination [J]. *Water Res*, 2010, 44 (20): 5897-906.
- [32] CHEN M, HUR J. Pre-treatments, characteristics, and biogeochemical dynamics of dissolved organic matter in sediments: A review [J]. *Water Res*, 2015, 79: 10-25.
- [33] DUTTA M R, BLIUMKIN L, LANE D, et al. Analysis of DOM phototransformation using a looped NMR system integrated with a sunlight simulator [J]. *Water Res*, 2017, 120: 64-76.
- [34] TRANVIK L J, BERTILSSON S. Contrasting effects of solar UV radiation on dissolved organic sources for bacterial growth [J]. *Ecology Letters*, 2001, 4 (5): 458-463.