湖泊的复杂广谱污染及其治理技术

退休工程师 杨继田

湖泊的复杂、广谱污染，是指水体中同时存在富营养化、重金属、超量蓝绿藻等污染物的现象。治理这类污染，至今市场上还没有出现相对廉价、快速的治理技术，以至于30年多前由日本人创造的琵琶湖水体修复案例，至今仍是修复大型水体的最典型案例。

一、湖泊污染物简述

1.营养盐

湖泊的富营养化，主要由单一或同时存在的氨氮、总氮、总磷导致。这些污染物在水中主要以溶解态存在，少量以悬浮态存在。其浓度与水深呈正相关，氨氮在水体受物理扰动时会加剧挥发。总氮、总磷具有可被铝盐、铁盐类絮凝剂絮凝的特性。

底泥中的营养盐，一部分是由湖泊蜕变的过程中积累，更多的则是水中营养盐的沉淀所致。底泥中的营养盐可分成溶水盐与不溶水盐。其中对水中营养盐含量产生贡献的是溶水性盐。

我国的太湖、东湖、巢湖，均为单一富营养化湖泊。

水体中营养盐的可挥发、可絮凝、可沉淀特性，构成了可被反污染利用的三个有用特性。

水中营养盐与底泥中营养盐的总和，组成了水体的营养盐。重金属盐亦然。我国各湖泊的营养盐或重金属，大多来源与外污染源。外污染源又分为点源和面源。对入湖物而言，河流入湖可视为点源入湖，下雨或地下水渗入湖中污染物可视为面源入湖。面源污染有可截断与不可截断两类。如雨水入湖可用用围堰截断，而地下水系带入的污染渗透则无法截断。

2.水中的蓝、绿藻及其他可漂浮类生物

水中营养盐对水华的贡献，是引起水中可漂浮类生物（如蓝藻、绿藻、水葫芦等）的狂长，导致水面表层的孢株集群形成对更下一层孢株集群的遮蔽，使其不能光合，缺氧腐烂、发臭，形成水华。其中蓝藻、绿藻是产生水华的主要罪魁。营养盐对蓝绿藻生长的贡献，是大大提高了蓝绿藻单阶次繁殖的生存率和生育率，其生存和生育基数的提高使以同一几何速率下繁殖总量的绝对值呈爆炸性增长，从而提高了暴发水华的几率。

影响蓝绿藻生长的外部因素依次为阳光照射、温度、营养盐。蓝、绿藻在光合作用下，会释放氧气，使水体及其上空中的含氧量增加。地球氧气的90%来源于藻类。在成长期后期，大量、密集的孢株上浮到水面后，遮闭、窒息了次表面以下的孢株，导致这些孢株死亡腐烂。

蓝绿藻的增加相对于营养盐的作用具有时延特性。即营养盐增加时，蓝绿藻的数量要经过一定时间才会增加，营养盐去除后,即使水中营养盐为零了，仍可发生水华，密度已经足够大的孢株集群死亡腐烂后的自营养作用可继续维持其狂长一段时间。

藻类等漂浮类生物对水体质量损益的双向作用，是治理水体污染、保持治后水质时可以利用或必须限制的重要因素。

我们还应注意到，水中不同种类的可漂浮类生物，对水中以溶解态存在的不同种类的营养盐、重金属盐有不同的吸收作用。这一现象有可能被利用来清除水中营养盐或重金属。

利用漂浮体，可以人为使多种地种植物漂浮在水面生长，达成清除营养盐及重金属盐的辅助作用。如美人蕉可以清除氨氮、慈菇可以吸收水中铅盐等等。

3.重金属

水中重金属盐同样以溶解和悬浮两种形态存在。底泥中重金属盐也有上述两种形态，但对水污染有贡献的只是溶水性重金属盐。典型湖泊（如滇池）中的主要重金属是铅、镉、砷、汞、硒。

以悬浮态存在于水中的重金属盐，可以被铝盐、铁盐类絮凝剂絮凝。以溶解态存在于水中的重金属盐，则不能被其絮凝，必须选择其他类型的絮凝剂絮凝。如硫蛋白、螯合肽等。

对底泥中重金属盐中的不溶盐，风险值不高时完全可以不予理会，对其中的溶水盐则应加以清除。

二、治理水体富营养化仍是一个世界性难题

治理水体特别是大型水体的富营养化，至今仍是一个世界性难题。我国对水体富营养化治理，在“源”治理上有较大进展，在“汇”治理上未取得有效进展。在“汇”的复杂广谱污染治理上进展更是微乎其微。国家地表水质量分类标准是杂质浓度标准，导致许多地方以维持湖泊水位为手段以不使水中污染物浓度增加，而湖中污染物的总量不但没有减少，而且还在上升。这是因为，许多湖泊的入湖水是准3类水甚至是4类水。入湖后，在自然蒸发的浓缩作用下，就成了劣4类甚至5类水。在一些城市湖泊中，入湖水往往是生活、工业污水处理后的混合型4类水甚至是准4类水，其污染物的广谱性，远超单一富营养化的5类水体，在入湖时，或可将湖内5类水的营养盐浓度冲淡至4类，从而提高水质类别，但同时又增加了湖水污染的广谱性。从这一意义上来说，中水入湖的稀释作用，只是对水中营养盐的浓度产生“削峰”效应，而污染物的种类会更加广谱化。随着这类水不断进入湖中又不断蒸发，不断将新的污染物浓缩于水中、沉积于湖底，八味羹变为九宝汤、百宝箱成为千宝柜，其结果恐怕是更加难于治理。以“广谱污染”换取“削峰”效果，是否应算作污染治理，目前也只能任由仁者见仁、智者见智了。但希望大家明白，今天湖中的五类水，正是昨天的四类水象今天的中水入湖一样一点一点炼成的。

如果在外污染源截断之后，将水体中的营养盐、重金属、超量藻类取出来，水体就得到了净化 。也就实现了水体修复。但如何才能将水体中的污染物取出？这就需要找一个好的办法。日本琵琶湖生态修复的本质，一是通过湿地截留营养盐等污染物，一是通过湿地和水中植物消耗营养盐，以减少水体中的营养盐。这一作用完全可以由其他异曲同工的等效技术实现。

三、治理湖泊污染的关键指征

对湖泊污染的治理，可以归结为对入湖水中污染物的等效0增量控制、内污染源和湖内存量污染物的清除、水体底层缺氧的改善、增加水体的流动性和湖水、底泥中生态的再平衡或重建。

其目标选择的顺序是：

1.确定被治理水体水质拟达到的国标。

2.以拟达到的国标为基准，确定在特枯期水位时水体允许的各污染元素含量的上限。其中地表水国标对蓝绿藻密度并无指标要求，这应以被治理湖泊不发生水华的经验值密度自行提出控制要求。

3.以水体中现各污染元素的实际存量值减去特枯期水位时允许的各污染元素的限量，所得差值即为水体各污染元素的应清除量的下限。

4.以入湖水带入的年输入污染物总量，确定治理后每年对污染物的清除量，并设计相应的清除措施。以达成对水中污染物的等效0增量控制。

5.设计相应的技术手段，增加水体的流动性并改善水体底层缺氧。

6.选择湖泊底泥中重金属分布为零或较少的区域（不少于被治理湖泊水域面积的十分之一）暂不予治理，作为被治湖泊原生态重建的种源。

7.在治理、维护水体的过程中，将会取出大量污染物。对这些污染物的总的处理原则是：节约（节地、节能、减少排碳）、不产生二次污染（无害化） 。目前主流思维认为对取出污染物（水溶性污染物和有毒底泥取出后的原位处理）进行双原位处理是最好方式。

对湖泊污染内源污染治理的前提是尽量截断外污染源。但现在的实际情况是有些湖泊的外污染源可以被截断（如滇池），有些湖泊的污染源很难被截断（如白洋淀）。后者的整个湖体被华北地区地下水系的污染包围，导致其外污染源不可截断。同时，你截断了地下水系的污染，土壤中的污染物也就无处去，截流也不过是顾此失彼。在水系污染的源头——人为向地下强行灌注工业污水的现象和农业面源污染的现象消失后，也许对地壤的“水洗（向地下水系灌注优质水）”方式会成为华北土壤修复的方式之一。

三、可用来治理水体复杂广谱污染的技术

基于对治水的治本要求和取出污染物的无害化处理原则，我们讨论治理水体复杂广谱污染的三项关键技术。

1.水体透析技术——将营养盐、重金属、超量藻类从水中分离出来。

营养盐具有可被絮凝、部分营养盐（氨氮）具有可挥发特性。水体透析机利用这一特性，将其中可絮凝的絮凝，可挥发的挥发，以达成营养盐从水中的分离。

对水中重金属盐的分离相对复杂。水中重金属盐往往以悬浮、溶解两种形态存在。对悬浮态重金属盐，其清除办法与营养盐相同，对水溶性重金属盐的清除，则要用特定的螯合剂二次絮凝。

用下面所说的生物质滤料截留分离出的污泥时，还可利用生物质本身对重金属的截留作用或为增效人为添加特定螯合剂（如硫蛋白、螯合肽）实现絮凝与截留的一体化。

水体透析机的另一作用，是可形成被作用水体的纵向环流。纵向环流不断把底层水带到水面，将水底层的溶解性气体（如氨氮）带到水表面曝光曝气，使可挥发的营养盐挥发，另还可有效改善水底部的缺氧。

多部水体透析机可以组成用于大水体治理的工程矩阵。

2.生物质滤料——截留分离出的污染物

对经水体透析后分离出来的污染物，采用生物质滤料过滤截留。生物质滤料，是用秸杆、蔗渣、稻壳等制成的可滤除营养盐或重金属盐、蓝绿藻的三维滤体。可用来制成过滤器、高效海绵湿地、透析坝等各种形式的过滤装置。滤除营养盐后失效的滤料，可以还田用做肥料，滤除重金属后失效的有毒滤料，可参与污泥烧结。从而实现零弃料。

3 有毒污泥的原位缩量含减害处理技术

该技术是将截留的有毒污泥与已报废的生物质滤料混合后干燥，尔后装入窑中焚烧。在焚烧中，泥中的重金属盐与稻壳中的二氧化硅结合成颗粒状物质，该颗粒可用于替代混凝土中的部分沙子，也可以放回水中，从而达成对有毒污泥的原位无害化处理。烧结后污泥体积缩减为烧结前的五分之一左右。污泥焚烧的一大难题是污泥热值的不确定性。在该技术中，污泥的取出载体是过滤单元。可以人为控制过滤单元中滤料与污泥的比例，使二者混合物热值的总和大于3000大卡/kg，高于其起燃热值（2300大卡/kg），混合物在焚烧中变成气体和灰烬。灰烬中剩余物主要为由硅化物和低熔点重金属烧结而成的多孔瘤状玻化颗粒物。该颗粒物还有与活性炭、硅藻土类似的作用，可以吸附有机物。该颗粒物经封化处理后，其中的重金属将不再溢出。

对烧结后污泥的剩余物，应进行毒物浸出检测，以便决定其用途。可用与国标毒物浸出检测配方相同，但将浓度稀释至PH值为5（存在复杂广谱污染的典型水体的PH值不高于6.5）的三酸溶液中浸泡24小时，如浸出物中重金属含量已低于烧结前的原泥，且溶出浓度不高于地表3类水国标时，则可原位存放并以枯水期四类地表水国标的允许重金属含量限制水体中的存放总量。如不能，则可替代部分沙子制作混凝土或二次做滤料使用。二次做滤料使用时，其微孔会被污泥所封堵，阻挡了其中重金属的析出，从而可以减少底泥烧结剩余物对水体的可溶性重金属盐的释放。

5. 使用生物质滤料——水体透析——污泥烧结缩量减害技术对水体的治理

由上可知，基于生物质滤料的原位水体透析技术与原位污泥缩量减害技术的组合使用，可以构成治理大水体复杂广谱污染的完整技术链。

在截断外源污染后，可沿环水体岸线设置若干水体透析机，清除水体内的存量污染物，达成对原水体的原位修复；可环水体、在入水口设置水体透析坝，截断外源的增量污染；可环水体设置污泥临时堆场、污泥焚烧窑，实现对清出污泥的焚烧、缩量、减害化的原位处理；可在水体中设置若干水体透析机，达成对污染的等效零增量控制、实现静止水体的流动和对水体底部的充氧。从而达成对存在复杂、广谱污染水体的修复和修复后的水质保持。