

再生水回用于景观水体的富营养化控制

李春丽, 周律, 贾海峰, 张晓健
(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 再生水回用于景观水体在目前水资源短缺的情况下具有积极的节水意义。本文对我国现行的再生水回用于景观水体的相关水质标准以及国外的水质标准进行了比较分析, 提出了回用于景观水体的再生水对水体美学价值和人体健康的潜在危害, 其中富营养化是再生水作为娱乐性、观赏性人工水体的最大障碍之一。景观水体富营养化的控制要结合再生水自身污染物本底值较高和缓流水体及浅水体等特点进行考虑。

关键词: 再生水 景观水体 水质标准 富营养化

1 引言

随着人们生活水平和人居环境质量的提高, 人们对整个居住小区的外部人文景观、绿化和自然环境的要求也越来越高。在城市绿地、公园建设和大型标志性建筑区中, 人工湖泊、人工河道及景观水池不断涌现。房地产开发中水景住宅也成为一大热点: 在目前遍布上海的千余个正在开发的住宅楼盘中, 有水景设施的就占了四分之一; 即使在水资源短缺的北京, 现有的 800 多个住宅楼盘里, “水景住宅”仍占到了 5%~6%, 这足以说明水景对人们生活的重要性: 水景设置可以提高环境的品质, 丰富空间环境, 增强居住的舒适感; 增加居住环境的湿度, 减少浮尘, 改善区内小气候; 同时可以为人们营造回归自然的氛围, 带来精神上的享受。

从人居的角度看“水景”有许多的优点, 但是随着世界城市化水平和工业化程度的提高, 水资源短缺和水污染加剧已日益严重, 目前城市污水回用已经成为解决城市缺水、提高水资源有效利用率、有效控制水体污染的一条重要途径。因此, 利用再生水补给人工景观水体也就应运而生。尤其在一些水资源严重短缺的地方, 如我国的北方地区, 常年气候干燥, 风沙肆虐, 水景的设置很有必要, 但是考虑到当地水资源的短缺, 使用再生水补给景观水体成为一种必然。例如我国北京、天津、石家庄、郑州等地均已开始或计划实施再生水作为城市内河景观补给水的工程, 而且已经取得了一定的效果。

2 国内外再生水回用于景观水体的相关水质标准

由于再生水回用景观水体的应用在我国还是刚刚起步, 因此相关水质标准与技术措施尚处于经验摸索阶段而遇到很多问题^[1]。我国先后颁布了若干与景观水体有关的水质标准, 地表水环境质量标准GB 3838-2002^[2]中的III、IV、V类水体考虑了景观娱乐水体水质的考核要求, 从标准中可以看到, 天然景观水体的水质标准中对COD_{Cr}, BOD₅, 溶解氧以及氮、磷等指标控制极为严格。随着我国再生水回用于景观水体的不断实践, 国家建设部颁布了再生水回用于景观水体的水质标准。这些标准与GB 3838-2002 中的景观娱乐用水的标准相比较, 主要的水质指标要求都偏低, 其中磷指标要求更低, 这主要是考虑到现阶段的可实现性^[3]。《城市污水再生利用 景观环境用水水质 (GB/T 18921—2002)》^[4]与《城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB 18918—2002)》^[5]的一级标准的A标准相近。GB/T 18921—2002 相对于旧标准《再生水回用于景观水体的水质标准 (CJ/T95-2000)》(2002 年废止)而言, 对氮和磷的指标要求有所提高, 而且内容不断完善。GB/T18921—2002 分别从感观性状指标、水质常规指标、水中营养盐含量、卫生学指标等方面对再生水回用于景观水体水质指标加以规定, 而且增加了与人群健康密切相关的毒理学指标。在水质指标的确定方面主要考虑水体的美学价值以及对人体健康的潜在危害, 在控制措施上以强调水体的自净能力为主导思想, 着重强调水体的流动性, 标准中还对景观水体的流动换水方式和水力停留时间作了说明。

国外的再生水回用景观水体起步较早, 尤其在美国、日本以及比利时等国家。美国加利福尼亚州是世界上开展污水回用较早的地区, 加利福尼亚州法律委员会在 1967 年推荐州公共卫生部制订“全州性污染标

准”，这一标准指出回用水在各种使用情况各种组份的最高允许浓度,标准中规定再生水回用的观赏湖泊和限制性娱乐湖泊中每 100 毫升水中平均最多有 2.2 个大肠杆菌，对非限制性娱乐湖泊要求出水中浊度不得高于 10 度，对大肠杆菌数的限制要求和观赏湖泊相同^[6]。加利福尼亚的兰开斯特（Lancaster）市从 1974 年起，将洛杉矶县卫生区第 14 号再净水厂的再净废水用于 3 个人工湖的用水，这些人工湖是阿波罗县公园（Apollo County Park）的焦点，人工湖中磷酸盐要求控制在 0.5 mg/L 以下^[7]；美国国家环保局（U.S. EPA）在总结国内外城市污水回用的技术经验的基础上，编制了“水回用指南”（1992 年），该指南对污水回用类别、处理方法、回用水水质与监测、水回用注意事项作了介绍，指南中对再生水作为景观水的水质说明见下表 1。从表 1 可以看出，“水回用指南”中对景观水体的水质要求比我国现行 GB/T 18921—2002 标准中的水质要求高。

表 1 U.S. EPA 对城市污水回用的建议和指导部分内容^[8]

再利用种类	再生用水水质	注意事项
风景河道湖泊 偶然接触人体（如垂钓、划船）以及完全与人接触的再生水	(1) pH=6~9 (2) BOD ₅ ≤10mg/L (3) 浊度≤2NTU (4) 不检查出粪大肠杆菌 (5) 余氯<1 mg/L	(1) 回用水应不损害人的皮肤和眼睛 (2) 回用水应清澈、无毒、无嗅 (3) 应去除营养素，以避免粪类繁殖 (4) 过滤前应投加混凝剂或助凝剂，使水质符合规定要求 (5) 回用水中不应有致病菌 (6) 需使余氯量高，接触时间长，使病毒及寄生虫卵灭活 (7) 所捕的鱼可以食用 (8) 处理方法合理、可靠、有效
风景景观塘湖 不允许公众与再生水接触	(1) BOD ₅ ≤30mg/L (2) SS≤30mg/L (3) 大肠杆菌≤200 个/30 mL (4) 余氯>1mg/L	(1) 需要脱氮以避免藻类在塘湖生长 (2) 需要脱余氯以防护水生动植物 (3) 处理方法要合理、可靠

3 再生水处理工艺

再生水回用目的的不同，对污水的深度处理工艺也不同。目前对回用于景观水体的再生水的处理工艺一般包括二级处理和深度处理，单独的常规二级处理和包括脱氮除磷工艺的二级强化处理远远不能达到回用于景观水体的水质标准。尤其氮、磷指标更是与再生水回用于景观水体要求相差很远。因此，需要在进行二级处理后增加深度处理。深度处理主要去除常规二级处理所不能完全去除的污水中杂质，如营养型无机盐氮磷、胶体、细菌、病毒、微量有机物、重金属以及影响回用的溶解性矿物质。常规的深度处理包括混凝、沉淀及过滤的工艺过程。有研究表明，二级出水经过传统的混凝、沉淀处理后，可去除浊度 73%~88%，SS60%~70%，色度 40%~50%，BOD₅31%~77%，COD_{Cr}25%~40%，总磷 29%~90%^[8]。

在最近的十年里，膜过滤工艺已经得到了发展，而且应用日益广泛，膜技术在污水深度处理中的应用也越来越广泛。在水回用方面，用微滤膜或超滤膜代替混凝、沉淀和过滤等传统工艺流程的优点是不需要使用药剂，一步处理即可获得很好的浊度、色度和细菌的去除效果。微过滤可除去沉淀不能除去的包括细菌、病毒和寄生生物在内的悬浮物，还可降低水中的磷酸盐含量。使用膜技术的再生水处理工艺一般是二级处理加微滤或超滤，之后进行消毒。如连续微滤（CMF）水处理技术已用于污水回用。

4 再生水回用于景观水体存在的问题



对再生水处理的程度取决于再生水的回用方式。就再生水回用于景观水体而言,要严格考虑再生水中存在污染物和病原体对水体美学价值和人体健康的危害。作为景观水体,首先要求在感官上给人舒适的感觉,要求水体清澈,透明度高,不出现浑浊,黑臭以及富营养化现象。景观水体是人们休闲娱乐的理想处所。一旦景观水体发生富营养化,使得水体透明度下降,水体浑浊,臭味弥漫,大煞风景,使水体的旅游观光的价值大减,甚至丧失观赏功能。

其次就是景观水体对人体健康的影响。尤其是娱乐性景观水体,因为水体要与人体有轻微接触,因此水中不能含有对眼睛的隔膜、耳隔膜以及皮肤有害的化学物质;在城市污水中经常检验到肠道疾病的因素有杆状细菌和阿米巴痢疾,霍乱,伤寒和副伤寒病菌等。研究指出,处理肠道病毒特别困难,这种病毒水体自然环境中与在大多数给水和废水的处理过程中的抵抗灭活的能力比大肠杆菌大^[8],经消毒处理的再生水中仍然存在着一些游离的传染性肠道病毒,如艾柯病毒(Echovirus)、脊髓灰质炎病毒(Poliovirus)和柯萨奇(Coxsackie)病毒都是对人体有害的肠道病毒。在再生水回用的所有方式中,肠道病原体对景观水体的危害最大^[9]。虽然观赏性景观水体与人体非直接接触,但是仍然不可避免地会与人体有一些接触,如果以再生水作观赏性喷泉,喷泉产生的气溶胶会对吸入者造成细菌、病毒感染的直接危害。所以,再生水作为景观水体时不宜用作观赏性喷泉。如果水体出现了富营养化现象,许多富营养化优势藻属如蓝藻中的微囊藻属(Microcystis)、鱼腥藻属(Anabaena)、束丝藻属(Aphanizomenon)等都能产生藻毒素^[10],它们都是由蓝藻产生的二次代谢产物,藻毒素主要分为肝毒素、神经毒素、脂多糖毒素三大类,藻毒素一般都是细胞内毒素,在细胞内合成,细胞破裂后释放出来并表现出毒性^[11],不仅危害水生动物,而且对人体健康也有潜在的危害作用。

富营养化是再生水作为娱乐性、观赏性人工水体的最大障碍之一。水体富营养化是指大量溶解性营养盐类进入水体,引起藻类和其他浮游生物迅速繁殖,大量消耗水体中的溶解氧,水质变差,鱼类及其他生物大量死亡的现象,严重时会发生水华。富营养化发生所需的必要条件有三个^[12]:充足的TN、TP等营养盐;缓慢的水流流态;适宜的温度条件。一般认为,水体形成富营养化的指标是^[13]:

- (1) 水体中含氮量大于 0.2~0.3mg/L, 含磷量大于 0.01mg/L,
- (2) 生化需氧量大于 10mg/L,
- (3) 在淡水中细菌总量达到 10⁴个/毫升,
- (4) 标志藻类生长的叶绿素a浓度大于 10μg/L。

富营养化是再生水作为娱乐性、观赏性人工水体的最大障碍之一。主要基于以下原因。

由于城市污水处理厂再生水是来自己经过一定处理的生活污水或不包含重污染工业废水在内的城市污水,使得再生水的污染物本底值相对较高,这是发生富营养化的根本原因,而且水体的稀释自净能力较天然景观水体差。

缓慢的水流是富营养化发生的必要条件,富营养化多发生在缓流水体中,景观水体,如公园以及住宅区内的水景,属于非连续流动水体,流速缓慢,有的甚至是静止水体,为藻类的生长提供了稳定的水环境,因此,易发生富营养化。

人工景观水体属于浅水水体,水深一般在 1~2 米。就湖泊而言,有浅水和深水湖泊之分。所谓深水与浅水之分,并无明确的界限,长江中下游平原的浅水湖泊水深小于 10 米,平均水深仅 2 米左右。国际上对于浅水湖泊的研究经验表明,浅水湖泊比深水湖泊更易发生富营养化问题^[14]。景观水体与浅水湖泊类似,也具有水浅这一特点。因此,和浅水湖泊一样易发生富营养化。

综合以上几点原因,再生水回用的景观水体比天然河流、湖泊更易发生富营养化问题。《城市污水再生利用 景观环境用水水质(GB/T 18921—2002)》中氮、磷指标要求高于天然水体富营养化水平的临界指标,因此,富营养化问题是再生水回用于景观水体首先要考虑的主要问题,必须采取措施预防和控制景观水体富营养化的发生。

富营养化的防治过程,实际上就是通过调节诱发富营养化发生的主要控制性条件,抑止富营养化发生。治理再生水回用的景观水体富营养化问题,应该从富营养化发生的机理并结合再生水自身污染物本底值高以及水体的稀释自净能力较天然水体差,以及景观水体为缓流水体和浅水水域等特点出发进行考虑。当再

生水回用到景观水体后,可以采取一些方法来控制富营养化发生,如增加景观水体流动的水力循环系统;循环过滤净化系统;化学药剂除藻;生物调控法和人工湿地生态系统等。

5 结论

目前再生水回用于人工景观水体在我国的应用刚刚起步,相关的一些水质标准还需进一步健全,只有制定更加严格的水质标准,才能保证再生水回用于景观水体的娱乐价值和安全性。当再生水回用的景观水体投入使用时,一定要注意对景观水体的维护,以保证景观水体的美学价值以及防治景观水体中微生物对人体的危害。其中富营养化是再生水作为娱乐性、观赏性人工水体的最大障碍。富营养化问题的治理要针对再生水的特点以及景观水体的特点进行考虑,虽然目前对水体富营养化的治理已经取得了一些进展,这方面的相关报道也很多,但是仍然存在一些问题需要做进一步的研究工作。

参考文献

- [1] 王鹤立,陈雷,梁伟刚等.再生水回用于人工景观水体的水质目标、策略与技术.环境科学,2002,23(12):93-98.
- [2] 《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》,国家环境保护总局.
- [3] 王鹤立,陈雷,程丽,李相峰.再生水回用于景观水体的水质标准探讨.中国给水排水,2001,17(12):31-35.
- [4] 《城市污水再生利用 景观环境用水水质(GB/T 18921—2002)》,中华人民共和国建设部.
- [5] 《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918—2002)》,国家环境保护总局.
- [6] 希利 I.S.等 著,邱中峙等译.水的再净与再用.北京:中国建筑工业出版社.1986.
- [7] 周彤主编.污水回用决策与技术.北京:化学工业出版社.2002.
- [8] 雷天成.污水回用新技术及工程设计.北京:化学工业出版社.2002.
- [9] Takashi Asano. Wastewater Reclamation And Reuse. Water Quality Management Library—Volume 10: 48-50
- [10] 林毅雄,刘丽萍等.滇池水体中主要藻种毒素.云南环境科学,1997,16(2):26-28.
- [11] 钱芸,戴树桂,刘广良.富营养化淡水水体中微囊藻毒素的研究进展.环境污染控制技术与设备,2002,6(3):13—17.
- [12] 李锦秀,廖文根.富营养化综合防治调控指标探讨.水资源保护,2002,2:4-5.
- [13] 任南琪,马放等.污染控制微生物学.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.
- [14] 秦伯强.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探.湖泊科学,2002,14(3):193-202.