

可持续发展理念下的水能源治理措施

——基于化工角度治污的综合分析

何晓东¹, 田桃桃², 刘雪芳¹, 张秋爽¹, 巴合提古丽·卡赛¹, 夏宝国^{1*}

¹伊犁师范大学化学与环境科学学院, 新疆 伊宁

²伊犁师范大学数学与统计学院, 新疆 伊宁

收稿日期: 2022年11月1日; 录用日期: 2022年12月1日; 发布日期: 2022年12月9日

摘要

水资源是维持生命的宝贵物质, 自然界的各种生命活动皆依赖于水资源。近年来, 由于人类活动的加剧, 工农业的不断发展, 水资源受污染情况恶化, 部分水体丧失自我恢复能力。为了治理水污染, 我国政府提倡可持续发展理念, 基于政策支持, 许多科研工作者从化工材料着手, 将其应用于吸附工程和光催化过程, 企图提升治理污水的效率, 有效落实可持续发展政策, 并取得了显著成果。本文主要综述了近年来全球水污染事件, 以及治理污水的政策和组织, 并从化工角度简要分析了化学治污工程。

关键词

水资源, 可持续发展, 化学工程, 治污措施

Water Energy Management Measures under the Concept of Sustainable Development

—Comprehensive Analysis of Pollution Control from the Perspective of Chemical Engineering

Xiaodong He¹, Taotao Tian², Xuefang Liu¹, Qiushuang Zhang¹, Bahetiguli·Kasai¹,
Baoguo Xia^{1*}

¹College of Chemistry and Environmental Science, YiLi Normal University, Yining Xinjiang

²College of Mathematics and Statistics, YiLi Normal University, Yining Xinjiang

Received: Nov. 1st, 2022; accepted: Dec. 1st, 2022; published: Dec. 9th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 何晓东, 田桃桃, 刘雪芳, 张秋爽, 巴合提古丽·卡塞, 夏宝国. 可持续发展理念下的水能源治理措施[J]. 可持续能源, 2022, 12(5): 29-39. DOI: 10.12677/se.2022.125005

Abstract

The water resource is the precious substance that sustains life. All kinds of life activities in nature depend on the water resource. In recent years, due to the intensification of human activities and the continuous development of industry and agriculture, the situation of water resources pollution has worsened, and some water bodies have lost the ability of self-recovery. In order to control water pollution, our government advocates the concept of sustainable development. Based on policy support, many scientific researchers start from chemical materials and apply them in adsorption engineering and photocatalytic process, in an attempt to improve the efficiency of sewage treatment, effectively implement the policy of sustainable development, and have achieved remarkable results. This paper mainly reviews the global water pollution events in recent years, as well as the policies and organizations of sewage treatment, and briefly analyzes chemical pollution control projects from the perspective of chemical industry.

Keywords

Water Resources, Sustainable Development, Chemical Engineering, Pollution Control Measures

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 水资源的功能和作用

水资源由于水循环的存在具有一定的可再生性,因此,水资源是一种可再生能源。在自然界中,水资源担当着重要的角色,水的功能和作用有以下几点:

1) 调节气候的功能。水蒸气是大气的组成部分之一。虽然大气中的水蒸气约占世界水的百万分之一,但大气和水的周期性相互作用决定了地球水循环的运动,并塑造了支持生物生存的气候。

2) 水是土壤形成的关键因素。流动的水将创造和促进地貌的形成,表面景观的重新排列和三角洲的形成。它在岩石的物理风化过程中也起着重要作用。

3) 水具有运输物质的功能。水可以运输各种物质,其中也包括营养物质。输水物质有溶解矿物和总物质两种形式。大气成分中包含的各种大气微粒,都可以通过大气水体孔隙并发生沉淀,然后直接通过水来传输。从这几方面分析可以清晰看出,水可以迅速将有毒环境污染物运输携带和扩散传播辐射到周围或更广泛的地区。

4) 水是所有生物的必需物质。生命的形成离不开水,水是生物的主体。生物体的水分占体重的60%~80%,甚至超过90%,水以各种方式与生物相互作用。

5) 水和人之间的关系也是非常地密切的。水也是我们一种极为珍贵稀少的特殊自然资源,生活与生产活动都离不开水。人体水分的含水量占正常体重含水量的近三分之二。为了维持人体水分正常平衡的生理及代谢,每个成年人的每天水摄入量至少需要添加到2~3升。

基于水具有以上的功能和作用,我们可以得出,自然界离不开水。

1.2. 地球上水资源的分布

地球上水资源的总储量大约有 1.36×10^{18} 吨，其中盐水含量平均为 1.32×10^{18} 吨。由于水中矿物盐含量太高，海水通常不能轻易地被陆地表面上存活的单细胞生物直接用作生命水源。地球表面上的水分分布规律大致为：海洋岩石中含水量 97.2%，极地冰山岩层中含水量 2.15%，地下水中占据 0.632%，湖泊海水和小型河流沉积物中含水量 0.017%，云层中约有 0.001%。水能源分布主要见图 1。

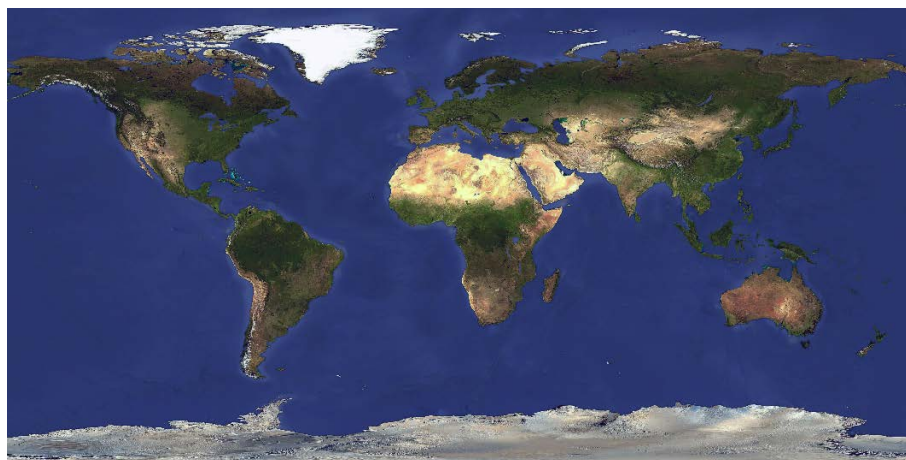


Figure 1. Satellites map the two-dimensional distribution of water energy on earth
图 1. 卫星绘制地球水能源二维分布图

陆地湖泊上大部分的淡水都直接来自天空。海水由于在太强的阳光照耀下被逐渐加热蒸发，海水溶液中同时还可以留下很多细盐，而又使一部分淡水大量受热蒸发并扩散到了天空中，并形成了云。在风的驱使下，云飘过大地。当其遇到冷空气时，它则凝结成雨，落在地上。到达地表上的雨水都有以下两个去处。第一，它只能在陆地水面向上流动，形成陆地河流。当它逐渐到达比较封闭稳定的内陆低丘地时，就会聚集形成许多湖泊水库或湖泊湿地。这将成为陆地湖泊上大量的补给地表水源泉；第二，水能通过渗入地表裂缝孔隙和各种植物根系，雨水直接进入地面，形成补给地下水。当地下水位继续上升时，它也会再以地下泉水涌出的新形式重复出现。因此，丰富优质的天然地下水完全可以用作于补充地表水。最后，地表水资源和所有地下水都依靠地势的高低趋势而流向地表最低处的淡水部分，即形成淡水海洋，从而真正完成地表淡水资源之间的平衡循环。在这个平衡循环的过程中，人类和陆地表面上出现的所有其他陆地生命系统都可以不断地去获得维持生命的淡水供应。

地球上分布的总淡水量约 3.8×10^{16} 吨，约占整个地球表面上总储水量的 2.8%。然而，如此数量有限的淡水资源，分布却比较零散，地表淡水主要分布于冰川、地下水、地表水系和极少量的陆地水汽系统中，地下淡水则以几种基本的组成形式存在或者分散存在于一些地下的固体、液体物质系统和一些气体沉积物系统中。淡水资源的时空分布主要特点如下：极地冰川占地球淡水总量约 75%，这些地下的淡水资源现在已是几乎枯竭，基本无法再次利用了；地下水总量占地球淡水总量比例的大约 22.6%，其量约为 8.6×10^{15} 吨，但全世界近一半以上地区天然的地下水资源的分布的深度多处在距海平面以下 800 多米处，难以用人工去开采，过度地人工开采这些天然的地下水源也同样会引起水资源匮乏，从中开采带来了许多其他的重大自然及环境问题。河流水库池塘和各种人工湖泊淡水仅占地球淡水总量的 0.6% 左右，其量只占了 2.3×10^{14} 吨左右，是全球所有野生陆地动植物水源和全世界所有其他人类淡水资源中的主要的天然水来源。大气淡水中实际含有的水蒸气量也只大约占地球淡水总量份额中的 0.03%，其量约

为 1.3×10^{13} 吨, 并且它还在以少量的降雨或径流蒸发的形式, 在持续地为地球上的整个陆地环境补充着部分淡水。

由于许多陆地湖泊海面上有着丰富的水资源, 而深层天然淡水源即便在没有夏季充足持续的高温光照情况下, 有时也只会逐渐加速海洋蒸发, 或将会随着每年夏季的滔滔江流而逐渐的回归淹没于浩瀚大海, 地球水面上每年可被直接利用, 供世界各种生物生活所使用的自然总淡水量, 仅占地球总自然水量比重的千分之三。由此可见, 陆地和湖上这样宝贵丰富的海洋资源, 天然总淡水资源也确乎是极其值得我们为了可持续发展和生存而给予高度珍惜。淡水资源就是我们通俗意义上的水, 也就是指现在我们平时经常会提及接触到的一种陆地水资源, 即在天然陆地河流源头上自然形成的那一些天然淡水资源。当然, 这只是一个狭义的称谓。其水源由来自江河水系及江河湖泊水体中流动的河水、高山积雪、冰川极地地区以及少量地下水资源等组成。科学早就告诉我们, 没有水, 就永远没有了生命。地球上只有大约百分之三或四的陆地水才是真正的淡水, 所有这些陆地生命其实归根结底都必须依赖于天然淡水以进行基本生活生存, 淡水量将影响着这个地球表面上各种生命种群分布。水蒸气是经高温而从太平洋等沿岸海面上徐徐升起, 被西陆风气流所挟带后, 降落到平原内陆至西北高原, 随着海拔高程逐渐地增高, 温度不断地下降, 汇聚并凝结形成了薄薄的一层云雾, 最终形成了降雨, 该过程同时也是构成人类淡水的来源方式之一, 溪流水汽的汇聚就形成了一条奔腾的大河, 雕刻创造出的自然界就有了诸多大自然奇观, 例如, 在印度洋沿岸的海域上, 河底泥沙的堆积形成了现代人类和许多珍贵原始海洋野生动物栖息地, 并在此产生了许多种类丰富而奇特的淡水海洋物种, 无论你从平原到高山, 还是从淡水湖底到海洋, 有着丰富淡水生命资源的地方, 那这个地方就会有生命的繁衍。

1.3. 近年来水资源的受污染状况

自 20 世纪末期开始, 世界人口便呈现着快速地增长, 而全球人口数量的这种快速增长也反过来加速了对于水资源的严重消耗, 工农业大规模生产的急速发展也严重地污染到了全球水体, 部分森林生态系统的彻底破坏, 更是改变了河流蒸发和雨水径流的方向。这些人类活动都严重地破坏并污染了水资源, 世界各国也正面临水生态危机。例如 1953 年~1956 年, 日本水俣病事件导致居民、水生生物出现死亡。1986 年, 莱茵河水污染事件导致河体系统“死亡”长达 20 年。中国(以下称为我国)淮河水污染事件导致下游地区鱼虾绝迹, 居民食用出现恶心、呕吐等症状。世界各国均出现部分水污染事件, 如图 2 所示。因此, 水污染治理迫在眉睫。



Figure 2. Partial water pollution events in countries around the world
图 2. 世界各国部分水污染事件

1.4. 与水资源有关的组织和政策

世界上已有各国科学家组成的协会早在 1996 年时就共同达成了亟需研究水资源水质这样一个国际共识, 并成立科学组织世界水理事会(WWC), WWC 也是有史以来第一个同时为来自世界各国及其他区域的专家学者提供一个探讨有关全球水问题论坛场所的全球性科学家协会组织[1]。自从 1973 年由美国学会的发起人 Ven Te Chow 教授等和另外一批当今世界各国的知名权威的全球水资源学者们共同创建并发起了国际水资源协会水学会组织(IWRA)。至今, IWRA 组织已经称得上是在当今全球水资源学术界最为广泛知名和有影响力的全球性水能源研究学术团体机构和国际有影响力的组织之一[2]。我国于 2005 年 3 月 22 日创建了水资源协会。

1977 年联合国召开名为“联合国水事会议”的会议时, 向全世界发出了最严重地一次警告: 水能源战争极有可能成为二十世纪的最后一个巨大无比的第三次世界社会危机, 继石油危机彻底结束之后, 人类遭遇的下一个本世纪最大的社会危机便将是全面失去具有自我恢复能力的水能源。1993 年, 第四十七届世界联合国水资源科学大会上又重新做出最后一次正式决议, 确定将每年举行一次水能源探讨的例会, 并于次年 3 月 22 日正式确定为“世界水日”并沿用至今。世界水日的宗旨之一, 是旨在广泛唤起国际全体公众最普遍认可的水安全及节水与科学使用意识, 加强促进全球水资源科学保护。近年来, 我国发布了一系列政策, 促进水资源环境治理行业的发展。我国全方位推进生态环境保护和水污染治理, 产业规模持续扩大。并确立了两个主要的治理措施: 一是《“十四五”生态环境保护监管规划》《水污染防治行动计划》等政策文件, 从顶层设计和国家规划层面全面推进生态环境治理以及水资源环境治理; 二是针对工业污水、村镇生活污水等领域发布专项规划文件进行重点整治, 国家政策支持有力地推动了水能源治理行业市场的大规模增长。2005 年, 时任浙江省委书记的习近平同志提出“绿水青山就是金山银山”这一科学理念, 并在“全国生态环境保护大会”和“政治局常委会”上, 再次强调“坚决打好污染防治攻坚战”和“保障人民健康安全”的重要性和必要性。

1.5. 国内外污水处理研究现状

自 19 世纪人类研究污水处理技术以来, 处理手段不断更新迭代, 时至今日, 由欧洲发达国家建立起比较完善的现代污水处理系统[3]。目前, 现代污水处理技术一般分为一级处理、二级处理和三级处理。一级处理主要采用物理方法格栅截留和过滤沉淀, 主要去除悬浮物和固体砂石, 一级处理属于二级处理的预处理, 达不到排放标准。二级处理采用化学方法和生物方法, 主要去除胶体和有机污染物, 可以达到排放标准。三级处理进一步处理难降解的有机物、氮和磷等能够导致水体富营养化的可溶性无机物等。

国内外对污水的处理主要是通过建造污水处理厂[4]。自 20 世纪下半叶至今, 美国建立了 18,000 多个废水处理厂, 是世界上污水处理厂最多的国家, 平均约 5000 人便有一座污水处理厂, 其中二级生物处理厂约为 78%。英、法、德大约有 8000 个处理厂, 平均约 7000 人便有一座污水处理厂, 且二级生物处理厂占绝大多数。日本约有 630 座城市污水处理厂, 平均约 2 万人一座污水处理厂, 其中二级处理厂占 98.6%, 瑞典是目前污水处理最发达的国家, 下水道普及覆盖率超出 99%, 平均 5000 人便有一座污水处理厂, 其中 90%为二级生物处理厂[5]。经过近 40 年的飞速发展, 我国现在拥有全球最大的市政废水基础设施, 目前已建成 5000 多个市政污水处理厂, 污水处理率已达到 90%以上。世界部分国家污水处理厂数量见图 3 所示。

我国的污水处理技术与国外相比起步较晚, 19 世纪中叶, 水中的污染物主要依靠水质的自净能力来净化处理。但是, 伴随着污水排放量越来越大, 水质的环境承载力早已无法满足自净作用的要求; 60 年代开始便运用污水开展农业灌溉, 达到污水处理农业节水灌溉的效果, 但是由于污水水质越来越复杂,

简单处理后的污水已不能够满足农田灌溉要求。70 年代，一些城市把近郊区无意义的水塘、湿地公园、低洼、废河改造为简单的稳定塘，简易解决城市污水。随着经济不断高速发展，我国也日益重视污水处理技术，从 80 年代至今我国污水处理可分为三个发展阶段：初始阶段，1984 年天津市纪庄子污水处理厂建成运行，是中国首座实施活性污泥工艺的大型污水处理厂，是我国大型污水处理厂建设的里程碑，并为日后污水处理事业的大规模发展奠定了基础。过渡阶段，2007 年，由于水体污染，太湖发生了藻类等微生物的繁殖严重威胁城市饮用水健康，一年后无锡污水处理厂实施了 A 级废水排放标准并投入使用，标志着我国开始实行更加严格的废水排放标准。快速发展阶段，2016 年保定市高碑店污水处理厂升级为再生水厂，标志着我国从简单水处理发展到再生水处理阶段[6]。

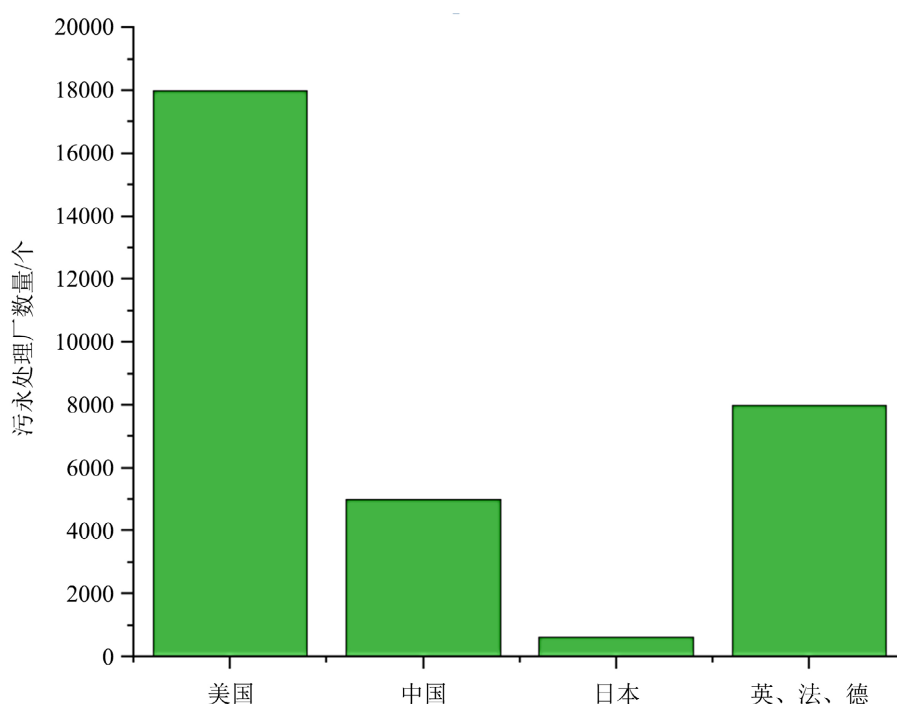


Figure 3. Number of sewage treatment plants in some countries of the world
图 3. 世界部分国家污水处理厂数量

2. 污水处理化学工程

2.1. 吸附工程

2.1.1. 吸附的提出

1773 年，C. W. Scheele 等人观察到了气体暴露于碳材料时的吸附现象。1785 年，洛维茨观察到木炭可以可逆地去除水中产生颜色和气味的化合物。1792 年的拉维茨和 1793 年的科尔分别在植物和动物炭上观察到了类似的现象。吸附作用是指高分子材料从其内部液体表面或内部气体环境溶液中被浓缩吸附到其固体表面中的过程。

1881 年 Kayser 首次提出了术语“吸附”，以区分表面积累和分子间渗透。他是假设吸附过程中的一种基本的特征是物质之间的表面电荷积累。现在我们习惯理论上来区分这两种物理吸附。如果一个固体表面分子和两个被吸附物质分子表面之间有吸引力，则产生的表面吸引力本质理论上可以说是一种物理的，则该吸附被称为物理吸附。一般来说，在物理吸附中，吸引力是范德瓦尔斯力，由于它们很弱，因

此产生的吸附在性质上是可逆的。另一方面，如果在所拟吸附的气体分子的内部原子和其他原子周围的固体表面，各种物质原子之间存在相互吸引的这种机械吸引力或完全吸引，是能借助外力吸附的。由于化学键的力作用而能直接产生吸附作用的，则称该机械吸附的反应的过程是化学吸附。鉴于化学吸附中的结合强度较高，很难从固体表面去除化学吸附物。

2.1.2. 吸附机理

吸附界面现象也是指另一种两相界面现象，其吸附界面作用只可单独发生作用，或仅在有某一个或两个相界面作用的吸附界面物质上。根据各种吸附剂的结构本身不同以及吸附剂和被吸附物质之间吸附作用不同，吸附能力机理等的具体解释程度都不同，可把大体过程分为物理相互吸附的作用机制和生物化学相互的吸附机制。

物理吸附原理的基本概念：当由一个气体原子间或相邻两个液体分子之间与另外某一固体表面分子之间碰撞产生气体的外作用力，并转换为该液体分子表面的原子间的作用力时，将会产生对液体原子的吸引力，其特点是指一种自可逆的吸附过程。

物理吸附的特点有：

- 1) 当被吸附质分子在被吸附剂表面上已经形成了一个单层表面吸附层或是一个多层的分子层表面吸附分子层时，其表面被吸附分子的附着率也比较低；
- 2) 吸附气体无选择性，任何的一个小固体颗粒就几乎可以吸附出其它任何形式的气体，当然每次的吸附出的气体量可能会有所不同；
- 3) 吸附的稳定性通常不是很高，吸附时间和解吸的速率变化都相对是很快的；
- 4) 吸附时不需要活化能，吸附反应速率变化并不一定因反应温度的持续升高变化而会变快。

化学吸附物质的概念：由于化学吸附质通常是分子与该化学吸附剂表面原子间所发生的化学键之间的合作和反作用效应等造成的，即是在某些被吸附质分子与其他物质表面之间所发生的包含了电子的转移、原子间的电子重排作用或化学键间的电子破坏作用的发生与生成的现象。

化学吸附的特点有：

- 1) 化学吸附往往是不可逆的；
- 2) 化学吸附物的化学吸附反应热要接近于其他化学反应引起的吸附反应的热量，要比其他物理化学反应吸附温度大。
- 3) 吸附效果很难稳定，一旦失去吸附，不易再解吸；
- 4) 吸附是单分子层一层一层进行的；
- 5) 吸附过程需要大量活化能，温度急剧升高，吸附时间和解吸的速率也会大大加快。

2.1.3. 吸附剂

一种好的吸附剂应该需要具备的最重要的特性是多孔结构，从而产生高比表面积。此外，建立吸附平衡所需的时间应尽可能短，以便能够在更短的时间内去除污染物[7]。因此，为了去除污染物，人们寻找具有高比表面积和高孔隙率的吸附剂，并要求可以显示快速吸附动力学的吸附剂[8]。

常用的吸附剂有氧化铝和铝土矿、硅胶等。

氧化铝：一种合成多孔结晶凝胶，以不同尺寸的颗粒形式存在[9]。铝土矿是一种天然多孔结晶氧化铝，受到高岭石和氧化铁污染，其比例因产地而异。它被广泛用于替代氧化铝，实验证明它可以去除大多数需氧和厌氧细菌[10]。

硅胶：由胶体硅酸凝聚而成，形成不同大小的多孔颗粒和非晶体颗粒。与氧化铝相比，它的比表面积更大，被认为是一种良好的吸附剂，在许多行业中用于干燥气体和液体、净化碳氢化合物等。

沸石和离子交换树脂：沸石是重要的天然微孔吸附剂，也是人工合成的。将其可视为低成本的吸附剂，沸石是能够进行可逆碱交换反应的结晶构造硅酸盐。早期的沸石是通过将称量的长石、粘土和苏打灰熔融而形成的[11]。后来，从烧碱、硅酸钠和铝土矿的混合物中获得的合成沸石也被开发出来。天然沸石通常比表面积较小；然而，一些合成沸石的表现面积可以高达 $700 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。沸石的三维结构表征方法通常需要通过直接测量比表面积、孔的缝隙体积分布和在低温中 N_2 吸附的孔径和分布，并可应用现代各种测量技术，如利用 X 射线聚焦和中子衍射、红外、拉曼、核磁共振扫描和扫描电子显微镜等等来进行，许多沸石也被用于去除各种污染物[12]。

海藻酸钠基碳气凝胶也是应用前景广阔的吸附剂。海藻酸钠本身就是一种优良的天然金属离子吸附剂。但凝胶拥有三维的多孔结构，且具有密度低、官能团丰富和优越的吸附性能等特点[13]。

2.1.4. 污水治理应用

吸附处理技术在工业水处理行业中，也是一项十分重要的核心技术。自新中国建国以来，我国社会工业用水规模不断大幅增长，由原来 2000 年用水量占当年全国生产总社会用水量额的近 20.7% 逐步增加和发展到现在 2007 年用水量占当时全国社会总生产用水量总额的超过 24.1%，水资源紧张在一定的程度上，会成为严重制约工业发展等一些领域企业生存发展水平的一大因素，工业水处理的再重复回收利用项目和生活工业污水中可再利用工程已经成为当今我国工业企业实施节能减排战略的重点措施。吸附处理技术还被许多国外实验室广泛进行研究及应用于对一些高浓度废水系统污染物的净化，净化前将其综合处理，例如利用吸附技术直接处理一些高浓度的含氟氰酚废水，该技术具有净化后综合处理和吸附的分离效果，可回收到其他任何有用的工业物料以及利用吸附剂来回收可再生循环的处理后的废水等优点。Jianhan Huang 利用二羟基磺化高度交联树脂来直接处理含苯酚的废水；孔德顺等人使用含 NaX 的分子筛（亦称沸石）树脂做为吸附剂来间接处理含酚废水。利用粉煤灰吸附处理法模拟处理实验室含铬的废水，贾陈忠等研究采用了粉煤灰的吸附技术处理了实验室的模拟处理含铬的废水，并均取得了较为理想的效果。利用优质粉煤灰渣吸附作用法研究处理各种焦化废水，张昌鸣等还研究了用优质的粉煤灰渣等作为吸附剂来直接处理焦化及生化肥厂出水后的焦化废水，处理后的净化水质效果很明显良好，夏海萍等课题组还专门研究与测定分析了膨润土石与粘土矿砂颗粒对焦化与生产过程废水烟气系统中游离性氨氮离子颗粒的吸附作用。

吸附反渗透技术也是国内近年来开发的另外一项新兴净水技术，现已被国内广泛研究应用于各项工业水净化处理，主要广泛应用于各类工业厂房中的循环水和冷却水等的水质处理，能快速、有效地解决各种循环水的水质问题。由于经过高压浓缩过滤后可能会产生出一系列有害的胶体离子，浓度含量增加、结垢严重等各种问题，该技术的应用达到了良好的水质除盐效果[14]。生物吸附工艺在各类工业废水排放中对去除有毒重金属离子等有着很广阔深远的行业应用及前景，自上世纪的 70 年代生物吸附开始，就引起了人们的广泛关注。生物吸附方面的理论研究开始变得越来越活跃[15]。活性炭吸附处理法近年来在生活工业废水的处理、水资源水环境的污染处理、饮用水系统的水处理工艺中均作为有效固体吸附剂并被国内外广泛推荐应用。

2.2. 光催化工程

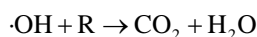
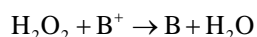
2.2.1. 光催化的提出

一九六七年，日本的学术工作者藤岛昭教授首次报道出了二氧化钛单晶表面在强烈紫外光直接照射作用下，水质出现了光致分解反应现象，这一现象也称作“本多 - 藤岛效应” (Honda-Fujishima Effect)，从而也开启起了光催化降解单晶方法发展的新纪元[16]。自发现半导体存在光电化学水裂解过程开始，光

催化水降解作为一项先进的催化氧化技术就获得了快速的发展。光催化反应是一种基于在光催化剂的存在下,在正常光照条件作用下所具有的选择性氧化及还原的能力,从而也可以同时达到选择性净化多种污染物、物质及其合成代谢到再转化功能等目的。通常在理想条件下,光催化氧化反应即以有机半导体分子为主要催化剂,将光辐射转化为反应能量,将某些有机物直接降解转变为游离的二氧化碳氮和游离的水。

2.2.2. 光催化机理

诸多研究及实验工作表明,光催化的反应作用原理主要是光电效应,即利用半导体光催化剂的分子受到与其能量相匹配或明显大于其带隙能量(E_g)的强光的照射发生作用的过程[17]。该过程主要包括,从一个半导体材料上电子的电子价带位置之间和正空穴导带位置之间的分别被激发后形成了一个光生电子穴和一个正空穴,该过程一般认为是一个电子在另一个电子中进行填充电子价带位置(VB)的过程,激发的光到了另外的一个电子空位导带(CB)中,在其产生 VB 的过程中只留下了一个电子正空穴,随后将激光催化下来的两个电子空位正穴和四个电子空穴分别用来与氧、水和羟基进行反应,以生成活性氧化物基团(如羟基自由基和超氧化物自由基阴离子具有很强的氧化能力)的光降解反应。这些活性氧化物基团是废水中持久性降解有机污染物的主要物质。其机理如下[18]:



2.2.3. 污水治理应用

目前,水污染的综合治理已是当前世界性话题的重中之重,而新型半导体光催化剂也可以更加有效并及时地处理清除掉城市污水,来处理多种重金属离子存在的污水。此外,还可以通过从农业污水排放中直接提取重金属。纳米 TiO_2 同时还能用来降解水中有机物生成如二氧化碳气体和水凝胶及制造一些相对简单易得的纳米无机结构材料[19]。Btryba 等人已使用了 Sol-Gel 法将纳米 TiO_2 材料加入在活性炭颗粒中,用于一次性过滤吸附掉水中残存的游离苯酚。在中国被有机污染物污染过的城镇、工厂车间等排放的各类有机工业污染废水在我国各类水污染中占比较大。其中,具有危害的一类水体污染物多为持久性有机氯化物。其分布空间较为狭小,但具有直接进入人体且能产生对人体不利的生物毒性,一直是国家治理农村水环境领域的技术瓶颈。光催化技术已在农业这一方面上得到了应用,其出色的表现得到了许多科研工作者的肯定。申请的研究项目也是日益增多。纳米级 TiO_2 催化剂可以迅速对水中的有机氯化物等进行比较迅速而且明显地生物降解,不会导致产生许多额外有害的生物多余化产物。使用有毒农药后排出的污染废水,如果排放到生活用水中,则会使水体受到污染,甚至也会因此破坏大气生态水平衡。使用半导体 TiO_2 催化剂对生产有机磷农药的废水中进行半导体光催化的降解,可以实现大部分有机磷农业、杀虫剂等完全无害的被降解,去除率的最高水平可达到 90%。同时,有关如何高效利用半导体光催化剂来降解工业废水污泥中印染染料化合物的应用研究领域也得到了飞速进展。采用纳米 TiO_2 光催化剂的降解机理,可使印染工业废水产品中污染物的平均 COD 指标和着色度指数明显大幅度下降,效果更为显著。许多通过化学手段难以进行自然富集来降解利用的化合物或经过化学处理、工业处理或其他化学有效控制方法的有机污染物,纳米 TiO_2 光催化剂可以直接去除一些污染物中的高挥发性物质,如脱三氯多氯联苯、有机磷化合物、多环芳烃及其单体衍生物等,可分别利用化学处理法予以有效降解去除。此外,纳米 TiO_2 光催化剂有时也还可用于进行有机无害化处理各种无机重金属污水和有机工业废水等。

纳米 TiO_2 通过高效光催化工艺和酶降解分离提纯技术,就完全可以很轻松地将在水中长期悬浮下来的多种环境有毒化学污染物迅速溶解和除掉,并能够快速回收经过反应后的分解产物,如二氧化碳废气

和高浓度氨水尾气等其他环境下无害的有机污染物质，它具有能迅速、彻底地溶解或破坏周围各种有机污染物、材料价格比较便宜等独特优点。光催化已经成为了一项极具创新性、科学实用性的特色生物处理工艺方式。与当今自然界以及其他任何一种工业环境污染物降解治理或处置等技术措施方法相比，光催化剂降解有机废水工艺的最主要优点则是：不需要通过任何的二次循环水处理，可在短期内快速地将其排入江河流域中，使排放到空气污染物水体中的含有重金属的以及各种其它有机的大分子污染物得以完全氧化降解，并被降解为 H_2O 、 CO_2 等。含有高浓度重金属无机微分子污染物可被进行矿化和处置等；并且还可以充分有效地利用太阳光能量来激变发光的催化剂分子以直接参与其它一系列需要光催化剂的催化反应，无需借助于其他任何清洁的能源系统；光催化剂产品本身可选择性进行光催化，并且能够进行循环的回收处理或被再次吸收利用。理想的光催化剂产品类型应当至少包括一种稳定性良好、价格相对低廉、无毒、高活性的化合物。且其能迅速被水体充分高效的分解和吸收。

本课题组在研究中发现，采用光催化技术进行降解印染厂废水，通过合成一定比例氮化碳材料来处理碱性条件下的苯酚，通过在类芬顿体系光催化，并在氙灯的照射下，将淡黄色的碱性苯酚溶液降解成无色的透明溶液，测定溶液的酸碱度呈中性，实验对比图如图 4 所示。研究结果与可持续发展理念相吻合。



Figure 4. Photocatalytic degradation of alkaline phenol solution in Fenton-like system—left (after degradation); right (before degradation)

图 4. 类芬顿体系下光催化降解碱性苯酚溶液——图左(降解后); 图右(降解前)

3. 结论与展望

1) 水资源是维持生命的宝贵物质，自然界万物皆依赖于水资源。由于人口数量的剧增、人类活动的干预，破坏了水的自我恢复能力，故保护水资源应成为世界上每一个人的责任，积极倡导“不要让眼泪成为最后一滴水”，水能源为自然界做出了非常大的贡献，我们要杜绝浪费水资源。

2) 本课题组采用光催化技术，按比例合成氮化碳材料来处理碱性条件下的苯酚，通过在类芬顿体系光催化，并在氙灯的照射下，将淡黄色的碱性苯酚溶液降解成无色的透明溶液，测定溶液的酸碱度呈中性。课题组计划在可持续发展理念下，后续将改进比例和条件，并探究该材料的最佳性能。

3) 许多科研工作者为了治理水污染，积极从各方面着手，自 20 世纪后半叶，便开展课题探究。研究至今，已有很大的进展，尤为显著的便是化工界有名的吸附和光催化这两个伟大的工程，从理论到实践，从单一性功能材料到掺杂不同物质的多功能材料，从净化少量污水到工业化生产源头治理水污染，吸附

又分为物理吸附和化学吸附,光催化从氙灯光源到阳光下进行,从价格昂贵的低性能材料到价格低廉的高性能材料。虽然这两种工程在污水治理中取得了进展,但如何提高净化效率依然是一个需要不断探究的课题,怎样能在可持续发展理念下提高性能、拓展领域仍然是治理污水的瓶颈。

致 谢

特别感谢伊犁师范大学化学与环境科学学院闫秀玲教授、刘天宝团队精心指导;特别感谢伊犁师范大学大学生(2021~2022)创新创业训练计划项目;特别感谢梅特勒·托利多科技产品有限公司提供仪器操作指导;特别感谢伊犁师范大学与科蒙乡中学等学校 2022 年秋季支教教学安排。

参考文献

- [1] 《中国水利百科全书》编辑委员会.《中国水利百科全书第二版》(第二卷) [M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:1065.
- [2] 《中国水利百科全书》编辑委员会.《中国水利百科全书第二版》(第二卷) [M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:462.
- [3] 邓家超,安永宁.化工污水污染治理措施研究[J].化工管理,2013(10):216-216.
- [4] 王香爱,曹强,史夏燃.国内外污水处理研究进展[J].应用化工,2021,50(1):176-182.
- [5] 刘欣铠.国内外城市污水处理现状及展望[J].水利天地,2005(6):13.
- [6] 王麒.我国城市污水处理工艺的发展状况综述[J].建筑与预算,2015(9):38-41.
- [7] 杜杰,张诚.综述低成本吸附剂处理含重金属废水的研究进展[J].粉煤灰综合利用,2006(5):49-52.
- [8] 孙政钊.关于吸附剂再生技术的研究[J].化工管理,2014(32):103.
- [9] 张文康,刘晶晶.氧化铝生产污水的处理和循环再利用[J].中国金属通报,2018(7):11-12.
- [10] 黄肖容,隋贤栋.梯度氧化铝膜对生活污水的净化处理[J].膜科学与技术,2001(1):52-55.
- [11] 张恒祥.沸石的改性及其在污水处理中的应用[J].辽宁化工,2022,51(8):1083-1085.
- [12] 陈红芳,王广智,周思敏,冯丽娜,王东东,胡磊.改性沸石在污水处理工艺中的应用进展[J].现代化工,2020,40(S1):59-63+70.
- [13] 夏宝国,刘帆,李美青,刘天宝,闫秀玲.海藻酸钠基碳气凝胶的研究进展[J].材料科学,2022,12(6):577-585.
<https://doi.org/10.12677/MS.2022.126062>
- [14] 邵娜.水处理技术在污水处理中的意义及应用前景[J].皮革制作与环保科技,2022,3(9):7-9.
- [15] 马龙.分析污水处理技术在化工行业环保工程中的运用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(19):189-191.
- [16] 杭子清.简析光催化技术及其研究现状[J].资源节约与环保,2021(2):122-123.
- [17] 水博阳,宋小三,范文江.光催化技术在水处理中的研究进展及挑战[J].化工进展,2021,40(S2):356-363.
- [18] 吕奎霖.光催化技术研究现状与进展[J].信息记录材料,2021,22(2):5-6.
- [19] 徐慧娟.光催化剂 TiO_2 的发展与应用[J].廊坊师范学院学报(自然科学版),2009,9(1):77-82.