

城市污水再生与循环利用的关键基础科学问题

◆曲久辉¹ 赵进才² 任南琪³ 张学洪⁴ 胡洪营⁵ 俞汉青⁶ 刘会娟¹
王志伟⁷ 吴光学⁵ 吴乾元⁵ 穆杨⁶ 盛国平⁶ 李大鹏⁸

1. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085;
2. 中国科学院化学研究所,北京 100191;
3. 哈尔滨工业大学,哈尔滨 150001;
4. 桂林理工大学,桂林 541004;
5. 清华大学环境学院,北京 100084;
6. 中国科学技术大学化学与材料科学学院,合肥 230026;
7. 同济大学环境科学与工程学院,上海 200092;
8. 国家自然科学基金委员会工程与材料学部,北京 100085

摘要 本文通过对城市污水再生与循环利用的国家重大需求和国际前沿研究工作的深入分析,阐明了城市污水再生与循环利用研究所呈现的“机制微观化”、“过程安全化”、“技术集成化”和“系统生态化”等基本特征,总结出污染物的去除与转化、化学物质能源化以及再生水循环过程的生态风险控制等在城市污水再生与循环利用研究中需要重点解决的关键科学问题,展望了为促进我国城市水系统可持续发展而应重点开展的4个研究方向:(1)污水再生及循环的物质转化与能源转换机制;(2)再生水生态储存与多尺度循环利用原理;(3)城市水系统水质安全评价与生态风险控制方法;(4)基于“再生水+”的可持续城市水系统构建理论。

关键词: 城市污水 再生水 循环利用 污染物转化 生态风险

中图分类号: X703 文献标识码: A

文章编号: 1009-2412(2017)01-0006-07

DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2017.01.002

随着我国城镇化和工业化进程的加快,水质污

收稿日期: 2016-10-08 修回日期: 2017-02-20

联系作者: 李大鹏,研究员 lidp@nscf.gov.cn.

染和生态破坏已成为社会经济发展的限制性因素。国家生态文明建设战略的实施和《水污染防治行动计划》(“水十条”)的颁布,对城市水环境保护和城市水系统建设提出了更高的要求。目前,我国城市各类污(废)水年排放总量近700亿吨,是城市水环境的主要污染源,但同时也是一种来源稳定、具有潜在利用价值的可再生资源。预计到2020年,缺水城市的再生水利用率将达到20%以上,京津冀区域将达到30%以上。因此,城市污水再生与循环利用是我国“水十条”的重要工作内容,具有重大的国家需求,对于控制水体污染、改善水环境质量、构建可持续城市水系统具有重要意义。

国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、化学科学部、地球科学部和生命科学部会同政策局、计划局于2015年10月联合召开了主题为“城市污水再生与循环利用的关键基础科学问题”的第143期双清论坛。来自国内25所高校与科研院所的60余名专家应邀出席了论坛。与会专家围绕城市污水再生与循环利用领域的研究现状、发展趋势及面对的挑战进行了交流和深入讨论,凝练和提出了我国在该研究领域急需关注和解决的重要基础科学问题、前沿研究方向和科学基金资助战略。

1 城市污水再生与循环利用的重大需求和研究现状

城市系统中水的社会循环模式可以勾勒为:人们从自然环境中抽取新鲜水,用于日常生活与生产

活动,因而引入了更多物质,成份变得更加复杂,成为污水;污水经人工净化后再回到自然界参与循环。快速城镇化和工业化条件下的城市水大规模社会循环模式,使得大量污染物进入到自然水体,是造成当前我国严重水环境问题的根本原因。在研究水社会循环过程科学规律的基础上,发展工程技术手段,实现城市污水的再生与循环利用,是减少水的社会循环对自然循环造成不利影响的主要途径。

城市污水处理技术的研究与应用经历了 100 多年的发展历程,逐渐形成了一级处理、二级处理和深度处理等处理模式,发展了多种物理、物化和生物等处理技术。物化+生物的二级处理是城市污水处理厂通行的处理模式,而生物处理技术是国内外普遍采用的城市污水处理方法,其理论研究和科技发展至今方兴未艾,未来一段时间仍将是城市污水处理的主导技术。随着对环境质量要求的不断提高,以物化方法为核心的深度处理技术也得到了长足发展,是污水处理的前沿领域。与此同时,国内外研究者对污水再生与多尺度循环利用过程中的生态风险识别与控制技术也进行了较为系统和深入的研究。2012 年 8 月,《Science》上发表的综述论文总结了污水产生最小化和回用的新途径,提出将污水的“污”去掉,以满足人类水安全与生态系统可持续发展的需求。但是,面对我国正在加速城市化进程及新常态下城市污水再生与循环利用的挑战,城市水系统社会循环的传统模式亟待变革。因此,发展相关的科学理论、突破关键技术、创新工艺原理,为城市水系统质量改善提供坚实的、前瞻性科技支撑,是本学科的重大任务。

城市污水再生与循环利用过程中,污染物的去除与转化、化学物质资源化以及再生水循环过程的生态风险控制,是近年来受到广泛关注的的关键问题。诠释和破解这些问题,是发挥和强化城市污水资源属性及其生态效益的科学基础。

1.1 城市污水中污染物去除与转化的过程及调控

城市污水处理的对象主要为有机碳、氨氮和磷酸盐,城市污水的脱氮、除磷是近年来研究的热点。与传统脱氮工艺相比较,短程硝化反硝化、厌氧氨氧化与亚硝化工艺相结合的脱氮工艺等已经开始替代传统的污水脱氮技术。与传统的专性好氧磷细菌去除工艺相比,反硝化除磷能节省有机碳和氧气消耗量,减少剩余污泥产量和 CO_2 的排放量,是一种经济、高效的城市污水生物脱氮除磷技术。好氧颗粒

污泥技术具有同时去除有机物、氮和磷的多重功能,从 20 世纪 90 年代后期逐渐受到重视。膜生物反应器(MBR)是一种由膜分离单元与生物处理单元相结合的污水处理技术,其应用范围和规模不断扩大。

提高城市污水处理厂中有毒微污染物的去除效率,保证出水的生态安全性是城市污水处理研究的另一个热点。对于新兴化学污染物等有毒有害污染物,其处理技术主要包括活性炭吸附、臭氧高级氧化和膜技术等。活性炭对某些有毒有害污染物如烷基酚具有较好的吸附效果,但对再生水中存在的微生物代谢产物等大分子物质去除效果较差,而且大分子物质的存在会堵塞活性炭空隙,缩短活性炭使用周期,增加经济成本。臭氧氧化是最常用的高级氧化技术,能快速与含有不饱和键的化合物反应,形成醛、酮、羧酸等反应产物;同时臭氧灭活微生物能力强,经过投加适量的 O_3 处理后,水中的病原微生物能被有效灭活。膜技术由于具有高效性、安全性和稳定性等特点,倍受关注。膜分离主要分低压膜(微滤和超滤)和高压膜(纳滤和反渗透膜)。高压膜对再生水中微量有机污染物如内分泌干扰物的截留主要利用筛分机理,低压膜则主要是通过膜的吸附去除作用来实现。在生物处理方面,针对实际废水的高效菌株选育、应用物理因素和化学药剂实施诱变育种等是近年来的一个热门研究领域。共代谢是一种有前途的去除低剂量有毒难降解有机物的生物降解技术,也受到关注。

消毒是污水再生处理、保证再生水生物安全的必要环节。常用消毒处理技术包括臭氧氧化、紫外线消毒等。2011 年 1 月,《Science》发表了氯消毒面临两难问题的论文,指出饮用水和再生水氯消毒生成有毒有害消毒副产物,但臭氧氧化等替代消毒方法自身仍存在多项危害。国内外有关再生水消毒的研究起步较晚,特别是关于再生水中新型病原微生物消毒的研究远远不够。再生水消毒有其自身的技术特点和要求,其对微生物的杀灭作用和规律与饮用水消毒相比存在着明显差别。因此,饮用水消毒方面的研究成果和经验能为污水消毒提供有益的参考,但不能直接指导再生水消毒的研究实践。

此外,随着资源、能源短缺问题日益突出,研究者开始关注污水中污染物的资源转化与回收过程及机制。磷资源作为一种不可更新、不能替代的宝贵资源在污水资源回收方面日益受到重视,而采用鸟粪石结晶法成为最具有前景的磷回收技术。此外,

从污泥中回收可降解塑料(PHA)、粗蛋白、利用污泥制备生物炭(biochar) 等也成为城市污水资源回收的研究热点。

1.2 城市污水中化学物质的能量转换过程及调控

当前以达标排放为核心目标的污水处理工艺具有高能耗、高物耗特点。目前,我国 3 000 多座城市污水处理厂年耗电量超过 100 亿 kWh,占社会总能耗的 2% 以上,且占比将继续增加。另一方面,城市污水中蕴含着可利用的化学能。据估算,如果能够获取污水化学能的 50%,城市污水处理厂理论上可以实现能量收益目标。然而,现有污水处理工艺,即使达到最佳能量配置及运行管理,能源节约潜力估算也仅为 14%。因此,研究城市污水中物质-能量的转换过程、调控机制和技术系统,是城市污水处理与再生利用领域具有挑战性的重要方向。

利用厌氧性微生物的代谢特性,以污水中被还原有机物为受氢体,能够在无外源能量条件下产生具有能源价值的甲烷气体。城市污水的厌氧处理或剩余污泥的厌氧消化,是利用城市污水中污染物提取甲烷的最成熟技术。第一代厌氧反应器技术诞生于 20 世纪 50 年代,以普通厌氧消化池和厌氧接触工艺为代表。为进一步提高厌氧处理效率,又逐步形成了以升流式厌氧污泥床等为代表的第二代厌氧处理技术。进入 20 世纪 90 年代后,发展了以厌氧颗粒污泥膨胀床、厌氧内循环反应器等为代表的第三代厌氧处理技术,通过颗粒污泥、水动力学等调控提升了污水中污染物向能源转换的效率。近年来厌氧膜生物反应器技术的发展,进一步提升了厌氧系统的固液分离效果和污染物的转化效率。

以污水为底物提取氢气,可获得洁净的氢能,也是污水中化学物质转换为能源的重要途径。通过异养型厌氧细菌利用碳水化合物等有机物,通过发酵作用产生氢气的研究较为系统和深入,但总体上尚未完全成熟。光合细菌利用光能,催化有机物厌氧发酵获得的小分子有机酸、醇类物质为底物而产氢,能量利用率高,与光能利用和有机物去除有机耦合,具有潜在的应用前景,但需要解决污水色度、铵盐浓度等问题。依据生态学规律,将非光合生物(可降解大分子物质产氢)、光合细菌(可利用多种低分子有机物光合产氢)以及蓝细菌和绿藻(可光裂解水产氢)等系统结合的共产氢技术已引起人们的研究兴趣。

随着研究的不断深入,新型的污水能源转化技

术不断涌现。微生物燃料电池(MFC) 是将污水中的有机污染物直接转换成电能的装置和方法。污水中有机物在阳极产电菌(主要是希瓦氏菌、地杆菌等)的代谢作用下实现分解,该过程中所产生的电子经过外电路到达阴极,形成电流回路。MFC 可与其他物理化学方法耦合成为污水自驱动的新型水处理工艺,如电-Fenton 法、微生物脱盐电池、微生物氮磷回收电池等。微生物电解池(MEC) 是一种利用微生物作为主体,通过外电源在阴阳极间施加电流将有机物降解的同时产生氢气或甲烷的一种水处理方法。与 MFC 相似,污水进入阳极室后在厌氧微生物作用下分解成小分子酸和甲烷,产生的质子迁移到阴极室中再还原成氢气。通过对电极材料类型、微生物菌落组成及电解参数进行控制,可以实现产物类型的有效调控。这些新型能源转化技术为实现城市污水中化学物质的能量转换提供了新的技术途径,但这些生物电化学系统在处理实际城市污水中的能量效率还相对较低,且在放大过程中存在内阻增加以及电池间反应速率不匹配的问题,导致放大系统的能量效率明显降低。因此,进一步优化调控能量转换过程、提升能量捕获效率是上述新型能源转化技术研究的重点和难点。

1.3 城市再生水循环过程中的生态风险识别与控制

再生水可应用于城市水体补给、农业灌溉、绿地灌溉等生产、生活和生态途径,再生水已经成为维系城市水生态系统健康的重要水资源。但是,现行再生水水质标准存在明显的局限性。因此,即使达到再生水回用标准的再生水中仍含有较高浓度的氮、磷等营养物质以及病原微生物、有毒有害化学污染物、溶解性有机物。这些污染物对生态系统的潜在风险不容忽视。2013 年 2 月,《Science》发表了再生水中常见的精神药物影响自然种群中鱼类行为的研究结果,指出再生水浓度水平的奥沙西洋即可使欧洲鲈鱼兴奋、不合群、进食速度加快。补给再生水的城市地表水体存在有害藻类大量生长、暴发水华、影响生态安全的潜在风险。相关研究表明,再生水补给对水生态系统的影响极其复杂,亟待投入更大的力量进行系统和深入的研究。

城市污水再生循环涉及再生水处理、储存、利用等多个环节,污水再生循环的生态风险控制不仅需要控制污水厂出水水质,还需优化储存水体设计、构建健全的水生生态系统,并在后续利用的预处理环节中提升水质。目前已有研究者提出了基于风险控

制的再生水水质控制目标确定方法,并围绕关键水质指标控制开展了污水再生处理技术的研发。同时,储存水体中污染物净化去除亦与水生植被、土壤等生态系统要素密切相关。基于人工湿地、水力调控与土壤优化的地表和地下储存水体优化设计方法,可削减污水厂出水中污染物负荷,从而实现水质的生态净化。但是,这些较大尺度单元中污水中物质和能量流动与转化、转换的微观机制,尚需进一步明确。

污水厂出水中复杂污染物在生态系统多要素复合作用下的迁移转化十分复杂。在地表或地下储存系统中,部分有毒有害污染物、消毒副产物前体物可被光照、微生物等降解以及包气带土壤氧化还原所去除,但是某些有毒有害污染物降解后生成高毒性的物质并被水体底泥、包气带土壤所吸附浓缩。消毒后部分微生物在地表储存系统中存在复活与再生长的潜力,其中微生物生长与污水厂出水的生物可利用性亦密切相关。污水厂出水地下储存可以去除部分病原微生物和化学污染物,但部分存活能力和迁移能力强的病原微生物以及亲水性的化学污染物亦可能穿透土壤过滤系统,进而污染地下水。更重要的是,污水厂出水中高密度有害基因在底泥、土壤等储存水体环境介质中的水平遗传和富集特性仍不清楚。

污水厂出水的有毒有害污染物与水生生物的生长发育的影响规律亦十分复杂,如下游雄鱼的雌性化不仅与雌激素物质有关,亦与抗雄激素物质有关,而且污染物通过食物链的传递和放大作用机制尚不清楚。污水厂出水不仅作用于生物个体,亦可能对生物群落产生复杂影响。污水厂出水使得不同河道下游细菌多样性降低,并出现了微生物种群相似化的现象。因此,后续亟需对再生水补给的复杂生态效应展开系统深入的研究。

在生态风险评估技术方面,研究者利用化学仪器分析和生物测试方法,初步了解了污水厂出水中部分病原微生物、有毒有害污染物以及生物毒性的分布特征。但是,相关研究多针对某一类特定的有毒有害污染物、病原微生物、毒性,尚无法给出污水厂出水中的污染物整体分布图谱。

2 城市污水再生与循环利用的发展趋势

再生水处理单元可以实现污水向再生水的转化,是城市水系统中物质流和能量流的一个重要节

点,是解决城市水环境污染的重要手段;再生水的生态储存和利用,进一步扩展了水质净化的空间尺度,丰富和强化了再生水的资源化属性。通过再生水的生态处理、生态储存和生态利用来控制城市水环境污染、缓解城市缺水困境和有效解决城市洪涝问题、以生态学理念审视城市污水再生与循环利用的全过程,已经成为重要的发展趋势。在此背景下,城市污水再生与循环利用研究呈现以下主要发展趋势和特征。

2.1 城市污水中物质转化与能源增值转换的“机制微观化”

研究的微观化对于深入理解城市污水中的有机质、氮、磷等物质的资源化、能源化过程,提高城市污水再生性能及循环利用效率等具有重要的理论意义和实用价值。通过探索城市污水中污染物迁移转化的物理、化学过程和分子生物学机理,探索在复杂、多变、开放的环境体系中污染物的界面行为,阐明多种污染物的复合影响作用以及污染物与微生物相互作用的机制,可以为城市污水中物质转化与能源转换过程的优化调控提供理论与基础依据。体现在以下几个方面:

(1) 研究城市污水再生过程中物质流、能量流和电子流以及三者之间的交互作用规律,探讨城市污水资源化、能源化过程的微观调控机制;

(2) 研究城市污水再生与循环利用过程中微生物的成分、形态、浓度及其迁移转化规律,从分子水平上探讨其在污水再生过程中的反应特性和控制原理,考察其形成消毒副产物的能力;

(3) 明晰微生物代谢产物的成分、浓度及特性,探讨其可能的产生源和形成机理,考察工艺参数对微生物代谢产物形成、性质的影响,阐明微生物代谢产物毒性与微生物性能的内在联系,建立描述微生物代谢产物形成的数学模型;

(4) 开展微生物的基因组学和蛋白组学研究,探索城市污水再生与循环利用过程中微生物的种群演变、生长动力学、热力学和代谢规律。

2.2 城市污水生态储存与多尺度循环利用的“过程安全化”

针对不同用水目标和多尺度循环过程,围绕有毒有害化学污染物、病原微生物、抗性基因和有害藻类等筛选关键风险因子,阐明混合污染物共暴露对生态系统的影响机制,发展并建立混合污染物共暴露条件下的生态影响和健康危害性的科学评价方

法,使水生态系统中敏感生物和生物群落安全处于全天候的监护之下,开展化学品、病原微生物、抗性基因和有害藻类等的高效控制原理与技术研究,实现城市污水再生、储存与多尺度循环利用全过程的安全化。体现在以下几个方面:

(1) 研究水中低剂量有毒有害物质在城市污水处理过程中、再生水储存和循环利用过程中的毒性变化规律,定性和定量分析回用水的急性和慢性生态毒性,甄别关键毒性因子,提出有别于传统综合污染指标的新指标;

(2) 确立基于活体模型动物的快速评价方法,建立针对单元工艺、生态储存与利用过程的安全性评价的科学方法,提出控制和削减有毒有害物质技术有效性的生物评价指标;

(3) 建立以生物标记物和细胞、生物分子毒性为基础的多指标评价体系,发展实用的毒性确认技术及在线毒性监测方法,形成评价水处理技术安全性、对纳污水体生态风险的评价方法和指标体系。

2.3 城市污水再生与循环利用的“技术集成化”

城市污水中污染物组成极其复杂。为了控制城市污水再生、储存与循环利用过程中有毒有害化学物质、病原微生物等对水质的影响,多技术的耦合和集成化是必然趋势。通过污染物的微观迁移转化过程研究建立相应优化调控技术,是提升耦合与集成技术的处理效能的有效途径。集成化趋势主要包含以下几个方面:

- (1) 单元生物处理技术的集成化;
- (2) 生物-物化处理技术的集成化;
- (3) 生物-生态处理技术的集成化;
- (4) 生物-生态-物化等处理技术的集成化。

2.4 以再生水为纽带的可持续城市水系统构建的“系统生态化”

传统的城市污水处理的浅生态模式将发展为以生态理念为核心的污水再生与循环利用的新模式。新模式将突破现行的再生水有限水质指标、使用目标和循环尺度的局限,充分利用生态媒体延伸传统污水厂的范围与功能,使所含物质以不同途径得到充分和经济的利用。新模式将修复和提升城市水生态系统的质量和功能,强化城市水的资源属性。体现在以下几个方面:

(1) 系统生态化摒弃污染物完全矿化的传统处理模式,发展以低能耗和低资源损耗为前提的新型城市污水再生技术,对污水中的水资源、能源、碳源、

氮磷等组分加以合理利用,使之符合节能减排和环境质量改善的可持续发展要求;

(2) 在再生水的储存过程引入生态媒体,研究生态媒体对于再生水存储的水质和生态影响,分析生态媒介对于实现再生水在地表和地下进行稳定优化的生态储存的作用;

(3) 研究城市再生水的补给和循环对于城市水生态系统质量和功能的保障作用,以及再生水补给的水体快速实现自然性过渡并具有更完整的生态系统和服务功能的作用。

3 关键科学问题

再生水处理是城市水系统中物质流和能量流的一个重要节点,以生态理念为核心的“生态处理-生态储存-生态影响-生态修复”再生水生态循环与利用新模式、新理念是支持可持续城市水系统构建的关键。然而,城市污水中存在复杂多样的常规有机物、有毒有害化学污染物、氮磷营养物质、病原微生物等,对再生生态处理、生态储存与循环利用带来复杂影响。同时,污水中的资源/能源物质组分复杂、浓度低,制约着污水中物质的资源、能源回收效率。为了促进我国城市水系统的可持续发展,未来应着重研究的关键科学问题包括:

(1) 污水再生及循环利用过程中物质流、能量流和电子流的交互作用与微观调控动力学

物质的传输、分配和转化贯穿于污水再生处理到循环利用的全过程,而影响该过程的能量流与物质流具有非线性关系,电子则是此过程物质和能量变化的主要驱动力。因此,需要深入研究三者之间的交互作用规律,阐明以电子转移为核心的物质及能量转化动力学机理,建立污水资源化、能源化和生态循环的微观调控机制。

(2) 混合污染物共暴露下生态系统中关键要素的响应机制及分子的选择性无害化机理

受纳水体生态系统对再生水中污染物共暴露具有复杂的响应机理,其中低剂量有毒物质及与常量污染物共同作用的生态毒理效应是本领域的科学难题。因此,需要深入研究混合污染物共暴露下敏感生物或生物群落的变化机理,揭示主导这种影响的关键因子或物质,探索通过选择性改变分子结构或形态使这类物质无害化的原理,发展再生水水质安全保障的新方法。

(3) 生态储存、回用及多尺度循环的地球化学、生物学过程及多尺度效应

再生水进入天然水系统并与自然循环相融合的过程,必将发生一系列的物理、化学和生物学反应,这些反应也必然在所关联的不同时间、空间尺度上表现出不同的热力学与动力学特征。因此,需要深入研究储存、回用环境下再生水的地球化学过程和分子机制,揭示再生水转化为生态水、社会循环与自然循环耦合的过程机理,阐明从环境补给、生态储存到多元循环的时空尺度效应。

(4) 基于“再生水+”的新一代污水处理与城市河流生态系统完整性理论和方法

“再生水+”是对传统再生水内涵的拓展和深化,是从工程排水向生态用水理念的重大转变。当排水对受纳水体的影响不再是污染,而成为其生态修复的一种途径,有关再生水的理论与工艺也必然被重构。因此,需要深入研究基于上述内涵的再生水处理新原理、新技术和新工艺,探索通过再生水补给实现水生态系统完整性目标的基础科学问题,创建新一代污水再生及循环利用的理论和体系。

为解决这些科学问题,今后应重点开展以下4个方向研究。

(1) 污水再生及循环的物质转化与能源转换机制

针对污水中有机质和氮磷等营养盐的能源转化与资源利用,研究水质净化-物质回收-能量转化的协同调控机制和物质流、能量流变化规律,研究以电子转移为核心的物质及能量转化动力学机理;发展污水有机质高效分离富集新材料、新原理和新技术以及富集有机质的高效定向生物转化原理,探索城市污水中的氮磷分离、回收和产品化过程的机制和调控原理。

(2) 再生水生态储存与多尺度循环利用原理

研究再生水在地表水体和地下水回灌等生态储存及多尺度循环利用过程中物质的物理、化学和生物学过程,解析再生水中物质在不同时间/空间尺度上转化过程的动力学和热力学特性,探明再生水转化为生态水、社会循环与自然循环耦合的过程机制和水质转化机制,阐释从环境补给、生态储存到多元循环的时空尺度效应,探索再生水水质综合控制原理。

(3) 城市水系统水质安全评价与生态风险控制方法

针对再生水直接利用和经过生态储存后的自然

媒介循环利用等多尺度利用模式,研究基于再生水特点的化学污染物和病原微生物选择性分离、浓缩和分析技术,建立多污染物共暴露条件下的生态影响和健康危害性评价方法,发展再生水不同用途情况下的暴露途径和暴露量评价方法以及关键风险因子的识别方法,探索基于选择性地改变分子结构或形态的去毒化或无害化原理,发展再生水水质生态风险控制的新原理和新方法。

(4) 基于“再生水+”的可持续城市水系统构建理论

研究保障城市水系统生态安全的再生水+的生态学理论,解析以再生水为纽带实现水生态系统完整性目标的基础科学问题,研究基于生态学理念的再生水处理、储存、水输运和利用的新原理、新技术和新工艺,建立以污水再生和多元化循环利用为核心的可持续城市水系统构建的方法、理论和技术体系。

参考文献

- [1] Abbasi T, Tauseef S M, Abbasi S A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview [J]. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2012, 16: 3228—3242
- [2] Alsbaiee A, Smith B J, Xiao L, et al. Rapid removal of organic micropollutants from water by a porous β -cyclodextrin polymer [J]. *Nature*. 2016 529S: 190—194
- [3] Batstone D J, Hülsen T, Mehta C M, et al. Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater: A review [J]. *Chemosphere*, 2015, 140: 2—11
- [4] Beale D J, Karpe A V, McLeod J D, et al. An omics approach towards the characterisation of laboratory scale anaerobic digesters treating municipal sewage sludge [J]. *Water Res.*, 2016, 88: 346—357
- [5] Cheng H, Hu Y, Zhao J. Meeting China's water shortage crisis: current practices and challenges [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 240—244
- [6] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, et al. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [J]. *Nature*, 2015, 528: 504—508
- [7] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle [J]. *Nature*, 2008, 451: 293—296
- [8] Gaulke L S, Strand S E, Kalthorn T F, et al. 17 α -ethinylestradiol transformation via abiotic nitration in the presence of ammonia oxidizing bacteria [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 42: 7622—7627
- [9] IWA. *Global Trends & Challenges in Water Science, Research and Management*. IWA Press, London, 2016
- [10] Kartal B, Kuenen J G, van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox [J]. *Science*, 2010, 328: 702—703
- [11] Larsen T A, Hoffmann S, Lüthi C. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 2016, 352: 928—933
- [12] Li W W, Yu H Q, He Z. Towards sustainable wastewater treatment

- by using microbial fuel cells-centered technologies[J]. *Energ. Environ. Sci.*, 2014, 7: 911—924
- [13] Li W W, Yu H Q, Rittmann B E. Reuse water pollutants[J]. *Nature*, 2015, 528: 29—31
- [14] Logan B E, Elimelech M. Membrane-based processes for sustainable power generation using water[J]. *Nature*, 2012, 418: 313—319
- [15] Mauter M S, Elimelech M. Environmental Applications of Carbon-Based Nanomaterials [J]. *Environ Sci Technol.* 2008, 42: 5843—5859
- [16] McCarty P L, Bae J, Kim J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer—Can this be achieved [J]? *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45: 7100—7106
- [17] Scherson Y D, Criddle C S. Recovery of freshwater from wastewater: Upgrading process configurations to maximize energy recovery and minimize residuals[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48: 8420—8432
- [18] Schwarzenbach R P, Escher B I, Fenner K, et al. The challenge of micropollutants in aquatic systems [J]. *Science*, 2006, 313: 1072—1077
- [19] Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades [J]. *Nature*, 2008, 452: 301—310
- [20] Smith A L, Stadler L B, Cao L, et al. Navigating wastewater energy recovery strategies: A life cycle comparison of anaerobic membrane bioreactor and conventional treatment systems with anaerobic digestion[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2014, 48: 5972—5981
- [21] van Kessel M A H J, Speth D R, Albertsen M, et al. Complete nitrification by a single microorganism [J]. *Nature*, 2015, 528: 557—559
- [22] van Loosdrecht M C M, Brdjanovic D. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. *Science*, 2014, 344: 1452—1453
- [23] Wang X, McCarty P L, Liu J X, et al. Probabilistic evaluation of integrating resource recovery into wastewater treatment to improve environmental sustainability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112: 1630—1635
- [24] Werber J R, Osuji C O, Elimelech M. Materials for next-generation desalination and water purification membranes [J]. *Nature Reviews Materials*. doi: 10.1038/natrevmats.2016.18
- [25] Yi T, Harper Jr W. The Link between Nitrification and Biotransformation of 17 α -Ethinylestradiol [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41: 4311—4316
- [26] 郝晓地, 邢会娟, 仇付国. 提高“未来的城市”可持续性的水与资源综合管理系统[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(2): 9—15
- [27] 李春光. 污水再生利用水质标准和处理工艺探讨[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(6): 5—8
- [28] 张昱, 郑兴灿, 李殿海, 等. 城市污水再生利用及水质安全保障的关键技术集成与示范应用 [J]. *给水排水*, 2013, 39(4): 9—12
- [29] 曲久辉, 王凯军, 王洪臣, 等. 建设面向未来的中国污水处理概念厂[J]. *中国环境报* 2014
- [30] 王娟, 郑雄, 陈银广. 城市污水回用现状与应用进展 [J]. *给水排水*, 2016, (S1): 87—92

Critical Fundamental Scientific Problems in Reclamation and Reuse of Municipal Wastewater

Qu Jiuwei¹, Zhao Jincan², Ren Nanqi³, Zhang Xuehong⁴, Hu Hongying⁵, Yu Hanqing⁶, Liu Huijuan¹, Wang Zhiwei⁷, Wu Guangxue⁵, Wu Qianyuan⁵, Mu Yang⁶, Sheng Guoping⁶, Li Dapeng⁸

1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085;
2. Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191;
3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
4. Guilin University of Technology, Guilin 541004;
5. Tsinghua University, School of Environment, Beijing 100084;
6. University of Science and Technology of China, School of Chemistry & Materials Science, Hefei 230026;
7. Tongji University, School of Environmental Science & Engineering, Shanghai 200092;
8. National Natural Science Foundation of China, Engineering and Material Division, Beijing 100085

In this paper, in-depth analysis into the vital demand of China and the international research advances in the field of municipal wastewater reclamation and reuse is provided; the fundamental features of related researches (i. e., mechanism elucidation at microscopic level, process security, technological integration, extension to ecological system) are revealed; the critical scientific problems to be addressed (i. e. contaminant elimination/transformation, chemical-to-energy conversion, water reuse-associated ecological risks control) are summarized; Lastly, four future directions to promote the sustainable development of urban water system in China are proposed, namely: (1) mechanisms of mass and energy conversion during wastewater reclamation and reuse; (2) principles for ecological storage and multi-scale recycling of reclaimed water; (3) methodologies for water security assessment and ecological risks control in urban water system; (4) theories for developing reclaimed water + -based sustainable urban water system.

Keywords: municipal wastewater; reclaimed water; reuse; contaminant conversion; ecological risks.