

· 学科进展 ·

城市污水再生利用和水环境质量保障

王晓昌* 张崇森 马晓妍

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 710055)

[摘要] 本文在国家自然科学基金重点项目研究成果的基础上,针对我国城市污水再生利用和水环境质量保障,从基于城市水代谢理念的污水再生利用系统构建、再生水生态毒性评价与生态安全保障、再生水病原体风险评价与健康安全保障等方面介绍了该领域的研究进展和发展趋势。相关理论和技术研究及其应用成果在国际水环境界产生了重要的影响。

[关键词] 污水再生,水环境质量,生态毒性,病原体风险

城市污水再生利用是缓解水资源不足的重要对策。由于缺水地区通常同时面临水环境本底条件差,生态脆弱的问题,在实施污水再生利用时,除了保证再生水的水质符合供水要求外,最终受纳再生水的水体环境质量保障是一重要命题。从供水工程技术角度,污水再生利用通常被认为是城市给水排水技术的延展,因此关注点多在于再生处理技术,而再生处理技术通常又是排水处理和给水处理技术的叠加,从而研究工作的重点会自然而然地放在特定目标污染物的去除技术上。然而,国家自然科学基金重点项目“城市污水生态回用及水环境质量保障”的研究目标并非主要定位在污染物控制理论与技术层面,而是从“Wastewater as a resource”的概念出发,把污水作为城市可利用水资源的一部分来研究其与城市物质代谢过程、城市水生态环境以及人体健康之间密不可分的关系。

1 城市水代谢理念—污水再生利用系统构建的基础

Wölman在20世纪60年代提出了“城市代谢”(metabolism of cities)的概念^[1],指出地球是一个闭环生态系统,而城市是其重要的子系统,能源的使用、物质的消耗、废物的产生、废物的自然吸收净化等都是城市代谢的环节。水作为城市最重要的物质流之一,也伴随着相应的“城市水代谢”(urban water metabolism)过程^[2,3],它也是全球或流域尺度上

的自然水代谢系统所含的子系统^[4]。自然水代谢过程既伴随着宏观的水文循环,又包含了微观的物理、化学、物化、生化过程,从而维系了水资源量与质的动态平衡^[5,6]。在流域尺度上,人类对水资源的利用早已包含了污废水的再生利用,只是因为上游排水和下游用水之间经过了完全自然的水代谢过程,所以人类已经认可其为天然水,且水体的自净作用也在很大程度上提供了水质安全保障。根据热力学原理,水代谢系统的熵增可描述为 $\Delta S = \Delta_i S + \Delta_e S$,其中自然因素导致的熵增 $\Delta_i S$ (内因熵增)发生在自然水代谢过程中,基于水文循环的闭环特点,在达到动态平衡的条件下可认为 $\Delta_i S \rightarrow 0$ (准可逆过程);而人为因素导致的熵增 $\Delta_e S$ (外因熵增)则不具有任何意义上的可逆性,即 $\Delta_e S > 0$,这是造成系统熵增,也就是水代谢失调的根本原因^[7-9]。

图1是城市水代谢系统的一般模式^[10,11],它由若干串联的人工子系统叠加于自然水代谢体系。在再生水作为城市可利用水资源的情况下,从城市人工水代谢体系来看,是增加了一个流量为 ΔQ 的闭路循环;从自然水代谢体系来看,是减少了自然水资源耗量 ΔQ 。从热力学角度来看,二者均能减少系统的熵增,从而促进良性的城市水代谢。另一方面,减少人为因素导致熵增 $\Delta_e S$ 可通过在人工体系中最大限度营造近自然的水代谢条件,使体系能在闭环中达到动态平衡,这等价于外因熵增向内因熵增的转化,从而构建具有热力学可逆过程特点的城市水代谢系统^[12-13]。

* Email: xcwang@xauat.edu.cn

本文于2014年6月26日收到。

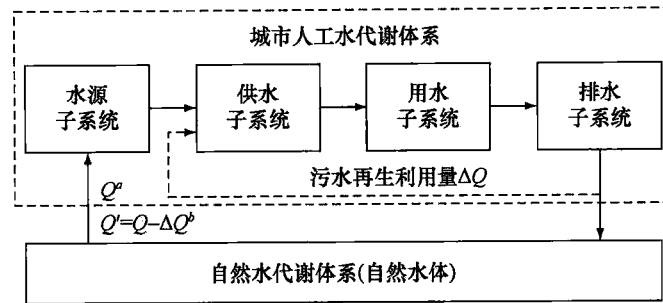


图1 城市水代谢系统构成示意图

a: 未实施污水再生利用; b: 实施污水再生利用

基于城市水代谢理念,可将污水再生利用纳入城市涉水单元的组合体系,以系统资源输入最小化和利用效率最大化为约束条件,优化城市水系统的给水、排水、水再生、水环境单元配置,构建水量水质动态平衡的水代谢系统,在系统物料平衡的前提下确定工程单元与生态单元融合的水质转换与保障工艺,在水循环体系中实现水资源再生和高效利用^[4,8,14]。

2 再生水生态毒性评价与生态安全保障

上述城市水代谢系统究其本质是一个生态系统,其生态健康状态的维系取决于系统的生态容量与其在循环与代谢过程中受纳的生态毒物质量之间的平衡关系。城市污水中往往富集了来自城市生产和生活活动的大量有毒有害物,这些物质在污水再生处理的过程中不可能彻底去除,且具有单体剂量低、综合毒性高的特点^[15,16],难以逐一检测、评价与控制,因此生态毒性评价对于再生水以及水环境生态安全保障极其重要^[17,18]。

生态毒性评价通常以水生生物为受试对象,通过生物毒性试验进行水中污染物对水生生物的综合毒性效应评价^[19]。根据受试对象,水生生物毒性试

验包括细菌类^[20]、藻类^[21]、蚤类^[22]、鱼类^[23]、原生动物类^[24]以及群落级毒性试验^[25]。在细菌类生物毒性测试中,利用淡水发光细菌青海弧菌(*Vibrio qinghaiensis* sp. Q67,简称“Q67”)进行急性毒性检测具有快速、简便、灵敏的特点,能为水环境生态安全性评价提供有力的依据^[26],如图2所示,城市生物污水处理过程中生物毒性的变化规律以及污水消毒后生物毒性上升的趋势均能通过Q67生物毒性检测得以揭示^[27]。氯消毒后生成一定浓度的三卤甲烷是导致生物毒性上升的原因^[28]。在特别关注水中有机污染所造成的生物毒性的情况下,通过固相萃取进行有机物浓缩能有效提高急性毒性检测的灵敏度,并排除无机盐对毒性检测的干扰^[29]。将生物毒性检测与污染物指标分析相结合,可有效判断水中毒性物质的主要来源^[30],为污染控制和水环境生态安全保障提供可靠依据。

对水中无机和有机污染物通过反渗透同步浓缩的条件下,富集的营养盐成分对发光细菌急性生物毒性检测的干扰难以避免^[31],但将Q67发光菌的暴露时间延长,发光抑制率与浓度和时间的相应关系呈现图3所示的三维动态变化规律,在与发光菌的对数增殖期基本相符的8~12h暴露时间段,曲面形

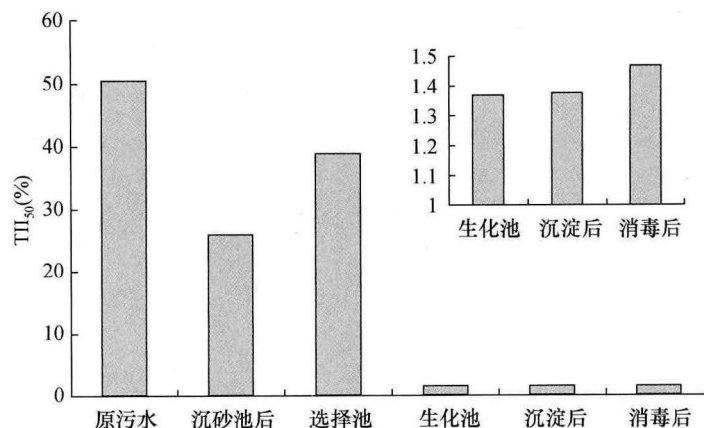


图2 污水处理过程中 Q67 急性生物毒性的变化

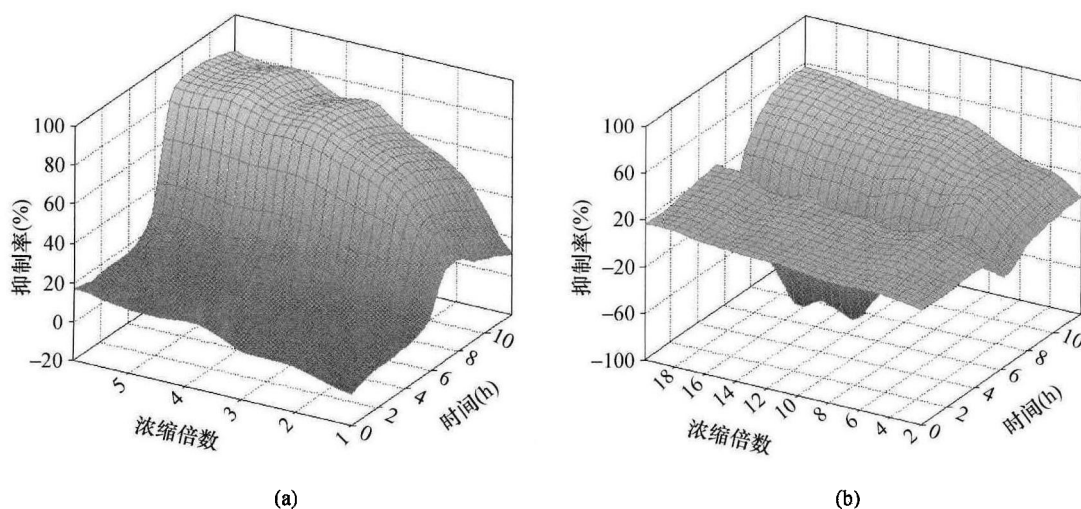


图3 Q67慢性生物毒性的三维动态变化特点
(a:较高浓度样品;b:低浓度样品)

状相对稳定,短历时暴露期的刺激发光等异常干扰得以排除,生物毒性检测灵敏度和可靠性大幅度提高^[32]。由此定义的发光细菌慢性毒性能弥补急性毒性检测的局限性,且为生态毒性动力学特性研究提供了新途径。随着发光细菌传感器^[33,34]、全自动在线发光细菌毒性检测技术和设备的开发,发光细菌生物毒性检测在水生态安全评估中的作用日趋重要^[35,36]。

发光细菌生物毒性检测虽然与其他多种生物毒性检测法有良好的相关性^[37],但其机理主要基于污染物对活体细菌发光过程的抑制作用^[38],因此它所反映的主要还是污染物对水生动物细胞代谢过程的影响,而不能全面获得关于植物毒性、遗传毒性、内分泌干扰毒性的信息^[39,40]。建立包括藻类、蚤类、鱼类等不同营养级的活体生物毒性检测体系,并结合遗传毒性(例如 *umu* test)、激素活性(例如 ER 受体效应)等体外特异性生物毒性检测,即能对再生水生态毒性做出全面的综合评价。

3 再生水病原体风险评价与健康安全保障

再生水通常用于非饮用目的,但即使在城市化、景观水体补水等环境利用过程中,也存在与人体接触的可能性,因此再生水中所含致病物质对人体健康的影响问题一直受到广泛关注^[41]。这些致病物质主要包括化学污染物和病原微生物两大类。在化学污染物中,对人体具有潜在致癌、致畸变作用的有机化合物^[42-45]、环境内分泌干扰物^[46]在再生水中的残留特性及健康风险是关注的重点。而对于病原微生物,由于其对人体的急性致病性、介水传播性及广泛

危害性,在污水再生利用领域一直是研究的热点^[47]。

传统的水质细菌学指标虽然能反映水的病原体污染程度,但难以成为病原体致病风险定量评价的可靠参数。随着分子生物学技术的发展,针对污水再生利用中特定致病微生物(例如强感染性的诺如病毒或轮状病毒)的健康风险评价已经成为可能^[48,49]。然而,要全面评价再生水的微生物安全性,则需要根据水传播疾病的特点,通过一系列主要病原微生物的检测和致病风险率比较和分析,明确污水再生利用健康安全目标。如图4所示,污水中常见的病毒和病原菌在去除率与安全保障率的关系上呈现不同形态,对于病原菌而言,达到一定安全保障率的去除要求可相差几个数量级^[50,51]。

将分子生物学技术与水样高效浓缩技术相结合,可实现病原微生物人体健康风险的全面、高效、准确预测与评价。针对沙门氏菌、志贺氏菌、大肠埃希氏菌等主要肠道病原菌(Enteric pathogenic bacteria),肠道病毒、星状病毒、轮状病毒、诺如病毒等主要肠病毒(Enteric viruses),可在探明病原体核酸特性的基础上,通过克隆转化制备含有病原微生物特定基因片段的重组质粒,建立实用的实时荧光定量PCR检测方法^[52-55]。针对水中最常见的肠道病毒(Enteroviruses),根据该病毒属所包括的众多血清型(种)在RNA5'非编码区中具有高度同源性的保守序列来设计通用引物,建立多种肠道病毒同步检测的实时荧光定量RT-PCR检测方法^[56,57],可作为评价再生水病毒风险的指示性指标。在我国和其他某些国家,由某些肠道病毒感染引起的手足口病备受关注,通过特异性引物设计和相应定量RT-PCR检测方法的建立^[58],可在把握水中肠道病

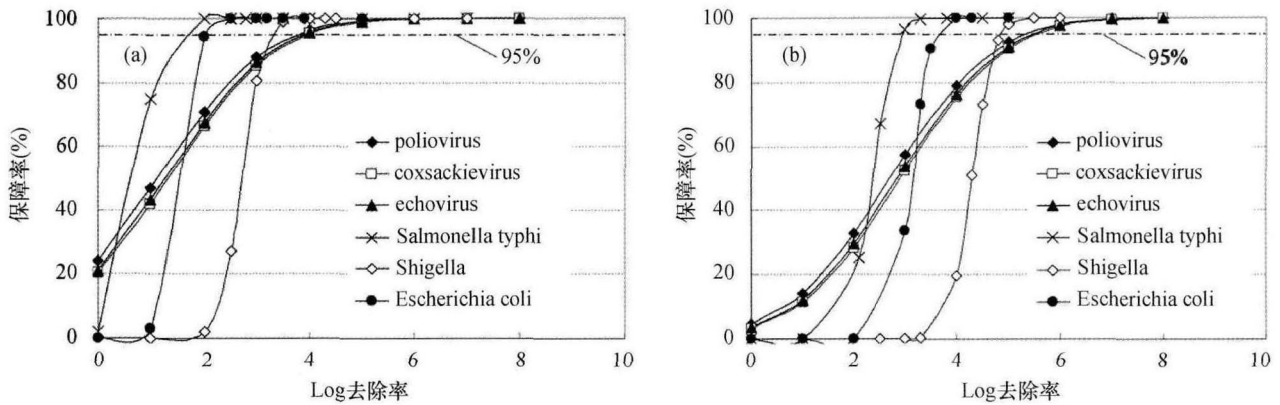


图4 典型病原体去除率与健康安全保障率的关系
(a: 再生水绿化; b: 再生水景观水体补水)

毒分布状况的同时,评价手足口病感染的潜在风险。

鉴于肠道病毒来源的复杂性和多样性,其在水中赋存状态的分型检测(Genotyping)是值得研究和探索的命题。通过选择肠道病毒核酸序列位于5'UTR中部的片段进行半巢式PCR扩增,在变性剂梯度为10%~40%的范围内进行聚丙烯酰胺凝胶电泳分析,可建立肠道病毒PCR-DGGE分型检测方法^[59]。对于不同来源的城市生活污水,DGGE图谱上可呈现出相同或不同的特异性条带。结合核酸测序,可有效分析不同来源肠道病毒的相似度和差异性^[59],为污水再生利用的病原体风险的源头控制提供依据。

4 新型污水再生利用系统构建与水环境质量保障的实践

运用城市水代谢理念,在缺水城市某独立供水

园区进行了污水再生利用与近自然的水生态环境营造相结合的新型水系统构建与水环境质量保障的实践^[60]。如图5所示,将园区的供水、排水、处理再生、水环境景观等单元集成为一个水循环与代谢系统,实现了用后水的全量回收再生和多级利用。系统中引入了近自然状态的环境湖(Environmental lake),成为园区水循环代谢的核心水体,同时发挥了水环境景观、再生水调节、水质稳定与改善的作用。在这个水循环体系中,适宜的再生处理有效抑制了常规污染物的积累,控制了再生水的病原微生物风险;近自然生态环境的营造大幅度提升了体系的自净能力,使水中溶解性无机离子和多种微量有机物含量有效削减,生态毒性得到有效控制^[14,55]。通过循环体系中的水再生利用,园区的水资源利用率接近200%,再生水提供了包括冲厕、杂用、水景、绿化在内的所有非饮用供水,营造了绿色的生态园区。

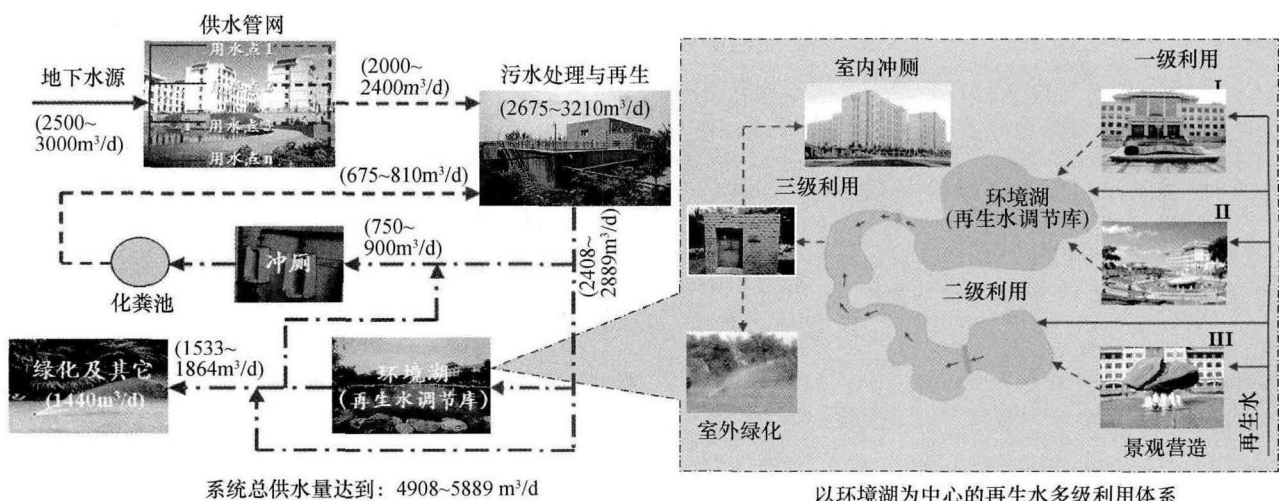


图5 独立园区污水再生利用与水环境质量保障系统

新型污水再生利用系统构建与水环境质量保障的实践成果得到国际水环境界的高度关注,2012年荣获国际水协会全球项目创新奖(IWA Global Project Innovation Award)。

5 总结和展望

再生水利用的生态安全保障和人体健康安全保障是国内外关注的热点科学技术问题,也是推进城市污水再生利用过程中必须解决的实际问题。本文结合国家自然科学基金重点项目的研究,着重论述了基于城市水代谢理念,构建符合水的自然循环规律,在动态平衡的条件下实现水环境良性代谢的新型污水再生利用系统的理论和方法。环境生态用水是我国城市污水再生利用的重要方向,水环境质量和生态安全性的保障在很大程度上都依赖于一个具有良性代谢条件的城市水系统。在这一方面,尚有大量理论和技术问题有待探索和研究。本文讨论的污水再生利用系统构建问题、再生水生态毒性评价问题以及再生水病原体风险评价问题都将继续成为本领域研究的重点。

致谢 本文为国家自然科学基金重点项目(资助号:50838005)的部分研究成果。

参 考 文 献

- [1] Wölman A. The Metabolism of Cities. *Scientific American*, 1965, 213:179—190.
- [2] Tambo N. Urban metabolic system of water for the 21st century. *Water Sci Technol: Water Supply*, 2004, 4(1):1—5.
- [3] Tambo N. Technology in the high entropy world. *Water Sci Technol*, 2006, 53(9): 1—8.
- [4] Wang X C, Chen R. Water metabolism concept and its application in designing decentralized urban water systems with wastewater recycling and reuse. In: Hao X. et al. (ed.) *Water Infrastructure for Sustainable Communities*, IWA Publishing, London, 2010, 199—211.
- [5] Narasimhan TN. Hydrological cycle and water budgets. In: Likens GE (ed.) *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford: Elsevier, 2009, 714—720.
- [6] Pouget L, Escaler I, Guiu R, et al. Global change adaptation in water resources management; The water change project. *Sci. Total Environ*, 2012, 440: 186—193.
- [7] Ludovisi A, Poletti A. Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems. 1. Entropy production indices. *Ecological Modelling*, 2003, 159: 203—222.
- [8] Wang X C, Luo L, Chen R, et al. Thermodynamic analysis of an urban water system with reclaimed water as supplemental water resource. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 32: 307—315.
- [9] Luo L, Wang X C, Guo W S, et al. Novel conceptual models for thermodynamic analysis of urban water systems. *J Water Sustainability*, 2011, 1(2):165—175.
- [10] Luo L, Wang X C, Guo W S, et al. Impact assessment of excess discharges of organics and nutrients into aquatic systems by thermodynamic entropy calculation. *J Environ Management*, 2012, 112:45—52.
- [11] Wang X C, Luo L. District water cycle management for wastewater reuse. In Ngo HH, et al. (ed.) *Green Technologies for Sustainable Water Management*. In publishing by ASCE.
- [12] Amores MJ, Meneses M, Pasqualino J, et al. Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *J Clean Prod*, 2013, 43:84—92.
- [13] Maruyama T, Kawachi T, Singh VP. Entropy-based assessment and clustering of potential water resources availability. *J Hydrology*, 2005, 309: 104—113.
- [14] Chen R, Wang X C. The function of an environmental lake for water quality stabilization and improvement in a water reuse system. *J Environ Quality*, in press.
- [15] Yang X, Flowers RC, Weinberg HS, et al. Occurrence and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in an advanced wastewater reclamation plant. *Water Res*, 2011, 45(16): 5218—5228.
- [16] Hope BK, Pillsbury L, Boling B. A state-wide survey in Oregon (USA) of trace metals and organic chemicals in municipal effluent. *Sci Total Environ*, 2012, 417—418: 263—272.
- [17] Leusch FDL, Khan SJ, Laingam S, et al. Assessment of the application of bioanalytical tools as surrogate measure of chemical contaminants in recycled water. *Water Res*, 2014, 49: 300—315.
- [18] Leusch FDL, Khan SJ, Gagnon MM, et al. Assessment of wastewater and recycled water quality: A comparison of lines of evidence from in vitro, in vivo and chemical analyses. *Water Res*, 2014, 50: 420—431.
- [19] Perdigon-Melón JA, Carbajo JB, Petre AL, et al. Coagulation-Fenton coupled treatment for ecotoxicity reduction in highly polluted industrial wastewater. *J Hazard Mater*, 2010, 181(1-3): 127—132.
- [20] Kurvet I, Ivask A, Bondarenko O, et al. LuxCDABE-Transformed Constitutively Bioluminescent *Escherichia coli* for Toxicity Screening: Comparison with Naturally Luminescent *Vibrio fischeri*. *Sensors*, 2011, 11(8): 7865—7878.
- [21] Jin X, Jin M, Sheng L. Three dimensional quantitative structure-toxicity relationship modeling and prediction of acute toxicity for organic contaminants to algae. *Comput Biol Med*, 2014, 51(0): 205—213.
- [22] Dom N, Penninck M, Knapen D, et al. Discrepancies in the acute versus chronic toxicity of compounds with a designated narcotic mechanism. *Chemosphere*, 2012, 87(7): 742—749.
- [23] Reyhanian N, Volkova K, Hallgren S, et al. 17 α -Ethinyl estradiol affects anxiety and shoaling behavior in adult male zebra fish (*Danio rerio*). *Aquat Toxicol*, 2011, 105(1-2): 41—48.
- [24] Bricheux G, Bonnet JL, Bohatier J, et al. Microcalorimetry: A powerful and original tool for tracking the toxicity of a xenobiotic on *Tetrahymena pyriformis*. *Ecotox Environ Safe*, 2013, 98: 88—94.

- [25] Shrestha B, Acosta-Martinez V, Cox SB, et al. An evaluation of the impact of multiwalled carbon nanotubes on soil microbial community structure and functioning. *J Hazard Mater*, 2013, 261: 188—197.
- [26] Gao Y, Lin ZF, Chen R, et al. Using Molecular Docking to Compare Toxicity of Reactive Chemicals to Freshwater and Marine Luminous Bacteria. *Mol Inform*, 2012, 31(11-12): 809—816.
- [27] Ma XY, Wang XC, Liu YJ. Study of the variation of ecotoxicity at different stages of domestic wastewater treatment using *Vibrio-qinghaiensis* sp.-Q67. *J Hazard Mater*, 2011, 190(1-3): 100—105.
- [28] Wu MN, Wang XC, Ma XY. Characteristics of THMFPP increase in secondary effluent and its potential toxicity. *J Hazard Mater*, 2013, 261: 325—331.
- [29] Ma XY, Wang XC, Liu YJ. Cytotoxicity and genotoxicity evaluation of urban surface waters using freshwater luminescent bacteria *Vibrio-qinghaiensis* sp.-Q67 and *Vicia faba* root tip. *J Environ Sci*, 2012, 24(10): 1861—1866.
- [30] Ma XY, Wang XC. Ecotoxicity comparison of organic contaminants and heavy metals using *Vibrio-qinghaiensis* sp.-Q67. *Water Sci Technol*, 2013, 67(10): 2221—2227.
- [31] Berglund R, Leffler P, Sjostrom M. Interactions Between pH, Potassium, Calcium, Bromide, and Phenol and Their Effects on the Bioluminescence of *Vibrio fischeri*. *J Toxicol Environ Heal A*, 2010, 73(16): 1102—1112.
- [32] Ma XY, Wang XC, Hao Ngo H, et al. Reverse osmosis pretreatment method for toxicity assessment of domestic wastewater using *Vibrio qinghaiensis* sp.-Q67. *Ecotox Environ Safe*, 2013, 97: 248—254.
- [33] Chan AC, Ager D, Thompson IP. Resolving the mechanism of bacterial inhibition by plant secondary metabolites employing a combination of whole-cell biosensors. *J Microbiol Meth*, 2013, 93(3): 209—217.
- [34] Gabriel GVM, Lopes PS, Viviani VR. Suitability of *Macrobrachium* firefly and *Pyrearinus* click beetle luciferases for bacterial light off toxicity biosensor. *Anal Biochem*, 2014, 445: 73—79.
- [35] Lopez-Roldan R, Kazlauskaitė L, Ribo J, et al. Evaluation of an automated luminescent bacteria assay for in situ aquatic toxicity determination. *Sci Total Environ*, 2012, 440: 307—313.
- [36] Pinto P, Costa SPF, Lima J, et al. Automated high-throughput *Vibrio fischeri* assay for (eco)toxicity screening: Application to ionic liquids. *Ecotox Environ Safe*, 2012, 80: 97—102.
- [37] Girotti S, Ferri EN, Fumo MG, et al. Monitoring of environmental pollutants by bioluminescent bacteria. *Anal Chim Acta*, 2008, 608(1): 2—29.
- [38] Ma XY, Wang XC, Ngo HH, et al. Bioassay based luminescent bacteria: Interferences, improvements, and applications. *Sci Total Environ*, 2014, 468—469: 1—11.
- [39] Macova M, Toze S, Hodggers L, et al. Bioanalytical tools for the evaluation of organic micropollutants during sewage treatment, water recycling and drinking water generation. *Water Res*, 2011, 45(14): 4238—4247.
- [40] Tang JYM, Aryal R, Deletic A, et al. Toxicity characterization of urban stormwater with bioanalytical tools. *Water Res*, 2013, 47(15): 5594—5606.
- [41] Dominguez-Chicas A, Scrimshaw MD. Hazard and risk assessment for indirect potable reuse schemes: An approach for use in developing Water Safety Plans. *Water Res*, 2010, 44: 6115—6123.
- [42] Rodriguez C, Linge K, Blair P, et al. Recycled water: Potential health risks from volatile organic compounds and use of 1,4-dichlorobenzene as treatment performance indicator. *Water Res*, 2012, 46: 93—106.
- [43] Liu JJ, Wang XC, Fan B. Characteristics of PAHs adsorption on inorganic particles and activated sludge in domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 5305—5311.
- [44] He YY, Wang XC, Jin PK, et al. Complexation of anthracene with folic acid studied by FTIR and UV spectroscopies. *Spectrochimica Acta Part A*, 2009, 72: 876—879.
- [45] He YY, Wang XC. Adsorption of a typical polycyclic aromatic hydrocarbon by humic substances in water and the effect of coexisting metal ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects*, 2011, 379: 93—101.
- [46] Cao Q, Yu Q, Connell DW. Fate simulation and risk assessment of endocrine disrupting chemicals in a reservoir receiving recycled wastewater. *Sci Total Environ*, 2010, 408: 6243—6250.
- [47] Campos C. New perspectives on microbiological water control for wastewater reuse. *Desalination*, 2008, 218(1-3): 34—42.
- [48] Barker SF, O'Toole J, Martha I, et al. A probabilistic model of norovirus disease burden associated with greywater irrigation of home-produced lettuce in Melbourne, Australia. *Water Res*, 2013, 47: 1421—1432.
- [49] Mok HF, Barker SF, Hamilton AJ. A probabilistic quantitative microbial risk assessment model of norovirus disease burden from wastewater irrigation of vegetables in Shepparton, Australia. *Water Res*, 2014, 54: 347—362.
- [50] Zhang C M, Wang X C. Health risk assessment of urban surface waters based on real-time PCR detection of typical pathogens. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2012, 18(2): 329—337.
- [51] Zhang C M, Wang X C. Distribution of enteric pathogens in wastewater secondary effluent and safety analysis for urban water reuse. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, 20(3): 797—806.
- [52] Liu YJ, Zhang CM, Wang XC. Simultaneous detection of enteric bacteria from surface waters by QPCR in comparison with conventional bacterial indicators. *Environ Monit Assess*, 2009, 158: 535—544.
- [53] Zhang CM, Liu YJ, Wang XC. Detection of enteroviruses from water samples using optimised RT-PCR with universal primers. *Int J Environ Pollution*, 2009, 38(1/2): 151—165.
- [54] Liu YJ, Zhang CM, Wang XC. Rapid detection of pathogenic bacteria in surface water by PCR with universal primer. *Int J Environ Pollution*, 2009, 38(1/2): 166—179.
- [55] Zhou JH, Wang XC, Xu LM, et al. Source identification of bacterial and viral pathogens and their survival/fading in the process of wastewater treatment, reclamation, and environmental reuse. Under review by *Ecotox Environ Safety*.

- [56] Zhang CM, Wang XC, Liu YJ, et al. Characteristics of bacterial and viral contamination of urban waters: a case study in Xi'an, China. *Water Sci Technol*, 2008, 58(3): 653—659.
- [57] Zhang CM, Wang XC, Liu YJ, et al. Simultaneous detection of enteroviruses from surface waters by real-time RT-PCR with universal primers. *J Environ Sci*, 2010, 22(8): 1261—1266.
- [58] Ji Z, Wang XC, Zhang CM, et al. Occurrence of hand-foot-and-mouth disease pathogens in domestic sewage and secondary effluent in Xi'an, China. *Microbes Environ*, 2012, 27(3):288—292.
- [59] Ji Z, Wang XC, Xu LM, et al. Estimation of contamination sources of human enteroviruses in a wastewater treatment and reclamation system by PCR-DGGE. *Food Environ Virol*, 2014, 6:99—109.

Domestic Wastewater Reuse and Water Environmental Quality Control

Wang Xiaochang Zhang Congmiao Ma Xiaoyan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

Abstract Based on the study supported by NSFC Key Project, this paper introduced the research progress and future direction on domestic wastewater reuse and water environmental quality control, with attention paid to structuring sustainable water reuse systems following the concept of urban water metabolism, bio-toxicity evaluation and biological safety control, pathogenic risk assessment and health safety control related to reclaimed water use. The achievements in theoretical and technological studies showed international influences in the field of water environment.

Key words Wastewater reuse; Water environmental quality; Bio-toxicity; Pathogenic risk

· 资料信息 ·

全印刷介观钙钛矿太阳能电池研究取得新进展

充分利用太阳能是解决目前人类面临的能源短缺和环境污染等问题的根本途径。作为第三代太阳能电池的代表,基于介观尺度的无机或有机半导体材料及三维互穿网络结构的新型介观太阳能电池因其有望实现廉价获取能源而受到各国科研工作者的关注。特别是近两年,随着钙钛矿材料如 MAPbI₃ (碘铅甲胺)的应用,这种介观太阳能电池以超乎寻常的速度发展,光电转换效率从 3.8% 快速提升至 17.9%,显示出良好的应用前景。然而遗憾的是,获得该效率的太阳能电池所采用的有机空穴传输材料及金对电极不仅价格昂贵(据报道有机空穴传输材料 spiro-OMeTAD 价格为金或铂的 10 倍),且需高真空等高能耗加工过程。因此,如何在廉价条件下实现高效稳定的全固态介观太阳能电池依然是实现太阳能大规模应用的关键问题。

借鉴钙钛矿太阳能电池的发展,华中科技大学韩宏伟课题组通过引入两性分子开发出混合阳离子

型钙钛矿材料 (5-AVA)_x(MA)_(1-x)PbI₃ (碘铅甲胺-5-氨基戊酸),并将其应用于无空穴传输材料可印刷介观太阳能电池中。其特点是在单一导电衬底上通过逐层印刷方式涂覆二氧化钛纳米晶膜、氧化锆绝缘层、碳对电极层,之后填充钙钛矿材料。这一关键技术实现了介观太阳能电池低成本和连续生产工艺的完美结合。结果显示这种新材料的应用不仅获得了 12.84% 的光电转换效率,且器件显示出良好的重复性及稳定性。2014 年 7 月 18 日出版的 Science 刊发了该项成果 (<http://www.sciencemag.org/content/345/6194/295>)。

该光电转换效率获得美国 Newport 公司独立光伏实验室权威公证,为目前国际上无空穴传输材料型钙钛矿太阳能电池最高效率。

供稿:何杰(信息科学部)