

第 6 届化学科学与社会研讨会(CS3) 白皮书

化学与水：变化中的世界面临的挑战与解决方案

莱比锡

2015 年 9 月



中国化学会译

目录

关于化学科学与社会研讨会(CS3)	1
执行总结	2
介绍	6
第一章 水资源、人类健康和环境	9
1 现状	9
2 面临的挑战	10
3 为什么需要化学的帮助	11
第二章 污染物检测	13
1 现状	13
2 面临的挑战	13
3 为什么需要化学的帮助	14
第三章 资源回收	17
1 现状	17
2 面临的挑战	18
3 为什么需要化学的帮助	19
第四章 水处理与废水处理	22
1 现状	22
2 面临的挑战	22
3 为什么需要化学的帮助	24
展望	27
参考文献	28
2015 CS3 与会人员	29

关于化学科学与社会研讨会（CS3）

化学科学与社会研讨会 (Chemical Sciences and Society Summit, CS3) 将世界各地化学领域里最顶尖的人才汇集在一起, 以探求国际社会面临的最紧迫的健康、食品、能源、环境等问题的创新性解决方案。这一独特的活动拥有一个创新的形式, 旨在为全球科学研究指明方向, 并将每年由参与国轮流主办。

《化学与水: 变化中的世界面临的挑战与解决方案》白皮书是对 2015 年 9 月 14 日至 18 日在德国莱比锡城召开的第 6 届 CS3 的成果总结。这次会议重点关注了水资源、人类健康、环境问题、污染物监测、资源再生和水处理。来自中国、德国、日本、美国和英国的研究水处理的顶级化学家和工程师齐聚莱比锡城, 确定了国家级乃至世界级的主要科学技术难点, 以便于推动水化学领域向着最符合社会需求和可持续发展的方向进步。

CS3 由中国化学会、德国化学会、日本化学会、英国皇家化学会和美国化学会合办。该系列研讨会由中国国家自然科学基金 (NSFC)、德意志研究联合会 (DFG)、日本学术振兴会 (JST)、英国工程和自然科学研究委员会 (EPSRC) 和美国国家科学基金会 (NSF) 提供赞助。

(本白皮书由科学作家 Michael Gross 经过与德国化学会咨询后编译和撰写, 并经 2015 年 CS3 与会人员审核。)



执行总结

面对世界人口数量持续增加、全球都市化程度更高、人们更富有、平均寿命更长的现状，淡水供给成为 21 世纪人类遇到的最大难题之一。气候变化对水文周期造成的影响是多方面的，从灾难性干旱到大范围的洪灾都会使淡水供给问题雪上加霜。为应对这些问题，化学在水分析、水处理和水资源回收方面的技术创新将会在世界范围内水资源可持续利用和安全供给等方面做出重大贡献。

在第 6 届 CS3 研讨会上，来自中国、德国、日本、英国和美国的 40 位专家齐聚一堂，主要商讨了下面 4 个关键领域的议题：（1）水、人类健康与环境；（2）污染物监测；（3）水处理；（4）资源回收。

面对世界范围内资源日渐匮乏的现状，正如那句标语所说“同一个水源，同一个环境，同一个健康”，水、人类健康与环境问题在所有层面上（从局部层面到全球层面）都至关重要而且相互关联。水资源的可持续利用、对自然过程中水污染降解的深入理解以及将化学处理水污染的使用降到最低限度是保卫人类健康和保护环境的先决条件。

来自农业、城市和工业源的污染威胁着饮用水的安全。这种威胁不仅来自于农药残留和化工产品，还来自于生产药品和化工产品等消费性产品过程中排出的废液。纳米颗粒和微塑料更加重了对环境的人为污染。发展中国家存在的水传播性的微生物和致病菌问题非常令人担忧，世界各地都要考虑到这些潜在的威胁。气候变化、土地用途改变、世界人口增长、城镇化和人口结构变化等更加剧了以上问题。

在应对严重危机和制订长期规划时，需要跨学科和跨部门（地域）的思维来迎接这些挑战。这意味着化学专业知识和分析技术革新需要与医疗服务、社会学认知以及对水、人类健康和环境的协调管理措施结合起来。对微环境中污染物的自然衰减过程要有流域尺度上的深入了解，以保证自然环境的承载能力（作为一种预防原则），还要有处理层面的理解，以将其作为一种工程技术上节约能源的修复策略。在流域尺度上，由于对污染物的自然衰减过程理解不足而导致的污染物突增事件频繁发生（被称为“热点事件”和“热点时刻”）。而在水处理中，对污染物自然衰减过程的研究才刚刚起步。来自各个方面的推动因素，比如先进的创新性分析化学、生化分析中的高通量筛选技术、能帮助增进

我们对降解过程理解及设计更易降解药品的计算化学、避免使用有毒溶剂的绿色化学等，在解决这些难点问题中都至关重要。

所有的可持续水资源管理站都建立在污染物监测基础之上，需要以简单可靠同时又先进精细的分析方法为其根基。为了达到这个目的，必须确定相关的目标分析物，即构成威胁的污染物。

分析检测应包括对已知污染物的监测和对新出现污染物的识别。一方面，分析方法要符合国际和国内规范，比如《欧盟水框架指令》等的要求；另一方面，我们需要积极主动地开发先进分析仪器，识别和定量化目前尚被忽视的转化产物、纳米粒子、微塑料制品等水体污染物。

检测技术的发展要能跟上自然和人为过程中产生的化学物质日益多样这一形势，要专注于确保水质满足不同使用目的。所以需要包括从特异性检测到广谱检测的一整套不同的仪器和方法。

在整个检测过程中（从样品制备到检测结束），化学分析以及生物毒性鉴定方法的标准需要协调统一，以提高测试结果的可信度和可比性。但是，在转化产物识别以及非靶标检测方法的验证标准方面的研究还存在显著缺口，相关的标准还有待明确限定。

理想的情况是，在覆盖一种化合物整个生命周期的全面分析中，在产品的开发中早已事先考虑到所生产化学品在废水中的检测需求。

检测由化学品混合物造成的危害是一个重要的难点，因为目前的风险评估是将化学物质分别考虑的。可是，实际上，数以千万计化学物质，即使单个物质的浓度在检测限以下，都存在着混合效应。因此，我们不仅要弄明白各种化学物质的混合效应，更要改进检测方法以便能检测到混合效应的生成物。生物分析技术，如以细胞为基础的生物鉴定方法，其可以提供测量化学物质总负担量的影响的手段，也能成为对特定物质进行化学分析的有益补充。分子水平的毒性测定（生态毒理基因组学）也能帮助筛查混合效应。高通量质谱分析法的最新进展在检测化合物混合效应包括目前未知的微污染物以及他们的转化产物方面扩大了我们的视野。这种方法可能成为一个更强大的化学综合评估的工具，用于评价处理工艺和污染控制的有效性。

水分析学需要联用技术（如 GC-MS, LC-MS）在朝应用于环境研究方面取得特定发展后才能将其纳入使用，比如，GC- 或 LC-IRMS 对特定化合物的同位素分析可以在其他方法都不可用的时候（比如在流域尺度或者非常复杂的工程系统里），通过测定同位素比率来作为污染物转化的证据。与此形成鲜明对比

的是，不需要专业人员操作的常规测试的发展则要朝着速度更快、成本更低、检测方法和设备更方便的方向优先发展。

水分析数据需要更好的数据库和更加整合的数据管理，比如，实现分析数据共享和计算机分析，以使化合物的鉴定更加快速。但是，这种共享的跨国实施也是一个重大的挑战。

20 世纪的后 50 年，工业化国家的水处理技术在应对日渐增长的废水量和提升水质方面非常成功。为解决 21 世纪的技术难点，为安全有保障的提供各种类型的用水，水处理研究和开发需要在基础层面（如新颖的膜类、特殊的生物材料、吸附剂、催化剂）、中间层面（如技术转移、技术放大）和设备层面（如集成过程、能源回收等）同时展开。研究范围既应包含设计先进的水处理系统来处理复杂的废水流，也应包含研制更简单、成本更低的水处理系统保证发展中国家的用水安全。未来的涉水基础设施需要灵活适应当地需求和周围环境的快速变化。比如，人口规模增大和减小都会对现有的涉水基础设施产生影响。

对介于公共设施和产业界之间的新的水处理工程技术的资金支持也是一个必须解决的难点问题。

像中国这样快速增长的经济体本来可以采用新技术建立未来水资源管理系统，但是，一些守旧的工厂依然倾向于采用发达国家广泛使用的非常成熟的废水收集、废水处理和处置策略。这种保守的做法表明新技术和管理方法的革新并非一番风顺，而那些新技术往往才是新问题出现时更合适的解决方案。

需要建立可以在各个层面上测试新技术的试点性和示范性设施。风险累加标准也要确定，这样才能根据潜在的不利影响（例如，减少毒性）来鉴定水质。这需要齐头并进地发展上面所述的有效分析方法。

废水处理和管控正在从保护人类健康和环境的必需向宝贵自然资源的回收过渡。已经和可能从城市污水中回收的自然资源包括能源（从碳、氮和热能）、一系列金属（比如金、锂）、营养元素（比如磷酸盐、氮）、其他盐类和化学品，除此以外，更重要的就是纯净的水。专注这些机遇有助于刺激更先进的水处理技术的出现和吸引更多水处理方面的投资。需要在基础研究以及将研究成果付诸实施的过程中对资源回收再利用这一理念有全方位的执行与支持，才有可能实现将废水处理从视作负担到当成一种可开采宝藏的机遇的转变。

虽然许多领域进展显著，CS3 与会者确定了一系列需要着重研究发展的特定技术和能力，如：从废水中生产、提取能源的技术；对资源回收设施所用原

材料成分组成和变化进行表征和监测的新化学方法；对能量产额进行预估以及可当作原材料的潜力的判定方法。此外，进一步开发可高效回收和再利用（而不是仅仅从水体中去除）营养物质和金属的技术尤为重要。

为达到足以维持人类与环境健康发展的可持续水资源供给这一总体目标，水检测、水处理和资源再生等问题必须和工业、农业和生活污染源以及再生资源的下游使用等同时考虑，协调解决。本白皮书中选择性地呈现了一些成功案例。但是，如何将这些成功案例传播到世界各地，使世界人民都能高效可持续地利用水资源，需要长期战略性的国际合作，这也依赖于以工程学和化学为首的所有相关学科的基础工作。

介绍

水是地球生命起源的重要先决条件。人类和地球上其他物种一样都需要洁净的水源来维持生命。虽然海洋覆盖了地球表面的 71%，但是蓄水层、湖泊、河流、冰川中的淡水资源仅占到地球总水量的 3%。形象的说，假如地球上所有的水变成一个巨大的球形水滴，它的直径为 1,391 公里（864 英里），而所有的淡水组成的水滴直径只有不到 203 公里（127 英里）^[1]。

庆幸的是，淡水是一种可再生资源，因为水循环可生成淡水。但是，水循环生成的淡水并不总是能在人类需要的时间送到指定地方，适用的淡水在世界上很多地方都非常稀缺。

工业革命之后世界人口指数式增长，现在这个数字已经达到了这个星球的资源能够承载的极限^[2]。很多地方，水成为制约社会和经济体发展到更程度的核心资源。随着工业化进程和人们生活水平提高，世界范围内对淡水资源的需求量也不断增加。虽然在绝大多数的发达国家人均用水量未增加甚至出现下降，发展中国家的人口增长和城市化进程并未因当地有限的可利用水资源和涉水基础设施而有所减缓。因此，相关问题并非全球性的，而是具有区域性。本世纪内，这一趋势还会持续，并且预计会导致更加广泛的缺水问题。

额外的挑战来自于污染。20 世纪中叶，污染导致很多淡水河道不再符合人畜使用的要求。从此，废水处理厂开始兴起，一些过去被用作城市和工业排污通道的河流（像德国的莱茵河、埃姆舍河）开始进行复原工作，污染情况在最近几十年有了改善。可是在全球范围内，这种改善并不明显。雪上加霜的是，具有生物活性的化学品、对抗菌剂产生耐药性的微生物、微塑料等化学制品或材料都会带来新的污染。

气候变化已经在全球很多地方影响了水循环系统。比如，最近发生在加利福尼亚州、澳洲和中国部分地区的重度干旱就是缺水的例子中的三个典型。这些或许只是初演，可能很快会蔓延到更多的地区。在另外一些地方，会发生相反的问题，比如海洋温度升高会增加强风暴的出现频率，导致类似 2015 年秋季发生在法国南部的洪灾。在这些案例中，现有的涉水基础设施可能无法应对这些不可预测的水资源可利用量的突然变化。

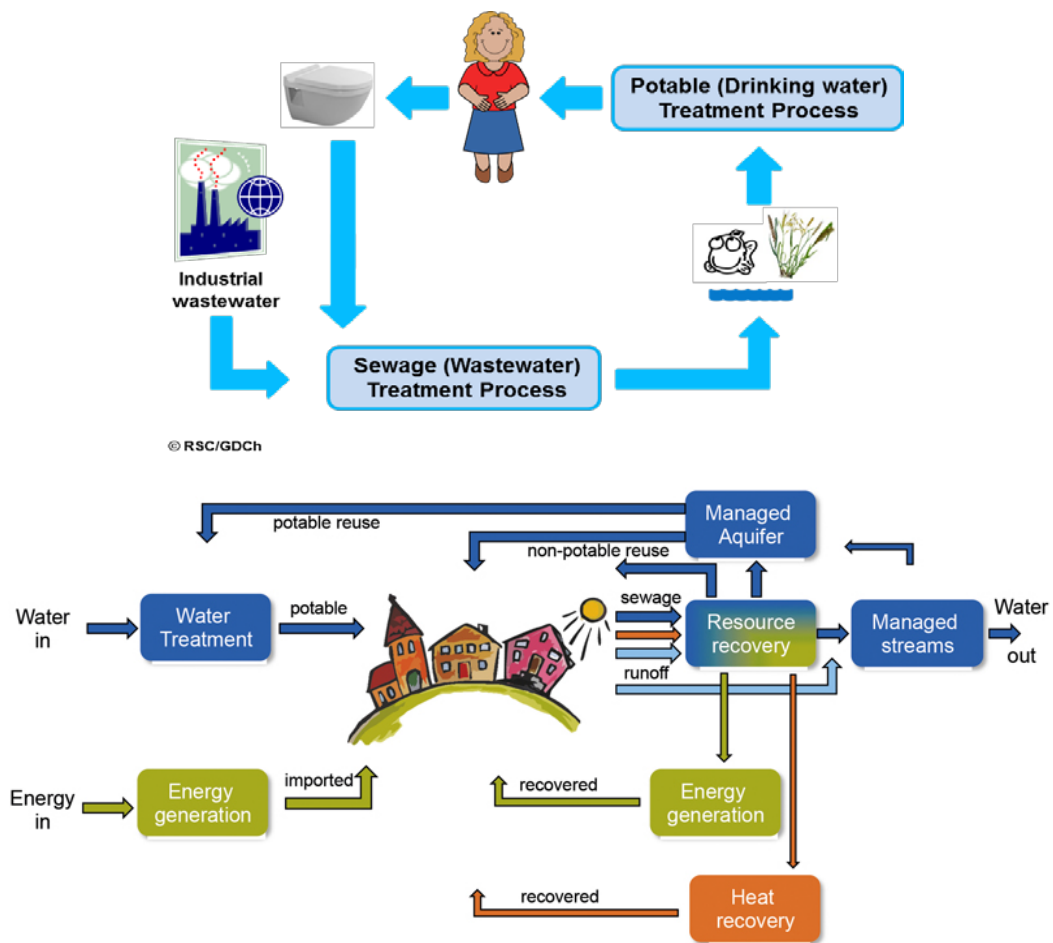
人类活动也会导致极端厄尔尼诺现象出现，当前的厄尔尼诺现象已经媲美 1997 至 1998 年间记录在案的强度。这种反常气候会影响世界范围内的降水模式。印度尼西亚已经遭遇了严重干旱和丛林大火。干燥的气候条件已经影响了

印度、越南、澳洲、南非以及智利的局部地区。特别是南亚地区的粮食减产有可能导致像 1990 年发生在东非的萨赫勒地区干旱那样的人道主义危机^[3]。

为了保护自己的水资源，各族群常起冲突，这也会对自然生态系统造成重大损失。比如，美索不达米亚平原的幼发拉底河和底格里斯河流经好几个国家，土耳其考虑建设的大坝会威胁到下游伊拉克人民的用水安全，这甚至高于该地区主要的政治和军事冲突带来的威胁。

未来十年的一个重要难点就是在气候变化、地区族冲突和对地球系统的其他人为破坏等的不断干扰的形势下，为日益增加的人口提供越来越多的淡水。第二个难点是想办法通过减轻并治理污染和盐碱化，确保淡水供应的质量。第三个难点是从以前使用过的水体（包括闭合和半闭合的水循环）中提取能源和有价值的化学产品，提供满足不同用途的、社会可接受和经济可行的淡水来源。

城市涉水基础设施应该被设计或改造成连接有水处理设施、自然水源和可靠供给机制的可持续发展的水循环系统，使其能够支持解决上述难点。



来源：德鲁维斯等^[4]

化学可为处理和缓解这些问题提供很大帮助：通过研究新方法对含盐水和海水进行脱盐作用，通过先进的纯化技术对废水提纯，可在保障淡水数量、淡水质量和水资源再利用方面提供全新的或改进的解决方案；发展先进的分析和检测水中污染物的手段，达到满足保护人类健康和环境的需求的水平；提供新的物化、生化工艺过程，改善和提供可持续的循环使用水；发展可从废水中提取能源和有价值化学品的化工产品和工艺。

与 20 世纪的形势相比，化学在解决水资源问题中扮演的角色更加重要，水资源问题越来越需要以化学为支撑的多学科解决方案。废水处理就是一个典型，过去普遍使用生物学方法，然而，在当前设计的废水处理设备中，愈加需要以化学为基础的废水处理方法来对产品回收。

通过这些方式，化学有助于保障安全的清洁水供应，保护水资源安全。所谓“水资源安全”联合国的定义是，“一个族群获取维持生计、保证人民福祉和社会经济发展所需的足够数量和合格质量水的能力，保护人民免受水源污染和与水相关的灾害发生的能力，维持生态平衡使社会处于和平与稳定的氛围中的能力” (UN-Water, 2013) ^[5]。

2015 年 9 月在德国莱比锡城召开了第 6 届 CS3 研讨会，与会者主要在以下 4 个方面探讨了上述问题：

- 1) 水、人类健康和环境
- 2) 污染物监测
- 3) 水处理和废水处理技术
- 4) 资源回收

本白皮书对该研讨会的讨论内容作了总结，并记录下对可持续水资源管理具有指导意义的调查研究和政策改进方面的推荐举措。

第一章 水、人类健康和环境

水、环境安全和人类健康密不可分。无论是区域问题还是全球问题，对水资源和环境安全的保护都至关重要。在全球资源越来越稀缺的情况下，标语“同一个水源，同一个环境，同一个健康”形象地捕捉到了这种相互依存关系。本次研讨会想要表达的观点就是如何完美地、可持续地利用水资源，如何保卫人类健康和环境安全。我们需要对污染物衰减的自然过程有更深入的理解，才能更合理的使用化学物质和化工处理方法。

1 现状

目前，40%的世界人口处于水资源短缺状况。1/5 的人类生活在物理性缺水（physical water scarcity）的地区，即，缺乏充足淡水资源的地区；另有 1/4 的人类处于经济性缺水（economic water shortages）地区，即，缺乏水利基础设施将可获取的水资源进行充分利用的国家或地区。

气候变化和森林滥伐会对本来不易干旱的地区的自然水源供应造成威胁。现在，不同寻常的干旱正影响着加利福尼亚州，据传，干旱也是导致叙利亚当前的冲突的原因之一。

水供给缺乏、清洁卫生不达标会对人类健康和幸福指数产生负面影响，并且会导致财政消耗很大，经济活动受损严重。在 2014 年，有 7 亿多人口喝不到安全的饮用水。根据世界卫生组织（2015 年）的数据，估计每年有 50 万人因为饮用了受污染水而感染腹泻死亡。

因为人为改变河道、水体污染和过度使用，导致自然生态系统也经受可用水的数量和质量下降的困扰。整个湖泊都已经干涸，野生动植物失去了栖息地，生态系统功能正在遭受威胁。

《2015-后可持续发展目标》取代了 1990 年制定的关于水资源议程的《新千年发展目标》，把工业化国家也纳入其中，并强调保护生态系统、限制污染物排放和对突发水安全事件快速响应等。

但是，目前水资源供给缺乏是全球性的，需求每一天都在增加，公共设施供应商和政策制定者需要加快步伐。不管是在发达国家还是发展中国家，都存在人口的增长、城市化进程加快、气候变化加剧的现象，越来越需要依靠低化学污染的水源来满足用水需求。

2 面临的挑战

世界范围内，到 2050 年，地球需要为 90 到 100 亿人口提供水、食物和能源^[6]。如果真是那样，就将需要提高创新能力和增进全球合作水平。

全球范围内，气候变化、土地用途改变、全球贸易增长、人口迁移和人口结构变化加剧了地方层面上的水资源问题。反过来，局部活动也会造成全球危机。缺乏水资源相关问题的国际管理，严重阻碍了战略响应和损失控制^[7]。

水资源在一些地方很丰沛，而在许多地方却很稀缺。大规模的输水工程是可以解决水资源供给问题，但是也会随之带来一些不良影响（比如美国科罗拉多河）。

对饮用水供给的可靠性和安全性造成威胁的因素有地球成因学源、农业源、城市和工业源等污染。

废水中的药品、工业化学品和消费性产品中的化学品越来越引起注意，因为他们可以逃避检测和治理，其排放到水体中会对环境安全和人类健康带来潜在危害，这已经被确切证实，比如，一些激素和内分泌干扰素（EDCs）。EDCs 问题在于纳克级别的 EDCs 就会对生态系统造成微妙的影响^[8]，而且，它们在浓度极低情况下也可能会有集合效应，单个 EDC 浓度低于检测限，无法检测到，但混合起来后则因这种集合效应是可以被测量到的。

有证据表明，在水生环境中，新兴的化学品也是潜在的威胁。解决这个问题关键在于改进毒性筛查方法、风险预估方法以及对混合物的集合效应的更深入研究。当前，关于这个方向的研究已经起步，比如英国、美国和欧盟资助的一些项目，但更多研究需要投入到在化学物质的累积效应、极低浓度的内分泌干扰、以及如何评估化学物质的集合效应对敏感群体和敏感年龄段人群的影响等研究方面。

农药和工业化学品依然是全球范围内的重大威胁，因为硝酸盐大多来自农业生产活动，砷化物和氟化物大都来自地球成因源。与此同时，在流域尺度上这些化学品的自然衰减地点和条件依然尚不明了。

近些年，用显微镜才能观察到的非常小的塑料颗粒（微塑料）受到关注，因为它们也可能会对环境造成负面影响。这些粒子大多来自河流和海洋中大的塑料制品的降解。而且，包裹着化妆品的微小颗粒或者来自人造合成纤维的小颗粒也有可能被冲入生活污水中。为此，在日常消费品中微小粒子的使用就被诟病，现在正在逐渐减少。塑料污染最初被认为只是海洋问题，大多数塑料垃圾未经正确后处理就被扔进大海，它们会聚集形成巨大的海洋漩涡。但是，最近的研究发现，在北美的五大湖^[9]、意大利的加尔达湖^[10]等淡水水体中，甚至

北极的冰^[11]中都有大量的微塑料污染的存在。技术的革新使这些微塑料更加微型化，更多其他微米级别甚至纳米级别粒子也会进入水循环系统中，带来新的未知的不良影响。

水传播的微生物和致病菌在很多国家造成了极其严重的公共健康问题。比如，1996年，在有1万居民的日本埼玉县越生町，由饮用水供给造成的腹泻爆发影响了超过8千居民。像南琵琶湖（日本）这样的湖水中的诺瓦克病毒和其他病原菌会定期检测，因为它既是饮用水的水源，也是人们休养和钓鱼的地方。2011年的海啸导致的洪水也带来大范围的污染问题。在英格兰北部，2015年出现了一起隐孢子虫集中暴发灾害。

3 为什么需要化学的帮助？

通过提供更安全的饮用水处理技术和公共卫生保障，新的化学方法的探索可以改善公共健康，还可以帮助解决联合国提出的《2015-后可持续发展目标》中提到的经济性水资源短缺问题。

解决这些难点需要在应对突发危机形势和进行长期规划时通盘考虑、协调行动。比如，新型药物的研发和审批管制不仅要考虑药物自身的效力和副作用考虑进去，还要将它可排泄出去的代谢物及其归宿都纳入考虑。同理，消毒剂和清洁用品也应有这样的通盘考量。现存的“老”药也要重新评估一下环境风险。与此同时，解决低收益农业和高度发达农业中使用的“传统”化学污染物（比如，砷化物、硝酸盐、莠去津）的问题，提出可持续发展的对策依然迫在眉睫。

- 化学研究要与其他领域如生态学、流行病学的研究关联起来。化学的见解和分析能力必须与医药供给、社会学理解以及与水资源、人类健康和环境安全相关的环境管理搭配应用。
- 将尖端的生物分析技术（高选择性和高灵敏度、高通量的技术）引入水化学和水处理技术研究中，以保证生物分析能获取有益于水科学的信息
- 对微环境中污染物自然降解过程中的“热点（hot spots）”和“热点时刻（hot moments）”的深入研究可保持和优化自然环境的承载量（预防原则），并有助于工程上高能效的生物除污技术的实现。
- 计算化学可成为没有人畜健康数据可用的情况下预估新兴污染物的潜在毒性的有力工具，借助它可将新兴化学污染物作为进一步监测和实验研究的优先考虑对象。

- 理想的状况是避免污染，例如，绿色化学可减少工业上有机溶剂的使用和与之相关的化工产品污染。

德国的一个案例研究：重建一个河流环境

在 20 世纪初期和中期，未经处理的废水流入河流，破坏了许多河流的环境。在德国，一个大规模的修复破坏最严重的河流的工程现在已经接近完工。

在 19 世纪初，埃姆舍河还只是一条不起眼的小河，从它的发源地霍尔兹维克德蜿蜒 109 千米，穿过乡村，流入杜伊斯堡附近的莱茵河。很不幸的是它处于鲁尔区的中枢，流经互相平行的限定该区边界的利珀河和鲁尔河之间。后来，鲁尔区兴起了很多煤矿和钢铁厂，这里变成重工业区。由于深层煤矿上方频繁的地壳运动，建立大型的闭合排水网络系统不太实际，因此，坐落于中心位置的埃姆舍河就成了一个巨大的重工业区和快速发展的城市里的露天下水道。早在 1882 年，就有一些热心市民给普鲁士国会写了一封信，称埃姆舍河已经濒临死亡，当洪水来临将河水冲入市区的时候，会造成严重的卫生问题。

埃姆舍河虽然现在几乎全部开掘为标准混凝土槽式河道，在几乎整个 20 世纪，当时它以刺鼻性气味和有毒水而闻名于世，河里几乎没有任何的生命痕迹。由于挖煤导致的地面塌陷，它无法在原来的入口流入莱茵河，而是被改道到下游更低海拔的入口流入莱茵河。

在煤矿关停之后，情况有所改变，开凿与河道平行的闭合地下污水运河已经可行，自 1992 年开始，一个目前估计耗资 45 亿欧元的巨大重建工程开始为排入该河的污水建立处理设施，并将未经处理的污水引到沿河建立的四个大型处理厂。该河的几个延伸河段也被清理和恢复原貌。所规划的闭合地下污水运河将在 2017 年建成，而包括所有支流复原的整个工程会在 2020 年竣工。



第二章 污染物检测

检测水体中的所有污染物是可持续发展的水管理、环境健康和保证饮用水安全供给的重要基础，这需要多种稳定、简易的工具以及复杂先进的分析方法。检测体系还要不断调整，以适应由于新技术的使用而带来的新污染物类型。化学应当处在创新的最前沿，为快速准确地鉴定新的化学污染物提供尖端技术手段。

1 现状

过去几十年分析技术的进步使低浓度化学物质的检测变得轻松。一些特殊的分析工具已经用在环境领域，如质谱（组学）和传感技术。但是，为使水资源可持续发展，需要知道哪种化学物质有危险以及怎样监测。随着商用化学品的数量剧增和农药等引入发展中国家广泛使用，需要监测的水体污染物对象一直在不断更新。

2 面临的挑战

制造业生产和使用的化工产品和/或消费性产品的数量有增无减，加重了水体污染物检测的难度。电子学、纳米科技和相关科学领域的快速发展带来新的污染物品种和/或一些产品的环境转化产物。主要工业化国家已经对新物质的注册和测试做了相应规定，但这些监管体系可能应对不了数以千计的新物质及其转化产品的冲击，更别提还有无主和遗留化学品需要纳入监管。

全球范围内，集约农业和水产养殖业的快速发展、日常生活中与日俱增的化学品的使用（如个人护理产品）以及新出现的污染物都增加了对更先进检测方法和技术的需求。

预期中对安全饮用水需求的增加带来另一个难题，这会使水资源直接重复使用率和/或脱盐工厂数量上涨。因此，不能全靠自然过程来确保供给用户的水的纯度，更要依靠检测和去除水中所有不想要的成分来保障水供应。

立法也能促进检测需求。比如，《欧盟水框架指令》（2000/60/EC 和 2013/39/EC）确定了包括重金属、工业化学品、农药等在内的 45 种化学物质作为优先检测的污染物，因为这些污染物会对生态系统有潜在危害。

更深层的问题来自于在环境和水体中存在的低浓度的各种不同化学物质的复杂的混合物。混合物中有毒物质对生物系统的作用非常复杂，因为这些污染

物可以独立发挥作用，也可能起累加作用，也可能以复杂的方式导致协同作用和拮抗作用。因此，混合物毒性不能单纯从浓度的角度来度量，也不适合仅对单个化合物进行毒性测试。生物活体内的检测方法可适用于环境混合物，但是因其与动物权益相抵触而使用受限。在细胞和分子水平上开展高通量的对新兴污染物质的体外毒性测试会极大地加速环境样品的筛查。关于能否将以细胞为基础的生物分析工具置于水框架体系中用于评价环境质量的讨论正在进行。生态毒理基因组学、蛋白质组学和代谢组学等新兴领域的出现和发展给未来带来了希望^[12]。

检测体系应该包括对已知问题的监测，还要能对新出现的污染物（定向的和非定向的）保持警觉，并及时知悉其出现的新形式。

一方面，为对已知问题保持控制，分析方法要专注于在满足国内和国际法规的特殊需求上，比如《欧盟水框架指令》。另一方面，要积极发展创新性的分析工具来确认和量化目前尚被忽视的水体污染物。这两方面的目标都有赖于创新性的预富集技术和分析工具以及高精度、高选择性、高灵敏度的生物分析方法。

对因需求增加导致的污染物数量的不断增长需要系统的合作思考。因此，新生产的化学品对环境的潜在影响应在其设计之初就纳入研究范畴。一个新化合物的研发者不仅要考虑对它的分析和检测，更要关注到它与环境如何相互影响。

检测混合物中某些化合物的富集作用带来的危害是非常重要的一个难点。当前的风险评估是将化学物质单个进行考虑的。实际上，数以千计、百万计的化学物质即使个体浓度低于检测限，都可能因汇集一起而产生协同效应。

3 为什么需要化学的帮助？

化学研究和相关专业知识可帮助提高、改进从进样到数据处理这一程序链上的各种检测方法。

化学家们已经研发出很多能够实时、高灵敏度和高选择性地检测复杂环境机制中污染物的方法。研究者们现在努力的方向是实现环境基质的全分析这个终极目标。

- 为提高检测结果的信度和可比较性，化学分析方法、生物分析以及分子水平的筛查手段的标准化必须优先考虑。转化产物的识别、纳米颗粒和微塑料的分析以及非定向的检测方法等方面的校验标准仍有待定义。

- 检测方法的发展由自然过程和人为过程中新增各种新物质的检测驱动，其核心是要保证各种用途的水质量合格。这既需要特定的检测技术，又需要更广谱的环境检测技术。至于具体需要什么工具则是由相应的环境问题决定。
- 理想状况下，在囊括化合物整个生命循环周期的全盘解决方案中，检测和捕获废水中的人工化学物质应该在产品开发之时就已考虑周全。对于新研发的药品类蛋白或者纳米粒子，材料安全数据表（MSDS）应该包含帮助从水体中检测和去除该化合物和/或它的转化产物的有用信息。
- 对混合化学品的研究需要更加深入。化学家们需要研发从复杂混合物中分离和识别各种单个组分的多级分析技术。我们需要更深入了解化学品的混合效应对人类健康和环境安全的影响，因此，与毒理学家和建模人员的跨学科合作势在必行。
- 生物分析技术，如以细胞为基础的生物分析，能够获得测量化学物质的总量的手段，以及在特定成分确认方面为化学分析提供有益补充。此外，最新研发的高分辨率质谱可检测到未知的微污染物和它们的转化产物。但是，在对这些污染物的验证和标准化以及对数据的评估和解读方面需要研发新对策，这样才能提高我们对新化合物和新材料对人类健康和环境安全的影响的预测能力。
- 在仪器研发方面，气相色谱-质谱连用和液相色谱-质谱连用技术已经广泛使用了很多年。在其他方法都不可行（比如在流域尺度或者复杂工程系统中）的情况下，使用 GC- 或 LC-IRMS 进行特定化合物同位素分析，可以将同位素的自然丰度的信息用于证明污染物质的转化^[13]。此外，二维液相色谱技术（LCxLC）和离子迁移质谱能提高复杂基质中结构相似的化合物的选择性。与此同时，一个优先要做的事情是将材料科学、电子学、计算化学和其他相关学科领域的新成果应用于发展新一代分析技术和设备。
- 科学家也需要研发更好的用于非特定目标物质检测的方法。存在的问题是怎样比较和验证非定向分析数据，怎样对未知污染物的数据进行评估、存储以及处理。当遇到现阶段很难指认的化合物时，需要通过发展多实验室对比以及新的计算机模拟方法等策略来实现对质谱更好的预测。
- 水体中污染物分析的改进，需要包括共享分析数据、资源开放获取、数据的智能分析等在内的更完善的数据库和更集成的数据管理，另一方面

是要有可比较的抽样方法。实现这些举措的跨国实施是一个主要的难点。

- 另一个优先要做的事情就是研发检测速度更快、成本更低、更简便的检测方法和设备，比如，特别是无需专门人员操作的可实现对复杂环境监测和快速反应的实时传感网络体系。

第三章 资源回收

已经到了 21 世纪，应将废水处理看作水资源的重复使用，将水体中的化学物质和材料当作回收有用的能量和材料的来源。将中水中的纯净水和有机物、无机物分离开来不仅对人类健康和环境安全很有必要，还应当被看作重新获得有用资源的一种方式。在一个可持续发展、环境友好的社会中，理想的情况是废水中包含的所有资源包括水本身都应回收利用。

能源也应被当作可从废水中回收的一种资源。现在已经能做到从废水处理的剩余固体物中回收甲烷。然而，还有其他从废水中获取能量的方法可能比现有的办法效率更高，比如，厌氧消化（或者更新的如厌氧膜生物反应器）通过产生甲烷真正地获得了能量。研究和应用这些方法可以将废水变成可重复使用的水，还能将转化过程变成一个能量产出的过程。

最需要大量回收的资源当然是达标纯度的水。从各种处理过程中得到的水需要达到的质量标准取决于它的最终用途，比如，排入自然水系中、非食品或食品农业灌溉、工业过程中的重复使用或者再次当作饮用水。

可以从水体中回收的材料包括金属（如金、锂）、营养元素（如磷酸盐、氮、钾）、其他盐类和化学物质，还有一些颇有争议的就是像类固醇激素、药物或脂类等有机物。

专注于这些机遇可激励我们更加深入研究水资源重复使用，也使其对私人投资和公共投资更具吸引力。

水的颜色与其来源	
灰色水	不含有粪便污染的来自居民区或办公区的所有废水，如，除来自马桶的所有废水源
黑色水	来自马桶的废水
绿色水	土壤中自然存储的水
蓝色水	从河道、湿地、湖泊和含水层中抽取的水

1 现状

目前全球范围内，各个国家关于生物固体（污水中的固体物质）的管理现状各有不同。并且，这一现状还取决于市政或工业废水/污泥是否被考虑其中。

许多国家，大多数生物固体会用到农田里、焚烧或者填埋，个别国家会回收一部分。但是，一些处理工厂展示了将其进行资源回收的潜能。在意大利都灵建设的一个处理厂中安装的 175kW Demosofc（示范性固体氧化物燃料电池）燃料电池发电机，其产生的能量已经可以满足该厂 1/4 的能量需求。该燃料电池是由处理厂厌氧消化产生的沼气推动的。在日本大阪、奥地利斯特劳斯和英国的好几个地方都有类似的使用回收能源的示范工厂。

像在英国斯托克巴道夫和 Minworth 的一些创新的水处理工厂可以实现磷和氮元素的回收（见第 21 页的关于厌氧氨氧化菌的案例分析）。

其他地方，也有从废水污泥中回收活性炭、金、银、钯和铂的例子。据报道，日本诹访市的一家水处理工厂能从每吨垃圾焚烧灰中回收 2kg 金。这表明垃圾焚烧遗灰的含金量是世界上一些富金矿中矿石含金量的 50 倍^[23]。这种异乎寻常的高含量，是因为这些工厂的集水区涵盖了使用贵金属的工厂。在长野县丰田汽车集团的另一个水处理工厂，每年总生成的 70 吨灰能够产出 22kg 金。日本科学家正积极研发从废水（包括污泥）中回收其他有价值材料的方法(见 22 页的案例研究)。

2 面临的挑战

在不远的将来，一些资源必须依赖从废水中回收才能避免供给短缺和/或因有限的自然来源导致的政治紧张局势，例如，最明显的例子是磷，该元素的主要矿藏就是在有争议的地区（西撒哈拉）发现的。人为或者自然引发的资源短缺也很有可能主要与供应源单一有关。此外，所有试图使世界经济更可持续、可循环地发展的努力都要在资源回收上下大工夫，比如，目前磷元素的使用存在着很大程度的浪费。

从废水中回收稀有金属是可行的，但需要方法改进使其更加经济合算。最有希望回收的金属有银、铜、金、铁、钯、锰、锌。日本的科学家已经对更稀有的元素如硒、碲和钒等的回收展开研究。

至于回收水用于直接饮用或者回收将会进入食物链的东西，难点是使大众信任回收物在卫生方面的纯度。而且，公众对相关项目/技术的看法和接受程度也非常重要。

这个领域的战略目标是重构整个处理过程，不再将强制进行废水处理后再排放到水体中的规定视为一个负担，而是视为开采各种有价值物质的机遇。因此，资源回收想法的落实需要从基础研究到实际应用等各个层面上的支持。

为推进重复用水的理念，需要重点考虑以下几点：

- 废水中所包含的资源包括水、能源、营养元素、金属、盐类和其他有价值的东西；
- 为满足多种目标和使用标准，资源回收设施必须以节能为导向，并且要考虑系统层面上的实施办法；
- 应该鼓励探索新的化学方法或发展更先进的材料来提取和利用从废水中回收或生产的材料；
- 由于采用了不同的技术和经济标准来衡量什么是最好的、成本收益比最高且适合当地环境的方案，所建立设施的规模、来源（市政还是工业）、推动因素/有利因素/不利因素（如立法层面、政府层面、基础设施层面的限制等）也有所不同，这些都解释了为什么参加本次研讨会的 5 个国家到目前为止所取得的成果各不相同。
- 有必要研究和发​​展能够促进落实合适的制度框架以及提供恰当营销策略以增加回收材料的使用的举措。

最终，对废水中所获回收资源的高效利用以及对它们进行恰当的风险预估将是向着循环经济目标迈进的重要一步。

3 为什么需要化学的帮助？

在很多重要领域已经有了相当大的进展，为促进未来更大的进步，CS3 的与会者们指出了在该领域的研究和发​​展中需要解决的技术和能力，包括以下几点：

- 将能源存储纳入考虑的从水成分中生产和提取能源的技术，以及使其与当前能源网络相兼容的方法；
- 新的能够表征和监测资源回收设备所用原材料的组分以及变化的化学方法——可通过内联传感，也可以是远程传感；
- 适应废水中潜在资源的复杂多变性及其对分离提纯过程造成的影响的能力；
- 对能量产额进行预估以及可当作原材料使用的潜力的判定方法；
- 能够实现根据营养元素的生物可利用度和化学形态而对其进行高效回收和再利用（而不仅仅是将它们从水体中去除）的技术；
- 实现根据金属的形态、纯度和价值来对其进行高效回收和再利用的有关技术；
- 促进产品生产的新的化学方法和技术；

- 从废水中的有机物中提取能源的技术可行、经济适用的新材料和新工程工艺，其能够使整个过程获得净能量；
- 对原始基质进行分析的方法以及对产品及其能否作为（比如生物塑料、酶、有生物活性的化学物质）回收化学物质的原材料（凝结剂）或向其他物质转化的潜力进行评估的技术。

英国的一个案例分析：简化氮循环

人们十几年前发现一个可高效去除水体中的含氮化合物的细菌处理过程。

一个来自空气中的氮原子的循环路径经由化学肥料、植物、动物或人类、废水，最终回到大气中，这一过程非常复杂，尤其是因为它在完全还原状态（氨）和完全氧化态（硝酸盐）之间转化了好几次。Haber-Bosch 过程使大气中的氮元素得以利用，比如，产生氨，氨再被氧化生成氮肥。在这个循环过程的末端，废水中的氨被氧化成硝酸盐，然后硝酸盐被还原成分子形态的氮气。

20 世纪 90 年代中期，厌氧氨氧化（anammox）这一神奇发现及其在水处理程序中工业规模的应用极大地降低了从废水中移除氮的成本和复杂性，该过程将氨重新转变成分子态氮，这种转变堪称完美，因为氮气是一种主要的空气组分。在 anammox 工艺的第一步，亚硝化单胞菌将部分氨转化成亚硝酸盐，之后在厌氧菌的作用下，亚硝酸盐与剩余的氨气反应生成分子态氮。其中的第二步大规模的发生在海洋中缺氧的地方，据估计，空气中 1/3~1/2 自然生成的氮气都是由该过程产生的。

在代尔夫特建立了一个 anammox 的模型工厂之后，荷兰又建成了另外两个工厂。在英国，伯明翰附近的 Minworth，一个主要服务于 170 万人的大型处理厂最近引进了 anammox 技术。该工厂进行技术优化，使用 anammox，在除氮的同时可实现深度脱磷。每天最多可除氮 50 吨，占该工厂废水中氮含量的 90% 以上。



这个工艺比传统除氨方法成本低很多，占用空间小，对曝气和化学物质的需求少。该工厂污泥和二氧化碳排放量也比使用传统方法少很多，是因为 anammox 菌生长相对缓慢。这一工厂在 2013 年全面运转。

日本的一个案例分析：污泥淘“金”

假如处理废水不是负担而是一个资源回收的“金矿”，情况会是怎么样？日本拥有世界顶级的技术，可从废水处理中剩余的生物固体和垃圾焚烧遗灰中“淘金”。

一家岛根县的工厂可以从污水污泥中回收磷酸盐，并结晶成磷酸镁铵（MAP）。至少有两家工厂可以从垃圾焚烧遗灰中回收黄金，并且保证金属回收过程是赚钱的。然而，日本的大部分污水（77%）仍未开发，单纯当作废物来处理。

这方面的难点在于开发能够低成本地提取原料并产出高价值的产品的技术，这样才能用所得资金回补资助整个水处理过程。现有的物理-化学分离方法并不能很好地适用于将某个浓度很低的特定的粒子或者化合物从非常复杂的、不好预测其组分的混合物中提取出来。此外，还需要消耗大量的能量和/或额外材料，导致整个过程经济性差且不利于生态平衡。

因此，日本科学家正在研究回收有稀有元素的生物学方法，包括微生物金属代谢。微生物可以从固体中提取出一些物质，使它们挥发，吸附或者矿化它们。这些相态转化过程可能包含有化学转化比如氧化/还原、甲基化作用或者氢化作用。

作为一个用微生物方法从废水中回收元素的例子，日本大阪大学的 Michihiko Ike 及其同事研发了一个矿化硒元素的过程。硒元素存在于在生产铜的工业废水中，以溶于水的形式如硒酸盐和亚硒酸盐存在时，毒性很大，必须去除。同时硒也十分珍稀，从废水中对硒元素的定向提取和后续的回收非常有价值。但是现有的技术对其进行回收时效率很低。

在大阪研发的原型技术使用斯氏假单胞菌（*Pseudomonas stutzeri*）NT- I 的菌株将可溶性硒化合物还原成硒元素，也就是 0 价硒。这个革兰氏阴性需氧菌最初是从排放含硒废水的管道里出现的生物膜上被发现的^[1]。神奇的是，这种细菌能分离出不溶于水且无害的纳米粒子形态的 0 价硒，可以很容易从液体介质中移除。科学家们首先建立了中试规模的反应器测试该技术的潜能。因为硒元素在气体状态很容易捕获，他们还研究了将其进行甲基化生成气体产物来回收硒元素的可能性^[2]。

类似硒元素这样，通过细菌将物质还原到一个不易溶解的状态，也适用于一些其他的金属，包括铬、钒、碲、铂、铀和镉等的回收。这种回收技术的大规模应用有可能将成本巨大的废水处理工程变成一种崭新的有利可图的开发过程。

参考文献：

(1) M. Kuroda et al., Journal of Bioscience and Bioengineering 2011, 112, 259-264. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2011.05.012

(2) T. Kagami et al., Water Research, 2013, 47, 1361-1368

第四章 水处理和废水处理

为人类提供充足数量和合格质量的淡水的自然过程是很复杂的。先将海水蒸馏变成淡水，通过土壤和沉积物过滤掉很多污染物质才产生了从含水层和泉水中可抽取的饮用水。如果时间充分，现在的水循环过程中自然发生的生物降解过程能够移除大多数天然存在的污染物质，使水质满足使用要求。正是由于数量庞大的与环境容纳量比例失调的人口数量（特别是在干旱地区）加重了水循环系统的负担，此外，人工化学物质的排放对未来水供应造成很大的困扰和挑战。

在 20 世纪之前，废水的处理主要寄希望于水流的自然净化能力以及大江大海的稀释作用的。当河流中病原体和工业污染物质的富集作用以及汞一类的重金属在食物链中的生物富集作用被发现之后，废水排出之前应预先处理才被广泛接受^[14]。

1 现状

自来水厂是生产适合饮用的水，而污水处理厂是将用过的水进行一定级别的处理后使其适合排放到环境中，并再次参与自然的水循环过程。在工业化国家，从 1970 年开始，将废水进行处理对提高水体质量已经取得显著成效，而在其他地方，80%的废水依然未经任何处理直接排入环境中^[15]。

对含盐水和海水的脱盐化处理在世界范围内迅速增长，每天都有新的工厂设计和建造，虽然脱盐是高耗能的，但它是某些地区获得淡水的唯一途径，而且反渗透脱盐也要比长途运输淡水耗能少。

与海水脱盐获取淡水这条高能耗途径相比，将已使用过的水从耗能的污水处理工厂转移到可产生净能量的化工厂和纯净水生产厂这一模式更有潜力。此外，它们也可成为农业中的氮源和磷源。这也会降低内陆水域中的富营养化污染，如果考虑到磷，则可以降低对世界上为数不多的可开采磷酸盐矿石的依赖。废水中含有的能量（以有机碳和有机氮的形式）要高于使用现有的技术回收这些能源时的能耗，因此，从废水中有机物质成分来获取净能量是具有开发潜力的。

2 面临的挑战

由于对纯净水需求的增加，水处理和废水处理要扩大范围才能保证新品种的污染物不进入环境中，不为人类接触。需要发展新的膜、吸附剂、催化剂等材料 and 生物处理工艺所需的微生物菌株来将水体中不需要的化学物质和材料去

除或降解掉。在中间层面上，技术转移和升级是关键的要求。在设备层面上，以资源回收为目的的化学和生物技术的融合需要更加优化。这些设备应既包括可以处理复杂水体的先进水处理系统，也包括更基本的、价格实惠的能保证发展中国家水供给和人民健康的设备。

水利基建要变得更灵活和可变通，适应当地需求和环境条件的快速变化。比如，人口的增长和减少都会对现有的水利基建带来挑战。国际贸易的发展会使一个地区的生产活动对另一个很远的地方产生污染，使得水污染问题被跨境输出^[7]。

水污染问题亦存在机遇。将新出现的污染物像内分泌干扰物和其他物质在排入环境之前从废水中移除，已经成为一个突出问题。处方药和违禁品如可卡因等在废水中可检测到，某种程度上对这些物质的详细分析可能成为公共健康数据的重要来源^[16]。水力压裂提供了从地表下岩石中提取甲烷的方法，但是此类采矿作业产生的高污染废液又会带来附加问题。在一些地区，没有足够的水源同时供给水力压裂和农业使用。

这个领域的重要问题包括低成本和高能效技术（如新型膜、催化剂、吸附剂）的研发和对来自基础研究中的新方法扩大试验的投资，以及对水系统的深入理解，包括水源保护、灵活的最小限度化学品的使用、处理技术对不同水处理目标的适应性（量身定做）等。

体制性障碍的破除、新的涉水基建投资和老化的水利设施保养，以及对介于公共设施和（有利可图的）产业界之间的新的废水处理项目和技术的投资，这些都是需要解决的问题。

像中国这样快速增长的经济体在开发新城镇时，有机会在水资源管理理念上实施新技术和新方法（参考第 25 页的案例）。中国已经启动了一个 2006 至 2020 年的控制水体污染的国家级项目。该项目涵盖了从源头杜绝污染到生态环境修复等水资源管理的各个方面。

最新的科研进展显示了成本低廉地从废水中去除营养元素以及在水处理工厂节约能源的前景，比如，使用 anammox 去除含氮物质^[17]、使用表面改性的生物炭吸附污水中的含氮、含磷物质^[18]。这些技术可极大地提高水处理工厂的效率。需要鼓励对新技术更深入的研发。

工业界往往不求变革，更倾向于使用工业化国家现已广泛和成功应用的废水处理工艺。这种守旧性成为技术革新的壁垒，导致当新的问题出现时，对所需新技术和管理手段的引进存在障碍。

3 为什么需要化学的帮助？

在寻求恰当的处理方案和理解处理过程方面，化学家已经扮演重要角色。除此之外，化学家还可以在以下方面做出贡献：

- 发展改进的节能型水脱盐技术和废水回收使用技术；
- 发明新的材料和方法用于从废水中提取能源，能维持废水处理工厂的能源平衡甚至产生净能源；
- 研发可以用于有效去除新兴污染物质、用于海水淡化以及当作捕获营养元素的途径的新型膜^[19]。

中国的一个案例研究：完整水循环管理

随着经济快速发展和城市化进程的加快，中国可能有机会建成最先进和可持续发展的城市水循环系统新模式。

在作为唐朝都城（公元 618-907）和“丝绸之路”起点的光辉岁月里，西安尚不存在如今这样的水资源短缺问题。发源于秦岭山脉的 8 条河流流经这座城市。然而，由于气候变化、城市快速发展、水资源过度利用和管理不当等问题，“八水绕长安”的古典美景基本消失，水环境恶化已经成为限制这座城市持续发展的最大问题。

“八水润西安”工程是城市水环境修复和水资源可持续管理的重大投资项目。这个耗资高达 15.8 亿美元的工程包括 28 个湖池的修建，其中一些湖池将模仿古代艺术作品建成盛唐时代风貌的主题公园。这是基于一个整体规划，使用各种可利用水资源（自然降水、市内溪流、再生水等），结合城市环境营造构建一个拟自然水循环体系，提供安全可靠的环境用水，且为市民提供休闲娱乐的诱人景致。



截至 2012 年，规划中一半的湖池已经改建完成，其余工程也预计在 5~10 年之内完工。这将会造福于 800 万以上的当地居民。

另一个水循环示范项目位于西安城东郊的一座大学校园里，服务人口为 30,000~35,000 人。该项目利用校园景观湖的修建提供水循环体系的蓄水容积，通过污水处理再生设施，可实现校园污水全回收，用于校园冲厕、园艺和景观湖补水。这样一来，有限的地下水就能专供于饮用水。

水质检测分析表明，利用景观湖进行再生水储存可有效降低水中无机盐含量和不同营养级别的生物毒性，只是湖水中有有机物含量会略微增加。水循环体系中物质的作用与变化机理仍在进一步研究之中。

中国的这些成功案例表明，拟自然水循环体系的构建可提高水资源利用效率，同时改善水环境质量。

(进一步阅读可浏览：X. C. Wang et al., *Water Cycle Management : A New Paradigm of Wastewater Reuse and Safety Control*, Springer 2015.)

美国的一个案例分析：生产饮用水

在自然水源非常稀少的地方，比如干旱的美国西北部，非常有必要将废水和/或盐水转变成饮用水。

人们都喜欢来自自然水源的饮用水，是假定自然水循环中的环境过滤是大自然的完美净化机制。因此，人类只在特别需要的时候才会将盐碱水或者废水转化成饮用水。

在德克萨斯州，部分地区遭受长时间的严重干旱，地下水几乎枯竭，所以，上述需要变得非常迫切。德州大泉市几经思考后否定了“间接饮用水再生使用 (IPR)”这种方案（也就是将处理过的废水渗透通过自然缓冲系统来填补蓄水层），因为高温会将绝大部分填补的水蒸发掉。因此，当地供水公司建成了美国第一个“直接饮用水再生使用系统” (DPR)，于 2013 年 5 月开始使用。该系统每天可将高达 200 万加仑 (910 万升) 废水处理成可饮用水。

然而实际操作中，所生产的清洁水会与自然水源中未净化的水混合，混合水会经过标准过滤程序变成饮用水。

不久之后，在德克萨斯州威奇托福尔斯市的另一个社区，也着手开建 DPR 项目。在这个案例中，所需设备早已就位并用来处理含盐的湖水，因此只需要投资建立一个连接废水处理厂和现有的饮用水生产工厂的输送管道。

在德克萨斯州的一些先驱性社区里，良好的沟通加上显而易见长期干旱导致的用水需求使 DPR 饮用水接受度很高。然而，在德克萨斯州的另一些城镇，类似的计划因为公众接受度不高而被搁置。

在水资源稀缺的美国其他州和其他国家正饶有兴趣地关注这一发展。加利福尼亚州在最近 5 年遭遇了严重干旱，50 年来，该州一直在使用“间接饮用水再生系统”，也就是将循

环水补充到蓄水层中。进一步的 IPR 和 DPR 规划将考虑将现在排到太平洋中的废水利用起来。

在世界其他地方，污水直接处理后变成饮用水还是应对突发干旱危机和紧急缺水情况下的常规做法。虽然受制于高能耗，但脱盐工厂在某些情况下也是备选方案之一。

展 望

为达到足以维持人类与环境健康发展的洁净、可持续的水资源供给这一总体目标，需要协调解决有关检测、处理、和资源回收方面的问题，时刻注意工业污染、农业污染和城市污染，注重回收资源的后期使用。

水域是跨国界的，水循环也是全球范围内发生的。一个国家森林滥砍滥伐可能会导致另一个国家发生干旱。

而且，世界贸易会将“虚拟水”和“虚拟污染”转移到非常远的地方，例如，当制造业将加工厂转移到低收入国家时，由于监管体制不够严格，其环境影响也被转嫁给当地^[7]。

对水资源和环境管理失败会导致在遥远的地方和未来的灾难性后果。

因此，全球用水安全需要长期的、跨国的、超过现有级别高度的战略合作。

提高用水安全的战略离不开各相关学科的基础工作。特别是化学不仅能提供怎样检测和去除污染物质的技术，还能帮助理解有可能对环境产生影响的污染物质的复合效应，而且能帮助研发减轻污染的新方法。

参考文献

- [1] Carbon Visuals, <http://www.carbonvisuals.com/blog/all-the-accessible-freshwater-in-the-world>, 2014.
- [2] J. Rockström et al., *Nature*, 2009, 461, 472-475.
- [3] NOAA, <https://www.climate.gov/enso>, 2016.
- [4] UN-Water, *Analytical Brief on Water Security and the Global Water Agenda*, <http://www.unwater.org/topics/water-security/en/>, 2013.
- [5] UN-Water, <http://www.unwater.org/statistics/statistics-detail/en/c/211820/>, 2014.
- [6] C. J. Vörösmarty et al. *Science*, 2015, 349, 478-479.
- [7] M. Eriksen et al., *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77, 177-182.
- [8] H. K. Imhof et al., *Current Biology*, 2013, 23, R867-R868.
- [9] R. W. Obbard et al., *Earth's Future*, 2014, 2, 315-320.
- [10] A. Fedorenkova et al., *Environmental science & technology*, 2010, 44, 4328-4333.
- [11] D. Taylor, in: *Still only one Earth: Progress in the 40 years since the first UN conference on the environment*, RSC 2015, 253-280.
- [12] UN-Water, *A post-2015 Global Goal for water*, 2014.
http://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/27_01_2014_un-water_paper_on_a_post2015_global_goal_for_water.pdf.
- [13] C. Ort et al., *Addiction*, 2014, 109, 1338-1352.
- [14] Z. Hu et al., *Appl Environ Microbiol.*, 2013, 79, 2807-2812.
- [15] Xiaofei Tan et al., *Chemosphere*, 2015, 125, 70-85.
- [16] A F Ismail, T. Matsuura, *Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment, Energy and Environment*. IWA Publishing, 2016, ISBN 9781780407951.
- [17] A. Ghauch, *Freiberg Online Geoscience*, 2015, 38, 180.
- [18] H. Särkkä et al., *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015, 754, 46-56.
- [19] Brillasa&Martínez-Huitle, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 166-167, 603-643.
- [20] W. Cornwall, *Science*, 2015, DOI: 10.1126/science.aaa6359.

2015 CS3 与会者

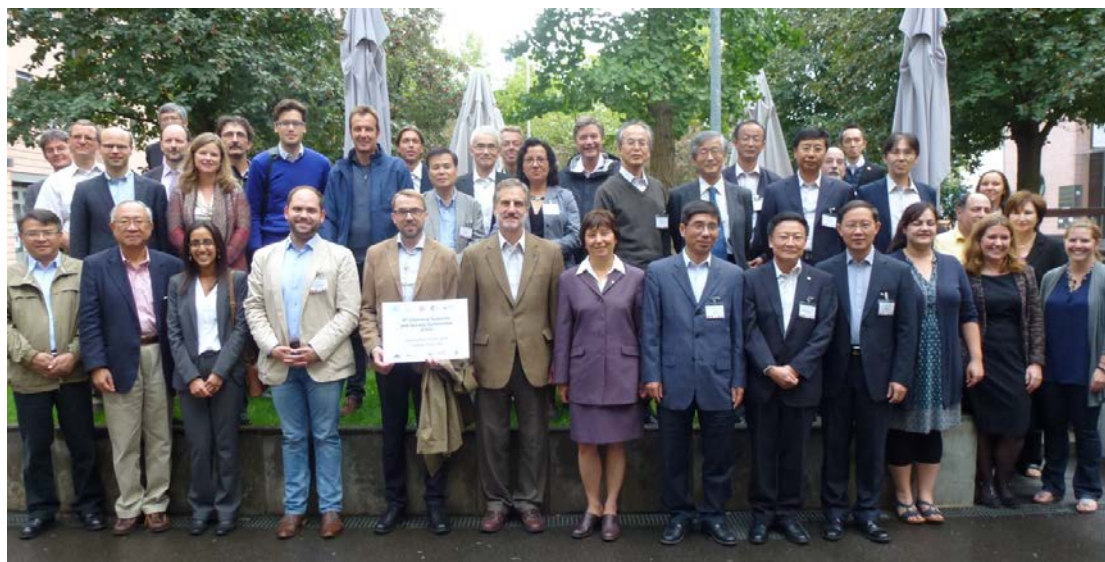


Photo: Janna Wolff

Title/Name	Institution
China	
Prof. Dr. Jiuhui Qu (Co-Chair)	Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing
Prof. Dr. Hu Hong-Ying	Tsinghua University, Beijing
Prof. Dr. Xie Quan	School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology
Prof. Dr. Zhigang Shuai (Liaison)	Tsinghua University, Beijing and Chinese Chemical Society (CCS)
Prof. Dr. Xiaochang Wang	School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology
Prof. Dr. Min Yang	Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing
Prof. Dr. Gang Yu	School of Environment, Tsinghua University, Beijing
Germany	

Prof. Dr. Torsten C. Schmidt (Scientific Chair)	University Duisburg-Essen and Centre for Water and Environmental Research / Water Chemistry Society - Division at GDCh
Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes	Technische Universität München (TUM)
PD Dr. Martin Elsner	Helmholtz Zentrum München, Institute of Groundwater Ecology
Prof. Dr. Beate Escher	Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Leipzig and Eberhard Karls University Tübingen
Dr. Michael Gross	Science Writer, Oxford
Prof. Dr. Henner Hollert	RWTH Aachen University
Dr. Wolfgang Wachter	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation), Bonn
Dr. Hans-Georg Weinig (Liaison)	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh, German Chemical Society), Frankfurt am Main
Dr. Arne Wick	Federal Institute of Hydrology BfG, Koblenz
Janna Wolff (Liaison)	Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh, German Chemical Society), Frankfurt am Main
Japan	
Dr. Hiroaki Tao (Co-Chair)	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Takamatsu
Masahiro Henmi	Toray Singapore Water Research Center
Prof. Dr. Michihiko Ike	Osaka University
Nobuyuki Kawashima (Liaison)	The Chemical Society of Japan (CSJ), Tokyo
Prof. Dr. Takeshi Komai	Tohoku University, Sendai
Toshiki Nagano, MBA	Japan Science and Technology Agency (JST), Tokyo
Dr. Yasuyuki Shibata	Fellow Center for Environmental Measurement and National Institute for Environmental Studies, Ibaraki
Prof. Dr. Hiroaki Tanaka	Kyoto University

United Kingdom	
Prof. Elise Cartmell PhD Cchem FRSC (Co-Chair)	Cranfield University
Dr. Deirdre Black (Liaison)	Royal Society of Chemistry (RSC), Cambridge
Dr. Mindy Dulai (Liaison)	Royal Society of Chemistry (RSC), Cambridge
Dr. Rachel L. Gomes	University of Nottingham
Prof. Katherine Huddersman	De Montfort University, Leicester
Dr. Barbara Kasprzyk-Hordern	University of Bath
Natasha Richardson	Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), Swindon
Dr. Micheal Templeton	Imperial College London
United States	
Prof. Dr. Matthew S. Platz (Co-Chair)	The University of Hawaii at Hilo
Prof. Dr. Amy E. Childress	University of Southern California, Los Angeles
Dr. Colby A. Foss, Jr.	National Science Foundation (NSF), Arlington
Dr. Venera A. Jouraeva	Cazenovia College
Christopher M. LaPrade (Liaison)	American Chemical Society (ACS), Washington
Prof. Dr. Bruce E. Logan	Pennsylvania State University
Dr. Brooke K. Mayer	Marquette University, Milwaukee
Prof. Dr. Jerald L. Schnoor	University of Iowa