

污染生态化学研究与展望^{*}

周启星

(沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室 沈阳 110016)

摘要 污染生态化学是环境化学与应用生态学相互交叉、融合的产物,是一门处于形成之中且最近几年得到迅速发展的新兴边缘学科。简要阐述了污染生态化学的研究意义,概述了国内外该新兴分支学科的研究现状及发展趋势,并就该学科我国及我院今后的发展与重点建设提出了若干建议。

关键词 污染生态化学,分子生态过程,复合污染,生态效应,研究建议



污染生态化学主要阐述生物体与其污染环境相互作用的化学机理与化学过程及其生态调控的化学,是环境化学与应用生态学相互交叉、融合的产物,是一门处于形成之中且最近几年得到迅速发展的新兴

边缘学科^[1]。作为环境化学的重要分支,污染生态化学正在逐渐完善其基本理论,同时通过学科交叉和再融合,在使其自身成熟的过程中,促进或带动环境化学及其它分支学科的发展。作为应用生态学的重要组成部分,污染生态化学的研究及其成果的应用,已经成为应用生态学发展与学术创新的催化剂。

随着世界范围内环境污染的进一步恶化以及由此导致的不良生态效应在生态系统层面上逐渐地由个体向种群、群落、景观与区域、全球生态系统等高层次水平的不断扩展,污染生态化学在研究解决这些复杂问题、治理污染环境的过程中得到了发展。不仅如此,污染生态化学还在国家生态安全、人体健康、乡村城镇化环境规划、工业清洁生产、农牧渔业可持续发展、农产品安全生产、绿色药物设计和生物多样性保护等方面发挥了不可替代的重要

作用^[2,3]。

1 国际上的发展现状及趋势^[4-8]

1.1 生态系统中典型化学污染物的行为、迁移转化与归宿

20 世纪 50 年代以来,随着几次大的污染事件的发生,特别是其中几次与重金属的污染有关,单一重金属在食物链中的传输规律以及在土壤-作物、土壤-水系统中的行为、迁移转化与归宿得到了比较广泛的研究。近年来,这些研究正在从一般化学行为的观察走向生理生化水平与分子机制的探索,走向对植物根际圈利用根系分泌物、根细胞壁等组织结构抗拒以及排斥重金属吸收的研究和对细胞内重金属结合多肽的分子动力学以及重金属结合肽的螯合作用、区室化作用和解毒过程及其微观机制的研究。与此同时,国外许多研究者对有毒、有害和持久性有机污染物在生态系统各分室中的行为、迁移转化与归宿等也做过比较系统的研究,但过去主要集中在酚类物质、多氯联苯、氯代烃类农药、洗涤剂、增塑剂和石油烃,近年来则逐渐转向于一些新合成的化学品,如有机磷农药、除草剂和有机染料以及多环芳烃、二恶英和甲基叔丁基醚(MTBE)等。

大量的资料还表明,磷的非点源污染特别是土壤环境中磷的大量过剩和淋失以及由此导致的生态衰退与水体富营养化,是西方发达国家一直未能

^{*} 收稿日期:2003 年 8 月 24 日

从根本上解决且最近几年来仍然加剧的问题。因此,生态系统中磷的迁移模型、形态分析及应用化学计量学进行定量描述(例如分配系数 K_d 、水活性系数 K_w 和植物有效系数 K_p 等) 是西方发达国家近年来污染生态化学研究的热点之一。在西欧,另一营养类化学污染物硫,则因长期燃煤引起的酸雨问题的解决,而使硫在生态系统尤其是农业生态系统中显得越来越缺乏。因此,农业生态系统中有关硫的补给、有益转化及生物有效性研究,在西欧有升温的趋势。

20 世纪 90 年代以来, 由于人们认识到要解决环境污染和生态破坏及其所造成的危害与后果,必须对被污染的环境系统与生物系统之间相互作用的动态过程进行系统研究,污染生态过程因此得到了前所未有的重视,今后的重点将集中在有生物参与的多介质界面扩散-混合过程、吸附-解吸过程、老化-固定过程、沉淀-溶解过程、络合 / 螯合-解络过程、吸收-排泄过程、累积-放大过程、生物烷基化过程、次生代谢过程、共代谢过程、降解-合成过程和致毒-解毒过程及其生态化学动力学,特别是这些过程对环境中的化学污染物的生物毒性和可利用性的影响。总之,污染生态化学今后的趋势将加强对化学污染物在环境中的多介质界面过程(主要包括水-土界面表面扩散与表面吸附过程、土-根界面表面解吸与表面吸收过程和水-土-根界面形态转化过程等)的研究与探索。

1.2 化学污染物的毒理效应及生态风险分析

早期,大多研究主要集中于大剂量、高风险化学污染物对生物体的急性毒性效应研究,涉及的环境介质以水体为主。化学物质对水生生物不可逆转的毒害作用是其研究重点。例如,在西方发达国家,由于长期使用污泥而造成的农田植物的金属毒性一直受到重视,有关的研究也比较系统。以后,逐渐过渡到环境中化学污染物剂量-效应关系的研究以及 QSARs 模型的建立, 特别是以化学污染物对生态系统结构与功能的影响、对种群和种群的胁迫及其化学机制的研究为核心内容,还涉及到环境污染引起的生物耐受性变化、种群依存关系、能量与物质流动变化及群落结构关系污染引起的生物耐受性变化、种群依存关系、能量与物质流动变化及群

落结构关系等科学问题。

近年来,污染生态化学注重在整体上对低剂量化学污染物长期、慢性影响及其生物标志物进行研究,通过与已灭绝的生物物种从地球上或地球某一区域消失的过程进行比较,就现有化学污染物对珍稀物种、敏感物种以及对生物多样性胁迫效应作出评价和分析,并深入到分子水平进行研究。总的来说,相对于水生生态毒理效应研究,陆生生态毒理学研究开展的较晚,有关资料积累也较少。

可以说,这是一个非常重要的研究方向,也是一直受到西方发达国家高度重视的热点问题。至今,在各种国际 *SCI* 刊物中,以“环境毒理学或生态毒理学”等字样命名的刊物就多达 10 种以上。

1.3 生态系统中复合污染化学问题

近年来, 国外一些学者在水-水生动物系统、大气(或水、土壤)-植物系统和土壤-微生物系统复合污染等方面做了较多工作, 并取得了一些重要成果。但总的看来,水生生态系统复合污染的研究较为系统,而陆生生态系统复合污染的研究还处于起步阶段,目前的研究主要集中在重金属之间的交互作用和两种有机污染物共存时的联合毒性方面,对同一介质或生态单元中由重金属和有机污染物组成的多种污染物复合污染的研究还很少,有待进一步加强。

现在很多复合污染的研究结果都带有猜想性,实验也多以急性毒性实验为主,长效实验和蓄积实验较少,一些生物技术的新方法没有充分利用。因此, 今后对复合污染生态效应过程与机理的研究,将更加有赖于研究过程中充分应用分子生物学的各种技术手段。

复合污染更为接近环境的现状,环境污染也就更依赖于对复合污染的解释,所以西方各国正在加强复合污染研究成果的应用。例如,国际上现有的饮用水卫生标准、地表水环境标准、食品卫生标准和土壤环境质量标准仅基于单因子污染的生态效应,应用现有的复合污染研究成果,正确评估水、土壤和大气(包括室内和室外)环境质量与生态安全性,对复合污染条件下地表水、饮用水和食品安全指标及土壤环境质量基准提出建议,有助于推动更为符合环境实际、更有助于生态安全和人体健康的

各种卫生标准和环境标准的制定,更好地服务于环境保护工作和人体健康的要求。

目前大多数国家对化学污染物危险性的评价包括危害分析、暴露特征指数估算、剂量-效应关系和危险性特征指数计算 4 项主要内容,它们主要是针对单一化学污染物存在条件下的情形,而对一种以上化学污染物的危险性评价和定量表征,还缺乏必要的研究和可靠的方式,有待研究和发展。

1.4 污染环境的快速准确诊断及其方法的标准化

生态系统是否受到了人为污染,其污染程度如何?需要采用灵敏的和有效的方法予以诊断。在确定生态系统确实已经受到了污染,要判断是否需要立即需要进行修复以及采用何种方法进行修复,也需要通过对污染进行诊断来回答。污染环境经过修复后,是否达到预定的目标或修复的标准,仍然需要通过修复现场的诊断加以判断。

鉴于上述,国外十分重视对生态系统污染诊断指标体系(包括物理指标、化学指标、生物学指标、生态学指标和生态毒理学指标等),污染诊断的影响因素和地表水、污染土壤及地下水诊断方法进行研究。目前大体上已经建立的污染环境诊断方法有:敏感植物指示法(如症状法、生长量法、清洁度指标法、种子发芽和根伸长抑制法、植物生长半效应浓度法、生活力指标法和斜生栅藻法等)、敏感动物指示法(蚯蚓指示法、线虫指示法和鱼类回避试验法等)、敏感微生物诊断法(如微生物数量指示法、微生物群落结构变化法和发光细菌诊断法)和酶学诊断法等。相比较而言,陆生生态毒理诊断方法相对滞后,主要存在两个方面的问题:方法之间的可比性较差;方法缺乏国际统一性,公认性与规范化不够。

目前,有关这些方法在国家层面以及在国际组织水平上的标准化,是该研究方向的主要趋势。

1.5 环境污染对生态系统健康质量与食物安全的化学胁迫

生态系统健康是指生态系统中物质循环和能量流动的正常方式与良好状态,反映了人类活动、社会组织、自然系统和人体健康的关系。由于环境复合污染的发生,生态系统中一些植物成分或优势

种、营养循环、土壤有益动物和微生物区系等关键生态组分受到损伤,生态系统健康受到干扰和损害,甚至发生一些疑难疾病或新型疾病。在生态系统水平上,环境污染对陆地生态系统的胁迫,则反映在生态系统本身健康质量的下降。例如,当土壤中有益元素或必需元素与污染物发生交互作用造成其正常循环途径被破坏,土壤健康质量下降,可进一步影响食物的安全性。这就是说,人体健康、食物安全与陆地生态系统健康密切相关。

当前,艾滋病、非洲热带病等综合疑难病症有向北延伸并在温带和寒带地区扩展和扎根的趋势,肥胖狂症等寒温带病则有向南扩展的趋势,军团杆菌病、莱姆氏病的发病率在不断上升,非典型肺炎、新型脑炎、疯牛病、疯鹿病和妇女中毒休克综合症等新型疾病时有爆发。有关这些问题的解决和根治,需要从污染生态化学基础研究着手,以揭示新型疾病的起源。

1.6 污染环境修复与污染控制生态化学

绿化树种净化大气、水生植物净化污染水体是污染环境修复的早期工作,在多个方面取得了进展,成功的例子包括街道树种改良、氧化塘和污水土地处理系统。

近年来,污染土壤及地下水的化学修复和生态修复(包括微生物降解、植物修复和化学-生物联合修复)逐渐受到重视并成为热点。化学修复分为原位化学修复和异位化学修复。其中,零价铁(Zero-Valent Iron)及其化学活性栅(Chemical Reactive Barrier)技术倍受青睐,它主要针对这一技术的改进及现场应用的化学问题并应用这一技术对 Cr、As 等重金属和石油烃、MTBE、RDX 等有机污染物污染的土壤及地下水进行修复及其化学机理(如化学氧化、土壤催化氧化、化学还原、化学聚合、化学脱氯等)与生态因子的影响等。在植物修复方面,国际上已报道的超富集植物已有 400 多种。但是,在这些超富集植物中,大多是 Ni 超富集植物(约 300 种),此外还有 Co26 种、Cu24 种、Se19 种、Zn16 种、Mn11 种和 Cd1 种,而具有多种重金属同时超积累的植物尚未见报道。

由于土壤及地下水污染往往呈复合型,当前的修复技术只能解决其中某些污染物的污染问题,对

复合型污染土壤及地下水的修复还存在着困难,尤其是土壤及地下水同时受到无机和有机污染物污染时,已有的修复方法更是难以奏效。因此,美国、德国、荷兰、英国等国家在开辟新的污染土壤及地下水修复途径方面加大了力度,尤其看好化学-生物联合修复。

污染控制生态化学的研究,目前也逐渐趋于活跃,主要涉及三个方面的工作:(1) 固体废物处理(如卫生填埋)与资源化的土壤、地下水生态化学调控研究;(2) 鉴于生态系统的脆弱性与化学敏感性,围绕生态系统退化的生态过程开展研究,在区域或景观水平上寻求有效的生态调控方法;(3) 土壤化学物质(如泥碳、硅铝酸盐和铁锰结核)的提取、加工及在污水处理中的应用。

2 我国及我院的进展

我国对污染生态化学的研究,可以追溯到 20 世纪 70—80 年代,那时主要是结合环境污染的实地调查和污水灌区的环境质量评价,开展了重金属和农药在土壤-植物系统中的迁移转化及生态效应、水体污染物的急性毒性与毒理、大气污染对植物的急性影响、水生植物净化污水以及利用种植树木和高粱进行镉土改良等研究^[3-9]。但是,这些早期的工作仍以原母体学科的特色为主,虽涉及面相当广,但由于非常分散、零星,系统深入研究不够,对污染生态化学学科的形成与发展没有起到关键作用。90 年代以来,由于污染生态化学在解决环境污染问题中起着越来越重要的作用,国家自然科学基金委员会开始重视这一新兴分支学科的发展,把其中许多有关的研究内容列为鼓励研究领域或优先资助领域给予重点支持。

中国科学院十分支持这一新兴学科的发展,于 1998 年专门设立污染生态化学“百人计划”岗位,面向国内外公开招聘。与此同时,以污染生态过程为主要研究方向之一的陆地生态过程实验室被中国科学院批准为院重点实验室并进入首批知识创新序列。2000 年初,在中国科学院“引进国外杰出人才”科研项目的支持下,污染生态化学“百人计划”团队得到组建。之后,生态环境研究中心与水生生态毒理学研究有关的实验室也被批准为院重点实

验室。这些进展,标志着我国污染生态化学研究进入到一个新的发展水平,从而奠定了我院这一学科在国内的领先地位。随着污染生态化学与生态过程首届国际学术会议在沈阳的成功召开,我国的污染生态化学研究跻身到了国际先进行列并起到了推动该学科发展的领导作用。

尽管如此,我国污染生态化学的研究基础仍然十分薄弱,有待进一步强化。

3 学科发展对策及建议

污染生态化学仍是一门处于形成中的年轻“弱势”学科,在现阶段基本上不具备与其它成熟科学在人、财、物方面特别是一些重大项目争取上的竞争优势,目前尚没有相应的院士级学科带头人产生。因此,该学科的发展,不仅需要得到化学、生物学及生态学等已经属于成熟学科的引导,还需要得到相关学科有影响科学家和相关领导的支持与爱护。

在中国科学院层面上,把污染生态化学作为我院优先发展领域加以大力扶植与长期持续支持,也是十分必要的一环。在研究队伍建设上,要实施重点培育的原则,给予一定倾斜;在项目的支持上,要突出团队的作用,避免分散单干、低水平重复,才能逐渐形成学科优势;在研究方向布局上,应该做到既要避免重复建设、又不能搞“一言堂”,既有分工、又有合作,才能形成合力,才能通过竞争机制推动学科的向前发展。

从本学科自身发展而言,则应该牢牢把握其国际发展方向,抓住机遇,努力争取国际合作及相关资源。与此同时,更要十分注意与国家的需求密切结合,以取得国家层面的大力支持。为此,建议国家科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院有必要对这样一些研究内容给予重点支持:(1) 新型疾病与环境介质(水、土壤和大气)污染的关系;(2) 污染土壤的致毒过程、脱毒缓解及应用;(3) 土壤污染生态过程及其化学动力学;(4) 化学污染物互作态及其对化学污染物的生态毒性与生物可利用性影响;(5) 污染土壤修复基准;(6) 生态系统化学污染阻控新方法与新技术。并建议将这些研究内容在适当时机作为国家“973”、“863”、国家重点或

重大基金和院知识创新重要或重大项目进行立项。

主要参考文献

1 周启星, 孙铁珩. 污染生态化学: 现状和展望. 应用生态学报, 2000, 11(5): 795-798.

2 Zhou Qixing. Application of biotechniques to water purification: principles and methods. Goosen F A, Shayya W H, eds. Water Management, Purification, and Conservation in Arid Climates. Lancaster: Technomic Publishing Co., INC., 2000, 31-44.

3 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学. 北京: 科学出版社, 2001.

4 Manahan S E. Toxicological Chemistry and Biochemistry.

Boca Raton: Lewis Publishers, Inc., 2002.

5 McNeill J. Historical perspectives on global ecology. World Futures: The Journal of General Evolution, 2003, 59(3-4): 263-274.

6 Nelson W M. Green Solvents for Chemistry: Perspectives and Practice. Oxford: Oxford University Press, 2003.

7 Sandermann H. Molecular Ecotoxicology of Plants. New York: Springer Verlag, 2003.

8 Steckel R.H. Assessing long-term trends in health. Indicators, 2003, 2(3): 5-23.

9 高拯民. 土壤-植物系统污染生态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1986.

Progress in Pollution Eco-Chemistry and Its Strategic Expectation

Zhou Qixing

(Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, CAS, 110016 Shenyang)

Scientific and practical significance of pollution eco-chemistry is briefly expounded. Current situation of research on pollution eco-chemistry and its developing trends as a new discipline and rising field at home and abroad are generally summarized. Future researching pivots and scientific problems to be solved in the growing scientific branch are tentatively suggested.

Keywords pollution eco-chemistry, molecular ecological process, combined pollution, ecological effect, researching suggestion

周启星 沈阳应用生态研究所研究员, 博士生导师。1963 年出生于浙江。1986 年毕业于浙江大学, 1989、1992 年分别获中国科学院理学硕士和博士学位, 1997—2002 年先后任职于英国女皇大学、伦敦大学和美国佛罗里达大学。现任中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室主任, 中国生态学会污染生态专业委员会主任, 中国科学院知识创新工程重要方向项目首席科学家。著有《Ecology of Combined Pollution》、《环境生物地球化学及全球环境变化》和《污染土壤修复原理与方法》等 10 多部中、英文学术专著, 在国内外发表学术论文 180 余篇。