

马文娟,刘丹妮,杨芳,等.水环境中污染物同位素溯源的研究进展[J].环境工程技术学报,2020,10(2):242-250.

MA W J, LIU D N, YANG F, et al. Research progress in isotope methods for tracing contaminants in water environment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(2): 242-250.

水环境中污染物同位素溯源的研究进展

马文娟^{1,2}, 刘丹妮¹, 杨芳^{1*}, 王鹤立², 王希欢¹, 李崇蔚¹, 廖海清^{1*}

1. 中国环境科学研究院流域水环境污染综合治理研究中心

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院

摘要 水环境中污染物的源辨识及污染过程控制是当前流域水污染治理的难题,利用同位素示踪技术对污染物来源及污染过程进行追踪是解决该问题的有效手段之一。综述了近几年同位素技术在国内外水环境污染源解析研究中的应用状况,简要介绍了同位素技术的基本原理与特点,重点总结了稳定同位素技术在示踪水环境中不同污染物及其迁移转化过程的研究进展;提出同位素示踪技术与传统水化学方法相比,有其独特的优势,但也存在一些不足,结合传统水化学分析和荧光光谱等技术,可提高同位素技术的示踪效率及环境友好程度;对同位素示踪技术的应用前景进行了展望。

关键词 同位素示踪技术;水环境;污染物;源解析

中图分类号:X502 文章编号:1674-991X(2020)02-0242-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20190081

Research progress in isotope methods for tracing contaminants in water environment

MA Wenjuan^{1,2}, LIU Danni¹, YANG Fang^{1*}, WANG Heli², WANG Xihuan¹, LI Chongwei¹, LIAO Haiqing^{1*}

1. Watershed Water Environment Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing)

Abstract The sources identification and pollution process control of contaminants in aquatic environment is still a challenge in watershed pollution management. Isotope technology for tracing pollutants sources and the pollution processes is one of the effective methods to solve this problem. The application situations of isotope technology in water pollution sources research at home and abroad in recent years were summarized. The basic principles and characteristics of isotope technology were introduced briefly. The research progresses in stable isotope technology for tracing different pollutants, as well as the corresponding migration and transformation processes in water environment were summarized. Compared with the traditional methods, e. g. hydrochemistry, it was proposed that isotope technology had its unique advantages, while limitations still existed. Combined with the traditional hydrochemistry and fluorescence spectroscopy, the efficiency and environmental friendliness of isotope technology could be greatly improved. The prospects for the application of isotope tracing technology in aquatic environment were carefully addressed.

Key words isotope tracing technique; water environment; pollutant; source analysis

人类活动的加剧使大量污染物排入水体,对环境造成严重污染。目前全世界每年约有4 200亿m³的污水排入江河湖海,日益加剧的水污染事件已

对人类生存和健康造成了很大威胁,成为经济和社会可持续发展的重大障碍。虽然各国都制定了相应的法规来约束污染排放行为,但水污染事件仍时有

收稿日期:2019-05-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41573124);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(JY-2011ZX07212-007-001)

作者简介:马文娟(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为流域水污染源解析,mwj1550125@163.com.

* 责任作者:1. 廖海清(1979—),男,研究员,博士,主要从事流域水环境保护与污染控制研究,liaohq@eraes.org.cn

2. 杨芳(1986—),女,助理研究员,博士,主要从事寒旱区湖泊污染控制领域相关研究,fff. yyyy@sina.com

发生。掌握污染来源是监管和追责工作的基础,对提高管理部门对水环境污染事故的处理能力,从源头控制和消除水环境污染具有重要意义^[1]。因此,污染源解析在理论和实践上都得到了越来越多的关注。

水环境污染源解析就是识别水体中污染物及其来源,以便提出减少和控制流域污染输入的措施,其是流域水安全管理的重要内容之一^[2]。综述了水环境污染溯源技术的发展以及同位素技术在示踪流域水环境中不同污染物的迁移转化过程的研究进展,以期把握同位素示踪技术前沿动态,增强其在水环境污染防治领域的推广和应用,及流域水污染控制与综合管理提供科学依据。

1 溯源技术发展

水环境中污染物的溯源技术发展经历了几个重要的历史阶段。早期主要利用水化学方法对污染物进行溯源,通过对水化学参数的收集和分析,从而达到溯源的目的。随着同位素技术的建立和完善,它在示踪水环境中污染物的潜力也越来越受到重视。然而,同位素示踪技术并不是万能的,也有其自身的局限性。因此,近年来人们对水环境中污染物的溯源逐渐过渡到以同位素示踪技术为基础,结合其他技术手段进行溯源的多技术联用阶段。

1.1 水化学参数统计分析溯源

20世纪60年代以前,识别水环境中污染物的来源和跟踪污染物的迁移过程主要依赖于水化学方法。水化学方法是基于水体基本化学指标(pH、氧化还原电位、电导率、化学需氧量等参数)和其中物质含量的信息,如总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、金属、非金属和微量元素等,确定水体的水化学特征,通过各指标间相关性研究了解区域水化学过程^[3]。实际应用中还要借助多种统计分析手段(如因子分析、聚类分析和层次分析等),具体操作步骤:1)对收集的数据进行筛选和标准化处理,利用因子分析对数据进行检验和关联性分析,确定主要污染物;2)对因子分析的结果进行描述统计,利用聚类分析将有相似性的主要污染因子聚集在一起,同时能够区分差异性较大的污染因子;3)根据前面两步得到的初步结果,结合详细的污染源经验数据建立层次比较阵,从而找出概率最大的排放源^[1]。以水环境中硝酸盐来源示踪为例,通常以 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 等作为检测指标,基于不同氮形态之间的转化关系,结合环境参数分析水环境中硝酸

盐的污染来源及污染特征。国内外有许多学者利用该方法进行污染物溯源,如González等^[4]利用多元统计方法评估了波特雷罗德洛斯富内斯河的有机物污染状况,得出污染物主要源于过去几年城市化和旅游业的开发;Sharifi等^[5]借助水化学方法,通过监测不同水源的水质情况,确定了城市集水区中重金属的潜在来源,并判定街道、桥梁和停车场等地面是河流重金属污染的主要贡献者;Dimzon等^[6]利用气相色谱-质谱法和液相色谱-串联质谱法研究了菲律宾圣巴勃罗市3个火山口湖的有机污染物来源,结果表明,3个湖泊中的有机污染物主要来自农业、水产养殖、居民生活和生态旅游活动,且规模小的湖泊承受的环境压力更大;胡红岩等^[7]通过对不同深度地下水的水化学分析,确定金堤河两岸地下水的主要化学类型,得出研究区浅层地下水受人类活动影响较强,主要污染源为含氮的农药、化肥和被污染的地表水等。

利用水化学参数进行污染物溯源的方法比较成熟且应用广泛,但存在明显的局限性:1)在污染物来源复杂的情况下,难以准确判断,得出的结论比较模糊;2)水化学参数往往稳定性不好,只能在一些特定场合使用,严重影响了该方法的适用范围;3)该方法只能给出贡献较大的污染源,不能给出具体污染源对水体的贡献大小,缺乏对水体污染防治工作的实际指导意义^[8]。

1.2 同位素分析溯源

20世纪60年代以来,随着同位素技术的进步和完善,人们逐渐意识到同位素技术在环境污染物的溯源及过程示踪有着广泛的应用前景。如Nigro等^[9]利用锶(Sr)同位素作为污染的自然示踪剂研究了意大利中部城市固体废物填埋场下流动的地下水,以识别潜在的污染来源。王锦国等^[10]在奎河徐州段两岸对浅层地下水进行了研究,通过对 $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ 和 $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ 进行分析,得出了地下水 NH_4^+ 和 NO_3^- 的来源。由于不同来源的同位素特征值存在一定的重叠,导致辨别不清。在此背景下,双同位素或多同位素技术逐渐发展起来并越来越广泛地应用到水环境污染溯源中。如Archana等^[11]利用 $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ 示踪技术,研究了珠江口下游到开阔海洋盐度梯度下污水、大气沉降、固氮和地下水的 NO_3^- 来源,并借助双同位素分析模型得出了各来源以及 NO_3^- 转化过程(同化、硝化和反硝化)的贡献;Garcia等^[12]应用主要元素浓度和铀(U)、硫(S)、硼(B)、Sr同位素特征,得出地表水的自然上涌是里奥

格兰德河盐度的主要来源; Meghdadi 等^[13]应用硝酸盐同位素($\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)、硼同位素($\delta^{11}\text{B}$)、锶同位素比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)以及贝叶斯同位素混合模型,评估伊朗塔罗姆河流域 3 种主要硝酸盐来源(肥料、动物粪便和居民污水)贡献比例空间和季节变化;孟志龙等^[14]应用多同位素示踪、IsoSource 计算等方法,甄别出汾河下游流域硝酸盐污染源包括农业化肥、粪便和污水,并得出各来源贡献率。

使用同位素技术进行污染物来源研究可以将不同的污染来源和性质区别开来,通过同位素模型实现量化分析,结论相对精确,但仍存在一定的局限性。例如硝酸盐来源识别过程中,由于氮是一种易分馏的元素,氮循环过程中的复杂的同位素分馏会改变硝酸盐来源的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$,使判断硝酸盐来源时易产生偏差^[15],如何降低偏差以达到精确溯源的目的成为研究热点。

1.3 同位素与其他技术联合分析溯源

为了弥补同位素技术的不足,国内外学者开始通过同位素与其他方法联用的手段来进行污染物溯源。最常见的是利用多种同位素结合水化学分析的手段来研究污染物的来源、迁移和转化。如 Danni 等^[16]综合水化学分析、水的稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$)和硝酸盐的稳定同位素($\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)方法,研究马萨河流域硝酸盐污染源,发现化粪池是主要的污染源,由于研究区域卫生系统不完善,故生活污水是潜在的硝酸盐污染源;Anornu 等^[17]等综合水化学和同位素($\delta^3\text{H}$ 、 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$)技术追踪加纳地下水硝酸盐来源,发现该地区 NO_3^- 主要来源于人类和动物粪便以及某些地区发生的反硝化作用,化肥和大气沉积物不太可能是该地区 NO_3^- 的来源;Puig 等^[18]将水动力、水化学和多同位素系统学(H_2O 中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 、 NO_3^- 的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{11}\text{B}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$)相结合用于表征西班牙东北部污染盆地中的硝酸盐污染源和潜在自然衰减过程,发现粪便是 NO_3^- 的主要来源,并证明了在近河地区发生了由有机物驱动的反硝化作用;Widory 等^[19]利用多同位素方法($\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 、 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{11}\text{B}$)及传统的水文地质分析跟踪水中硝酸盐的来源,证明将同位素信息与传统的水化学分析结合起来的方法更有研究价值;马燕华等^[20]通过分析枣庄市南部不同深度地下水和地表水的水化学特征及 δD 、 $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 同位素组成,研究地下水硫酸盐的来源、污染的范围和途径。

同位素与荧光光谱方法联用的技术也开始应用

到水环境污染溯源中,如 Osburn 等^[21]利用荧光以及稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}\text{-DOC}$)评估 2 个低地热带雨林溪流中暴雨流和基流的溶解有机质(DOM)来源,以此研究哥斯达黎加东北部的地表水碳循环过程;Derrien 等^[22]借助稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)和荧光光谱估算了河流沉积物有机质的来源及每个来源的贡献率;马永祥^[23]采用同位素示踪技术和原子荧光光谱等技术研究了地下水的补给来源,通过综合指数评价法和地下水单一组分评价方法对宁东煤田煤炭开采前、开采初期和开采中后期的水质资料进行详细研究,发现长期的煤炭开采活动使该区域地下水受到了持续污染,与开采初期相比 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度有数倍的增加,且地下水中 pH 明显增大;聂泽宇^[24]利用常规水质监测、 $^{15}\text{N}\text{-}^{18}\text{O}$ 双稳定同位素示踪、基于平行因子分析和自组织映射图的荧光指纹图谱,对太湖南部茗溪水体碳、氮污染现状进行了系统评估,对氮素主要赋存形态 NO_3^- 和 DOM 的来源及空间赋存规律进行了解析。

除此之外,Shakak 等^[25]结合地理信息系统、遥感技术和稳定同位素方法对苏丹地区含水层硝酸盐来源进行指纹识别,并利用同位素比率质谱法进行分析,证明了地理标志及遥感的特殊分布和集成有助于识别硝酸盐的污染源;Meghdadi 等^[26]应用 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 、地下水细菌群(粪大肠菌群和产肠杆菌)及质量平衡同位素混合模型,研究了澳大利亚布里斯班地区含水层硝酸盐的主要来源以及空间变化,表明同位素分馏分析可以准确地反映出反硝化作用,使用线性混合质量平衡模型可以量化含水层中硝酸盐的主要来源,应用地下水的粪便细菌特性可准确区分不同重叠来源中的硝酸盐贡献率。

同位素技术与其他示踪技术的结合更有助于结果的解释,能更好地刻画水环境中污染物的地球化学过程。这是目前乃至今后研究水环境污染来源的重要手段,具有广阔的应用前景。特别是同位素技术与荧光光谱的结合更有助于污染物的源解析,以便提出更加科学有效的流域管理策略。当然,全面掌握研究区的水文地质以及地球化学背景是污染物准确源解析的首要前提。

2 同位素溯源技术

2.1 基本原理

同位素示踪技术^[27]是利用放射性核素或稳定核素作为示踪剂,以追踪研究对象及其运动变化规

律的一种重要技术手段。利用核素作为示踪剂进行污染物的示踪,主要基于2个基本的假定:1)每一种污染物的不同来源都有其特定的同位素组成;2)不同来源的污染物在经历不同的物理、化学和生物过程中其同位素组成能保持相对稳定。第一个假设可以保证对不同来源的污染物进行有效区分,即不同来源污染物的同位素信号差别越大,其识别度就越大,越容易进行区分,从而保证示踪结果的定量表达;第二个假设可以保证示踪剂的性质满足污染物不同端元解析的数学逻辑,即不同来源的污染物的同位素组成越稳定,就越能满足作为理想示踪剂的数学要求,确保解析结果的准确性。但实际情况是,有些同位素在不同来源的污染物中的信号往往发生

重叠,导致不同来源的污染物之间难以识别,最后传递到结果中的误差也可能很大;其次,由于实际过程中发生同位素分馏效应,有些污染物的同位素信号在经历不同的物理、化学和生物过程后其同位素组成发生变化,从而无法满足作为理想示踪剂的数学要求,使示踪的有效性显著降低。因此,在实际工作中要对同位素示踪剂进行筛选,以确保示踪剂的有效性和示踪结果的准确性。

根据同位素本身的性质,同位素示踪方法主要分为放射性同位素法与稳定性同位素法两大类^[28]。它们在现代水环境中污染物的来源识别和过程示踪中均发挥了重要作用,但各有其优缺点(表1)。

表1 不同同位素示踪技术的特点

Table 1 Characteristics of different isotope tracing methods

方法	优点	局限性
放射性同位素法	灵敏度高;试验方法简便易行,不受其他非放射性物质干扰;能准确定量测定代谢物质的转移和转变;符合所研究对象生理条件	具有辐射效应,对人体和生物体有害;需要专业的操作人员 and 专门的实验室;必须具备良好的设备条件和相应的防护措施
稳定性同位素法	检测方法简便;无辐射,危害性远小于放射性同位素;物理性质稳定,没有试验时间的限制;没有环境污染问题	检测灵敏度没有放射性同位素法高;示踪剂价格较贵;检测仪器复杂,价格昂贵

最先应用和环境领域的是放射性同位素法,其被广泛应用于污染物标记、环境定年等方面的研究。随着没有放射性且不会造成二次污染的稳定性同位素法的发展,人们逐渐把环境监测用的放射性标记物转向稳定性同位素标记物^[30],稳定性同位素法逐渐用于示踪污染物的迁移转化过程和源解析中^[31]。

2.2 技术特点

不同来源的同位素具有明显的指纹特征^[31],即特定的污染源中具有特定的稳定同位素组成,其组成的含量分析结果精确稳定,在迁移与转化过程中具有组成不变的特点^[30],因而可以通过介质中不同来源同位素的丰度来追溯污染物的来源。目前,水环境中污染物源解析主要使用碳、氢、氧、氮、硫、铅、汞等稳定性同位素,利用其作为示踪剂推测水体中污染物的来源,分析污染物随时间的迁移与变化,从而达到对已发生的污染事件进行仲裁,了解污染及其转化途径等目的。

同位素示踪技术中 δ 表示样品的同位素比值(重同位素与轻同位素的丰度之比)相对于一个标准物质的同位素比值的千分差^[32]。

稳定性同位素的常规分析方法主要有质谱法、核磁共振谱法、气相色谱法、中子活化分析法、光谱

法等^[33-38]。其中,质谱法具有分析元素多、分析精度高的优点,是目前环境科学领域中最常用的稳定性同位素分析方法。该方法是先将样品经过热电离、电子电离、激光照射电离、粒子流轰击电离、等离子体电离等处理后,进入质谱检测器进行定量或定性分析,主要包括固体、气体同位素质谱,连续流质谱,激光探针质谱,离子探针质谱,电感耦合等离子体质谱,同位素比质谱分析等^[39]。

目前利用稳定性同位素示踪技术对水体中硝酸盐氮以及有机质碳、氮来源进行分析的研究居多。例如由于不同来源的氮同位素比值具有不同的特征值,如硝酸盐合成肥料的 $\delta^{15}\text{N}$ 为 $-1\text{‰} \sim 2\text{‰}$,动物粪便或污水的 $\delta^{15}\text{N}$ 为 $8\text{‰} \sim 16\text{‰}$,因此通过评估样品中的 $\delta^{15}\text{N}$,可以大致区分硝酸盐来源^[40]。但在实际研究中,由于环境条件的复杂性导致不同来源的氮同位素特征值存在或多或少的重叠,仅仅利用氮同位素无法达到精确溯源的目的,因此越来越多的研究者利用多同位素技术或者同位素与其他技术联用的方式进行污染物溯源,如将水化学分析、水的稳定性同位素($\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$)和硝酸盐的稳定性同位素($\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)综合起来研究水体硝酸盐来源。

3 同位素溯源技术应用进展

近年来,同位素示踪技术在水环境中的研究主要分为无机污染物,水中有机氮、磷循环和持续性有机污染物(POPs)溯源及防治等几个部分。

3.1 无机污染物溯源

采矿、冶炼、机械制造、化工等工业生产排放废水含有大量的无机污染物(包括各种酸、碱、盐类以及重金属等),这些物质排入水中造成严重的水体污染,为了研究污染物的来源及其在水环境中的迁移转化规律,同位素示踪技术发挥了很大的作用。Gooddy 等^[41]利用磷酸盐氧的稳定同位素组成示踪废水处理厂流出物中的磷,证明在已知流出物来源的条件下 $\delta^{18}\text{O-PO}_4$ 是从废水处理厂追踪磷的有效工具; Neymark 等^[42]首次尝试将放射性锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)和铀($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)同位素示踪剂结合起来估算油田采出水对地下水污染的程度,研究证明了使用联合放射性 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 和非传统稳定性 $\delta^{88}\text{Sr}$ 同位素系统学作为地表和地下水系统中人为污染示踪剂的潜力; Diédhiou 等^[43]利用硝酸盐同位素数据($\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ 、 $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$)和环境同位素示踪剂(^{18}O 、 ^2H 、 ^3H)研究了达喀尔地区含水层硝酸盐污染的发生和相关过程,结果表明地下水中 $\delta^{15}\text{N}$ 为10‰~22‰,其主要来源是人类和动物的排泄物。

赵鹏宇等^[44]利用氮氧同位素示踪技术对滹沱河源头繁峙县地下水进行分析,确定了硝酸盐污染特征及其迁移过程,并借助同位素混合模型确定了各污染来源的贡献率;赵庆良等^[45]采用 $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ 双同位素示踪法及稳定性同位素混合模型追溯北京城区河流硝酸盐来源,并评估各污染源的贡献率,结果证明北京河流无机氮污染以硝酸盐氮污染为主;王静等^[46]利用氮、氧同位素示踪技术解析了店埠河水体硝酸盐污染的可能来源是粪肥污水、土壤有机氮以及化肥,并利用稳定性同位素混合模型定量评价了不同类型污染源在枯水期和丰水期对水体硝酸盐的贡献率;梁越等^[47]利用碳、氮稳定性同位素对鄱阳湖流域蚌湖丰水期的氮污染进行了研究,识别了氮污染来源及转化途径;张秋霞等^[48]应用水动力学并结合地下水的 ^{18}O 、 ^2H 以及硫酸盐 ^{34}S 和 ^{18}O 同位素方法,解析了山东淄博煤矿区奥灰水的污染来源与途径,通过混合比计算,量化了矿坑水对矿区地下水的污染贡献。

国内在同位素研究方面起步较晚,但是发展却十分迅速,在研究技术和设备方面取得了很大的突

破。目前运用同位素示踪技术对水体无机污染物的研究已经相当广泛,但这种方法本身仍存在一些不可避免的系统误差。以水体硝酸盐污染为例,利用不同类型污染源的氮、氧同位素存在差异溯源硝态氮污染源贡献率时,由于污染物选取的样品个数有限,必然造成试验数值与真实数值间存在一定差异;而且在对水样进行同位素测定前处理时,由于水样硝酸盐浓度较低,导致采集的水样体积大,前处理耗时较长,这个过程中可能存在一定的分馏反应,导致试验结果出现偏差^[49]。随着社会经济的快速发展,水体氮污染问题一直普遍存在并亟待解决,氮污染来源分析仍然是研究热点,尤其是湖泊中有机氮、磷循环的研究,已经成为水体污染面临的关键问题。

3.2 水体中有机氮、磷溯源

水体富营养化是目前国内外比较关注的环境问题。过量的氮、磷等营养物输入是引起富营养化的根本原因,导致水体中藻类及其他浮游生物异常繁殖,水体溶解氧浓度下降,造成水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡。为有效控制水体富营养化,必须全面了解水中氮、磷等营养盐分布特征及其来源。

近年来,国内外针对有机氮、磷循环做出了大量研究。Dolenec 等^[50]利用颗粒物、浮游动物和贻贝的稳定氮同位素比值,研究了生活污水、市政和工业废水中人为输入的有机氮对科西里纳湾沿海生态系统的影响,表明人为输入有机氮的影响很小。王毛兰^[51]以鄱阳湖及其五大支流为研究对象,借助同位素技术对其水化学特征及氮、磷时空分布特征进行了系统研究,发现鄱阳湖 TN 和 TP 浓度明显高出湖泊富营养化发生浓度,与历史数据相比,鄱阳湖受氮、磷污染趋势日益加重,正在朝富营养化方向发展。王静等^[52]以贵州省 2 个高原湖泊红枫湖和百花湖为例,利用颗粒态有机物稳定氮同位素比值($\delta^{15}\text{N-POM}$)的季节及水体剖面变化,揭示了湖泊氮源变换以及内部生物地球化学作用,为研究湖泊系统氮的循环转化提供重要信息。李跃飞^[53]对秦淮河水体 TN、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、DON、TP、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、DOC 等基本理化指标进行连续周年定点观测,研究河水氮、磷的时空动态变化,发现秦淮河水体氮、磷污染严重,且具有很强的时空变异性,氮、磷源主要为粪肥和污水。李军^[54]以太湖、巢湖、龙感湖为研究对象,通过对氮、磷等生源要素化学形态时空分布特征和有机碳同位素、生物硅、聚磷酸盐等沉积记录的研究,初步揭示了太湖富营养化和生态环境的演变过程及聚磷酸盐在过程中的重要意义。

目前水体富营养化研究大多是根据成熟的地球化学和同位素指标如碳、氮、磷等的循环来反演水体生态环境变化,这仅仅属于宏观角度,对于发生这些变化的作用机制缺乏研究^[55]。在水体富营养化问题越来越普遍的背景下,为了填补同位素示踪技术在水体氮、磷循环领域的研究空白,应加大水体生态环境变化机制方面的研究力度,开发分子水平的同位素示踪技术。

3.3 POPs 溯源

在杀虫剂、除草剂、塑料等有机化学品广泛应用的同时,产生的有机污染物给人类的生存空间造成了严重影响,其中最典型的是 POPs。POPs 在环境中分布广泛且持久存在并具有高生物富集性,通常具有致癌、致畸、致突变等危害。水体中的 POPs 可被水生生物富集并通过食物网传递,对生态系统及人体健康构成极大的危害。近几十年来,国内外已经有较多学者陆续研究了有机氯农药、多环芳烃、多溴联苯醚、多氯联苯、多氯苯并二噁英、多氯苯并呋喃、全氟化合物、六溴环十二烷和有机锡等^[56],分析了这些 POPs 在湖泊生物中的分布现状和富集特征。

Fisk 等^[57]通过 C、N 稳定性同位素研究了北极冰间湖橈脚类浮游动物,并且在高进食时期收集了大量浮游动物样本和水样来检验 POPs 的变化趋势。Evenset 等^[58]利用¹⁵N 作为稳定性同位素示踪标志来比较 2 个湖泊生物体(例如浮游动物)中 POPs 的含量,此外对各种挥发性的有机成分,甲烷和二氧化碳中的稳定性同位素组成随距离垃圾填埋场的远近而迁移转化的规律也有所研究。

多环芳烃(PAHs)单体稳定同位素分析技术(CSIA)已被开发并用于实际研究中^[59]。由于不同来源的 PAHs 具有不同的碳稳定同位素组成,且其碳稳定同位素在迁移转化过程中基本保持稳定^[60]。很多研究者在致力于优化 PAHs 的 CSIA 检测方法的同时,也利用该技术对土壤、大气及沉积物中 PAHs 的溯源开展了广泛研究^[61-64]。

2001 年包括中国在内的多个国家在瑞典的斯德哥尔摩签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》。POPs 是目前全球关注的热点问题,将同位素示踪技术应用到该领域有助于对 POPs 来源与转化认识的进一步深化,有助于针对 POPs 的防治提出建设性意见。将同位素技术与其他新技术整合,开发新的示踪剂是同位素技术研究的未来趋势。随着同位素技术的日益成熟和检测技术的不断发

展,稳定同位素示踪技术的应用领域会不断拓展。

4 结语

通过总结同位素示踪技术在流域水环境污染代谢机理、无机污染物迁移、有机物转化及持久性有机污染物富集规律方面的研究进展可知,虽然放射性同位素和稳定性同位素都可用来示踪,但随着世界性的环境问题不断加重,以及污染物在环境中的复杂性和多变性,稳定性同位素技术相应做出了很多改进,随着双同位素或多同位素方法精度的提高,稳定性同位素技术有很好的应用前景。将同位素示踪技术与其他示踪方法联用,并结合研究区的环境状况、经济条件、水生态系统等方面的情况,才能真正发挥同位素示踪方法的作用。同位素示踪技术用于水环境中外源无机污染物和营养元素的输入、运移、转化研究较为成熟,但是对于 POPs 的研究较少,从全球环境问题来看,POPs 是最受关注的环境问题之一,尝试将同位素示踪技术广泛应用到这一领域会对 POPs 的防治提供很大帮助。

同位素示踪技术目前遇到的障碍还有很多,与其他技术连用可以解决一部分问题,但核心的问题还是要满足同位素方法理论的基本假设。目前一方面要开发更多可用的同位素,寻找更理想的同位素示踪剂,拓展同位素技术的应用领域,宏观与微观相结合(如开发分子水平的同位素技术),更加系统地掌握水体变化情况;另一方面要厘清不同地球化学过程中同位素的分馏机制,才能更好地利用现有示踪剂进行污染源解析或过程的跟踪。

参考文献

- [1] 潘金珠,侯宪锋,尤鸿,等.水污染溯源方法分析[J].科技广场,2014(9):10-13.
PAN J Z, HOU X F, YOU H, et al. Analysis of source identification method for water pollution [J]. Science Mosaic, 2014(9):10-13.
- [2] 苏丹,唐大元,刘兰岚,等.水环境污染源解析研究进展[J].生态环境学报,2009,18(2):749-755.
SU D, TANG D Y, LIU L L, et al. Reviews on source apportionment of pollutions in water environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2):749-755.
- [3] 陈丽,钟欣平,喻阳华.喀斯特区河流型水源地水化学分析[J].贵阳学院学报(自然科学版),2019(1):58-64.
CHEN L, ZHONG X P, YU Y H. Hydrochemical analysis of fluvial water source in karst area [J]. Journal of Guiyang University (Natural Sciences), 2019(1):58-64.
- [4] GONZÁLEZ S O, ALMEIDA C A, CALDERÁN M, et al.

- Assessment of the water self-purification capacity on a river affected by organic pollution: application of chemometrics in spatial and temporal variations [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(18): 10583-10593.
- [5] SHARIFI S, HAGHSHEENAS M M, DEKSISSA T, et al. Storm water pollution source identification in Washington DC, using Bayesian chemical mass balance modeling [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 140(3): 04013015.
- [6] DIMZON I K D, MORATA A S, MÜLLER J, et al. Trace organic chemical pollutants from the lake waters of San Pablo City, Philippines by targeted and non-targeted analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 588-595.
- [7] 胡红岩, 陈鸿汉, 毕二平. 濮阳东北部金堤河两岸地下水污染状况分析 [J]. *水资源保护*, 2012(2): 12-16.
- [8] 胡成, 王彤, 苏丹, 等. 水环境中污染物的源解析方法及其应用 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(1): 57-62.
- [9] NIGRO A, SAPPA G, BARBIERI M. Strontium isotope as tracers of groundwater contamination [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, 17: 352-355.
- [10] 王锦国, 李群, 王碧莹, 等. 奎河两岸污灌区浅层地下水氮污染特征及同位素示踪分析 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(4): 15-19.
- WANG J G, LI Q, WANG B Y, et al. Characteristics of nitrogen pollution and isotopic tracer analysis of shallow groundwater in the sewage irrigation area of Kuihe River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(4): 15-19.
- [11] ARCHANA A, THIBODEAU B, GEERAERT N, et al. Nitrogen sources and cycling revealed by dual isotopes of nitrate in a complex urbanized environment [J]. *Water Research*, 2018, 142: 459-470.
- [12] GARCIA S, NYACHOTI S K, MA L, et al. Tracing anthropogenic salinity inputs to the semi-arid Rio Grande River: a multi-isotope tracer (U, S, B and Sr) approach [C]//San Francisco: American Geophysical Union Fall Meeting, 2015.
- [13] MEGHDADI A, JAVAR N. Quantification of spatial and seasonal variations in the proportional contribution of nitrate sources using a multi-isotope approach and Bayesian isotope mixing model [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 207-222.
- [14] 孟志龙, 杨永刚, 秦作栋, 等. 汾河下游流域水体硝酸盐污染过程同位素示踪 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 1066-1072.
- MENG Z L, YANG Y G, QIN Z D, et al. Isotopic tracing for nitrate pollution process of water body in the lower reaches of Fenhe River [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 1066-1072.
- [15] 方晶晶, 马传明, 刘存富. 水土环境中硝酸盐来源与转化的环境同位素示踪研究进展 [J]. *国土资源高等职业教育研究*, 2017(2): 56-61.
- [16] DANNI S O, BOUCHAOU L, ELMOUDEN A, et al. Assessment of water quality and nitrate source in the Massa catchment (Morocco) using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ tracers [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 154: 108859.
- [17] ANORNU G, GIBRILLA A, ADOMAKO D. Tracking nitrate sources in groundwater and associated health risk for rural communities in the White Volta River Basin of Ghana using isotopic approach ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ - NO_3^- and ^3H) [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 603: 687-698.
- [18] PUIG R, SOLER A, WIDORY D, et al. Characterizing sources and natural attenuation of nitrate contamination in the Baix Ter aquifer system (NE Spain) using a multi-isotope approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 518-532.
- [19] WIDORY D, PETELET-GIRAUD E, BRENOT A, et al. Improving the management of nitrate pollution in water by the use of isotope monitoring: the $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{11}\text{B}$ triptych [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2013, 49(1): 29-47.
- [20] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 [J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4690-4699.
- MA Y H, SU C L, LIU W J, et al. Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: evidences from isotopic and hydrochemical characteristics [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4690-4699.
- [21] OSBURN C L, OVIEDO-VARGAS D, BARNETT E, et al. Regional groundwater and storms are hydrologic controls on the quality and export of dissolved organic matter in two tropical rainforest streams, Costa Rica [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2018, 123(3): 850-866.
- [22] DERRIEN M, KIM M S, OCK G, et al. Estimation of different source contributions to sediment organic matter in an agricultural-forested watershed using end member mixing analyses based on stable isotope ratios and fluorescence spectroscopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 569-578.
- [23] 马永祥. 宁东煤田煤炭开采对区域地下水环境的影响及其特征研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [24] 聂泽宇. 典型农业面源污染河流硝态氮及荧光溶解性有机质的源解析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [25] SHAKAK N B I. Detection of the nitrate pollution sources in shallow aquifer, using integration of RS & GIS with stable isotopes technologies [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, 42(3): 1511-1517.
- [26] MEGHDADI A, JAVAR N. Evaluation of nitrate sources and the percent contribution of bacterial denitrification in hyporheic zone using isotope fractionation technique and multi-linear regression analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 54-65.
- [27] 张胜. 同位素示踪技术的原理及应用阐释 [J]. *生物学教学*, 2018, 43(8): 79-80.
- [28] 张建尚. 同位素示踪技术的应用及展望 [J]. *生物学教学*, 2017(11): 56-58.
- [29] 贺晓蕾, 张彦. 同位素示踪技术在环境领域中的应用研究 [J]. *环境科技*, 2011, 24(5): 70-73.
- HE X L, ZHANG Y. Study on application of stable isotope tracer technique in environmental field [J]. *Environmental Science and*

- Technology, 2011, 24(5):70-73.
- [30] 白志鹏,张利文,彭林,等. 稳定同位素在污染物溯源与示踪中的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2006(4):29-32.
BAI Z P, ZHANG L W, PENG L, et al. Application of stable isotope to trace to the sources and trail pollutants [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2006(4):29-32.
- [31] 颜耕,周磊,陈玲. 同位素技术在环境科学研究中的应用进展[J]. 环境监测管理与技术, 2018(2):1-4.
YAN G, ZHOU L, CHEN L. Progress of applying isotope technology in the studies of environmental science [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018(2):1-4.
- [32] 郑淑惠. 稳定同位素地球化学分析[M]. 北京:北京大学出版社, 1986.
- [33] 郑永飞. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [34] 郑淑惠,郑斯成,莫志超. 稳定同位素地球化学分析[M]. 北京:北京大学出版社, 1986.
- [35] 张炜明. 稳定核素的应用[M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [36] 赵墨田. 稳定同位素分析法[M]. 北京:科学出版社, 1985.
- [37] 李冰,杨红霞. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)技术在地学研究中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(2):367-378.
LI B, YANG H X. Applications of inductively coupled plasma mass spectrometry in earth science [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2):367-378.
- [38] 丁梯平. 稳定同位素测试技术与参考物质研究现状及发展趋势[J]. 岩矿测试, 2002, 21(4):291-300.
DING T P. Present status and prospect of analytical techniques and reference materials for stable isotopes [J]. Rock and Mineral Analysis, 2002, 21(4):291-300.
- [39] 白志鹏,张利文,彭林,等. 稳定同位素在环境科学研究中的应用进展[J]. 同位素, 2007, 20(1):57.
BAI Z P, ZHANG L W, PENG L, et al. The status of applying stable isotope in the studies of environmental science [J]. Isotopes, 2007, 20(1):57.
- [40] DANNI S O, BOUCHAOU L, ELMOUDEN A, et al. Assessment of water quality and nitrate source in the Massa catchment (Morocco) using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ tracers [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2019:108859.
- [41] GOODDY D C, BOWES M J, LAPWORTH D J, et al. Evaluating the stable isotopic composition of phosphate oxygen as a tracer of phosphorus from waste water treatment works [J]. Applied Geochemistry, 2018, 95:139-146.
- [42] NEYMARK L A, PREMO W R, EMSBO P. Combined radiogenic ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and stable ($\delta^{88}\text{Sr}$) isotope systematics as tracers of anthropogenic groundwater contamination within the Williston Basin USA [J]. Applied Geochemistry, 2018, 96:11-23.
- [43] DIÉDHIU M, CISSÉFAYE S, DIOUF O C, et al. Tracing groundwater nitrate sources in the Dakar suburban area: an isotopic multi-tracer approach [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(5):760-770.
- [44] 赵鹏宇,翟召怀,步秀芹,等. 淳沱河源头地下水硝酸盐污染的氮氧同位素示踪[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6):83-89.
ZHAO P Y, ZHAI Z H, BU X Q, et al. Traceability of Nitrogen-oxygen isotope on nitrate-contaminated groundwater of Hutuo River Source [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6):83-89.
- [45] 赵庆良,马慧雅,任玉芬,等. 利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2016, 37(5):1692-1698.
ZHAO Q L, MA H Y, REN Y F, et al. $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ tracing of nitrate sources in Beijing Urban Rivers [J]. Environmental Science, 2016, 37(5):1692-1698.
- [46] 王静,叶寅,王允青,等. 利用氮氧同位素示踪技术解析巢湖支店店埠河硝酸盐污染源[J]. 水利学报, 2017, 48(10):1195-1205.
WANG J, YE Y, WANG Y Q, et al. Using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values to identify sources of nitrate in the Dianbu River in the Chaohu Lake Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10):1195-1205.
- [47] 梁越,肖化云,刘小真,等. 碳氮稳定同位素示踪鄱阳湖流域蚌湖丰水期的氮污染[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4):957-966.
LIANG Y, XIAO H Y, LIU X Z, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes tracing nitrogen pollution in major flooding season in Lake Bang, Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4):957-966.
- [48] 张秋霞,周建伟,康凤新,等. 淄博煤矿区地下水污染水动力和同位素解析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(8):116-122.
ZHANG Q X, ZHOU J W, KANG F X, et al. Hydrodynamic analysis and isotope tracing for probing into groundwater pollution of Zibo Mining Area [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(8):116-122.
- [49] 袁丽君,刘广,张泽洲,等. 溧湖氮污染双同位素溯源与清单统计法对比研究[J]. 土壤, 2018, 50(4):738-745.
YUAN L J, LIU G, ZHANG Z Z, et al. The comparison of dual isotope and budget statistics method for the sources of nitrogen pollution in Gehu Lake, Jiangsu [J]. Soils, 2018, 50(4):738-745.
- [50] DOLENEC M, ŽVAB P, MIHELČIĆ, et al. Use of stable nitrogen isotope signatures of anthropogenic organic matter in the coastal environment: a case study of the Kosirina Bay (Murter Island, Croatia) [J]. Geologia Croatica, 2011, 64(2):143-152.
- [51] 王毛兰. 鄱阳湖流域氮磷时空分布及其地球化学模拟[D]. 南昌:南昌大学, 2007.
- [52] 王静,吴丰昌,黎文,等. 云贵高原湖泊颗粒有机物稳定氮同位素的季节和剖面变化特征[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5):571-578.
WANG J, WU F C, LI W, et al. Seasonal variation and vertical characteristics of the $\delta^{15}\text{N}$ of particulate organic matter in Lake Hongfeng and Lake Baihua, Guizhou Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(5):571-578.
- [53] 李跃飞. 秦淮河氮、磷时空动态特征及基于硝态氮同位素方法的氮源判别[D]. 南京:南京农业大学, 2013.

- [54] 李军. 长江中下游地区浅水湖泊生源要素的生物地球化学循环[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2005.
- [55] 孙玮玮,毕春娟,陈振楼,等. 稳定性同位素示踪技术在环境领域的应用初探[J]. 环境科学与技术,2009,32(9):88-92.
SUN W W, BI C J, CHEN Z L, et al. A preliminary study on application of stable isotope tracer technique in environmental field[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(9): 88-92.
- [56] 张东平,张少欢,余应新,等. 太湖鱼中多不饱和脂肪酸及其与多氯联苯共摄入益害分析[J]. 科学通报,2012,57(5):324-331.
ZHANG D P, ZHANG S H, YU Y X, et al. Polyunsaturated fatty acids in fish from Taihu Lake and the associated risk of ingesting polychlorinated biphenyls[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(5):324-331.
- [57] FISK A T, STERN G A, HOBSON K A, et al. Persistent organic pollutants (POPs) in a small, herbivorous, arctic marine zooplankton (*Calanus hyperboreus*): trends from April to July and the influence of lipids and trophic transfer[J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 43:93-101.
- [58] EVENSET A, CHRISTENSEN G N, SKOTVOLD T, et al. A comparison of organic contaminants in two high Arctic Lake ecosystems, Bear Island Norway [J]. Science of the Total Environment, 2004, 318(1/2/3):125-141.
- [59] 马红枣,潘立刚,李安,等. 单体稳定同位素分析技术在有机污染物溯源中的应用研究进展[J]. 农药学报,2017(3):15-22.
MA H Z, PAN L G, LI A, et al. Research progress on the application of compound-specific isotope analysis in the origin traceability of organic pollutants[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2017(3):15-22.
- [60] O'MALLEY V P, ABRAJANO T A JR, HELLOU J. Determination of the ^{13}C ^{12}C ratios of individual PAH from environmental samples: can PAH sources be apportioned [J]. Organic Geochemistry, 1994, 21(6/7):809-822.
- [61] BLESSING M, JOCHMANN M A, HADERLEIN S B, et al. Optimization of a large-volume injection method for compound-specific isotope analysis of polycyclic aromatic compounds at trace concentrations[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2015, 29(24):2349-2360.
- [62] BUCZYŃSKA A J, GEY PENS B, van GRIEKEN R, et al. Stable carbon isotopic ratio measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons as a tool for source identification and apportionment: a review of analytical methodologies[J]. Talanta, 2013, 105:435-450.
- [63] 苑金鹏,钟宁宁,吴水平. 土壤中多环芳烃的稳定碳同位素特征及其对污染源示踪意义[J]. 环境科学学报,2005,25(1):81-85.
YUAN J P, ZHONG N N, WU S P. Stable carbon isotopic composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and its implications for the pollutants tracing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(1):81-85.
- [64] MIKOLAJCZUK A, GEY PENS B, BERGLUND M, et al. Use of a temperature-programmable injector coupled to gas chromatography-combustion-isotope ratio mass spectrometry for compound-specific carbon isotopic analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons. [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2010, 23(16):2421-2427. ▷

欢迎订阅 2020 年《环境工程技术学报》

《环境工程技术学报》是由中华人民共和国生态环境部主管,中国环境科学研究院主办的综合性学术期刊,2015年起收录为“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊)。主要刊载国内外环境工程技术领域的最新研究成果,报道环境工程及环保实用技术应用的典型案例,关注环保产业政策和行业动态,以及环境工程新技术、新成果的转化应用。本刊主要面向环境、生态、管理工程技术学领域的科研人员、技术研发人员、各级环保管理人员、环保企业经营者与生产者以及相关专业大专院校师生。

《环境工程技术学报》为双月刊,大16开,单月20日出版。每期定价60元,全年360元。欢迎国内读者到当地邮局订阅,邮发代号:2-620;中国国际图书贸易总公司承担本刊国外发行,发行代号:6338BM。如有漏订可直接与编辑部联系。

编辑部地址:北京市朝阳区安外大羊坊8号 中国环境科学研究院

邮政编码:100012

电话/传真:010-84915126

网 址:www. hjpgcjsxb. org. cn

电子邮箱:hjpgcjsxb@vip. 163. com