

· 专论与综述 ·

岩溶环境对多环芳烃迁移转化的影响

蓝家程¹, 孙玉川², 姜勇祥³, 龙家辉³

- (1. 贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001;
2. 重庆市岩溶环境重点实验室/西南大学地理科学学院, 重庆 400715;
3. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:从水文地质条件、地貌环境和地球化学环境等3个方面, 综述了岩溶环境对多环芳烃(PAHs)迁移转化的影响。针对研究现状及存在的不足, 提出了未来可能的研究趋势, 包括不同气候条件下发育的岩溶系统的对比研究、不同气候条件和不同岩溶系统快速流和慢速流对PAHs迁移的贡献、碳酸盐岩与PAHs相互作用的机理, 以及有机质对PAHs迁移行为的影响。

关键词: 多环芳烃; 岩溶环境; 迁移转化

中图分类号: X523; X143 文献标志码: A 文章编号: 1006-2009(2020)01-0008-05

Effect of Karst Environment on Migration and Transformation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

LAN Jia-cheng¹, SUN Yu-chuan², JIANG Yong-xiang³, LONG Jia-hui³

- (1. School of Karst Science/State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment/School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. School of Geography & Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: In this review paper, the effects of hydrogeological condition, geomorphological environment and geochemical environment on the migration and transformation of PAHs in karst environment were discussed. Furthermore, in view of the present research situation and problems, it pointed out the possible research trends in the future, including comparative study on karst system under different climatic conditions, the contribution of fast and slow flow to PAHs migration in different climatic conditions and karst systems, the mechanism of interaction between carbonate rocks and PAHs, and the effect of organic matter on the migration of PAHs.

Key words: Polycyclic aromatic hydrocarbons; Karst environment; Migration and transformation

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是具有持久性特征的一类有机污染物, 普遍存在于环境介质中, 主要来自煤、石油等化石燃料的不完全燃烧和其他有机物质^[1-2], 因具有毒性、致癌性、致突变性而受到广泛关注^[3]。早在1976年, USEPA就将16种PAHs列入优先控制有毒有机污染物黑名单^[4-5]。PAHs具有挥发性和疏水亲颗粒性, 主要以气态和颗粒态形式迁移到大气中, 通过大气干湿沉降到达表层土壤, 并以地表径流、渗透等形式扩散污染临近地表水和地下水生态系

统^[6-8]。此外, PAHs还可以通过排污、石油泄漏等途径进入水环境^[9], 对水生生态系统和人体健康形成威胁。

收稿日期: 2019-04-10; 修订日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41761091); 贵州师范大学2017年度学术新苗培养及创新探索专项基金资助项目(黔科合平台人才[2017]5726-27); 贵州师范大学2014年博士科研启动基金资助项目(600204)

作者简介: 蓝家程(1986—), 男, 广西都安人, 副教授, 博士, 研究方向为岩溶环境多环芳烃污染及其环境行为。

岩溶生态系统由于碳酸盐岩造壤能力低,基岩大片裸露,土层浅薄,土壤层的天然保护和过滤功能基本丧失。降水、地表水可以通过落水洞、裂隙等岩溶形态直接渗入转换为地下水^[8],导致岩溶地下水对外界环境影响非常敏感^[10],极易受到地表污染物的影响。全世界大约有 25% 的人口将岩溶地下水作为主要饮用水源^[11],而中国岩溶地下水资源达 2 039.67 亿 m^3/a ,约占全国地下水资源量的 1/4 以上^[12]。岩溶区由于其特殊的水文地质条件、岩溶形态和富钙偏碱环境,PAHs 研究具有一定的特殊性和意义,岩溶环境对 PAHs 迁移转化的影响逐渐引起了国内外学者的广泛关注。今就岩溶水文地质条件、地貌环境和地球化学环境对 PAHs 迁移转化的影响进行综述,并提出研究展望,旨在加强对未来岩溶系统 PAHs 污染机理的认识,并为相关政策的制定提供依据。

1 岩溶水文地质条件对 PAHs 迁移的影响

经大气干湿沉降进入土壤的 PAHs 可通过下渗或水流扩散至地下含水层,成为地下水中 PAHs 的潜在来源^[13]。广西南部一个落水洞型湖泊沉积物中 PAHs 的污染水平与同一时期受工业污染或人口密集的区域相当,表明沉积物中的 PAHs 主要来源于大气沉积^[14]。长期积蓄在落水洞、沉积物和土壤中的 PAHs 可能会因融雪或降水事件突然释放进入水体,引起岩溶含水层大范围或长距离污染。

岩溶地下河系统属于管道和裂隙结合的水文系统^[15],岩溶管道和裂隙对 PAHs 的迁移有重要影响。排入落水洞污水中的 PAHs 通过管道快速流的方式迁移到地下河出口,而岩溶洼地地表水中的 PAHs 则通过裂隙慢慢渗透的形式进入地下含水层^[16]。广西南宁清水泉地下河沿途分布有许多天窗和落水洞,导致 PAHs 等污染物通过间隙进入地下水系^[17]。谢正兰^[18]研究发现,土壤水中溶解态 PAHs 浓度随深度增加而升高,土壤水 PAHs 垂直迁移是地下河 PAHs 的重要来源。因此,地表 PAHs 可以通过岩溶裂隙、天窗和落水洞等途径进入地下含水层。由于不同分子量 PAHs 性质的差异,2~3 环 PAHs 有较强的迁移能力,4 环以上高分子量 PAHs 倾向富集于岩溶地下河管道中,导致地下河出口沉积物较上游沉积物和表层土壤更易富集低环 PAHs^[19]。该现象与孔祥胜等^[20]的研究

结论一致,表明高环 PAHs 易富集于上游,若长期积累并向下游扩散则将对地下河产生严重的污染。

水动力条件对 PAHs 的迁移至关重要。早在 1987 年,Simmlleit 等^[21]研究发现在融雪期间和融雪后,87.5%~99.7% 的大气 PAHs 和 BCHs 从冰雪覆盖物中释放出来,并且保留在岩溶系统中,岩溶水体中的有机污染物可通过吸附在悬浮颗粒物和溶解性腐殖质上及溶解 3 种方式在水中传输。Schwarz 等^[8]研究表明,即使是非常脆弱的岩溶流域,PAHs 仍然有效地保留在土壤中,只有在大流量(降雨)事件期间,泉水中 PAHs 的增加才主要与颗粒物浓度增加有关,颗粒物吸附传输是 PAHs 迁移的主要方式。在融雪期和降雨期,法国高山岩溶洞穴系统中大气湿沉降和地下水、渗透水中的 PAHs 组成相似,PAHs 通过大气湿沉降和林冠穿透水进入渗透水,土壤水溶液 PAHs 浓度与地下水、渗透水处于一个量级,土壤层对大气湿沉降的高环 PAHs 具有过滤作用,只有低环 PAHs 可以迁移到地下水中,而在水土流失的情况下 PAHs 也会释放到地下水中^[22]。上述研究表明,在温带气候下发育的岩溶水文系统,融雪或降雨能够促进大气沉降和土壤中的 PAHs 迁移至地下水中,而迁移量有限。然而,上述研究采样的分辨率相对较低,迫切需要通过高分辨率的监测来揭示 PAHs 的迁移规律,以及降水事件对岩溶地下水系统 PAHs 输出的贡献。此外,上述研究区位于德国南部和法国高山岩溶区,岩溶裂隙、孔隙和落水洞的发育可能不及亚热带气候的中国西南岩溶区,地下水中 PAHs 对外界环境的敏感性可能也不及中国西南岩溶系统。本课题组前期研究发现,降雨带来的流量增大能够促进 PAHs 迁移^[16],降雨越强,越能促进 PAHs 迁移,尤其是颗粒物结合的 PAHs 和高环 PAHs 迁移^[16,23]。

2 岩溶地貌环境对 PAHs 迁移传输的影响

岩溶天坑或洞穴能够形成小气候环境,引起洞顶和洞底、洞内和洞外温度的差异,并形成气压差,造成气流变化,产生 PAHs 的传输和交换,洞底和洞穴内部 PAHs 浓度较高。因此,岩溶巨型天坑或洞穴具有“冷陷阱效应”,成为 PAHs 的一个汇^[24-25],导致岩溶底部土壤及与其相连的地下河均受到 PAHs 污染^[26-27]。受东亚季风环流影响,大气远距离或区域近距离传输的 PAHs 通过干湿

沉降到达大石围天坑及周边,随天坑深度降低、温度降低而湿度升高,土壤中的 PAHs 由地面、绝壁向坑底垂向传输,坑底土壤再由水土流失迁移至地下河沉积物中,进而污染地下河^[27-28]。王英辉^[26]通过洞穴土壤与大气交换监测发现,大气 PAHs 进入洞穴的传输过程有3个阶段:一是洞口的陷阱效应,由于洞内外温度变化大,改变了 PAH 化合物的亨利常数和饱和蒸气压,土壤吸附为非等温线方程,洞穴内靠近洞口的土壤富集重环 PAHs,轻环 PAHs 逃逸并向洞内迁移;二是洞内的色层效应,由于洞内温度较为恒定,土壤为等温吸附,同一种 PAH 化合物土气交换作用稳定,洞内土壤和大气中轻环 PAHs 浓度均呈现从外到里逐渐衰减的变化过程,PAH 分子量越小,迁移越远;三是裂隙叠加作用的影响,从裂隙进入洞内的大气 PAHs 或土壤 PAHs 使得洞内 PAHs 传输不再出现色层效应。天坑和洞穴通过影响气温、湿度及风向等环境因素,进而对 PAHs 的迁移传输产生影响。

3 岩溶地球化学环境对 PAHs 迁移转化的影响

3.1 岩溶富钙偏碱环境对 PAHs 吸附和降解的影响

由于在碳酸盐岩组成中以钙、镁为主,以碳酸盐化学溶蚀为主的岩溶区具有富钙偏碱的环境特征。岩溶水以 HCO_3^- 为主,在实验条件下,岩溶水中的 HCO_3^- 通过影响水中羟基自由基和紫外光,促进水中 Phe 光降解,抑制 Flu 和 Pyr 的光降解过程^[29]。在 PAHs 生物降解方面,邵一先^[29]筛选出山西郭庄泉水中 PAHs 高效降解菌——不动杆菌属,并揭示了其可以同时利用 PAHs、葡萄糖和 HCO_3^- 作为碳源,高效地降解水中 PAHs;经过 6 d 培养,使水中低环 PAHs 完全降解,高环 PAHs 被降解 65%;葡萄糖和 HCO_3^- 能够为微生物生长提供额外营养素,可能增加了 PAHs 代谢,促进了 PAHs 的生物降解;腐殖酸加入含有 PAHs 的溶液后,一方面为微生物生长提供了营养元素,另一方面其羟基官能团能够被微生物转化为极性官能团,从而影响酶的活性,加快 PAHs 的降解,如 Pyr 的降解率由 50% 提高到 70%。通过 Phe 在石灰石上吸附的动力学及控制因素研究发现,碳酸盐岩矿物对 Phe 的吸附影响不大,pH 值变化导致碳酸盐的沉淀、溶解和石灰石羟基的离解,从而影响碳酸盐岩石的吸附能力,在较低的离子强度下,钙离子会占据 Phe 的

一些吸附点位^[30]。然而,上述研究均为在实验室控制条件下得到的结论,缺乏野外验证。

3.2 有机质对 PAHs 迁移行为的影响

PAHs 由于其疏水性更倾向于吸附并贮存在土壤和沉积物中。土壤有机质的时空分布是控制 PAHs 迁移的关键因素,土壤有机质的消耗将其吸附的 PAHs 释放到环境中,并转移到食物链中,从而威胁生态系统和人类健康^[31]。研究表明,岩溶区土壤/沉积物有机质含量与 PAHs 含量具有较强的相关性,有机质被认为是控制 PAHs 水平、分布的重要因素^[19,32]。对重庆南川区几个表层岩溶泉域的研究发现,土壤中低环 PAHs 的迁移能力大于高环 PAHs,土壤 TOC 含量是控制 PAHs 在土壤中垂直迁移的主要因素^[33]。有机质组成或种类也会对 PAHs 在不同环境介质中的分配和行为产生影响。沉积物对 PAHs 的吸附与腐殖质的芳香性具有很强的相关性,胡敏酸、富里酸能够明显增强沉积物中 PAHs 的水溶解性,胡敏酸的效果更为显著^[34]。土壤中的 PAHs 可能随溶解性有机质(Dissolved Organic Matter, DOM)释放到水中而再活化、迁移^[35],DOM 是影响 PAHs 在水环境中的行为和最终命运的重要因素之一^[36]。本课题组前期研究发现,岩溶地下河中的 DOM 不仅是高环 PAHs 重要的贮存库,同时能够促进游离态 2~3 环 PAHs 的积累,尽管只有 0.34%~5.27% 与 DOC 有直接关系^[19]。英国莱茵河水中的 DOC 与 5 环以上的 PAHs 有强相关关系^[37]。尽管有机质含量对 PAHs 迁移有影响已被证实,但有机质与 PAHs 相互作用的机理尚不清楚,有机质的组成、结构及其对 PAHs 的吸附机理需要深入研究。

4 研究展望

(1) 尽管降水事件能够促进 PAHs 的迁移,但是缺乏不同气候条件下发育的岩溶系统的对比研究。在不同气候条件下,岩溶地下河或表层泉系统发育程度存在差异,进而导致岩溶水文系统对外界环境反应的敏感性存在差异。即便是高度脆弱的岩溶系统,通过大气沉降输入的 PAHs 也有超过 80% 被保持在岩溶泉域的土壤中,土壤层能够有效地过滤 PAHs,阻止其向地下水迁移^[8],尤其是中-高分子量 PAHs 被有效过滤,导致其在地下水中未被检出^[22]。因此,即使在温带气候下发育的岩溶水文系统,大气沉降和土壤中的 PAHs 迁移至地下

水中的量仍然有限。属于亚热带气候的中国西南岩溶区,其岩溶裂隙、管道等发育程度可能更高,水动力条件对 PAHs 在岩溶系统中迁移的影响可能更为显著。

(2) 岩溶裂隙、孔隙和落水洞通过慢慢渗透和快速流的方式控制 PAHs 在岩溶系统中的迁移,不同气候条件和不同岩溶系统两种途径对 PAHs 迁移的贡献是未来研究的难点。已有研究发现土壤水 PAHs 是地下河 PAHs 的主要来源^[18],土壤水可以通过地下孔隙或裂隙迁移到地下河,尤其是在降雨过程中没有形成地表径流时,其可能是最主要的贡献。中国西南岩溶区土壤漏失现象普遍存在^[38],PAHs 容易被土壤颗粒吸附,土壤携带 PAHs,尤其是高环 PAHs 漏失可能是 PAHs 迁移的主要途径,而岩溶裂隙土壤有可能成为重要的 PAHs 储存库。因此,裂隙对 PAHs 迁移、储集的控制因素、贡献和机理需要深入研究。

(3) 碳酸盐岩与 PAHs 相互作用的机理。以碳酸盐岩为主的岩溶区,碳酸盐岩的溶蚀或沉淀改变能够影响水中的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 pH 值,进而影响水中 PAHs 的吸附和降解过程。尽管目前已在实验室条件下获得一些认识,但缺乏野外验证,导致碳酸盐岩矿物与 PAHs 的相互作用机理仍不清楚。

(4) 有机质对 PAHs 迁移行为的影响。岩溶区石灰土腐殖质的特征是胡敏酸占比高于富里酸,而且胡敏酸/富里酸比值高于同纬度的黄壤和红壤,石灰土中的胡敏酸与钙结合生成不易分解的胡敏酸钙,使得石灰土具有较高的土壤有机质积累^[39]。有研究表明,随着 Ca^{2+} 强度增大,沉积物对 PAHs 的吸附能力降低^[34]。因此,未来应从土壤腐殖质的种类、结构及富钙特征等方面,揭示有机质与 PAHs 的相互作用机理。

[参考文献]

- [1] JOHNSEN A R, KARLSON U. Diffuse PAH contamination of surface soils: environmental occurrence, bioavailability, and microbial degradation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, 76(3): 533–543.
- [2] YUNKER M B, MACDONALD R W, VINGARZAN R, et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33: 489–515.
- [3] USEPA. Provisional guidance for quantitative risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons: EPA/600/R-93/089 [R]. Washington D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1993.
- [4] 丁海霞,陶雪梅,吕康乐,等. 兰州市土壤中 PAHs 和 PCBs 的分布特征及风险评价 [J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(2): 25–29.
- [5] 宋洲,方晓青,汪欣,等. 某地农田土壤及其潜在污染源中多环芳烃检测与评价 [J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(5): 30–34.
- [6] LIGARAY M, BAEK S S, KWON H O, et al. Watershed-scale modeling on the fate and transport of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 320: 442–457.
- [7] MOTELAY-MASSEI A, GARBAN B, TIPHAGNE-LARCHER K, et al. Mass balance for polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban watershed of Le Havre (France): Transport and fate of PAHs from the atmosphere to the outlet [J]. *Water Research*, 2006, 40(10): 1995–2006.
- [8] SCHWARZ K, GOCHT T, GRATHWOHL P. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in highly vulnerable karst systems [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 133–139.
- [9] 郑志周,李海燕. 水环境中多环芳烃的污染现状及研究进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(5): 1–6.
- [10] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学 [M]. 重庆:重庆出版社,1988.
- [11] FORD D C, WILLIAMS P. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. Chichester: Wiley & Sons, 2007.
- [12] 袁道先,朱德浩,翁金桃. 中国岩溶学 [M]. 北京:地质出版社,1994:127–164.
- [13] 孔祥胜,苗迎. 大气干湿沉降: 地下河多环芳烃的重要来源——以广西清水泉地下河为例 [J]. *地球学报*, 2014, 35(2): 239–247.
- [14] CHANG J, ZHANG E L, LIU E F, et al. A 60-year historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in lake sediment from Guangxi Province, Southern China [J]. *Anthropocene*, 2018, 24: 51–60.
- [15] 蓝家程,孙玉川,胡宁. 基于降雨事件的岩溶地下河多环芳烃浓度、组成变化及生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2018, 37(9): 2049–2059.
- [16] LAN J, SUN Y, YUAN D. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in a highly vulnerable karst underground river system of southwest China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(34): 34519–34530.
- [17] LU H P, ZHAO C H, LIU Q Q, et al. Characteristics and reasons for groundwater pollution of the Qingshuiquan underground river system [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, 7: 525–528.
- [18] 谢正兰. 不同形态多环芳烃在岩溶系统中的分布及迁移研究——以重庆老龙洞地下河系统为例 [D]. 重庆:西南大学,2017.
- [19] LAN J, SUN Y, XIAO S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in a highly vulnerable underground river system in Chongqing, Southwest China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 168: 65–71.

- [20] 孔祥胜, 祁士华, ORAMAH I T, 等. 大石围天坑群地下河沉积物中 PAHs 的污染特征 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 42-48.
- [21] SIMMLEIT N, HERRMANN R. The behavior of hydrophobic, organic micropollutants in different karst water systems; I. transport of micropollutants and contaminant balances during the melting of snow [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1987, 34(1): 79-95.
- [22] PERRETTE Y, POULENARD J, DURAND A, et al. Atmospheric sources and soil filtering of PAH content in karst seepage waters [J]. Organic Geochemistry, 2013, 65: 37-45.
- [23] 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 等. 降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4088-4094.
- [24] THEODORE O I, QI S H, KONG X S, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in Datuso Karst Tiankeng of South China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 30(5): 423-429.
- [25] WANG Y, QI S, CHEN J, et al. Concentration, distribution and sources of polyaromatic hydrocarbons in soils from the Karst Tiankengs, South China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 83(5): 720-726.
- [26] 王英辉. 喀斯特洞穴中持久性有机污染物分布与传输动力学研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- [27] 孔祥胜. 典型岩溶巨型漏斗中持久性有机污染物的环境行为研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [28] 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 等. 广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 [J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3905-3915.
- [29] 邵一先. 郭庄泉岩溶水系统中多环芳烃的分布与归趋研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [30] SHAO Y X, WANG Y X, KONG S Q, et al. Kinetics and controlling factors of phenanthrene adsorption on limestone [J]. Environmental Engineering Science, 2014, 31(2): 88-97.
- [31] ONDRASEK G, BAKI C, BEGI C H, ZOVKO M, et al. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications [J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 1559-1573.
- [32] SHAO Y, WANG Y, XU X, et al. Occurrence and source apportionment of PAHs in highly vulnerable karst system [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 153-160.
- [33] 孙玉川, 沈立成, 袁道先. 多环芳烃在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移及控制因素 [J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 795-805.
- [34] 戴国华, 刘新. 影响沉积物-水界面持久性有机污染物迁移行为的因素研究 [J]. 环境化学, 2011, 30(1): 224-230.
- [35] XIA X, ZHAI Y, DONG J. Contribution ratio of freely to total dissolved concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in natural river waters [J]. Chemosphere, 2013, 90(6): 1785-1793.
- [36] SHI Z, TAO S, PAN B, et al. Partitioning and source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers in Tianjin, China [J]. Environmental Pollution, 2007, 146(2): 492-500.
- [37] MOECKEL C, MONTEITH D T, LLEWELLYN N R, et al. Relationship between the concentrations of dissolved organic matter and polycyclic aromatic hydrocarbons in a typical U. K. upland stream [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(1): 130-138.
- [38] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究 [J]. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- [39] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-43.

本栏目编辑 姚朝英

(上接第3页)

价值。整个系统是环保技术、遥感技术、现代通信技术和现代资源配置理念的复合产物, 实现了城市固体废物收集管理的规范化、有序化、自动化、信息化和高效化。未来城市固体废物监管会朝着多学科交叉和多技术综合利用的方向不断迈进, 这将成为未来城市固体废物处理的主流趋势。

[参考文献]

- [1] 覃茂运. 基于 GIS 的海口市污染源动态管理系统设计与开发 [J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 4-7.
- [2] 易敏. 基于移动终端设备的环境现场监测管理系统设计与应用 [J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(2): 1-3.
- [3] 张朋兴, 袁希平, 甘淑. 基于遥感生态指数的江川区生态环境变化分析 [J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(5): 25-29.
- [4] 尚利堃, 杜明义, 靖常峰, 等. 基于 GIS 和物联网的多部门协同式餐厨垃圾管理 [J]. 物联网技术, 2013, 3(5): 73-75.
- [5] 韩泽治, 薛华. 地理信息系统 (GIS) 在城市生活垃圾管理中的应用 [J]. 辽宁城乡环境科技, 2003, 23(4): 48-49.
- [6] 刘洁, 何彦锋. 基于 GIS 的成都市生活垃圾收运路线优化研究 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2013, 38(4): 80-87.
- [7] BOSKOVIC G, JOVICIC N. Fast methodology to design the optimal collection point locations and number of waste bins; a case study [J]. Waste Manage. Res, 2015, 33(12): 1094-1102.
- [8] KARADIMAS N V, LOUMOS V G. GIS-based modelling for the estimation of municipal solid waste generation and collection [J]. Waste Manage. Res, 2008, 26(4): 337-346.
- [9] 王桂琴, 高博, 路鹏, 等. 基于 GIS 和多目标的生活垃圾运输路线优化研究 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 180-183.
- [10] WANG S J, LIU S F, WANG W L. The simulated impact of RFID-enabled supply chain on pull-based inventory replenishment in TFT-LCD industry [J]. International Journal of Production Economics, 2008, 112(2): 570-586.
- [11] WANG Y, HO O K, HUANG G Q, et al. Study on vehicle management in logistics based on RFID, GPS and GIS [J]. International Journal of Internet Manufacturing and Services, 2008, 1(3): 294-304.