

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究	张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 汤洁, 唐宜西, 孟伟, 董瑶 (2439)
北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究	姚波, 周凌晔, 刘钊, 张根, 夏玲君 (2449)
浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征	方双喜, 周凌晔, 栾天, 马千里, 王红阳 (2454)
南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征	段卿, 安俊琳, 王红磊, 缪青 (2460)
西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM _{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较	程玉婷, 王格慧, 孙涛, 成春雷, 孟静静, 任艳芹, 李建军 (2468)
沙尘天气对兰州市 PM ₁₀ 中主要水溶性离子的影响	王芳, 陈强, 张文煜, 郭勇涛, 赵连彪 (2477)
上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究	梁宗敏, 杜睿, 杜鹏瑞, 王亚玲, 李梓铭 (2483)
重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量	彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇 (2490)
宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析	李璇, 王雪松, 刘中, 吴梁, 翁燕波, 胡杰 (2497)
包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选	王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 聂磊, 郝郑平 (2503)
氨水混合吸收剂脱除 CO ₂ 实验研究	夏芝香, 项群扬, 周旭萍, 方梦祥 (2508)
焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究	孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 陆勇, 吴昌敏, 罗锦洪 (2515)
2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源	邢建伟, 钱薇微, 绳秀珍 (2520)
千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异	王明珠, 张运林, 施坤, 高冀, 刘刚, 蒋浩 (2528)
千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析	殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明 (2539)
太湖夏季水体中尿素的来源探析	韩晓霞, 朱广伟, 许海, Steven W. Wilhelm, 秦伯强, 李兆富 (2547)
鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例	刘霞, 钱奎梅, 谭国良, 邢久生, 李梅, 陈宇炜 (2557)
不同营养湖泊沉积物中 ²¹⁰ Pb _{ex} 和营养盐垂向分布特征及相关性分析	王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼 (2565)
地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究	姜烈, 何江涛, 姜永海, 刘菲 (2572)
预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究	陈雯婧, 丛海兵, 徐亚军, 王巍, 蒋新跃, 刘玉娇 (2579)
类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附	王红宇, 刘艳 (2585)
粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学	孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙 (2590)
SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd ²⁺ 的影响	王建涛, 孟昭福, 杨亚提, 杨淑英, 李彬, 马麟莉, 许绍娥 (2596)
老化的生物质炭性质变化及对非吸附的影响	唐伟, 郭悦, 吴景贵, 黄兆琴, 代静玉 (2604)
TiO ₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究	李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 王莉, 刘晴, 刘钰鑫, 何丽丽 (2612)
荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用	朱江鹏, 梅婷, 彭云, 葛思怡, 李时银, 王国祥 (2620)
改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究	马楠, 田耀金, 杨广平, 谢鑫源 (2627)
催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨	王梦月, 马鲁铭 (2633)
聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 为反硝化固体碳源的脱氮特性研究	刘佳, 沈志强, 周岳溪, 曹蓉, 李元志 (2639)
某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解	青宪, 黄锦琼, 余小巍, 张素坤, 杨艳艳, 任明忠, 温玉龙 (2645)
嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究	卫丹, 万梅, 刘锐, 王根荣, 张讯达, 文晓刚, 赵远, 陈吕军 (2650)
提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法	李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 朱建平, 王淑莹 (2658)
滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价	郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 王薛平 (2664)
舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征	江敏, Le Huy Tuan, 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊 (2672)
青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析	谢婷, 张淑娟, 杨瑞强 (2680)
福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评价	黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 李绘, 陈文文, 张莉, 胡婷, 石燎 (2691)
不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析	张鸿, 赵亮, 何龙, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (2698)
桑沟湾溶解态无机磷的分布、季节变化及影响因素	李磊, 任景玲, 刘素美, 蒋增杰, 杜金洲, 方建光 (2705)
引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例	王幼奇, 白一茹, 王建宇 (2714)
三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征	李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 赵铮, 张金洋, 马明, 张成 (2721)
广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评价	何秀婷, 王奇, 聂湘平, 杨永涛, 程章 (2728)
青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价	张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 高宗军 (2736)
焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究	伯鑫, 王刚, 温秉, 赵春丽, 吴铁, 李时蓓 (2742)
Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响	王辉, 谢鑫源 (2748)
3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应	李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅 (2755)
施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究	陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 刘孝利, 叶长城, 罗梅梅, 毛懿德 (2762)
保护性耕作对茬冬小麦土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	潘莹, 胡正华, 吴杨周, 孙银银, 盛露, 陈书涛, 肖启涛 (2771)
渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系	贾曼莉, 郭宏, 李会科 (2777)
蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究	王宁, 彭胜, 陈家军 (2785)
铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究	牟姝君, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (2791)
连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征	赵晨阳, 魏源送, 葛振, 钟佳, 才兴, 张媛丽, 李洪枚 (2798)
冬季猪粪固体堆放过程中 NH ₃ 、N ₂ O 和 NO 排放特征研究	丁钢强, 韩圣慧, 袁玉玲, 罗琳, 王立刚, 李虎, 李萍 (2807)
填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究	黄友福, 许心雅, 范良鑫, 方艺民 (2816)
渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究	王东梅, 刘丹, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖 (2822)
中国铅流变化的定量分析	马兰, 毛建素 (2829)
半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展	赵志瑞, 侯彦林 (2834)
《环境科学》征稿简则 (2679)	
《环境科学》征订启事 (2735)	
信息 (2476, 2556, 2713, 2770)	

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究

王东梅, 刘丹*, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756)

摘要: 为更科学合理地选择回灌填埋体提供一定的理论依据, 对 3 个不同年份垃圾柱的回灌出水进行了水质变化规律的研究. 采用成都某垃圾填埋场的渗滤液反渗透浓缩液, 对装填了填埋龄为 1、5 和 15 a 垃圾的垃圾柱开展了回灌实验, 研究了回灌出水中酸碱度、总有机碳、氨氮、硝态氮、重金属的变化规律. 结果表明, 1 a 垃圾柱处于产甲烷化阶段, 具有较好的去除硝态氮的能力, 硝态氮的降解率达到了 88% 以上, 但出水有机物、氨氮浓度较高, 对指标的改变主要通过生物作用; 5 a 垃圾柱已接近稳定化, 但还没有矿化垃圾的典型特征, 吸附能力与生物作用均较差, 对有机物、盐分、Cr、Ni 的削减能力较小; 15 a 柱具有较好的吸附能力和络合能力, 对有机物、盐分、Cr、Ni 具有较好的削减能力, 初期的去除率分别达到了 90%、78%、93%、74%, 但随着回灌进行会接近或达到吸附容量, 需要控制回灌过程和进度.

关键词: 渗滤液; 反渗透浓缩液; 回灌; 水质; 填埋体

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2822-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.07.054

Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation

WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, TAO Li-xia, LIU Ying

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To provide certain theoretical basis for selecting recirculation landfill scientifically and reasonably, the variation regularity of recirculation effluent from the landfill columns in three different years was studied. By using leachate reverse osmosis concentrate from a refuse landfill in Chengdu, the recirculation experiments were carried out in three landfill columns filled with garbage in 1, 5 and 15 landfill ages respectively. The variation regularity of pH, total organic carbon, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and heavy metals of recirculation effluent was researched. It showed that the one-year landfill column with a favorable ability of removing nitrate nitrogen and degradation rate of nitrate nitrogen reaching above 88% was in the stage of producing methanation, but the concentration of organic matter and ammonia nitrogen of the effluent is higher and changes in the parameters mainly depend on the biological function. The five-year landfill column without typical features of mineralized refuse and with relatively poor adsorption capacity and biological effects, as well as removal capacity of organic matter, salinity, Cr and Ni approaches stabilization. The fifteen-year landfill column has high capability of adsorption, complexing, as well as organic matter, salinity, Cr and Ni removal, and the removal rate at the initial stage reaches 90%, 78%, 93% and 78%, respectively, but the recirculation process and progress need to be controlled when the rate approaches or reaches the adsorption capacity.

Key words: leachate; reverse osmosis concentrate; recirculation; water quality; landfill

目前, 卫生填埋是国内处置垃圾最主要的方式^[1], 在卫生填埋过程中会产生大量的渗滤液, 渗滤液必须处理达标才可排入环境. 反渗透膜分离技术是依靠反渗透膜在压力下使溶液中的溶剂与溶质实现分离的技术, 欧美发达国家早在上世纪 90 年代就将其应用在渗滤液的处理上^[2~4]. 在国内, 随着垃圾渗滤液新标准的颁布以及 2011 年的开始实施, 反渗透膜分离技术也开始广泛应用在垃圾渗滤液的处理上^[5~9]. 膜分离技术在渗滤液处理上的应用有效地解决了渗滤液处理出水达标的问题, 可却产生了难以处理的渗滤液反渗透浓缩液, 其产生量较大, 为渗滤液进水的 13%~30%, 水质复杂, 盐分、重金属含量高, 可生化性差, 难以处理^[10~12]. 渗滤液反渗透浓缩液的处理问题已成为制约反渗透膜分离技

术在渗滤液处理应用上的瓶颈.

渗滤液反渗透浓缩液的处置方式目前有蒸发、高级氧化、固化、回喷焚烧以及回灌等^[13~17], 由于回灌成本低, 在我国回灌是实际工程应用最多的方式. 有学者对特定填埋体回灌出水化学需氧量(COD)、氨氮(NH_4^+-N)的影响及回灌填埋体的稳定、注水水量等问题进行了研究^[18~22], 表明回灌对 COD、 NH_4^+-N 有较好的处理效果, 但对渗滤液反渗透浓缩液中盐分、重金属的迁移转化少有报道, 而

收稿日期: 2013-11-04; 修订日期: 2014-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209178); 中央高校基本科研业务费专项(SWJTU09BR171)

作者简介: 王东梅(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为固体废物处置与资源化, E-mail: caroline040308@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liudan-swju@163.com

此类物质难以降解,在回灌系统中可能会逐渐累积,进入渗滤液的处理系统,进而影响垃圾填埋场渗滤液处理工艺的正常运行^[12]. 因此有必要系统地对回灌出水各类指标进行分析,以更全面、客观地掌握回灌出水水质规律. 另外不同填埋年份的垃圾具有不同的特征^[23,24],因而可能会影响渗滤液反渗透浓缩液的回灌出水水质. 而目前渗滤液反渗透浓缩液的回灌主要是选择正在填埋的垃圾区作为回灌填埋体,此方法可加速垃圾稳定,但是其内部环境可能不利于难以降解的盐分、重金属等物质的截留,导致回灌出水物质累积;矿化垃圾由于孔隙率高可能会有利于对盐分、重金属等物质的截留,也可能带来其他指标的变化. 因此笔者选用 3 个代表性年份的垃圾作为填埋介质在实验室设计 3 个垃圾柱,采用渗滤液反渗透浓缩液回灌,全面研究了回灌出水水质的变化规律,以期为综合评价回灌的优劣提供客观的参考,为更科学合理的选择回灌填埋体提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置采用 $\phi 300\text{ mm} \times 1\,100\text{ mm}$ 的聚氯乙烯(PVC)柱. 底部为液体收集管,PVC 柱内由下到上分别为:200 mm 砾石排水层 + 土工布 + 800 mm

垃圾层 + 50 mm 的砾石布水层. 垃圾装填量为 56.5 kg,装填体积 $0.056\,5\text{ m}^3$,装填密度为 $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 实验装置结构见图 1.

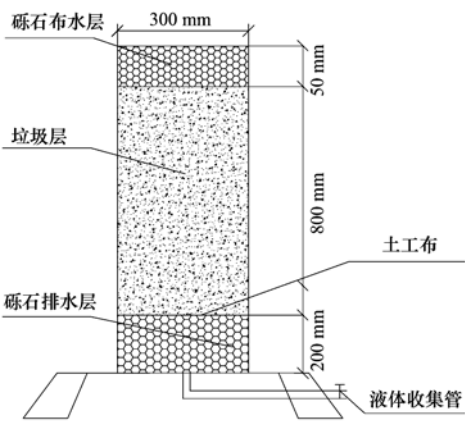


图1 实验装置结构示意图
Fig. 1 Sketch of experimental device structure diagram

1.2 实验材料

1.2.1 实验垃圾

实验垃圾取自成都市某垃圾填埋场,填埋龄分别为 1、5 和 15 a. 实验装填垃圾的物化特征见表 1 所示. 1 a 垃圾酸碱度(pH)值最低,其他各项指标均最高;15 a 垃圾 pH 值较高,其他各指标均最低,已完全具备矿化垃圾的特征;5 a 垃圾各指标值介于 1 a、15 a 之间,已经接近于稳定状态.

表1 装填垃圾物化特征

Table 1 Physical and chemical characteristics of filling wastes									
样品	pH	含水率/%	电导率 /mS·cm ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	BDM/%	Cr /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹	Ni /mg·kg ⁻¹
1 a	7.19	44.44	7.536	347.15	18.9	421	2 978	239	197
5 a	7.33	31.29	3.930	222.28	13.7	365	2 148	183	121
15 a	7.94	25.62	2.185	173.77	5.43	216	909	148	69

1.2.2 渗滤液反渗透浓缩液

实验用渗滤液反渗透浓缩液取自上述垃圾填埋场经膜生物反应器(MBR) + 反渗透(RO)联

合处理后 RO 截留的液体. 水质分析指标见表 2,其电导率高,离子浓度含量高,含有一定的重金属.

表2 渗滤液反渗透浓缩液水质特征

Table 2 Characteristics of leachate reverse osmosis concentrate								
指标	pH	电导率 /mS·cm ⁻¹	总有机碳 /mg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ²⁻ /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹
数值	7.67	64.45	1 540.75	2 854.9	16 458.58	1 055.21	3 099.49	7 637.68
指标	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	K ⁺ /mg·L ⁻¹	Cu/mg·L ⁻¹	Zn/mg·L ⁻¹	Ni/mg·L ⁻¹	Cr/mg·L ⁻¹
数值	1 763.98	742.55	10 348.85	7 360.71	0.064 2	1.052	1.602	0.610

1.3 实验设计

1.3.1 浓缩液回灌设计

实验设计了 3 个垃圾填埋柱进行不同年份垃圾

回灌的对比研究. 3 个垃圾填埋柱分别是:1 a 垃圾填埋柱(以下简称 1 a 柱)装填垃圾是填埋龄为 1 a 的垃圾;5 a 垃圾填埋柱(以下简称 5 a 柱)装填垃

圾是填埋龄为 5 a 的垃圾,15 a 垃圾填埋柱(以下简称 15 a 柱)装填垃圾是填埋龄为 15 a 的垃圾. 根据文献[25,26]以及课题组前期的研究基础设计的具

体实验方案见表 3, 不同的垃圾填埋柱每日回灌量、布水方式、频次以及回灌速度均相同,实验天数均为 24 d,整个实验均在室温(15~28℃)运行.

表 3 浓缩液回灌设计

Table 3 Experimental design of concentrate recirculation

序号	填埋介质	每日回灌量	布水方式	频次	回灌速度
1	1 a 垃圾	3 L	全分布(人工喷淋),上层铺加砾石层,采用喷壶人工模拟喷淋	1 次·d ⁻¹ (每日 09:00)	0.15 L·min ⁻¹
2	5 a 垃圾				
3	15 a 垃圾				

1.3.2 监测指标及方法

为全面反映渗滤液反渗透浓缩液回灌出水的水质情况,选择 pH、盐分、有机物、含氮物质、重金属这 5 类指标作为监测指标. 电导率是可以反映溶液中盐分的一个指标,因此选择电导率来表示溶液中盐分的多少;总有机碳(TOC)是指水体中溶解性和悬浮性有机物含碳的总量,由于 TOC 的测定采用燃烧法,因此能将有机物全部氧化,它比五日生化需氧量(BOD₅)或 COD 更能直接表示有机物的总量,

并且渗滤液反渗透浓缩液中存在的有机物大多为难降解有机物,采用 TOC 来衡量其中的有机物的总量更准确,因此本研究选用 TOC 来表达浓缩液中有机物的量;氨氮(NH₄⁺-N)和硝态氮是水体中主要的两个含氮物质的形式,因此选用这两个指标来表示溶液中的含氮物质;重金属的选择参照美国环保署(USEPA)重点控制的重金属污染物^[27],将其中的 Cu、Zn、Ni、Cr 作为监测指标. 监测频率及监测方法列于表 4.

表 4 监测指标及方法

Table 4 Experimental design of monitoring

监测指标	监测频率	监测方法
pH	1 天 1 次	pH 计法《水和废水监测分析方法》(第四版)
电导率	1 天 1 次	电导率仪法《水和废水监测分析方法》(第四版)
总有机碳(TOC)	2 天 1 次	燃烧氧化-非色散红外吸收法(HJ/T 71-2001)
氨氮(NH ₄ ⁺ -N)	2 天 1 次	《生活垃圾渗沥水 氨态氮的测定 蒸馏法和滴定法》(CJ/T 3018.6-1993)
硝态氮	2 天 1 次	离子色谱法(HJ/T 84-2001)
Cu、Zn、Ni、Cr	前 6 天 1 天 1 次,后 18 天 2 天 1 次	火焰原子吸收分光光度法(GB 11912-89、GB 7475-87)

2 结果与分析

2.1 回灌出水 pH 的变化规律

采用垃圾渗滤液反渗透浓缩液(pH:7.67)分别回灌于 3 个不同垃圾柱模拟回灌过程,回灌出水 pH 随着回灌时间的增加变化规律见图 2,其中所示虚线为进水 pH.

由图 2 可以看出:15 a 柱回灌出水 pH 整体呈现先下降后略有回升的规律,直至回灌结束 pH 一直低于回灌进水;5 a 柱回灌出水开始略有下降,后面维持在 7.7~7.9 范围内,与回灌进水 pH 接近;1 a 柱回灌出水 pH 呈现先增加后略有减少的规律,在回灌前 4 d 回灌出水 pH 小于 7,为酸性出水,从第 5 d 回灌出水大于 7,第 16 d 达到最高值为 8.2,随后开始略有下降稳定在 7.8 左右,与回灌进水 pH 差距不大.

从以上实验数据分析可得以下结论.

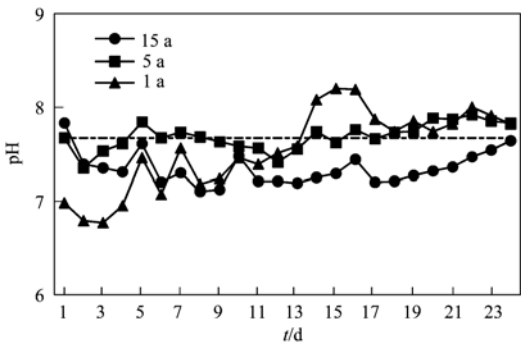


图 2 pH 随回灌时间的变化

Fig. 2 Changes of pH with recirculation time

15 a 柱内垃圾由于已具备矿化垃圾的特征,在浓缩液回灌中,垃圾吸附了浓缩液中的碱性物质,同时由于浓缩液主要含有难降解有机物,盐度高,在矿化垃圾中流动时并不能为微生物提供较好的生存条件,微生物作用较小,因而主要以物理吸附或络合为主,导致了在实验期间回灌出水 pH 略低于回灌进

水. 从回灌出水 pH 的变化趋势来看,若持续回灌,由于吸附达到饱和,物质成分少有改变,其出水 pH 会接近回灌进水.

5 a 柱内垃圾在浓缩液回灌开始时,由于有吸附作用,吸附了浓缩液中的碱性物质导致出水 pH 略有下降,随着回灌的进行,5 a 垃圾吸附容量很快达到饱和,对其中物质成分的影响较小,因此 5 a 柱后期回灌出水 pH 与回灌进水接近.

1 a 柱回灌出水出现从酸性出水到碱性出水变化的原因应该是 1 a 柱经历了由酸化阶段到产甲烷化阶段的过渡,初期的酸化反应提供了足够的酸度导致回灌出水 pH 小于 7,随着产甲烷化阶段的开始,垃圾柱内逐渐变成碱性环境,回灌出水水质 pH 开始回升,pH 出现的从高位 8.2 逐渐回落的现象是由于渗滤液反渗透浓缩液盐度高、重金属含量高,其持续回灌,可能部分的抑制了微生物的反应,从而导致了产甲烷化反应的减缓造成的.

2.2 回灌出水电导率的变化 规律

采用垃圾渗滤液反渗透浓缩液(电导率:64.45 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)分别回灌于 3 个不同垃圾柱模拟回灌过程,回灌出水电导率随着回灌时间的增加变化规律见图 3,其中所示虚线为进水电导率.

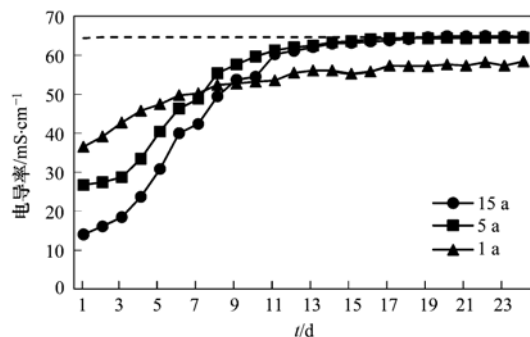


图 3 电导率随回灌时间的变化

Fig. 3 Changes of conductivity with recirculation time

由图 3 可以看出,在回灌的第 1 d,回灌出水电导率值远低于回灌进水,其中 15 a 柱回灌出水的电导率最低,约为 $14.00 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,对盐分的去除率达到了 78%;其次是 5 a 柱,回灌出水电导率最高的是 1 a 柱. 随着回灌天数的增加,回灌出水电导率均呈现逐渐增加的趋势,5 a 柱、15 a 柱增加迅速,1 a 柱增加缓慢. 在回灌的第 8 d,5 a 柱回灌出水电导率开始大于 1 a 柱;在回灌的第 9 d,15 a 柱回灌出水电导率值开始大于 1 a 柱;5 a 柱在回灌 17 d、15 a 柱在回灌 19 d 后,回灌出水电导率值开始大于回灌进水. 后期 1 a 柱回灌出水的电导率稳定在 57 ~

$58 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,低于回灌进水,5 a 柱、15 a 柱回灌出水电导率稳定在 $64 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右波动,略高于回灌进水.

从以上实验数据分析认为:随着回灌的进行 5 a 柱、15 a 柱回灌出水电导率会大于回灌进水,由于电导率值可以反映溶液中盐分的多少,因此可以认为随着回灌的进行,5 a 柱、15 a 柱对盐分的截留容量逐渐达到饱和,在这种情况下继续回灌,垃圾柱内垃圾已没有容量再容纳盐分,同时垃圾柱体中没有能消耗盐分的反应进行,在回灌溶液的流动下被截留的部分盐分也可能被带出,导致回灌出水电导率较进水略有增加,课题组对回灌出水的阴离子和阳离子的浓度进行了分析,离子浓度的变化与电导率的变化类似. 据此推测 5 a 柱、15 a 柱对盐分的去除应该无生物作用,截留机理主要是由于多孔结构的吸附、浓度的扩散以及部分的络合反应等物理化学作用,因此没有持续的降解作用,出现了容量饱和的问题.

1 a 柱对渗滤液反渗透浓缩液中的电导率有一个持续的降解作用,初期降解率略高,后期逐渐稳定,表现为回灌出水电导率稳定在 57 ~ $58 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,低于回灌进水值. 根据课题组对回灌出水阴阳离子的浓度分析,回灌出水 NO_3^- 的浓度一直低于回灌进水,说明在回灌的情况下,1 a 柱内持续的进行着反硝化反应,不断的消耗盐分中的 NO_3^- ,回灌后期在其他离子均已达到或超过回灌进水的浓度时, NO_3^- 仍远低于回灌进水,因此回灌出水电导率一直小于回灌进水是由 NO_3^- 的浓度决定的.

2.3 回灌出水有机物的变化规律

采用垃圾渗滤液反渗透浓缩液(TOC: $1540 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)分别回灌于 3 个不同垃圾柱模拟回灌过程,回灌出水 TOC 随着回灌时间的增加变化规律见图 4,其中所示虚线为进水 TOC.

由图 4 可以看出,15 a 柱回灌出水 TOC 的值一直低于回灌进水,初期回灌出水的 TOC 低于回灌进水约 90%,随着回灌时间的进行,出水浓度出现逐渐增加的趋势,增加的速度较为平稳,直至回灌结束的第 24 d,回灌出水的 TOC 仍低于回灌进水约 49%. 5 a 柱回灌出水 TOC 的变化规律呈现出与 15 a 柱类似的规律,不同的是,5 a 柱回灌出水的 TOC 值远高于 15 a 柱,并且在回灌结束的第 24 d,回灌出水 TOC 已基本接近于回灌进水,略低于回灌进水. 1 a 柱回灌出水 TOC 一直高于回灌进水,在回灌期间,回灌出水的 TOC 在 $2200 \sim 3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间.

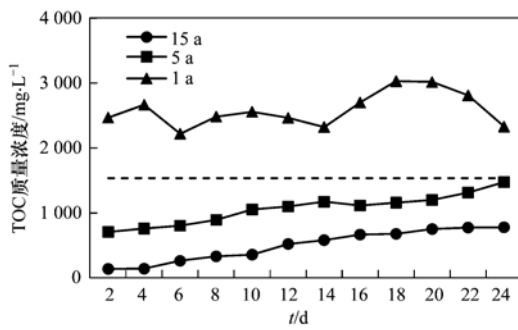


图4 总有机碳随回灌时间的变化

Fig. 4 Changes of TOC with recirculation time

从以上实验数据分析认为:15 a 柱、5 a 柱对 TOC 均有一定的削减能力,其中 15 a 柱削减能力较强,初期去除率达到了 90%,直至回灌结束,去除率仍达到 49%;5 a 柱削减能力略差,在回灌初期去除率为 54%,至回灌结束时回灌出水 TOC 已基本接近于回灌进水。由于 15 a 垃圾、5 a 垃圾均有一定的吸附能力,据此分析吸附作用对 TOC 的降低有着一定的作用,同时结合上节电导率的出水规律,在回灌后期盐分吸附达到饱和,吸附容量小,在此情况下 15 a 柱仍然对 TOC 有着较高的去除率,推测生物作用在后期起着主要的作用,5 a 柱由于未达到稳定阶段,垃圾仍然会分解出 TOC,本底 TOC 值高,因此其出水 TOC 要高于 15 a 柱。1 a 柱回灌出水 TOC 一直在高位 2 200 ~ 3 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,结合垃圾柱内垃圾的特性分析以及出水指标的变化规律分析可知,此垃圾柱正在经历产甲烷化阶段,垃圾分解产生的有机物不断溶入溶液中导致回灌出水 TOC 一直较高。

2.4 回灌出水氨氮、硝态氮的变化规律

采用垃圾渗滤液反渗透浓缩液 (NH_4^+-N : 未检出, NO_3^- : 7 637.68 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 分别回灌于 3 个不同垃圾柱模拟回灌过程,回灌后 5 a 柱、15 a 柱回灌出水均未检测到氨氮,1 a 柱回灌出水氨氮结果见图 5。3 个柱子回灌出水硝态氮随着回灌时间的增加变化规律见图 6,其中所示虚线为进水硝态氮。

由图 5 可以看出,1 a 柱回灌出水氨氮呈现先增加后略有减少的规律,浓度范围为 268.54 ~ 508.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,5 a 柱、15 a 柱回灌出水中未检测到氨氮,氨氮采用的检测方法是《生活垃圾渗沥水-氨态氮的测定-蒸馏法和滴定法》(CJ/T 3018.6-1993),其测定氨氮的浓度范围为 30 ~ 7 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明 5 a 柱、15 a 柱回灌出水氨氮的浓度低于 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图 6 可以看出,15 a 柱回灌出水

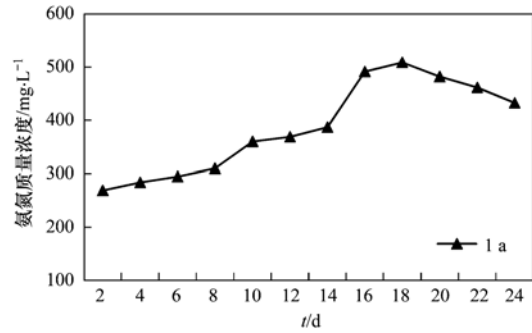


图5 氨氮随回灌时间的变化

Fig. 5 Changes of ammonia nitrogen with recirculation time

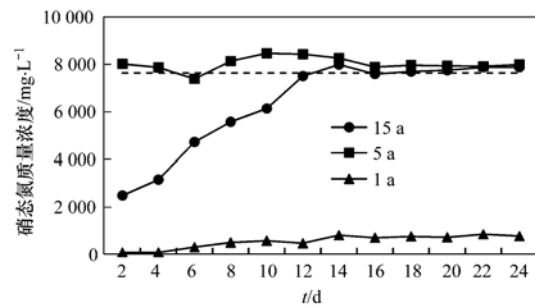


图6 硝态氮随回灌时间的变化

Fig. 6 Changes of nitrate nitrogen with recirculation time

硝态氮从开始的 2 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐开始上升,到回灌的第 20 d 接近于回灌进水值,然后基本稳定;5 a 柱的回灌出水硝态氮一直稳定在 7 700 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,与回灌进水值接近;1 a 柱的回灌出水硝态氮维持在一个很低的水平,在 100 ~ 900 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,硝态氮的降解率达到了 88% 以上。

从以上实验数据分析可知:15 a 柱回灌初期对硝态氮有一定的截留能力,后期截留能力消失,据此分析对硝态氮的去除应该没有生物作用,主要是吸附络合等物理化学作用;5 a 柱对硝态氮没有截留能力,没有生物作用,由于 5 a 柱的吸附作用要弱,在多物质共存情况下硝态氮的竞争吸附力差。根据 1 a 柱回灌出水氨氮、硝态氮的变化规律分析,1 a 柱内垃圾有反硝化反应发生,因此硝态氮比较低。

2.5 回灌出水重金属的变化规律

采用垃圾渗滤液反渗透浓缩液 (Cu : 0.064 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Zn : 1.020 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Cr : 0.610 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Ni : 1.602 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 分别回灌于 3 个不同垃圾柱模拟回灌过程,回灌出水 Cu 、 Zn 、 Ni 、 Cr 随着回灌时间的增加变化规律见图 7,其中所示虚线分别为进水 Cu 、 Zn 、 Ni 、 Cr 。

由图 7 可以看出:15 a 柱回灌出水中 Cu 、 Zn 均呈现增加的趋势,分别在前 5 d、前 3 d 出水浓度小

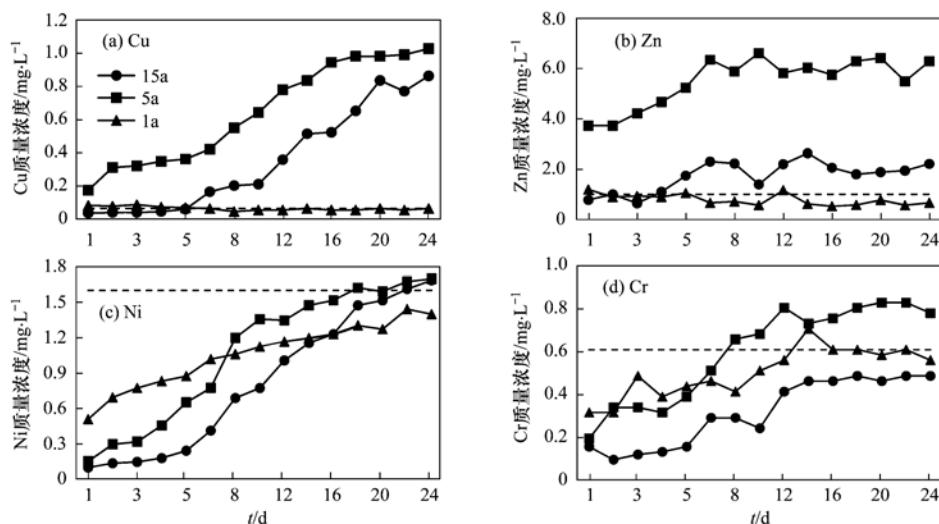


图7 Cu、Zn、Ni、Cr 随回灌时间的变化

Fig. 7 Changes of Cu, Zn, Ni and Cr with recirculation time

于回灌进水,在随后的回灌中,回灌出水开始大于回灌进水;15 a 柱回灌出水中 Ni、Cr 均呈现增加的趋势,Ni 增加的速度略快,但回灌出水值一直低于回灌进水,在回灌初期回灌出水 Ni、Cr 值低于回灌进水 74%、93%。5 a 柱回灌出水中 Cu、Zn 均呈现增加的趋势,回灌出水浓度值均高于回灌进水;5 a 柱回灌出水中 Ni、Cr 一直高于 15 a 柱,也呈现增加的趋势,在回灌初期出水浓度值低于回灌进水,但分别在第 21、8 d 开始高于回灌进水。1 a 柱回灌出水中 Cu、Zn 基本维持稳定的浓度,分别在 $0.045 \sim 0.087 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.584 \sim 1.206 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 内波动,基本维持在回灌进水浓度值附近,没有明显的变化;1 a 柱回灌出水中 Ni、Cr 均呈现逐渐增加的趋势,增加的速度较 15 a 柱、5 a 柱缓慢,直至回灌结束,回灌出水值一直低于回灌进水。

从以上实验数据分析认为:15 a 柱在回灌前期对 Cu、Zn 有一定的截留能力,推测应该是垃圾的多孔结构的吸附能力的作用,随着回灌的进行,溶液的水力流动逐渐将不稳定态的 Cu、Zn 带出柱体,因此出现了回灌出水逐渐增加的情况;5 a 柱回灌出水中 Cu、Zn 一直高于回灌进水,原因在于 5 a 柱垃圾自身 Cu、Zn 含量高,吸附条件差,在回灌中不稳定态的 Cu、Zn 带出柱体;回灌出水中 Ni、Cr 表现出与 Cu、Zn 不同的变化规律,因为 Ni、Cr 易于发生络合反应,易被截留,详细的机制有待进一步论证。1 a 柱正在进行甲烷化阶段的反应,甲烷化填埋层内为中性偏碱性的环境,填埋层内部二氧化碳分压较高(约 50%),此时重金属离子易形成氢氧化物、碳

酸盐等,这些产物在此 pH 值范围内的低溶解度也导致了 Cu、Zn 的低迁移性^[28,29],因此 1 a 垃圾柱回灌出水中 Cu、Zn 基本维持在回灌进水浓度附近,没有明显的变化;1 a 柱对 Ni、Cr 有一定的去除能力除了以上环境的作用外,不断分解的有机物会与 Ni、Cr 发生络合反应,因此渗滤液反渗透浓缩液回灌出水中 Ni、Cr 一直低于回灌进水。

3 结论

(1)1 a 柱内垃圾正在经历产甲烷化阶段,并有反硝化反应进行;5 a 柱内垃圾已经接近于稳定状态,但还没有矿化垃圾的典型特征;15 a 柱内垃圾已处于稳定状态,具备了矿化垃圾的特性。

(2)1 a 柱具有较好的去除硝态氮的能力,去除率达到了 88%,是通过反硝化反应来实现的,这也是出水电导率低的重要原因,但出水有机物、氨氮浓度较高,若反硝化反应条件缺失则硝态氮、盐分的去除能力也将消失。

(3)5 a 柱对硝态氮没有去除能力,对有机物、盐分、Cr、Ni 的削减能力也较小,主要是生物作用差,吸附、络合能力也较差,不是回灌处理渗滤液反渗透浓缩液的理想选择。

(4)15 a 柱对有机物、盐分、Cr、Ni 均具有较好的削减能力,初期的去除率分别达到了 90%、78%、93%、74%,主要是通过吸附、络合等物理化学作用实现的,因此随着回灌的持续进行会接近或达到饱和容量,在实际的回灌中可通过控制回灌过程和进度来达到对污染物的有效去除。

参考文献:

- [1] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(2): 389-396.
- [2] Linde K, Jonsson A S, Wimmerstedt R. Treatment of three types of landfill leachate with reverse osmosis[J]. Desalination, 1995, **101**(1): 21-30.
- [3] Peters T A. Purification of landfill leachate with reverse osmosis and nanofiltration[J]. Desalination, 1998, **119**(1-3): 283-293.
- [4] Chianese A, Ranauro R, Verdone N. Treatment of landfill leachate by reverse osmosis [J]. Water Research, 1999, **33**(3): 647-652.
- [5] 崔锋, 倪晋仁, 郭金成, 等. 新标准下卫生填埋场垃圾渗滤液的处理对策[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(6): 47-50.
- [6] 宋灿辉, 胡志泉, 肖波. UASB + A/O + UF + NF 工艺处理生活垃圾焚烧厂渗滤液[J]. 环境工程, 2010, **28**(1): 40-42.
- [7] Zhang G L, Qin L, Meng Q, *et al.* Aerobic SMBR/reverse osmosis system enhanced by Fenton oxidation for advanced treatment of old municipal landfill leachate [J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 261-268.
- [8] 牛瑞胜, 郭云峰, 闫永久, 等. 垃圾渗滤液处理工程实例[J]. 环境工程, 2011, **29**(2): 48-50.
- [9] 胡蝶, 陈文清, 张奎, 等. 垃圾渗滤液处理工艺实例分析[J]. 水处理技术, 2011, **37**(3): 132-135.
- [10] Renou S, Givaudan J G, Poulain S, *et al.* Landfill leachate treatment: Review and opportunity [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **150**(3): 468-93.
- [11] Zhang Q Q, Tian B H, Zhang X, *et al.* Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants[J]. Waste Management, 2013, **33**(11): 2277-2286.
- [12] Calabro P S, Sbaffoni S, Orsi S, *et al.* The landfill reinjection of concentrated leachate: findings from a monitoring study at an Italian site[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **181**(1-3): 962-968.
- [13] 邓旭亮, 荣丽丽, 张春燕, 等. 膜滤浓缩液处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2011, **31**(6): 10-13.
- [14] 郑可, 周少奇, 沙爽, 等. 臭氧氧化反渗透浓缩垃圾渗滤液动力学[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2966-2970.
- [15] 王东梅, 刘丹, 龚正君, 等. Fenton 氧化-絮凝-吸附法处理垃圾渗滤液反渗透浓缩液[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(18): 5423-5426.
- [16] Perez G, Fernandez-Alba A R, Uriaga A M, *et al.* Electro-oxidation of reverse osmosis concentrates generated in tertiary water treatment [J]. Water Research, 2010, **44**(9): 2763-2772.
- [17] Hunce S Y, Akgul D, Demir G, *et al.* Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials [J]. Waste Management, 2012, **32**(7): 1394-1400.
- [18] 赵成云, 林伯伟, 肖强, 等. 垃圾渗滤液反渗透浓缩液回灌中试研究[J]. 环境卫生工程, 2011, **19**(1): 11-15.
- [19] 詹良通, 兰吉武, 邓林恒, 等. 浓缩液回灌对垃圾填埋体水位及稳定性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, **34**(2): 126-131.
- [20] 刘保成, 吕国庆, 高祯, 等. 垃圾渗滤液浓缩液的回灌实验研究[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(19): 64-67.
- [21] 蒋宝军, 李俊生, 杨威, 等. 垃圾渗滤液反渗透浓缩液回灌处理中试研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2006, **22**(6): 36-40.
- [22] 宋延冬, 左俊芳, 朱正贤. 渗滤液的反渗透浓缩液回灌技术应用[J]. 环境工程, 2012, **30**(2): 33-37.
- [23] 吴松维, 吴伟祥, 陈英旭. 不同填埋龄垃圾降解特性研究[J]. 科技通报, 2012, **28**(5): 187-191.
- [24] 赵由才, 柴晓利, 牛冬杰. 矿化垃圾基本特性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, **34**(10): 1360-1364.
- [25] 何岩, 赵由才, 卓桂华, 等. 改性矿化垃圾反应床处理填埋场渗滤液研究[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(3): 24-27.
- [26] 孙晓杰, 王思明, 赵孝芹, 等. 矿化垃圾生物反应床堵塞问题探讨[J]. 环境工程, 2013, **31**(2): 83-86.
- [27] 李鸿江, 赵由才, 张文海, 等. 矿化垃圾去除渗滤液中有有机物及金属离子的研究[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(19): 106-108.
- [28] 邵立明, 何晶晶, 瞿贤. 生物反应器填埋场初期的重金属释放行为[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(1): 71-75.
- [29] Erses A S, Onay T T. In situ heavy metal attenuation in landfills under methanogenic conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, **99**(2): 159-175.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i> (2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i> (2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i> (2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i> (2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i> (2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i> (2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i> (2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i> (2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i> (2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen (2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i> (2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i> (2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i> (2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i> (2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan (2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i> (2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i> (2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i> (2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i> (2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming (2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaxing	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i> (2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i> (2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i> (2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i> (2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-hui, <i>et al.</i> (2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i> (2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i> (2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i> (2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan (2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i> (2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i> (2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke (2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun (2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i> (2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i> (2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i> (2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i> (2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-rui, HOU Yan-lin (2834)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行