

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

外源Cr(Ⅲ)在我国22种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究

郑顺安¹, 郑向群¹, 李晓辰², 刘书田¹, 姚秀荣¹

(1. 农业部环境保护科研监测所, 农业部产地环境与农产品安全重点开放实验室, 天津市农业环境与农产品安全重点开放实验室, 天津 300191; 2. 天津城建学院环境与市政工程系, 天津 300384)

摘要: 老化过程对土壤重金属有效性和毒性起着关键性作用. 由于我国土壤类型的复杂性, 目前对于我国土壤中铬(Cr)的老化过程、转变速率及影响Cr在土壤中老化的关键因子仍然不清楚. 本研究选取了全国22种典型土壤, 使用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$ 作为有效态提取剂, 研究我国典型土壤中Cr(Ⅲ)的老化过程及影响因子, 为准确评价重金属污染的生态环境风险提供科学依据. 结果表明, 有效态Cr含量随时间先是快速下降, 然后缓慢持续降低. 在培养期间的前21 d下降速率快, 而以后则变化比较缓慢. Elovich方程可以有效拟合有效态Cr在我国22种典型土壤中转化的动力学过程, 方程的斜率参数可以作为Cr在土壤中老化速率的表征参数, 并用它来比较不同土壤中Cr的老化速率快慢. 老化速率与土壤性质的逐步回归分析结果表明, 土壤性质中对老化速率影响最大的是有机质, 其次是pH和活性氧化铁.

关键词: 铬; 典型土壤; 老化; 动力学过程; 影响因子

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0698-07

Aging Process of Cr(Ⅲ) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis

ZHENG Shun-an¹, ZHENG Xiang-qun¹, LI Xiao-chen², LIU Shu-tian¹, YAO Xiu-rong¹

(1. Key Laboratory of Production Environment and Agro-Product Safety, Ministry of Agriculture, Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. Department of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: Aging process is a key factor influencing the availability and toxicity of heavy metals in soil. However, the aging of chromium (Cr) in soils and its influence factors are still unclear, as a result of complexity of soils in China. This study was conducted to investigate the aging process of Cr(Ⅲ) in 22 typical soils of China by using $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$ as the extractant for available Cr. The results manifested that Cr spiked in the soil was time-dependently transferred from the available fraction into less labile fractions. Two regions could be distinguished: the first one for short extraction time ($t < 21$ days), corresponding to a faster transformation of metals and the second for longer extraction time ($t > 21$ days) where the transformation was relatively slower. The decrease of Cr in available fraction during the incubation could be simulated by the Elovich equation, and decrease rates were applied to reflect the transformation rates of aging process among various soils. Multiple regression analysis showed that decrease rates might be related to the organic matter, pH and amorphous Fe oxides of soil, and organic matter was the key factor to the aging process.

Key words: chromium; typical soils; aging process; kinetic equation; influence factor

外源水溶性重金属加入土壤后, 迅速完成固-液分配, 其可提取态含量、生物有效性或毒害随时间延长而逐渐降低, 这个过程称之为“老化(aging)”, 或“固化(fixation)”. 土壤吸附和沉淀过程速率较快, 在数分钟至数小时即可完成, 而老化过程较慢, Han等^[1,2]的研究表明, 在重金属加入土壤1 a以后, 形态仍然缓慢转变中. 因此, 实际污染土壤与人工添加污染土壤中重金属的有效性及毒性存在着较大的差异, 当进行生态风险分析、环境质量标准制定或修复治理时, 认识并预测重金属的老化过程显得尤为重要.

关于外源重金属在土壤中的老化机理及动力学

特征已有一些研究. McLaughlin^[3]推测土壤重金属的老化机制可能包括微孔扩散、表面沉淀-共沉淀(包括絮凝)等作用导致的固相包裹和晶格固定. Ma等^[4]利用同位素示踪技术, 发展了一个预测模型, 可以成功用于多种欧洲土壤的短期(30 d)和长期(2 a)老化过程. 他认为微孔扩散是外源铜在土壤中的主要老化机制. 这个结果与Lu等^[5]和Oh等^[6]的研究相一致. 徐明岗等^[7]的研究表明, 铜、锌在红

收稿日期: 2012-04-17; 修订日期: 2012-09-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903015)

作者简介: 郑顺安(1981~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为土壤环境, E-mail: zhengshunan@gmail.com

壤、水稻土和褐土中的老化最适合二级动力学方程,而抛物线扩散方程拟合程度较差,说明老化并不完全取决于扩散作用。

老化过程对土壤重金属有效性和毒性起着关键性作用. 铬(Cr)是一种包括多种价态的重金属,具有致癌和致畸作用. 土壤中的铬,容易氧化成可溶性的复合阴离子,然后通过淋洗转移到地面水或地下水中. 土壤中铬过多时,会抑制有机物质的硝化作用,并使铬在植物体内蓄积. 受到 Cr 毒害的植物会出现失绿症状,严重时可导致细胞畸变,细胞质膜过氧化等^[8]. 2011 年 6 月云南曲靖铬污染事件造成当地蔬菜产地土壤重度污染,寸草不生. 目前对于我国土壤中 Cr 的老化过程及转变速率等尚缺乏系统深入的研究,尤其是由于我国土壤类型的复杂性,对于影响 Cr 在土壤中老化的关键因子仍然不清楚. 本研究选取了全国各地 22 种

不同性质的典型土壤,使用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 作为有效态提取剂,通过培养实验观测外源 Cr 进入土壤后 180 d 内有效态 Cr 含量随时间的变化,并利用动力学模型对 Cr 的老化过程进行拟合,筛选出描述我国典型土壤 Cr 老化动力学特征的最优模型,得到 Cr 老化动力学表征参数,再将动力学参数与土壤理化性质相结合,通过逐步回归分析,定量阐明 Cr 老化过程中的关键性影响因子,以期 Cr 污染土壤后的化学行为和可能产生的毒害效应分析提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤统一取自耕层(0~20 cm),风干后磨碎过 2 mm 筛备用. 采集地点及相关性质见表 1,各理化性质采用常规分析方法测定^[9].

表 1 供试土壤相关理化性质
Table 1 Selected properties of tested soil samples

编号	地区	类型	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	游离铁 /g·kg ⁻¹	活性铁 /g·kg ⁻¹	黏粒 ¹⁾ /g·kg ⁻¹	全 Cr /mg·kg ⁻¹
S1	重庆北碚	紫色土	4.46	15.73	11.26	17.68	1.61	300.9	54.42
S2	广西南宁	赤红壤	4.56	12.33	8.52	34.1	6.04	391.9	92.06
S3	贵州贵阳	黄壤	4.62	51.77	17.31	31.57	1.94	269.5	51.06
S4	江西鹰潭	红壤	5.11	9.64	10.36	40.88	2.13	423.3	52.79
S5	辽宁沈阳	棕壤	5.37	21.81	15.74	11.95	1.67	299.9	43.82
S6	湖南邵阳	水稻土	5.37	27.43	12.46	40.89	3.01	368.8	53.37
S7	吉林公主岭	黑土	5.53	62.25	25.54	12.6	3.07	225	30.13
S8	江苏南京	黄棕壤	6.08	16.37	12.68	21.18	1.83	145.6	37.45
S9	西藏拉萨	草毡土	6.72	81.78	21.74	26.06	9.72	126.1	34.42
S10	海南儋州	砖红壤	6.76	18.41	3.61	55.16	1.11	392.4	53.24
S11	福建福州	黄壤	7.08	25.23	17.35	23.99	1.43	425	9.92
S12	吉林公主岭	黑钙土	7.41	30.77	19.91	10.64	2.64	318.7	37.11
S13	广西刁江	红壤	7.53	21.78	8.68	34.44	1.33	358.6	114.27
S14	吉林公主岭	暗棕壤	7.76	25.93	15.86	16.99	5.9	89.5	21.63
S15	天津宝坻	潮土	7.81	10.51	14.05	12.89	1.17	159.2	64.75
S16	吉林双辽	盐碱土	7.83	9.09	8.14	5.88	0.38	161	66.01
S17	河北石家庄	褐土	7.9	13.54	14.81	4.14	0.56	168.8	47.37
S18	江苏苏州	黄泥土	7.97	22.81	12.88	20.66	3.99	257.4	51.33
S19	甘肃兰州	灰钙土	8.04	14.34	6.31	4.96	0.26	83.6	41.5
S20	内蒙呼和浩特	栗钙土	8.17	7.14	6.61	4.4	0.15	100.2	40.89
S21	新疆乌鲁木齐	棕漠土	8.18	6.18	4.55	5.29	0.35	100.1	48.41
S22	陕西西安	黄绵土	8.27	11.27	8.49	6.85	0.32	121.6	26.26

1) 黏粒为 <2 μm 土壤颗粒

供试土壤中 pH 在 4.46(重庆紫色土)~8.27(陕西黄绵土)范围内,酸性土壤 8 种(pH 4.46~6.08,S1~S8),中性土壤 3 种(pH 6.72~7.08,S9~S11),碱性土壤 11 种(pH 7.41~8.27,S12~S22). 除广西地区的 2 种土壤以外的 20 种土壤全 Cr 含量均未超过一级标准自然背景值(90

mg·kg⁻¹),广西地区的 2 种土壤也未超过二级标准. 总体而言供试土壤属于未污染土壤。

1.2 培养实验

称取 1 000 g 土样风干土于 1 000 mL 塑料大烧杯中,以 CrCl₃·6H₂O(优级纯)作为添加的外源重金属,Cr³⁺ 添加浓度为国家土壤环境质量二级标准,即

pH < 6.5 为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.5 ~ 7.5 为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH > 7.5 为 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 将重金属与土壤充分混匀后置于恒温恒湿培养箱中, 烧杯外包裹塑料膜并打孔保持通气, 培养箱的温度设定在 25°C , 湿度为 75%. 烧杯内加入去离子水使土壤水分保持 75% 田间持水量, 培养期间通过重量法定期添加去离子水使土壤水分保持稳定. 培养实验设置 4 个重复.

1.3 取样测定

重金属有效态的单一提取剂众多, 在关于老化的报道中, 目前国内 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 使用较多, 因此本研究也使用该提取剂, 使不同结果之间具有可比性. 取样时间为实验开始第一次加入水分后的第 1、7、21、42、84、126、168 d. 取样前先将土壤混匀, 以保证其浓度均匀一致, 然后每次取出约 50 g 的土壤. 土壤取出后分为两部分, 一部分迅速称重, 105°C 烘干后计算其水分含量, 另一部分根据含水量称取土样 (折合烘干土 1.000 g) 置于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液, 于 25°C 下振荡 2 h, 再在 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 20 min, 过滤, 取上清液, 使用美国 Varian 公司 AA220-Z 火焰-石墨炉自动切换原子分光光度计测定 Cr 浓度, 计算土壤中有效态 Cr 含量及比例 (有效态 Cr 含量/Cr 总量).

1.4 动力学模型

本研究采用 6 种动力学模型对外源 Cr 的老化过程进行拟合^[10].

Elovich 方程:

$$c_t = a + b \ln(t) \quad (1)$$

抛物线扩散方程:

$$c_t/c_\infty = a + b^{1/2} \quad (2)$$

一级方程:

$$\lg(1 - c_t/c_\infty) = a - bt \quad (3)$$

零级方程:

$$(1 - c_t/c_\infty) = a - bt \quad (4)$$

幂函数方程 (可转变为双常数方程):

$$c_t = at^b \quad (5)$$

二级方程:

$$\frac{t}{c_t} = -\frac{1}{K} + \frac{t}{c_\infty} \quad (6)$$

在这些动力学方程中, c_t 为与培养时间 t 相对应的土壤有效态 Cr 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), c_∞ 为达到平衡时土壤有效态 Cr 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), a 、 b 为常数, $K = kC_\infty^2$, 为表征二级反应的键合常数, 其中 k 为二级动力学速率参数 [$\text{kg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$].

1.5 数据分析

动力学模型拟合及制图采用美国 Origin 公司的 Origin8.5 软件, 逐步回归分析采用美国 Minitab 公司的 Minitab 16.0 软件.

2 结果与讨论

2.1 外源 Cr 在典型土壤中的老化过程

外源 Cr 在典型土壤中有效态的变化趋势见图 1. 可以看出, 在培养的第 1 d, 有效态 Cr 所占比例为 43% ~ 73%, 随着培养时间的增长, 所占比例持续下降. 到培养结束后, 有效态 Cr 比例下降到了一个较低的水平, 所占比例为 2% ~ 34%. 有效态 Cr 随时间都表现出先是快速下降, 然后缓慢持续降低. 在培养期间的前 21 d 下降速率快, 降低量占培养全期降低总量的 50% 以上, 而以后则变化比较缓慢. 这表明金属添加到土壤后有一个明显的老化过程, 且老化速率并不稳定. 培养后期贵州黄壤、水稻土、砖红壤、黑钙土、灰钙土、棕漠土、黄绵土等土壤的有效态 Cr 比例仍然变化比较剧烈, 表明随着外源重金属的加入, 有效态 Cr 比例增加, 老化延续的时间延长, 距离达到平衡状态仍然需要一个漫长的过程. Han 等^[1, 11]研究表明, 在黄土性土壤及砂质土壤中, 当 Cr 添加量超过 3 倍背景值时, 即使是 1 a 的培育其对老化作用仍是远远不够的.

不同土壤中有效态 Cr 比例差异较大, 8 种酸性土壤在培养初期有效态 Cr 比例为 46.52% ~ 64.76%, 培养结束后降低为 5.01% ~ 33.65% (图 1a). 3 种中性土壤的有效态 Cr 比例从初期的 49.9% ~ 65.49%, 降低为 3.66% ~ 14.27% (图 1b). 11 种碱性土壤的有效态 Cr 比例从初期的 48.85% ~ 72.67%, 降低至 2.03% ~ 27.46% (图 1c 和图 1d). 从有效态 Cr 的下降幅度来看, 中性土壤的表现较为一致, 在培养后期有效态 Cr 比例趋近于稳定, 而酸性土壤或碱性土壤中, 有效态 Cr 变化趋势差异较大. 一般认为 pH 与土壤重金属的有效性呈负相关, 如在 Lu 等^[5] 及 Ma 等^[12, 13] 对 Cu 及 Zn 的研究中, pH 是影响土壤重金属的老化的最重要因素, 但本研究中 Cr 的有效性与土壤 pH 并不完全对应, 如吉林长春的黑土, 虽然 pH 较低 (5.53), 但有效态 Cr 的比例从开始的 54.53% 下降为培养结束的 5%, 而内蒙古的栗钙土, 虽然 pH 较高 (8.17), 但直到培养结束, 有效态 Cr 的比例仍然超过 20%. 由于老化实验工作量较大, 实验步骤复杂, 在前人的研究中用于比较的土壤种类较少, 如徐明岗等^[7] 在对

外源 Cu、Zn 的老化研究中,选择的典型土壤为3种(红壤、水稻土、褐土),且 pH 高的土壤所含有有机质含量也较高,因此有效态重金属的老化速率与 pH 呈负相关关系.与之类似的,在 Lu 等^[5]的研究中,

选取了江西、北京和黑龙江的3种土壤,也是 pH 较高的土壤包含较多的有机质.而当土壤类型较多,且性质相差较大时,对老化的影响因素复杂多变,有必要做进一步分析.

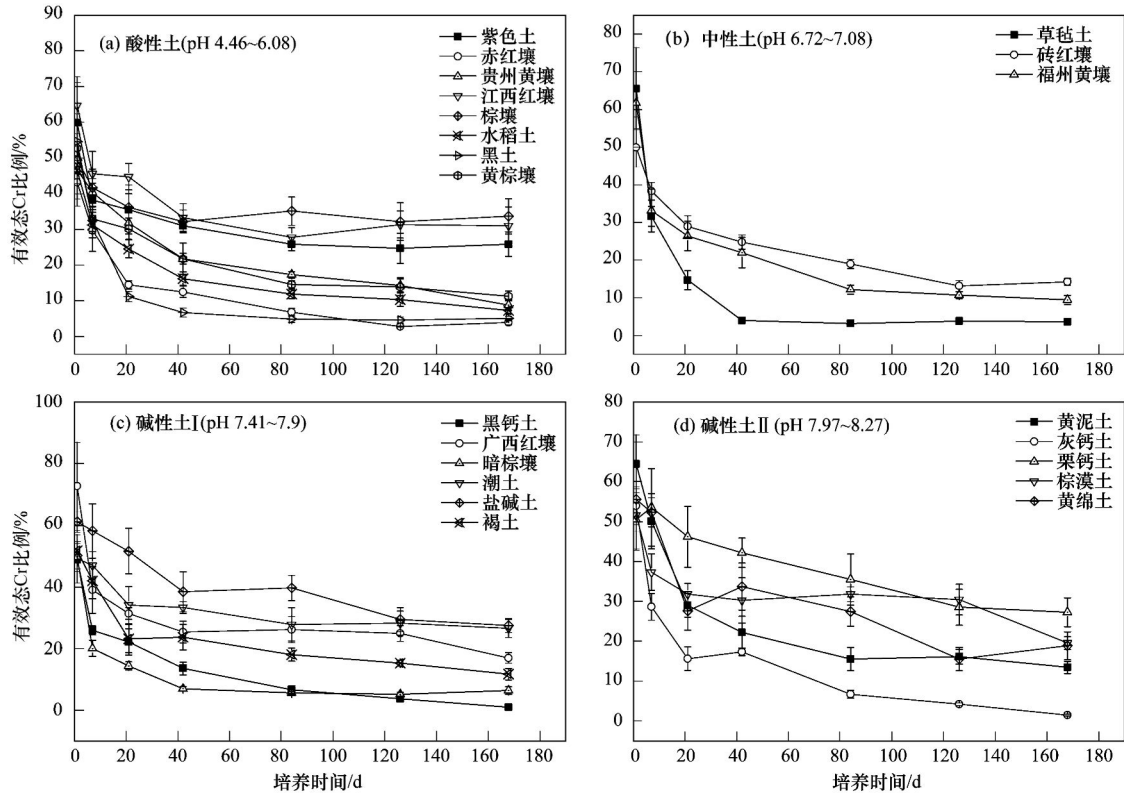


图1 有效态 Cr 所占比例在老化期间的变化趋势

Fig. 1 Proportion of available Cr fraction as the function of incubation time

2.2 老化过程的动力学模型拟合

Origin 的拟合结果表明,如果将酸性土、中性土和碱性土统一起来,使用 Elovich 方程拟合的结果最好,具有较高的决定系数 R^2 及较小的标准误差 SE (standard error),双常数方程次之,其余动力学方程拟合性较差(拟合结果见表 2. 限于篇幅,仅列出 Elovich 方程和双常数方程的拟合结果). Elovich 方程是一个经验式,它描述的是包括一系列反应机制的过程,非常适用于反应过程中活化能变化较大的过程.如果 Elovich 方程对于反应过程拟合较好,说明该过程是一个非均相分散过程^[14].在本研究中,有效态 Cr 的变化不能用扩散方程拟合,这表示有效态 Cr 向其他形态的转化不完全取决于扩散作用. $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 提取的重金属形态通常被认为是可交换态,是有效性很高的形态,随时间很容易向有效性低的形态转化,如铁锰氧化物结合态、有机质结合态及残渣态等.这种转化或老化受控于多种作用,如微孔扩散、表面聚合/沉淀、有机质结合

等^[15]. Sparks^[16]描述了外源重金属在土壤中老化的2种类型:一是在表面的聚集.低表面覆盖度时金属离子占据一些孤立的吸附位,随覆盖度增加,金属的氢氧化物晶核形成,最终成为表面沉淀或表面金属簇.二是由表面向晶层内的转变.先是形成外层络合物,然后脱水生成内层络合物,再经扩散或同晶替代进入到矿物的晶格;或者经快速侧向扩散到达边缘,在此被吸附或形成聚合体,最后随颗粒增长,这些表面聚合体被埋入晶格内.这预示着表面聚合/沉淀和扩散是控制金属离子活性的2个主要作用,并可能取决于二者的相对强弱. Lock^[17]等和 Alexander^[18]则认为在短期内(数分钟到数小时)吸附作用有显著的影响,表面沉淀只可能发生在高浓度金属离子的环境中,而在较长接触时间内(老化阶段),可能的反应机制有:①金属扩散进入土壤矿物或有机质的表面微孔;②金属通过慢的固态扩散进入到土壤矿物的晶格内;③一些条件下(如季节性淹水),土壤铁锰氧化物发

生还原反应和氧化反应,引起这些氧化物溶解和再沉淀,从而包裹一些金属离子;④高浓度金属和高浓度阴离子(如磷酸盐、碳酸盐等)生成新的固相沉淀;⑤金属或者扩散进入有机质分子内部或者通过有机质分子的包裹作用而使金属与有机质紧紧结合.徐明岗等^[7]认为,虽然长期老化中微孔

扩散是主要机制,但短期老化时表面作用不容忽视.最无效的重金属形态(残渣态)来源于微孔扩散作用,潜在有效形态(铁锰氧化物结合态、有机质结合态及碳酸盐结合态等)则很大程度上归因于表面作用.因而整个老化动力学过程很难用扩散方程表征.

表 2 动力学方程对 Cr 老化过程的拟合参数¹⁾

Table 2 Parameters of kinetic equations used to describe aging of available Cr fractions in soils

土壤编号	Elovich 方程 $c_t = a + b \ln(t)$				双常数方程 $c_t = at^b$			
	a	b	R^2	SE ²⁾	a	b	R^2	SE
S1	51.313	-6.44	0.920 9 ***	4.96	52.867	-0.132	0.919 1 **	4.76
S2	62.479	-6.40	0.925 3 ***	3.36	64.137	-0.157	0.911 4 **	3.71
S3	52.758	-8.78	0.958 8 ***	4.10	59.258	-0.281	0.930 0 ***	3.97
S4	43.034	-10.25	0.978 8 ***	1.89	60.453	-0.521	0.887 2 **	1.97
S5	47.927	-5.61	0.888 3 **	3.04	48.081	-0.081	0.882 6 **	3.36
S6	50.900	-9.47	0.970 6 ***	1.53	80.373	-0.605	0.825 5 *	1.54
S7	66.481	-6.87	0.872 7 **	5.46	70.648	-0.158	0.822 6 *	5.83
S8	49.485	-5.29	0.855 5 **	2.35	50.960	-0.14	0.779 4 *	2.30
S9	50.616	-14.52	0.920 4 ***	0.94	61.951	-0.535	0.947 8 ***	1.13
S10	42.953	-14.03	0.891 9 **	0.97	48.152	-0.449	0.952 0 ***	1.20
S11	47.431	-9.11	0.986 2 ***	3.21	81.882	-0.638	0.774 5 *	3.52
S12	50.785	-9.21	0.948 3 ***	3.75	60.677	-0.302	0.843 3 **	4.40
S13	59.163	-8.73	0.862 6 **	3.12	64.984	-0.234	0.801 9 *	3.47
S14	65.268	-9.79	0.967 4 ***	3.30	74.837	-0.326	0.955 5 ***	3.54
S15	56.104	-5.40	0.940 9 ***	3.89	57.477	-0.169	0.970 9 ***	4.86
S16	46.438	-8.06	0.994 9 ***	2.49	55.852	-0.351	0.935 2 ***	3.10
S17	58.636	-15.30	0.919 9 ***	3.37	77.147	-0.648	0.916 4 **	3.36
S18	51.041	-6.13	0.989 3 ***	2.91	57.444	-0.262	0.925 3 ***	3.23
S19	57.944	-8.89	0.972 5 ***	2.82	68.532	-0.368	0.956 7 ***	3.58
S20	51.620	-8.69	0.982 1 ***	2.39	58.811	-0.296	0.944 2 ***	2.57
S21	65.460	-8.01	0.901 9 **	2.67	68.103	-0.242	0.934 4 ***	2.90
S22	57.163	-5.17	0.896 6 **	6.21	59.190	-0.114	0.857 6 *	7.20

1) ****表示 $P < 0.0001$, ***表示 $P < 0.001$, **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$; 2) $SE = \left[\frac{\sum (c_t - c_t^*)^2}{(n-2)} \right]^{1/2}$, 式中 c_t 和 c_t^* 分别表示测定和

预测的有效态 Cr 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), n 表示测定数据的个数,在本研究中为 7 次

2.3 老化过程的关键性影响因子分析

Elovich 方程中的 b (绝对值) 是动力学方程中有效态 Cr 转变速率的表征参数,代表了有效态 Cr 在老化过程中所占总量比例下降速率,利用 b 作为有效态 Cr 在 22 种典型土壤中的老化速率参数,并与土壤相关理化性质进行逐步回归分析,判定那些性质是影响 Cr 老化的因子及所占权重.结果表明,有机质、pH 及活性铁含量是 Cr 老化过程的影响因

子,回归公式如下:

$$b = 0.73(\text{pH}) + 0.097(\text{有机质}, \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) + 0.43(\text{活性铁}, \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) + 0.458$$

$$(R^2 = 0.7624, P < 0.05, n = 22)$$

回归方程的决定系数 R^2 为 0.7426,可以解释 74.26% Cr 老化速率参数 b 的变异 (Variance),其中有机质所占权重最大,为 58.88%,pH 次之,为 8.6%,活性铁所占比例为 6.78% (表 3).

表 3 对老化速率参数拟合的回归方程参数

Table 3 Regression model for aging constant b from soils as related to various soil properties

变量	自变量	系数	P	偏决定系数	回归方程决定系数
老化速率参数 b	常数	0.458			
	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.097	0.001	0.5888	
	pH	0.73	0.015	0.0860	$R^2 = 0.7624$
	活性铁 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.43	0.043	0.0678	$P < 0.05$

从回归分析的结果来看,有机质对于Cr(Ⅲ)中的老化至关重要,所占权重超过50%。土壤有机质中的腐殖质大部分以有机颗粒或以有机膜被覆的形式与土壤中的黏土矿物、氧化物等无机颗粒相结合形成有机胶体和有机-无机复合胶体,由此增加了土壤的表面积和表面活性,使得土壤的吸附能力随有机质的增加而增加。另外土壤腐殖质属于一类高分子有机化合物,含有多种含氧功能团,如羧基、酚羟基和醇羟基等,容易和重金属元素发生络合或螯合反应,都有利于提高对交换态Cr的吸附能力,形成有机质结合态重金属。Sauvé等^[19]的研究表明,有机结合态重金属与有机质含量正相关,增加有机质可使碳酸盐结合态向有机结合态转化。还有报道指出,土壤中的有机质会加速铁锰氧化物中铁锰离子的解离,使铁锰氧化物态重金属向有机质结合态转变^[20, 21]。pH对Cr的老化速率也有较大贡献。pH是土壤化学性质的综合反映,pH较高的土壤中的黏土矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷较多,对铬离子的吸附力较强,从而使交换态Cr的浓度降低速度更快^[22]。pH升高还使得土壤表面含氧基团得到活化,使得更多的铬离子与土壤表面官能团形成络合物,不易解吸下来^[23]。Martínez等^[24]的研究表明,重金属在氧化物表面吸附的过程(α -FeOOH)也受pH的控制,并且随pH的升高,生成该元素氢氧根沉淀的机会增大,这些沉淀增大了土壤对重金属的吸附力,致使其在溶液中的浓度降低。另外活性铁对于交换态Cr的老化速率也有一定影响。土壤中氧化铁不仅是土壤结构体的胶结物质之一,更重要的是它具有较高的活性,而活性铁是氧化铁中活性更强的部分,具有无定形或微晶形结构,比表面积相比晶型氧化铁更大,对交换态重金属离子固持能力更强^[25],从而降低重金属的活性,减少交换态含量。

3 结论

(1)土壤有效态Cr含量在培养期间的前21 d下降速率较快,而后降低速率变缓,趋于平衡。Elovich方程可以有效拟合有效态Cr含量在我国22种典型土壤中转化的动力学过程。

(2)土壤性质显著影响有效Cr的老化速率。逐步回归分析的结果表明,土壤性质中对老化速率参数影响最大的是有机质,其次是pH和活性氧化铁。

参考文献:

[1] Han F X, Banin A. Long-term transformation and redistribution

of potentially toxic heavy metals in arid-zone soils; II. incubation at the field capacity moisture content [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1999, **114**(3-4): 221-250.

[2] Han F X, Banin A. Long-term transformations and redistribution of potentially toxic heavy metals in arid-zone soils incubated; I. under saturated conditions [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1997, **95**(1-4): 399-423.

[3] McLaughlin M J. Ageing of metals in soils changes bioavailability [J]. *Environmental Risk Assessment*, 2001, (4): 1-6.

[4] Ma Y B, Lombi E, Oliver I W, *et al.* Long-term aging of copper added to soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(20): 6310-6317.

[5] Lu A X, Zhang S Z, Shan X Q. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils [J]. *Geoderma*, 2005, **125**(3-4): 225-234.

[6] Oh S, Shin W S. Effect of ageing on desorption of lead and cadmium from sediments: kinetics and desorption-resistance [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2010, **45**(9): 1150-1168.

[7] 徐明岗, 王宝奇, 周世伟, 等. 外源铜锌在我国典型土壤中的老化特征 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3213-3218.

[8] 刘丽, 王玉军, 杨林, 等. 不同改良剂对铬污染土壤中小白菜生理、生化特性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(1): 96-100.

[9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[10] 蒋以超, 张一平. 土壤化学过程的物理化学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.

[11] Han F X, Banin A, Triplett G B. Redistribution of heavy metals in arid-zone soils under a wetting-drying cycle soil moisture regime [J]. *Soil Science*, 2001, **166**(1): 18-28.

[12] Ma Y B, Lombi E, Nolan A L, *et al.* Short-term natural attenuation of copper in soils: effects of time, temperature, and soil characteristics [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, **25**(3): 652-658.

[13] Ma Y B, Uren N C. Effect of aging on the availability of zinc added to a calcareous clay soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, **76**(1): 11-18.

[14] 张增强, 张一平. 对Elovich方程的再认识 [J]. *土壤通报*, 2000, **31**(5): 208-209.

[15] Gleyzes C, Tellier S, Astruc M. Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments; a review of sequential extraction procedures [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2002, **21**(6-7): 451-467.

[16] Sparks D L. *Environmental soil chemistry*. Second edition [M]. San Diego, California: Academic Press, 2003.

[17] Lock K, Janssen C R. Influence of aging on metal availability in soils [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **178**: 1-21.

[18] Alexander M. Aging, bioavailability, and overestimation of risk from environmental pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(20): 4259-4265.

- [19] Sauvé S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(7): 1125-1131.
- [20] Iu K L, Pulford I D, Duncan H J. Influence of waterlogging and lime or organic matter additions on the distribution of trace metals in an acid soil: I. manganese and iron [J]. *Plant and Soil*, 1981, **59**(2): 317-326.
- [21] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: II. Uptake of Cd, Ni and Zn in rice plants grown under flooded culture with organic matter addition[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, **61**(3): 257-266.
- [22] 桂新安, 杨海真, 王少平, 等. 铬在土壤中的吸附解吸研究进展[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(5): 1007-1012.
- [23] 陈英旭, 何增耀, 吴建平. 土壤中铬的形态及其转化[J]. *环境科学*, 1994, **15**(3): 53-56.
- [24] Martínez C E, McBride M B. Cd, Cu, Pb, and Zn coprecipitates in Fe oxide formed at different pH: aging effects on metal solubility and extractability by citrate [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, **20**(1): 122-126.
- [25] Okazaki M, Takamido K, Yamane I. Adsorption of heavy metal cations on hydrated oxides and oxides of iron and aluminum with different crystallinities [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1986, **32**: 523-533.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i>	(810)

《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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