

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)

兰州春夏季 PM₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析 马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)

2015年北京城区大气 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 及前体气体的污染特征 丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张扬, 庄国强 (1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 边博, 周燕, 张琴 (1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)

g-C₃N₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 南亚萍, 周厚田, 苏雪莹, 袁林江 (1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH₄ 厌氧去除特性 王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕幽, 汤蜜 (1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)

淹水水稻土消耗 N₂O 能力及机制 王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 孙松, 李楚娟, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 容跃 (1726)

《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定

容跃

(美国加利福尼亚州洛杉矶水质管理局, 洛杉矶 90013, 美国)

摘要: 本文主要介绍美国加州污染场地清理的风险评估的概念, 方法, 计算和风险管理. 从而引进挥发性污染物室内入侵风险评估方法来制定污染场地清理标准. 讨论如何运用数学模型计算土壤清理浓度和挥发性污染物室内入侵风险评估. 在风险评估基础上, 加州环保署水质管理局颁布了地下储油罐低风险结案政策. 政策中的污染场地清理定量标准是由人体健康风险评估方法计算得出. 最后, 用一个具体的美国加州洛杉矶案例介绍风险评估方法是怎样运用在污染场地清理修复中, 以回答污染场地修复的关键问题“多干净算干净”.

关键词: 污染场地; 场地清理; 场地修复; 风险评估; 污染物室内入侵; 土壤气体采样; 修复政策

中图分类号: X32; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1726-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612068

Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States

RONG Yue

(California Regional Water Quality Control Board, Los Angeles Region, Los Angeles, California 90013, U. S. A.)

Abstract: Site remediation has become an imperative part of environmental protection in China due to recent economic development, urban spreading, new industries replacing old ones, relocation of old industrial sites, and increased environmental conscience. This paper mainly introduced the concept, method, calculation, risk assessment and management for polluted sites remediation based on experience from California, USA. Further, the paper presented the concept of vapor intrusion and how to use vapor intrusion methodology to determine site remediation standard. Mathematical modeling approaches were also discussed in terms of how to determine the residual pollutant concentrations in soil and how to calculate indoor vapor concentrations. Based on risk assessment, California Environmental Protection Agency, Water Resources Control Board issued a ‘Low Threat Underground Storage Tank Case Closure Policy’ for impacted underground storage tank sites. The numerical criteria in the Policy were based on calculations of human health risk assessment. Finally, a real case study in California, USA, was presented to demonstrate how the risk assessment calculations were applied in polluted site remediation, which helps to answer the question of ‘how clean is clean’.

Key words: polluted sites; site cleanup; site remediation; risk assessment; indoor vapor intrusion; soil gas sampling; site remediation policy.

随着近年来中国经济发展, 城市扩建, 新兴工业取代旧工业, 工业场地搬迁, 环境保护意识增强都使得污染场地修复变得至关重要. 场地修复的关键问题是清理标准如何确定, 清理到“多干净算干净”一直是困扰决策者的大问题. 这个难题不仅出现在中国, 美国亦然. 本文将介绍美国加州环保署的经验, 包括污染场地的人类健康风险评估及政策制定. 希望这些经验对中国污染场地修复的作法和政策制定有些帮助. 本研究主要讨论风险评估方法、风险评估计算、挥发性污染物室内入侵风险评估及加州环保署土壤气体采样要求和指南(2015), 并包括污染场地修复中土壤气体采样的案例.

1 加州环保署的管理结构和法律依据

加州环保署成立于 1991 年. 其直属加州州长办公室. 现有 5 个局. 他们分别是: ①水资源控制理

事会, ②空气资源控制理事会, ③农药管理局, ④有毒物质控制局, ⑤环境健康有害评估办公室. 理事会①和②编制有 7 个理事, 由州长办公室任命, 分别代表不同的社会利益团体. 理事会开会是一个公开会议, 决议或决定要在公开场合投票. 所以权限稍微大一点. 因为这两个理事会是独立的机构, 所以理事会运作管理和规划相对独立一点. 例如水资源控制理事会在全加州有 9 个分区水质管理理事会. 理事会下设水质管理局, 像洛杉矶分局. 各分区水质管理理事会管理自己区的水质问题和污染场地清理^[1]. 局级单位③和④直属环保署. 环境健康有害评估办公室也直属环保署, 不过是一个研究单位(类似国内的环境科学院).

收稿日期: 2016-12-06; 修订日期: 2016-12-28

作者简介: 容跃(1958~), 男, 博士, 主要研究方向为水质管理, 污染场地清理和风险评估, E-mail: Yrong20373@aol.com

污染场地修复主要是水资源控制理事会下属水质管理局或有毒物质控制局负责。其它单位也有参与,像环境健康有害评估办公室和空气资源控制理事会。责任是由通过的法律确定的。例如,水资源控制理事会是背靠加州水法。另外,地下储油罐渗漏和清理依照加州地下储油罐法规处理。污染场地清理也可遵循美国联邦“超级基金”法。为何污染场地修复由水资源控制理事会负责?因为污染场地修复需要清理土壤和地下水。土和水是联在一起的,污染是分不开的。污染源一般是在地表,渗入土壤,最终是会渗入地下水的。一旦污染物进入地下水,随水运行,污染范围就会扩大。所以,清理地下水的难度就会加大。由管理水质的部门负责是比较合适的。

污染场地修复的清理标准需要考虑两个主要方面:一是污染物向上挥发到地表影响人体健康,二是污染物向下渗入地下水影响水质。

2 风险评估方法和计算方法及风险管理

2.1 人体健康风险评估方法和计算

大约在 500 多年前,欧洲有一位科学家帕拉萨斯说过这样一句话:“所有物质都是有毒的,无一例外。正确的剂量是区别于有毒和无毒的关键”。这句话就成了近代毒理学的基础。污染物影响人体健康在于人体摄取于此污染物剂量和暴露于此污染物的时间长短。人体健康风险评估就是需要评估剂量和暴露途径。即上文提到的污染物向上挥发到地表如何影响人体健康。

图 1 是一张概念性剂量反应曲线,即化学物剂量与肿瘤增加的关系。一般而言,化学物剂量浓度增加与肿瘤增加成正比。可是问题出现在低剂量区域。低剂量区域观察不到肿瘤。现在人们就用沿伸法把最低的数据点沿伸到原点。

公式(1)是人体健康风险的计算。

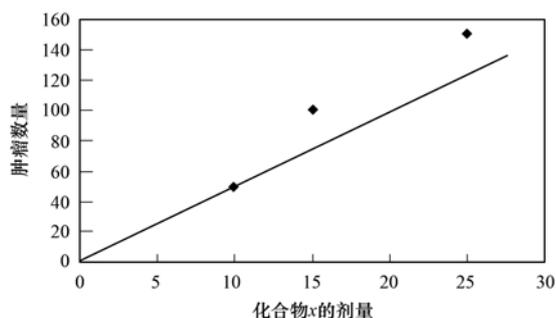


图 1 概念性剂量反应曲线

Fig. 1 Conceptual dose response curve

$$R = I_{\text{life}} \times F_r \quad (1)$$

式中, R 为人体健康风险, I_{life} 为生命平均摄取量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, F_r 为风险参数, $[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})]^{-1}$ 。

风险参数就是剂量反应线性曲线的斜率(图 1)。人体健康风险率,例如 10^{-6} 可以解读为风险率为百万分之一。

暴露接触途径。一般认为污染物影响人体健康的暴露接触途径有 3 种。一是通过吃或饮入,即所谓的病从口入。其二是通过皮肤接触进入。第三是通过呼吸吸入。

公式(2)是对于吃或饮暴露接触途径生命平均摄取量的计算。

$$I = \frac{c \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中, I 为吃或饮暴露接触途径生命平均摄取量 $[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]$, c 为污染物浓度 $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$, CR 为接触率 $(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$, EF 为每年暴露接触频率 $(\text{d} \cdot \text{a}^{-1})$, ED 为暴露接触时段 (a) , BW 为人体重量 (kg) , AT 为人体平均寿命 (d) 。

对于皮肤接触途径生命平均摄取量的计算公式与公式(2)类似,只是接触率 CR 单位为(以皮肤接触面积计算) $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

公式(3)是对于呼吸吸入暴露接触途径生命平均摄取量的计算。

$$EC = \frac{CA \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (3)$$

式中, EC 为呼吸吸入暴露接触途径浓度 $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$, CA 为污染物空气中浓度 $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$, ET 为暴露时间 $(\text{h} \cdot \text{d}^{-1})$, EF 为每年暴露接触频率 $(\text{d} \cdot \text{a}^{-1})$, ED 为暴露接触时段 (a) , AT 为暴露接触平均时间 (h) 。

有了这 3 个暴露接触途径平均摄取量的计算,就可以计算总体生命平均摄取量 (I_{life})。加州环保署利用了一些合理的平均值(如表 1)^[2] 计算了“平均健康风险值”。风险值也可用污染场地特殊值来计算。

有了风险值后,就需要做风险管理的决策决定。表 2 是加州环保署风险管理的决策。

2.2 污染物向下渗入地下水对水质的影响

加州环保署洛杉矶水质管理局应用土壤渗漏地下水数学模型计算出土壤清理的含量标准^[5]。即上面提到的污染物向下渗入地下水如何影响水质。表 3 是土壤清理的含量标准系数表(适用于汽油类污染物)。根据场地土壤类型和地下水深度,此表内的系数再乘以特别污染化学物的饮用水标准就是土壤清

表 1 加州环保署为计算平均健康风险值用的合理平均值^[2]

Table 1 The reasonable average values used by California environmental protection agency for calculating the average health risk value

项目	变量名	单位	住家情形		商业场地工人	地下管道 工人情形	来源
			儿童	成人			
得癌症的平均时间	ATearc	a	70	70	70	70	70a(USEPA 1989),定义值
体重	BW	kg	15	70	70	70	DTSC HERD(2005)
暴露时间长短	ED	a	6	24	25	1	适用于住宅和商业;DTSC HERD (2005)
暴露频率	EF	d·a ⁻¹	350	350	250	20	适用于公用事业工人;假设一个月工作 20 d;DTSC HERD (2005)
土壤摄取率	IRS	mg·d ⁻¹	200	100	100	330	DTSC HERD (2005)
土壤到皮肤指数	M	mg·cm ²	0.2	0.07	0.2	0.8	DTSC HERD (2005)
皮肤表面暴露面积	SAS	cm ²	2800	5700	5700	5700	DTSC HERD (2005)
汽体通量的平均时间	tau	s	9.50E+08		7.90E+08	3.20E+07	基于暴露持续时间
有害目标值	THQ	无量纲			1		USEPA(2010)
个体生命癌症风险目标值	TR	无量纲			1×10 ⁻⁶		USEPA(2010)

表 2 风险管理的决策^[3,4]

Table 2 Risk management decision

风险值	决策	行动
<10 ⁻⁶	无管控	无
>10 ⁻⁶ , <10 ⁻⁴	风险管控	监测,污染源处理和管理
>10 ⁻⁴	主动式清理	清理技术评估,清理项目

理的含量标准了. 即:

土壤清理含量(mg·kg⁻¹) = 土壤清理的含量标准系数(见表 3) × MCL(饮用水标准)

表 3 中的系数都是线性关系. 所以,任何不同的土壤类型和地下水深度都可以用内差方法算出. 例如,在 80 ft 深度,对于 50%粗沙和 50%粉沙的土质,甲苯(Toluene)的土壤清理的含量标准系数就是 3(即 2 和 4 的中间值). 再如,在 115 ft 深度,对于 100%砂砾的土质,乙苯(Ethylbenzene)的土壤清理的含量标准系数就是 6(即 4 和 8 的中间值). 以此类推. 可以看到最大的系数在 150 ft 深度和黏土的那个格子,而最小的系数在 20 ft 深度和砂砾的那个格子.

表 3 土壤清理的含量标准系数^{[5]1)/mg·kg⁻¹}

Table 3 Concentration standard coefficient of soil cleaning/mg·kg⁻¹

项目	地下水以上距离/ft	碳链区间			
		C4 ~ C12	C13 ~ C22	C23 ~ C32	
TPH	> 150	1 000	10 000	50 000	
	20 ~ 150	500	1 000	10 000	
	< 20	100	100	1 000	
BTEX	150	土层			
		砂砾	粗沙	粉沙	黏土
		B = 0.044	B = 0.077	B = 0.165	B = 0.8
		T = 2	T = 4	T = 9	T = 43
	E = 8	E = 17	E = 34	E = 170	
	X = 23	X = 48	X = 93	X = 465	
	MTBE = 0.039	MTBE = 0.078	MTBE = 0.156	MTBE = 0.78	
	80	B = 0.022	B = 0.033	B = 0.066	B = 0.34
		T = 1	T = 2	T = 4	T = 18
		E = 4	E = 7	E = 15	E = 73
		X = 11	X = 20	X = 40	X = 200
	MTBE = 0.013	MTBE = 0.039	MTBE = 0.065	MTBE = 0.338	
	20	B = 0.011	B = 0.011	B = 0.011	B = 0.044
		T = 0.15	T = 0.3	T = 0.45	T = 2.3
		E = 0.7	E = 0.7	E = 2	E = 9
		X = 1.75	X = 1.75	X = 5.3	X = 24.5
MTBE = 0.013	MTBE = 0.013	MTBE = 0.013	MTBE = 0.065		

1)本表适用于汽油类污染物;TPH 为 total petroleum hydrocarbons(碳氢化合物总量);BTEX :B 为 benzene(苯),T 为 toluene(甲苯),E 为 ethylbenzene(乙苯),X 为 xylenes(二甲苯);MTBE 为 methyl tertiary butyl ether(甲基叔丁基乙醚);MTBE 表示饮用水标准

3 清理标准制定中的挥发性污染物室内入侵风险评估

前文提到人体健康风险评估的计算. 如何应用人体健康风险评估来决定污染场地修复的标准? 在美国, 人们研究挥发性污染物室内入侵的风险. 假设污染场地将来要盖房子, 如果场地修复到一个挥发性污染物室内入侵的风险可以接受的程度, 那么这个可接受的风险所关联的污染物浓度就是污染场地修复的标准了. 所以, 挥发性污染物室内入侵风险评估不光是为污染物室内入侵考量, 更是为污染场地修复而确定标准.

公式(3)可用于评估挥发性污染物室内入侵的风险. 挥发性污染物室内入侵有 3 个来源. 一是污染物从地下水挥发出来. 其二是在土壤里挥发出来. 第三是土壤气体. 图 2 是一个挥发性污染物室内入侵的示意. 评估它的风险有两种方法. 一是用数学模型计算. 二是直接在土壤气体采样.



图 2 挥发性污染物室内入侵的示意

Fig. 2 Schematic of indoor intrusion of volatile pollutants

3.1 挥发性污染物室内入侵风险评估数学模型方法与污染场地修复的标准

广泛采用的挥发性污染物室内入侵风险评估数学模型是 Johnson & Ettinger Model^[6], 即所谓 J&E 模型. J&E 模型的主导公式是平流和分散传导偏微分方程. 模型算出污染物从污染源扩散到房屋底部, 再算挥发性气体从土壤穿过地板到达室内. 此模型在决定污染场地修复的标准中是利用“反算法”, 即定出室内的风险标准, 通常是居民住家为 10^{-6} (即百万分之一) 或工厂和商业区为 10^{-4} (即万分之一). 定好风险标准后, 用模型反算回土壤气体和地下水的污染物浓度. 这个算出来的土壤气体和地下水的浓度就可以作为制定污染场地清理标准的参考. 美国环保署把模型减化为电子表格型式运做^[7].

3.2 加州环保署土壤气体采样要求和指南(2015)

挥发性污染物室内入侵风险评估方法之一是土

壤气体采样. 因为在联邦政府层面没有土壤气体采样要求或指南, 所以加州环保署洛杉矶水质管理局公布了《加州环保署土壤气体采样要求和指南》(2015)^[8].

指南分为 9 章. 主要分为两大部分: 外场地土壤气体采样和实验室土壤气体样品分析. 指南要求土壤气体采样之前要有一个计划书描述采样的目的和污染物迁移转化的概念模型. 其后讨论到土壤气体采样的点和采样方法设计. 例如采样点选择, 采样设备和组装, 土壤钻孔, 孔隙封堵. 之后是讨论如何取土壤气体样品 (即采样方法). 采样点安装后要等一段“平衡恢复”时间, 使其恢复到原来没钻孔时的状态. 取样前要抽掉管中的置留气体, 要做漏气测试. 如果抽气抽得太猛, 则很有可能和地表空气联通. 所以, 指南对取样抽气率也作了要求 ($100 \sim 200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$). 之后, 土壤气体采样收集装置也有讨论. 例如针筒式、玻璃瓶、塑料袋、吸附棒或金属罐. 最后是讨论实验室土壤气体样品分析. 因为联邦环保署没有对土壤气体样品的分析方法 (有空气样品分析方法), 此指南对实验室土壤气体样品分析做了详细的要求. 包括样品分析前置留时间, 分析仪校正, 标准样品校正分析, 空白样品分析, 场地随行样品, 实验室品质保证步骤, 样品交接链签署. 另外, 还有分析检测极限值的最小要求.

4 加州地下储油罐“低风险结案”政策

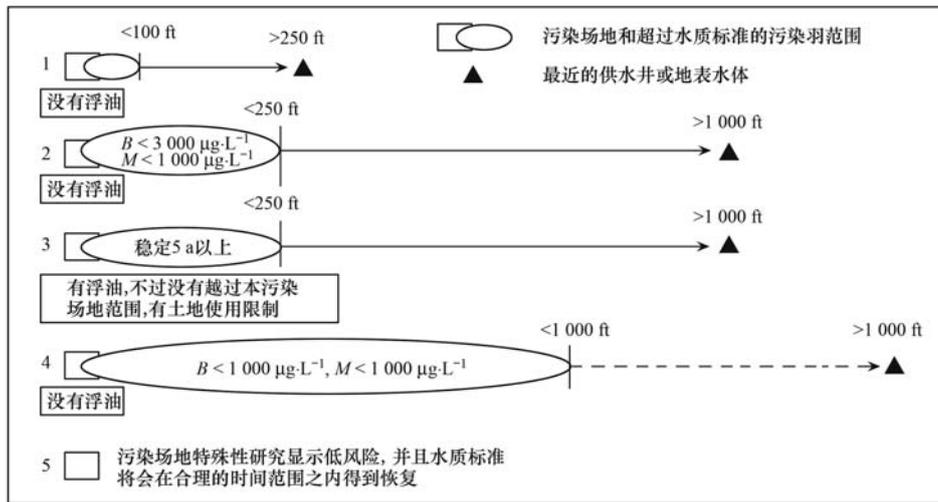
前文论述了人体健康风险评估的概念、方法、计算和风险管理, 从而引进挥发性污染物室内入侵风险评估方法制定污染场地清理标准. 那么怎样用这些方法去制定政策? 在 2012 年, 加州水质控制总局根据风险评估和风险管理的概念和计算结果颁布了一个“加州地下储油罐低风险结案政策”^[9]. 这是一个专为地下储油罐汽油和碳氢化合物污染物的清理和结案的政策. 政策中有定量的数字标准. 这被认为是一个突破.

政策中有先决条件, 例如污染源要先清除, 要用实践可行的最大程度上清理浮油, 要清理“第二污染源” (即残留在土和水中的高浓度污染物), 要求污染羽不要增加, 污染物浓度降低, 要求有一个污染场地清理概念性模型等. 当所有先决条件都满足后, 3 个环境介质需要考虑: ①地下水水质, ②挥发性污染物室内入侵, ③人体直接接触和室外气体接触. 根据上面讲的人体健康风险评估计算, 这 3 个

环境介质都给出了定量的标准. 如果满足政策中的先决条件和之后的 3 个环境介质定量标准, 那么这个场地就可认为是低风险, 可以结案了.

图 3 是地下水水质的定量要求. 这个条款有 5 个情形. 每个情形都有不同的污染物浓度, 汽油自由相(即浮油)的存在与否, 污染羽的长短, 与饮用

水水井的距离等. 例如, 第一情形只要求没有汽油自由相(浮油)的存在, 污染羽小于 100 ft(约 30 m) 和与饮用水水井的距离大于 250 ft(约 75 m). 只要你控制污染在这个范围内, 污染物浓度可以不计. 不过, 在政策先决条件中有一条“要求污染羽不要增加, 污染物浓度降低”的条款.



B: 苯; M: 甲基叔丁基醚

图 3 加州地下储油罐低风险结案政策中地下水水质的定量要求^[10]

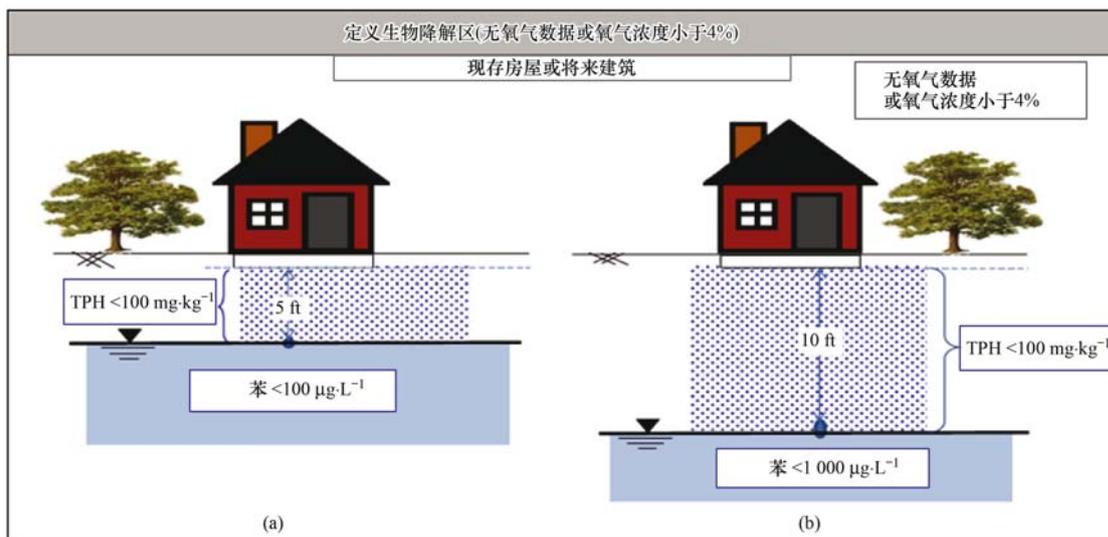
Fig. 3 Quantitative requirements of groundwater quality of California underground oil storage tanks closed low risk policy

图 4 是挥发性污染物室内入侵要求的其中一例. 即假设地下氧气缺乏 (< 4%), 碳氢化合物 (TPH) 不能很快自然降解, 其中显示的土和水的浓度及地下水深度就可以考虑为低风险了. 表 4 是人体直接接触和室外气体接触风险评估计算出的定量标准. 例如, 对于人们居住区苯在土壤中的含量应

在 5 ft(约 1.5 m) 小于 $1.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而在 10 ft(约 3 m) 小于 $2.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

5 污染场地修复中土壤气体采样和风险评估方法的案例

本节将引用一个美国加州洛杉矶实际用风险评



TPH: 碳氢化合物总量

图 4 挥发性污染物室内入侵要求的实例^[9]

Fig. 4 An example of indoor intrusion of volatile pollutants

表 4 加州地下储油罐低风险结案政策中人体直接接触和室外气体接触计算出的定量标准/mg·kg⁻¹[9]
 Table 4 Quantitative standard calculated for direct contact with the body and the outdoor gas
 in California underground oil tank of low risk policy/mg·kg⁻¹

化合物	住家情形		商业/工业情形		地下管道工人情形 0~10 ft(地面以下)
	0~5 ft (地面以下)	5~10 ft (地面以下,挥发到室内)	0~5 ft (地面以下)	5~10 ft (地面以下,挥发到室内)	
苯	1.9	2.8	8.2	12	14
乙苯	21	32	89	134	314
萘	9.7	9.7	45	45	219
多环芳烃	0.063	NA	0.68	NA	4.5

估方法在污染场地清理中的案例. 此案发生在一个有渗漏汽油加油站隔壁居民住所受污染的情况. 图 5 是案例的地图,其中上部是汽油加油站,下部是居民住家. 过去加油站渗漏的地下储油罐装在加油站

南部紧邻居民住家的位置. 地下水深度大概是 3 m. 地下水中监测到汽油的浮油. 所以,算是污染比较严重的场地. 居民住家有一个游泳池(见图 5). 池底深度大概是 4 m. 这就意味着池底低于地下水位,

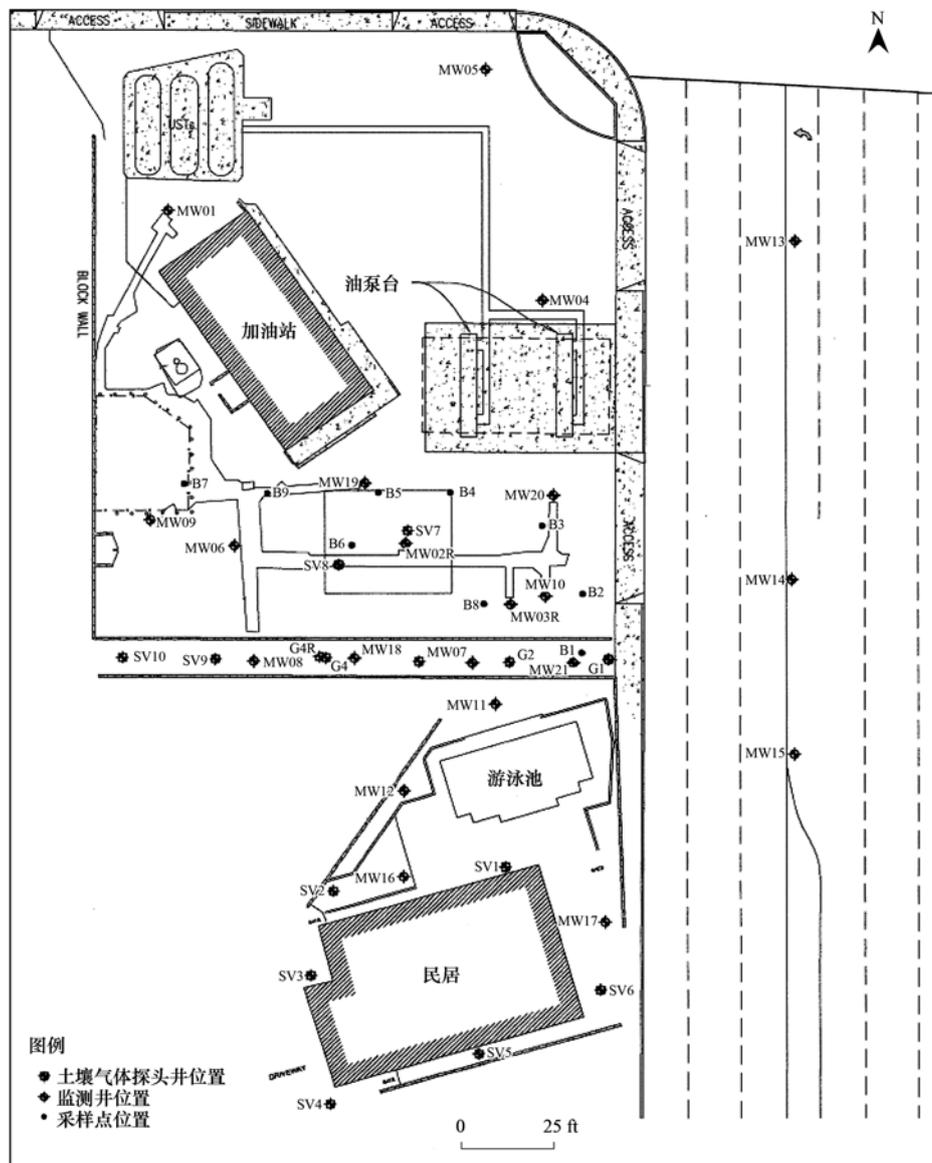


图 5 案例地图
 Fig. 5 Case map

因而游泳池切入地下水位。有可能造成浮油流入游泳池。这样造成社会影响就大了。

面对这个污染问题,政府机构要求责任方装监测井采样,包括到居民住家后院装井,确定污染羽,特别是浮油污染羽的范围,采取加大“双相”(即气相和液相)吸抽的方法同时清理土壤和地下水。清理效果还是显著的。以苯的地下水浓度为例,在居民住家后院的两口井(MW11和MW12),苯在MW11从2008年的 $1\ 670\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到2011年的 $0.65\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。另外,苯在MW12从2008年的 $12\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到2011年的 $0.48\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。浮油也看不到了。这是很好的清理结果。

在清理的同时,责任方也被要求做一个对于居民住家的人体健康风险评估。第一,责任方应用J&E模型。用 10^{-6} 作为苯污染物室内入侵风险的标准,用J&E模型反算回地下水应有的浓度。J&E模型结果是苯在浅层地下水($\sim 3\ \text{m}$)的浓度应该是小于 $16\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而比较在居民住家后院的两口井(MW11和MW12)中的2011年监测浓度分别为 $0.65\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.48\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这些浓度小于模型结果浓度 $16\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。所以认为苯污染物室内入侵的风险很小。第二,仅做数学模型分析是不够的。下一部要求是根据加州环保署土壤气体采样要求和指南(见3.2节),在居民住家后院取土壤气体样品做分析。土壤气体样品分析结果显示苯在土壤气体中浓度非常低,几乎测不到。所以这个结果进一步证实了数学模型的结果,即苯污染物室内入侵的风险很小。第三,责任方被要求做一个对此居民住家的总体风险评估。首先,评估了3个暴露途径,即:①皮肤接触土壤和摄入土壤(假设做工后没洗手);②摄入在居民住家后院种植的水果和蔬菜;③室内空气。有了暴露途径,再按3.1节中介绍的方法计算剂量。最后风险评估的计算结果为 1.2×10^{-8} ,即小于百万分之一的风险标准 10^{-6} 。总结来看,数学模型分析,实际居民住家后院土壤气体采样分析,最终考虑到3条暴露途径的风险评估计算都证实了同样的结果,即隔壁有渗漏汽油的加油站对此居民住家的人体健康负面影响风险很小。

6 结论

中国的污染场地修复行业正在兴起。场地修复的标准的制定是一个难题。说它是个难题,因为这个标准不仅牵涉到科学技术层面,也牵涉到政治、经济和管理层面。本文总结了美国加州的经验和思

路。首先场地清理需要考虑土壤和地下水,因为两者是联在一起的。其次是土壤气体取样在风险评估中的重要作用。研究发现挥发性污染物室内入侵风险评估对场地修复标准建立的作用。利用人体健康风险评估和风险管理来给场地修复定标准。最后,关注每个污染场地都有其特殊性,都有不同的污染物使用历史,不同污染物性质(例如:水溶、挥发性等),不同的土壤和水文地质环境,造成各样污染物的不同的迁移转化过程。所以在污染场地修复中,一定要考虑到此污染场地的特殊性来做风险管理和制定清理标准。一刀切的清理标准是不可行的。那么多干净才算干净呢?就是清理到残留污染物不再负面影响到人体健康和包括土壤和水体的自然环境。

参考文献:

- [1] 容跃. 美国加利福尼亚州水污染管理经验浅谈[J]. 科学对社会的影响, 2007, (S1): 46.
- [2] California Department of Toxic Substances Control (DTSC), Office of Human and Ecological Risk (HERO). Human health risk assessment (HHRA) note[EB/OL]. http://www.dtsc.ca.gov/AssessingRisk/upload/HHRA_Note1-2.pdf, 2014-09-30.
- [3] Department of Toxic Substances Control, California Environmental Protection Agency. Vapor intrusion mitigation advisory[EB/OL]. http://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/upload/VIMA_Final_Oct_2011.pdf, 2011-10.
- [4] Department of Toxic Substances Control, California Environmental Protection Agency. Vapor intrusion guidance[EB/OL]. http://www.dtsc.ca.gov/assessingrisk/upload/final_vig_oct_2011.pdf, 2011-10.
- [5] California Regional Water Quality Control Board, Los Angeles Region. Interim site assessment & cleanup guidebook[EB/OL]. http://www.waterboards.ca.gov/losangeles/water_issues/programs/remediation/brownfields/RBs%201996%20Guide%20Book1_1.pdf, 1996-05.
- [6] Johnson P C, Ettinger R A. Heuristic Model for Predicting the Intrusion Rate of Contaminant Vapors into Buildings [J]. Environmental Science & Technology, 1991, 25 (8): 1445-1452.
- [7] EPA. Screening level implementation of the johnson and ettinger vapor intrusion model [EB/OL]. https://www3.epa.gov/ceampubl/learn2model/part-two/onsite/JnE_lite.html, 2016.
- [8] California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control, Los Angeles Regional Water Quality Control Board, San Francisco Regional Water Quality Control Board. Advisory-active soil gas investigations[EB/OL]. https://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/upload/VI_ActiveSoilGasAdvisory_FINAL.pdf, 2015-07.
- [9] California State Water Resources Control Board. Low-threat underground storage tank case closure policy[EB/OL]. http://www.waterboards.ca.gov/ust/lt_cls_pley.shtml, 2012-08-17.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohé River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₂ ⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)