

我国土壤环境基准优先污染物的筛选及清单研究

葛峰^{1,2},徐珂珂^{1,2},云晶晶^{1,2},何跃^{1,2*},张小燕^{1,2},许琳玥^{1,2},张明珠^{1,2},王宁^{1,2} (1.环境保护部南京环境科学研究所,江苏南京 210042; 2.南京国环环境研究院有限公司,江苏南京 210042)

摘要: 基于国内外已有优先污染物的筛选方法,综合分析国内外相关污染物名录及文献资料,建立了我国土壤环境基准优先污染物的筛选程序、原则,筛选了我国土壤环境基准优先污染物清单.结果表明,本文筛选出的土壤环境基准优先污染物依次为滴滴涕、镉、苯并[a]芘、铅、多氯联苯、砷、铬、汞,建议我国未来土壤环境基准值的制定以优先污染物为基础,综合考虑土壤环境基准保护对象、社会发展需求及科技发展水平的影响,有针对性地展开研究工作.

关键词: 土壤环境基准; 污染物筛选; 层次分析法

中图分类号: X53,X32 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)11-4228-08

Studies on screening and list of priority pollutants in China's criteria research. GE Feng^{1,2}, XU Ke-ke^{1,2}, YUN Jing-jing^{1,2}, HE Yue^{1,2*}, ZHANG Xiao-yan^{1,2}, XU Lin-yue^{1,2}, ZHANG Ming-zhu^{1,2}, WANG Ning^{1,2} (1.Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 2.Nanjing Guohuan Institute of Environmental Research CO. LTD, Nanjing 210042, China). *China Environmental Science*, 2018,38(11): 4228-4235

Abstract: Based on methods for screening priority pollutants available in China and other countries, this paper comprehensively reviews pollutants lists and relevant literature, establishes the procedures and principles for screening priority pollutants based on the soil environmental criteria of China and makes a list of the priority pollutants identified through these procedures. The results indicate the following priority pollutants based on the soil environmental criteria of China: DDT, cadmium, benzo[a]pyrene, lead, polychlorinated biphenyl, arsenic and chromium mercury. It is recommended that the future soil environmental criteria of China should be developed on the basis of priority pollutants, and that well-targeted research should be conducted with an overall consideration of the protected objects of soil environmental criteria, demands of social development, and technological development level.

Key words: soil environmental criteria; screening of pollutants; analytic hierarchy process

土壤环境基准是指保障生态安全、人体健康和农产品质量安全等特定对象的土壤中污染物的最大允许含量^[1-4],是土壤环境标准制定、修订、土壤环境质量评价和控制的重要科学依据和基础^[5].欧美等发达国家土壤环境基准研究工作多起步于 20 世纪 80~90 年代,相关研究成果为本国土壤环境标准的制定提供了重要的科学依据^[6-8].相比之下,我国土壤环境基准的研究工作起步较晚.由于缺乏土壤环境基准的研究,1995 年颁发的土壤环境质量标准^[9](简称“95 标准”)只能以 20 世纪 80 年代土壤环境背景值和环境容量的研究成果及当时的食品卫生标准、饲料卫生标准为依据进行制定^[10-12].这一标准虽然在过去 20 年来发挥了重要作用,但已不能满足我国进一步发展的需要.因此,我国自 2006 年便启动了“95 标准”的修订工作,以土壤环境基准研究成果为基础,采用人体健康风险评估、生态风险评

估及统计的方法学展开相关研究.一方面,人体健康风险评估、生态风险评估与土壤环境基准研究方法一致,采用这些方法展开相关研究是一个相对缓慢的过程;另一方面,我国现有土壤环境基准研究工作由于缺乏统一的技术指南,导致研究成果参差不齐^[13-19],大大增加了数据筛选过程.这两个方面的原因间接导致了标准修订速度相对滞后,“超期服役”现象严重^[20].在土壤环境基准方面,随着我国生态安全、人体健康及农产品安全土壤环境基准制定技术指南的制定和发布,针对具体污染物基准值的研究工作也将陆续展开.但是土壤环境基准研究需要耗费大量的人力、物力及财力,同时开展所有污染物的基准研究显然是不可能的,因此亟需筛选出一批土

收稿日期: 2018-04-19

基金项目: 国家环境基准管理(2023011002)

* 责任作者, 副研究员, heyue@nies.org

壤环境基准优先污染物,以支撑我国下一阶段基准研究工作的开展。

在优先污染物的筛选方法上,现阶段我国尚无符合国情的土壤环境基准优先污染物筛选机制,需要借鉴发达国家较为成熟的筛选方法^[21-23]、我国大气环境健康基准^[24]及水环境基准优先污染物^[25]的筛选方法展开研究。作为一个复杂的、三相物质的分散系统,在借助国内外已有优先污染物筛选方法时要充分考虑土壤的复杂性^[26-27],充分结合我国发展需求,构建符合我国国情的土壤环境基准优先污染物清单,支撑下一阶段土壤环境基准工作的展开。

1 土壤环境基准优先污染物的筛选程序

2014年《全国土壤污染状况调查公报》^[28]显示,我国耕地土壤环境质量堪忧,工业废弃地土壤环境问题突出。在土壤环境基准优先污染物筛选过程中,要优先考虑这些在我国检出率高、环境问题突出的污染物,优先关注对生态安全、人体健康和农产品安全具有较大风险的污染物,从而保证筛选出的优先污染物满足国家相关发展规划的需求。本文借鉴美国毒物管理委员会和美国环保署的国家优先处理场址优先污染物的筛选排序程序和荷兰、加拿大等欧美发达国家优先污染物筛选原则^[29-34],提出了我国土壤环境基准优先污染物的筛选程序,包括:

1)初筛:①通过资料调研掌握美国、荷兰、加拿大、英国、日本等发达国家已制定土壤基准(或标准)的污染物名单;②通过资料调研等方式掌握我国已发布的水中优先污染物黑名单^[35]、《全国土壤污染状况调查公报》^[28]、国内土壤重大污染事件、《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)^[36]、《土壤环境质量·农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[37]、《土壤环境质量·建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)^[38]、《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332-2006)^[39]、《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)^[40]、《北京市场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T811-2011)^[41]、《土壤重金属风险评价筛选值·珠江三角洲》(DB44/T1415-2014)^[42]、《河北省农田土壤重金属污染修复技术规范》(DB13/T2206-2015)^[43]、《重金属污染场地土壤修复标准》(DB43/T1165-2016)^[44]、《浙江省农产品产地环境质量安全

标准》(DB33/T558-2005)^[45]和《上海市场地土壤环境健康风险评估筛选值(试行)》(沪环保防[2015]366号)^[46]中出现频率较高的污染物名单;③综合分析①②所获得的名单及人类致癌物和可能致癌物清单^[47],进行污染物初筛,建立初筛名单。

2)复筛:采用层次分析^[48-50]及等级赋值计分法^[51]对初筛名单中的污染物进行赋值排序,最终筛选出我国土壤环境基准优先污染物清单。

2 土壤环境基准优先污染物的筛选

2.1 土壤环境基准优先污染物初筛

2.1.1 初筛原则 我国土壤环境基准优先污染物的初筛原则如下:

1)国外 10 个国家优先污染物名录中出现 3 次以上及国外 21 个国家土壤环境基准或标准中出现 3 次以上^[33]的污染物。

2)在人类致癌或可能致癌污染物清单和我国各类污染物清单及共计 17 项统计资料中出现频率大于 6 次的污染物。

2.1.2 国外各类污染物清单筛选 由于欧美各国土壤类型、土地利用方式及土壤管理政策不同,导致各国在制定基准时关注的污染物类型存在差异^[8,52-55]。对欧美发达国家已制定土壤环境基准的污染物进行统计分析发现,美国、荷兰、加拿大、英国等发达国家已制定土壤环境基准值的污染物类型主要包括重金属及其他无机污染物、挥发性有机污染物、半挥发性有机污染物、农药/多氯联苯等有机污染物 4 大类(表 1)。

表 1 发达国家土壤环境基准污染物的类型及数量
Table 1 The type and quantity of pollutants identified by developed countries' soil environmental criteria

国家	无机污染物	挥发性有机污染物	半挥发性有机污染物	农药/多氯联苯等其他有机物
美国	16	32	44	15
荷兰	17	19	36	24
加拿大	15	7	5	2
英国	5	4	1	1
日本	11	9	0	6
德国	12	3	6	7

2.1.3 我国各类污染物清单筛选 统计分析我国 17 类国内数据资料中出现的污染物类型(表 2),共得到 90 种污染物,其中有机污染物 69 种,重金属和无

续表 2

序号	污染物名称	国外 10 个国家优先污染物名录 [21,31,32,61-63]	国外 21 个国家土壤基准/标准 [52,64-67]	我国水环境优先污染物黑名单 [3,5]	人类致癌和可能致癌物清单 [47]	搬迁工业企业场地污染物	全国土壤污染状况调查公报 [28]	国内土壤重大污染事件出现的污染物 [36]	土壤环境监测技术规范 [36]	土壤环境质量农用地及建设用地土壤污染风险管控标准(试行) [37-38]	食用农产品产地环境评价标准 [39]	污染场地风险评估技术导则 [40]	北京市土壤环境风险评估技术导则 [41]	《土壤重金属污染修复技术指南》 [42]	《农田土壤重金属污染修复技术规范》 [43]	《湖南省重金属污染修复技术规范》 [44]	《浙江省农产品产地环境质量安全标准》 [45]	上海市土壤环境健康风险评估筛选值(试行) [46]
52	钴		√			√			√									√
53	苯并[g,h,i]芘		√	√		√							√					√
54	邻二甲苯			√		√			√									√
55	间二甲苯			√		√			√									√
56	对二甲苯			√		√			√									√
57	1,1,2,2-四氯乙烷			√		√			√									√
58	铊	√	√	√				√										√
59	苯乙烯	√	√			√			√									√
60	氯乙烯	√	√		√				√									√
61	1,2-二氯乙烯	√	√						√			√						√
62	苯酚	√	√	√					√				√					√
63	氯苯	√	√	√					√				√					√
64	DDE	√	√						√				√					√
65	对二氯苯		√	√					√									√
66	萘		√			√						√						√
67	菲		√			√							√					√
68	硒		√					√				√						√
69	钼		√					√		√								√
70	锡		√			√							√					√
71	邻二氯苯		√	√					√									√
72	六氯丁二烯	√				√			√									√
73	狄氏剂	√	√										√					√
74	艾氏剂	√	√										√					√
75	异狄氏剂	√	√										√					√
76	七氯	√	√						√			√						√
77	二恶英/呋喃	√	√			√							√					√
78	总石油烃	√	√			√												√
79	丙酮	√	√									√						√
80	石棉	√			√								√					√
81	林丹		√										√					√
82	硫丹		√						√									√
83	N-亚硝基二甲胺			√	√													
84	间甲酚(甲酚)			√														√
85	钛														√			√
86	敌百虫			√		√												
87	二甲苯		√			√												
88	丙烯腈			√														
89	甲醛				√													
90	毒杀芬											√						
91	丙烯醛	√																
92	钡		√															

注:搬迁工业企业场地污染物及国内土壤重大污染事件出现的污染物两列所使用数据主要参考自研究报告《我国环境基准技术框架与典型案例预研究》,因该报告未公开,此处不作为参考文献列出。

表 3 我国土壤环境基准优先污染物初筛名单
Table 3 Initial screened priority pollutants list of China's soil environmental criteria

污染物类型	优先污染物
重金属及其他无机污染物	砷、铬(包括六价铬及三价铬)、镉、铅、汞、铜、镍和氰化物
半挥发性有机污染物	苯、苯并[a]芘
农药/多氯联苯等有机污染物	DDTs、HCHs、多氯联苯

表 4 污染物等级赋值计分法
Table 4 Grade assignment and scoring method of pollutants

分值	致癌性(IRAC)	急性毒性(mg/kg)	生殖毒性	生物富集性	检出率(%)
4	-	-	-	$\lg K_{ow} > 5$ 或 $BCF > 10000$	-
3	1 类和 2A 类	哺乳动物: $LD_{50} < 5$	a	$4 \leq \lg K_{ow} < 5$ 或 $1000 \leq BCF < 10000$	≥ 75
2	2B 类	哺乳动物: $5 < LD_{50} \leq 500$	b	$3 \leq \lg K_{ow} < 4$ 或 $100 \leq BCF < 1000$	50~75
1	3 类	哺乳动物: $LD_{50} > 500$	c	$\lg K_{ow} < 3$ 或 $BCF < 100$	25~50
0	4 类	证据显示可忽略	d	无数据	≤ 25

注:a存在正面证据证明会降低生育率,具有胚胎毒性;b 存在证据证明可能会降低生育率,具有胚胎毒性;c 可能伤害哺乳期婴儿;d无数据或无生殖毒性证据。

表 5 初筛名单中污染物的赋值排序
Table 5 Assignment and sorting of pollutants in the initial screened list

污染物	致癌性		急性毒性		检出率		生殖毒性		生物富集性		总分
	级别	得分	LD ₅₀ (mg/kg)	得分	部分工业企业土壤污染物 (%)	得分	毒性资料	得分	$\lg K_{ow}$ (非重金属类); BCF(重金属)	得分	
滴滴涕	2B	2	87	2	9	0	a	3	6.91	4	11
镉	1	3	225	2	39	1	a	3	0.138	1	10
苯并[a]芘	1	3	500	1	14	0	b	2	6.11	4	10
铅	2B	2	217	2	53	2	b	2	7.6×10^{-04}	1	9
多氯联苯	1	3	4046	1	8	0	c	1	5.96	4	9
砷	1	3	145	2	33	1	b	2	0.68	1	9
铬	1	3	147-316	2	32	1	b	2	1.0×10^{-04}	1	9
汞	3	1	43	2	29	1	a	3	0.62	1	8
HCHs	2B	2	177	2	8	0	c	1	3.80	2	7
镍	2B	2	250	2	20	0	b	2	0.05	1	7
苯	1	3	930	1	15	0	b	2	2.13	1	7
铜	-	-	55	2	41	1	d	0	0.08	1	4
氰化物	-	-	-	-	3	0	d	0	-	0	0

注:1.在进行污染物赋值排序时,滴滴涕以工业滴滴涕中占比最高的成分p,p'-DDT作为代表;多氯联苯(PCB)综合考虑7种同系物PCB 1016、PCB 1221、PCB 1232、PCB1242、PCB1248、PCB 1254、PCB 1260的影响;HCHs以其毒性最大的 α -HCH作为代表污染物;“-”表示暂无数据。2.由于《全国土壤污染状况调查公报》^[28]中公布的污染物数目相对有限,此表以部分工业企业土壤污染物检出率进行评估,数据涵盖来源于场地调查、风险评估、场地修复报告和国内文献数据的8大类共66个场地,其中包括5家电子废物拆解场地、13家化学原料及化学品制造业场地、12家有色金属矿区及周边场地、7家农药生产企业、3家煤炭开采和洗选业场地、7家石油加工及炼焦工业场地、5家电力热力生产和供应业场地及14家其他类型企业场地。3.检出率=100%×土壤中可检出该污染物的场地数量/66,其中土壤中可检出该污染物的场地是指在现有检测分析方法下,所采集土壤样品中的污染物可被分析仪器检出的场地。4.毒性及生物富集性数据来源于PubChem数据库^[60]及美国有毒物质和疾病登记署^[68]。

表 6 我国土壤环境基准优先污染物复筛清单
Table 6 Rescreened priority pollutants list of China's soil environmental criteria

污染物类型	优先污染物
重金属及其它无机污染物	砷、铬、镉、铅、汞
半挥发性有机污染物	苯并[a]芘
农药/多氯联苯及其他	滴滴涕、多氯联苯

3 结语

3.1 筛选出 8 种急需制定土壤环境基准值的污染物,依次为滴滴涕、镉、苯并[a]芘、铅、多氯联苯、砷、铬、汞。

3.2 由于土壤本身具有的复杂性,不同污染物在土

壤中的毒性效应存在差异,首要危害的环境对象也有所不同.未来研究的过程中,建议以本文筛选出的8种污染物为基础,结合土壤环境基准值制定时的首要考虑的保护对象,综合社会发展现状及需求,分阶段分类型开展污染物的土壤环境基准值制定工作.

3.3 在分阶段分类型开展污染物的土壤环境基准值制定工作的过程中,应注重基础科学的研究.对于重金属等能够在植物中富集的污染物,应综合考虑土壤氧化还原电位、pH值、阴离子交换量、土壤质地及共存离子等对重金属活性及土壤环境基准值的影响.

参考文献:

- [1] 徐猛,颜增光,贺萌萌,等.不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示[J].环境科学,2013,34(5):1667-1678.
- [2] 周启星,滕涌,展思辉,等.土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题[J].环境科学学报,2014,33(1):1-14.
- [3] 郑丽萍,冯艳红,张亚,等.基于生态风险的土壤环境基准研究概况[C].中国环境科学学会学术年会,2016:3713-3716.
- [4] 生态环境部.关于征求《生态安全土壤环境基准制定技术指南(征求意见稿)》等三项国家环境保护标准意见的函[EB/OL].http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/stbgth/201808/t20180803_447663.htm.
- [5] 吴丰昌,孟伟.中国环境基准体系中长期路线图[M].北京:科学出版社,2014:9-13.
- [6] Otte, P, Lijzen, J P A, Otte J G, et al. Evaluation and revision of the CSOIL parameter set: proposed parameter set for human exposure modelling and deriving Intervention Values for the first series of compounds [R]. Dutch:RIVM, 2001.
- [7] Canada C E. Review and recommendations for Canadian interim environmental quality criteria for contaminated sites [J]. Environment Canada Scientific, 1991:197.
- [8] CCME. A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines [EB/OL]. https://www.ccme.ca/files/Resources/supporting_scientific_documents/sg_protocol_1332_e.pdf.
- [9] GB15618-1996 土壤环境质量标准 [S].
- [10] 王国庆,骆永明,宋静,等.土壤环境质量指导值与标准研究 I. 国际动态及中国的修订考虑 [J]. 土壤学报, 2005,42(4):666-673.
- [11] 王国庆,林玉锁.土壤环境标准值及制订研究:服务于管理需求的土壤环境标准值框架体系 [J]. 生态与农村环境学报, 2014,30(5):552-562.
- [12] 宋静,骆永明,夏家淇.我国农用地土壤环境基准与标准制定研究 [J]. 环境保护科学, 2016,42(4):29-35.
- [13] 丁昌峰.根茎类蔬菜土壤镉铅铬汞砷安全阈值研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [14] 刘克.我国主要小麦产地土壤镉和铅的安全阈值研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [15] 蒋宝.土壤铜镍长期老化行为及有效态生态阈值研究 [D]. 北京:中国农业大学, 2017.
- [16] 和君强,贺前锋,刘代欢,等.土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型——以长沙某地水稻土为例 [J]. 土壤学报, 2017,54(5):1181-1194.
- [17] Cao H C, Luan Z Q, Wang J D, et al. Potential ecological risk of cadmium, lead and arsenic in agricultural black soil in Jilin Province, China [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2009,23(1):57-64.
- [18] Lu J H, Yang X P, Meng X C, et al. Predicting cadmium safety thresholds in soils based on cadmium uptake by Chinese cabbage [J]. Pedosphere, 2017,27(3):475-481.
- [19] Ding C F, Ma Y B, Li X G, et al. Determination and validation of soil thresholds for cadmium based on food quality standard and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2017,619-620:700-706.
- [20] 周裕涵,刘洋.我国土壤质量相关标准规范现状 [J]. 能源与环境, 2018,(2):10-11,14.
- [21] Ministry of the Environment Government of Japan. Methods for the risk assessment of priority assessment chemical substances [EB/OL]. http://www.env.go.jp/en/chemi/chemicals/assessment_chemical_substances.pdf.
- [22] E M, Snyder, S A, Snyder, J P, Giesy, S A, Blonde, G K, Hurlburt, C L, Summer, R R, Mitchell, D M, Bush. Scram: a scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American Great Lakes. Part I: structure of the scoring and ranking system [J]. Environmental science and pollution research international, 2000,7(1):52-61.
- [23] Haelst A G V, Hansen B G. Priority setting for existing chemicals: Automated data selection routine [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2010,19(9):2372-2377.
- [24] 邵桐,苗晓燕,周志祥,等.我国大气环境健康基准目标污染物筛选方法及候选清单研究 [J]. 环境化学, 2017,36(11):2386-2397.
- [25] 朱菲菲,秦普丰,张娟,等.我国地下水环境优先控制有机污染物的筛选 [J]. 环境工程技术学报, 2013,3(5):443-450.
- [26] 应蓉蓉,林玉锁,段光明.土壤环境保护标准体系框架研究 [J]. 环境保护, 2015,43(7):60-63.
- [27] 林玉锁.我国土壤污染问题现状及防治措施分析 [J]. 环境保护, 2014,42(11):39-41.
- [28] 生态环境部,自然资源部.全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. <http://www.gov.cn/foot/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>.
- [29] Greim H, Ahlers J, Bias R, et al. Priority setting for the evaluation of existing chemicals the approach of the German advisory committee on existing chemicals of environmental relevance (BUA) [J]. Chemosphere, 1993,26(9):1653-1666.
- [30] Swanson M B, Davis G A, Kincaid L E, et al. A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 1997,16(2):372-383.
- [31] Ian Martin C C. Compilation of data for priority organic pollutants for derivation of soil guideline values [R]. U K: Environment Agency, 2008.
- [32] CCME. Canadian Soil Quality Guidelines for Barium: Protection of Human Health Scientific Criteria Document [R]. Canadian: CCME, 2013.

- [33] 环境保护部科技标准司. 国内外化学污染物环境与健康风险排序比较研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 7-16.
- [34] CCME. Environmental quality guideline development process [EB/OL]. https://www.ccme.ca/files/Resources/environ_qual_guid/eqgdlnedvlpmtproc_final_e.pdf.
- [35] 周文敏, 傅德黔, 孙宗光. 水中优先控制污染物黑名单 [J]. 中国环境监测, 1990, 6(4): 1-3.
- [36] HJ/T166-2004 土壤环境监测技术规范 [S].
- [37] GB15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- [38] GB36600-2018 土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- [39] HJ332-2006 食用农产品产地环境质量评价标准 [S].
- [40] HJ25.3-2014 污染场地风险评估技术导则 [S].
- [41] DB11/T811-2011 北京市场地土壤环境风险评价筛选值 [S].
- [42] DB44/T1415-2014 土壤重金属风险评价筛选值珠江三角洲 [S].
- [43] DB13/T2206-2015 河北省农田土壤重金属污染修复技术规范 [S].
- [44] DB43/T1165-2016 重金属污染场地土壤修复标准 [S].
- [45] DB33/T558-2005 浙江省农产品产地环境质量安全标准 [S].
- [46] 上海市环境保护局. 上海市市场地土壤环境健康风险评估筛选值 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/stbgh/201808/t20180803_447663.htm.
- [47] 国家食品药品监督管理总局. 国际癌症研究机构致癌物清单 [EB/OL]. <http://samr.cfda.gov.cn/WS01/CL1991/215896.html>.
- [48] 林 卡, 李德成, 张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析 [J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 736-744.
- [49] 李丽君. 长期施用堆肥对曲周农田土壤健康影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [50] Vaidya O S, Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [51] Council T. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy [J]. Official Journal, 2000, 22(22).
- [52] Carlon C, D'Alessandro M, Swartjes F. Derivation methods of soil screening values in Europe: a review and evaluation of national procedures towards harmonization [R]. Europe: International organization-network or project, 2007.
- [53] Elzen M D, Berk M, Faber A, et al. FAIR 1.0 (Framework to Assess International Regimes for differentiation of commitments): an interactive model to explore options for differentiation of future commitments in international climate policy making [R]. Dutch: CCME, 2001.
- [54] EPA US. Soil screening guidance: technical background document: Part 1 [EB/OL]. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175231.pdf>.
- [55] Daprile L, Tatano F, Musmeci L. Development of quality objectives for contaminated sites: state of the art and new perspectives [J]. International Journal of Environment & Health, 2007, 1(1): 120-141.
- [56] Donald Machay, Wan-ying Shiu, Kuo-ching Ma, et al. Handbook of physicalchemical properties and environmental fate for organic chemicals [M]. New York: CRC Press, 2006.
- [57] SOMSDS. 化学品 MSDS [EB/OL]. <http://www.somds.com/>.
- [58] U.S.EPA. Integrated Risk Information System [EB/OL]. <https://www.epa.gov/iris>.
- [59] U.S.National Center for Biotechnology Information [EB/OL]. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.
- [60] U.S.National Library of Medicine [EB/OL]. <https://toxnet.nlm.nih.gov/>.
- [61] US.EPA and ATSDR. The ATSDR 2017 substance priority list [EB/OL]. <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/>.
- [62] European commission. Priority substances under the water framework directive [EB/OL]. http://ec.europa.eu/environment/water/water-dangersub/pri_substances.htm#list.
- [63] Government of Canada, Canadian environmental protection. Act priority substances list [EB/OL]. https://www.canada.ca/en/sr/srb.html?cdn=canada&st=s&num=10&langs=en&st1rt=1&s5bm3ts21rch=x&q=Priority+Substances+List+Assessment+Report&_charset_=UTF-8&wb-srch-sub=.
- [64] U.S.EPA. Regional screening levels (rsls) - generic tables [EB/OL]. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/197233.pdf>.
- [65] UK. Environment Agency. Soil Screening values for use in UK ecological risk assessment [EB/OL]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/657723/Soil_screening_values_for_assessing_ecological_risk_-_report.pdf.
- [66] CCME. Canadian environmental quality guidelines summary table [EB/OL]. <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html>.
- [67] RIVM. Proposal for intervention values soil and groundwater for the 2nd, 3rd and 4th series of compounds [EB/OL]. <https://www.rivm.nl/dsresource?objectid=0c3f8229-8459-4c57-9e7f-773e2f9cef7e&type=org&disposition=inline>.
- [68] U.S. ATSDR. Toxic substances portal [EB/OL]. <https://www.atsdr.cdc.gov/>.

作者简介: 葛 峰(1981-),男,江苏扬中人,副研究员,博士,主要从事土壤微生物研究.发表论文 10 余篇.