

王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2365–2378.

WANG Yu-jun, WU Tong-liang, ZHOU Dong-mei, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2365–2378.

农田土壤重金属污染评价研究进展

王玉军¹, 吴同亮^{1,2}, 周东美¹, 陈怀满¹

(1.中国科学院南京土壤研究所 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为科学合理地评价土壤中重金属污染问题,并为土壤污染修复和土地资源可持续利用提供依据,利用文献计量学方法,结合 CiteSpace 软件分析了近 25 年来国内外土壤重金属污染评价相关领域的研究热点和发展方向的演进,发现人体健康及生态风险评价、重金属在土壤中形态分析及污染源解析等问题受到较为广泛的关注。综合分析了内梅罗综合污染指数法、富集因子法、地累积指数法和潜在生态危害指数法等四种常用的指数评价法在实际评价中的优势与不足,并发现现有的污染指数评价方法侧重土壤重金属超标问题,对农产品质量涉及较少,而土壤和农产品综合质量指数法克服了现有评价方法存在的问题,将土壤重金属污染与农产品品质有机结合,同时考虑到土壤背景值、重金属形态等,可更为全面地评价土壤重金属污染。

关键词:重金属;土壤;农田;农产品;污染评价

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)12-2365-14 doi:10.11654/jaes.2017-1317

Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis

WANG Yu-jun¹, WU Tong-liang^{1,2}, ZHOU Dong-mei¹, CHEN Huai-man¹

(1.Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The evaluation of heavy metal pollution in agricultural soils is one of the important issues in the area of agricultural production and food safety. A scientific and rational assessment for heavy metal pollution in soils reflects the condition of soil environmental quality, and provides the basis for soil remediation and sustainable utilization of land resources. In the past 25 years, a variety of evaluation methods have been proposed, in the present study, the development of research hotspots and fields in the area of soil heavy metal evaluation were elucidated based on the bibliometrics analysis and CiteSpace software. The results suggested that the human health and ecological risk assessment have been received much attention, and the source identification, the distribution and speciation of soil heavy metals have been widely concerned. Both of the advantages and disadvantages of four commonly applied pollution index evaluations such as Nemerow index, enrichment factor, geoaccumulation index and potential ecological risk index were discussed. These index evaluation only focuses on the accumulation of heavy metals in the soil, but the quality of agricultural products are less concerned. The comprehensive index combined soil environmental quality and agricultural products quality overcome their disadvantages, which incorporating simultaneously the contents of heavy metals in soil and agricultural products, the soil element background values, the safety standard for maximum levels of contaminants in agricultural products, and the element valence effect in the evaluation of the soil environmental quality standard.

Keywords: heavy metals; soils; farmland; agricultural products; pollution evaluation

收稿日期:2017-09-25 录用日期:2017-10-13

作者简介:王玉军(1977—),男,研究员,主要从事重金属的环境土壤化学过程研究。E-mail:yjwang@issas.ac.cn

基金项目:重点研发计划项目(2016YFD0800407);国家自然科学基金项目(41422105);中国科学院南京土壤研究所领域前沿项目(ISSASIP1612);中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(2011226)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0800407); The National Natural Science Foundation of China(41422105); The Knowledge Innovation Program of Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences(ISSASIP1612); Youth Innovation Promotion Association CAS(2011226)

科学的土壤重金属污染评价方法能较好地评价土壤中重金属污染的程度或空间分布、相应的生态效应等,是保障粮食安全和生态健康的基础。目前土壤重金属污染评价的方法众多,其中以指数法最为常见,如内梅罗综合污染指数法^[1-7]、富集因子法^[8-13]、地累积指数法^[14-16]和潜在生态危害指数法^[17-22];也有以指数法为基础的模糊数学模型^[23]、灰色聚类法^[24]等模型指数法;还有基于地理信息系统(GIS)的地统计学评价法^[25-26]以及人体健康风险评价^[27]等综合方法。

正确评价土壤中重金属污染状况,需要分清土壤沾污及土壤污染的概念。在陈怀满等著《环境土壤学(第二版)》^[28]一书中有对二者的清晰定义,土壤沾污指由人类活动而引入土壤的外源物质或制剂的现象;土壤污染则指人为因素有意或无意地将对人类本身和生命体有害的物质或制剂施加到土壤中,使其增加了新的组分或某种成分的含量明显高于原有含量、并引起现存的或潜在的土壤环境质量恶化和相应危害的现象。可见土壤沾污是普遍存在的现象,而土壤污染则是土壤沾污发展到一定限度的不利后果。土壤负载容量也应是土壤重金属污染评价中的一个重要指标或必需因素,其可以提供一种污染物的含量在污染物临界值(基准值、标准值)和土壤背景值(自然质量基准值、标准值)之间的动态平衡的范围^[29],在保证土壤的自然环境质量的同时,维持土壤资源的可持续利用性,可指示该土壤对外源污染物的缓冲能力;评价方法中加入土壤负载容量因子的考量还可以对高背景值土壤中重金属含量在评价指数中的权重进行评估。在土壤重金属污染评价尤其限定农田土壤重金属污染评价时,将土壤部分与生物效应部分相结合,即在评价方法中同时涵盖样点土壤中重金属含量及该点位上所种植农作物中重金属含量,亦可得出更加实际合理的评价结果。

本文将利用文献计量学软件 CiteSpace^[30],可视化分析近 25 年来国内外土壤重金属污染评价领域中的关键词共现网络,以期得到本时间段内该研究领域的研究热点和发展方向,并通过关键词共现频率观察评价方法和手段的演变,综合分析常用指数评价法在实际污染评价中的优点与不足,为科学评价土壤重金属污染提供理论与技术支撑。

1 研究方法

本研究采用的 CiteSpace(5.0.R2.SE.11.3.2016)版本,是一种用于分析和可视化共引网络的 Java 应

用程序^[30]。为了可视化分析近 25 年来(1992—2016)有关重金属土壤污染评价方法的演变过程,我们分时段分析发表论文中关键词的时序差异、聚类结果等,从而更加清晰地认识该领域的发展方向及热点分布情况。

为了从文献计量学角度探讨近 25 年来重金属土壤污染评价方式的研究特点,本文将研究工作范围限定在土壤(soil*),并选择了能够涵盖土壤污染中大多数种类的重金属及应用较为广泛的以几种土壤重金属污染评价方式为核心关键词组合,制定英文检索式。利用美国科学情报所(Institute for Scientific Information, ISI)出版的 Web of Science 核心合集数据库,对 1992—2016 年的“文章(ARTICLE)”进行检索。检索式为:"soil*" AND ("trace metal*" OR "heavy metal*" OR "trace element*" OR "cadmium" OR "Cd" OR "copper" OR "Cu" OR "lead" OR "Pb" OR "zinc" OR "Zn" OR "tin" OR "Sn" OR "nickel" OR "Ni" OR "antimony" OR "Sb" OR "mercury" OR "Hg" OR "cobalt" OR "Co" OR "bismuth" OR "Bi" OR "arsenic" OR "As") AND ("pollut* assessment*" OR "pollut* evaluation*" OR "contaminat* assessment*" OR "contaminat* evaluation*" OR "single factor index" OR ((single factor) NEAR index) OR "Nemerow index" OR (Nemerow NEAR index) OR "pollution load index" OR "geo accumulation index" OR "geo?accumulation index" OR "enrichment factor*" OR "potential ecological risk" OR (GIS NEAR pollution) OR "GIS?based pollution" OR "health risk assessment*" OR "health risk evaluation*" OR "environment* risk evaluation*" OR "environment* risk assessment*"),共检索到相关国际英文文献 2671 篇。

同时,利用中国知网 CNKI,对 1992—2016 年该领域文献进行检索,并限定文献分类目录为“环境科学与资源利用”、“农业基础科学”,期刊类别为核心期刊。检索式为:SU=‘土壤’and (SU=‘重金属’ or SU=‘镉’ or SU=‘Cd’ or SU=‘铜’ or SU=‘Cu’ or SU=‘铅’ or SU=‘Pb’ or SU=‘锌’ or SU=‘Zn’ or SU=‘锡’ or SU=‘Sn’ or SU=‘镍’ or SU=‘Ni’ or SU=‘锑’ or SU=‘Sb’ or SU=‘汞’ or SU=‘Hg’ or SU=‘钴’ or SU=‘Co’ or SU=‘铋’ or SU=‘Bi’ or SU=‘砷’ or SU=‘As’) and (SU=‘污染评价’ or SU=‘单因子*’ or SU=‘内梅罗*’ or SU=‘污染负荷*’ or SU=‘地累积*’ or SU=‘潜在生态危害*’ or SU=‘模糊数学*’ or SU=‘灰色聚类’ or SU=‘地统计学*’ or SU=‘健康风险评价’ or SU=‘环境

风险评价'),共检索到中文文献 3665 篇。

工程文件参数设置为 LRF=3、LBY=8、e=1.0,其余参数为软件默认;节点类型选择 Keyword(关键词),网络修剪方式选择 Pathfinder(寻径)、Pruning sliced networks(修剪每篇网络)、Pruning the merged network(修剪合并网络),其余默认。结合关键词不同时间段出现频率的高低以及图谱质量考虑,本文将研究时间分为 1992—2001、2002—2011、2012—2016 三段,以期通过不同时间段聚类图谱及关键词列表的变化,分析该领域发展态势及演变趋势。各时间段数据筛选标准如表 1 所示。

表 1 各时间段数据筛选标准

Table 1 Standards for data filter in different time periods

数据来源 Data sources	时间分布 Time period	阈值选择 Threshold selection
WoS	1992—2001	c, cc, ccv(2, 3, 15; 2, 3, 18; 2, 2, 20)
	2002—2011	c, cc, ccv(3, 3, 15; 4, 5, 18; 5, 6, 20)
	2012—2016	c, cc, ccv(4, 5, 15; 7, 7, 18; 9, 10, 20)
CNKI	1992—2001	TOP 25
	2002—2011	c, cc, ccv(2, 3, 15; 3, 3, 18; 4, 5, 20)
	2012—2016	c, cc, ccv(3, 4, 15; 4, 5, 18; 4, 5, 20)

2 结果与讨论

2.1 近 25 年重金属土壤污染评价方法之文献计量学分析

2.1.1 国际该领域研究方向及热点

通过 Web of Science 检索结果中的年份发文统计,得出 1992—2001 年发文 207 篇,2002—2011 年发文 951 篇,2012—2016 年发文 1513 篇,分别占近 25 年发文量的 7.8%、35.6%、56.6%,尤其 2012—2016 年的 5 年发文总和超过前 20 年,说明土壤重金属污染评价越来越受到学者关注,近年发展迅猛。

利用 CiteSpace 对不同时间段关键词共现关系进行可视化分析,再借助软件聚类功能得出相应聚类,并自行对所得聚类进行精简归纳,得出各时间段关键词共现图谱,如图 1 所示。对应时间区间的关键词 TOP 25 关键词列表如表 2 所示。

从图 1a 可见 1992—2001 年间文献关键词共形成三个相对独立的聚类圈,分别为“重金属环境富集及风险评价”、“环境中重金属形态及环境行为”、“基于地理信息系统污染评价”。利用地统计学相关的地理信息系统(geographic information system)进行土壤重金属污染评价为一种重要方式,其次富集因子(en-

richment factor)、环境风险评价(environmental risk assessment)和健康风险评价(health risk assessment)等都是较为广泛采用的评价方法;铅(lead)和镉(cadmium)为该图中较关键节点,且为出现频率最高的重金属种类,同铅节点相连的还有儿童(children)和健康风险评价两个重要节点,说明铅与基于人体的健康风险评价在文献中相伴出现,受到研究者的广泛重视。

2002—2011 年该领域国际 SCI 文章研究热点关键词聚类如图 1b 所示,聚类分别为“重金属形态分析及风险评价”、“环境中重金属分布与富集”、“大气污染源与土壤重金属污染”。同上个 10 年相比,富集因子评价方式成为本时间段主要评价方法,人体健康风险评价方式应用逐渐增加。除铅镉外,还有锌(zinc)、铜(copper)两种金属离子也是当时研究热点。图 1b 还反映出各风险评价方法更加注重形态(speciation)研究,与之相呼应的还有提取(extraction)、分级提取(sequential extraction)、分级(fractionation)、生物可利用性(bioavailability)等关键词,这也符合研究者对形态深刻影响重金属的毒性、环境行为及归趋的重要认知。随之发展出一系列浓度和形态分析方法,如“重金属形态分析及风险评价”聚类中出现预富集(preconcentration)、硅胶(silica gel)、固相萃取(solid phase extraction)、固相微萃取(solid phase microextraction)等预处理方式,以及气相色谱(gas chromatography)、等离子体质谱(plasma mass spectrometry)、原子吸收光谱(atomic absorption spectrometry)等形态、浓度测定方法,可见新技术、新方法的引入为重金属污染评价的科学性、准确性提供了有力支撑。大气污染(air pollution)、源解析(source apportionment、source identification)、颗粒物(particulate matter)等关键词在此阶段形成聚类,说明研究者已经认识到大气颗粒物沉降是土壤重金属污染的重要源头。

2012—2016 年聚类结果如图 1c 所示,聚类分别为“重金属形态及生物累积”、“城市与农田重金属污染”、“重金属评价方法应用”、“大气污染与土壤重金属污染”。由表 2 右栏可知,同过去 10 年相比,人体健康风险评价成为土壤重金属污染主要评价手段,潜在生态风险评价(potential ecological risk)也成为研究主流,说明土壤重金属污染评价逐渐与人体健康及其生态效应相关联,体现污染评价从单纯土壤超标过渡到生物及人体危害的发展趋势。除此之外“重金属评价方法应用”聚类中还出现了地累积指数(geoaccumulation index)、污染负荷指数(pollution load index)等之

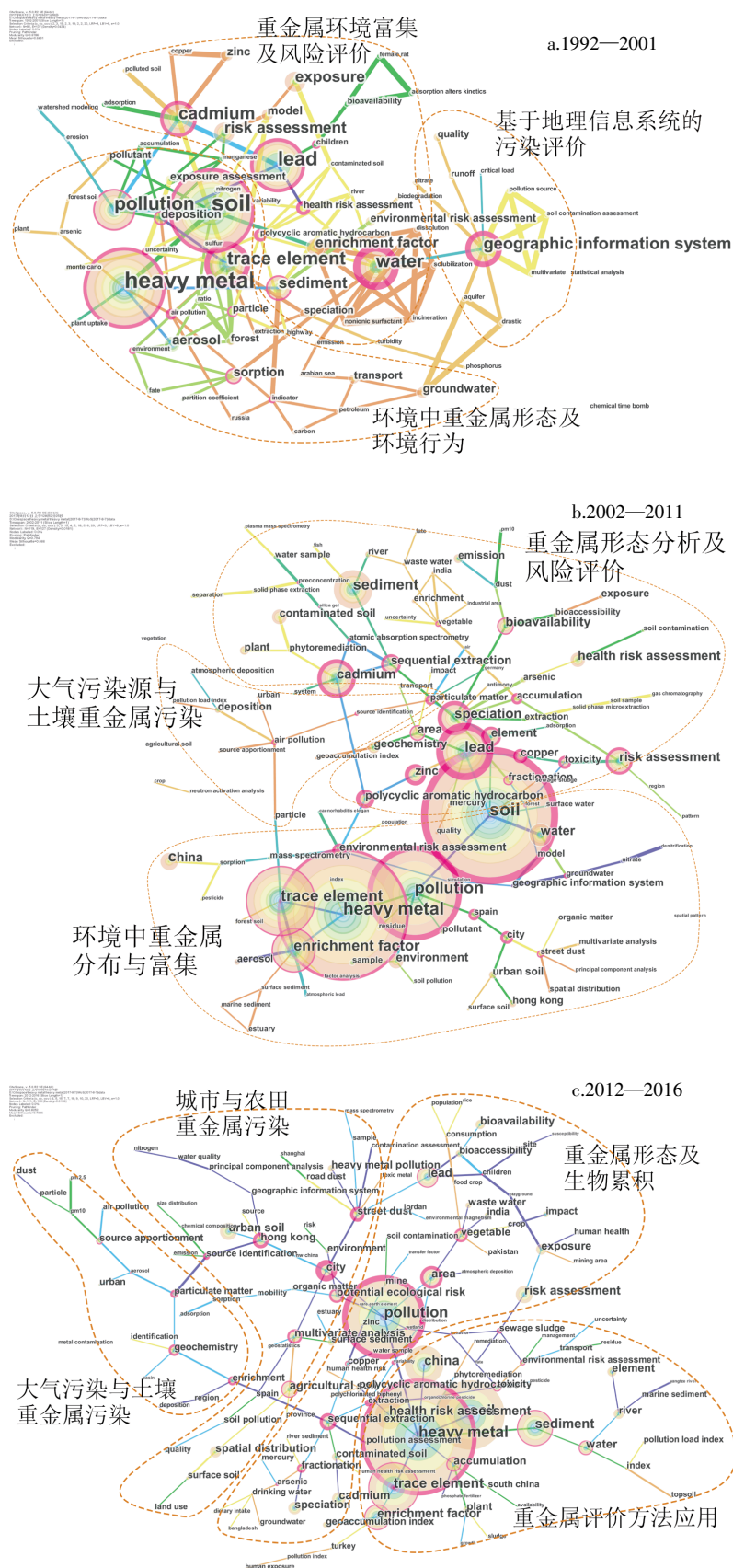


图1 不同时间段国际该领域期刊论文关键词共现关系

Figure 1 Keyword co-occurring networks of international articles in related fields of different time periods

表 2 各时间区间 SCI 论文高频关键词 TOP 25 列表

Table 2 TOP 25 high-frequency keywords in SCI articles in different time periods

序号 Number	1992—2001		2002—2011		2012—2016	
	关键词 Keywords	频次 Frequency	关键词 Keywords	频次 Frequency	关键词 Keywords	频次 Frequency
1	soil	43	heavy metal	329	heavy metal	816
2	heavy metal	41	soil	325	pollution	565
3	lead	26	pollution	218	soil	518
4	pollution	21	trace element	180	trace element	373
5	trace element	19	enrichment factor	121	china	300
6	water	17	lead	120	sediment	267
7	cadmium	16	sediment	116	health risk assessment	236
8	geographic information system	14	cadmium	88	enrichment factor	186
9	sediment	12	speciation	72	lead	164
10	risk assessment	11	water	70	risk assessment	154
11	exposure	11	risk assessment	63	urban soil	147
12	enrichment factor	9	China	57	area	137
13	aerosol	8	health risk assessment	56	agricultural soil	126
14	sorption	7	bioavailability	56	cadmium	124
15	model	6	environment	48	water	120
16	zinc	6	sequential extraction	47	speciation	113
17	deposition	6	element	45	accumulation	110
18	groundwater	6	area	45	spatial distribution	104
19	exposure assessment	5	zinc	44	potential ecological risk	101
20	environmental risk assessment	5	contaminated soil	42	multivariate analysis	99
21	transport	5	polycyclic aromatic hydrocarbon	40	exposure	96
22	health risk assessment	4	environmental risk assessment	37	city	94
23	pollutant	4	geochemistry	36	bioavailability	93
24	quality	4	copper	34	element	92
25	speciation	4	plant	31	sequential extraction	90

前较少应用的污染评价方法,说明随学科发展演进,污染评价手段向多样化方向发展。除了对重金属形态的持续关注以外,农业土壤(agricultural soil)和城市土壤(urban soil)也形成了相应聚类,可知土壤重金属污染评价对象已有较为成熟的分化,主成分分析(principal component analysis)、多元统计分析(multivariate analysis)、地统计学(geostatistics)等统计学方法应用,可以更加科学合理地展现和解释土壤重金属污染来源、组成和分布规律。从“大气污染与土壤重金属污染”聚类可见,其颗粒物(particulate matter)节点同“城市与农田重金属污染”聚类中源解析(source identification)节点相连,说明大气颗粒物是土壤重金属污染源解析的关键。

2.1.2 国内该领域研究方向及热点

利用 CiteSpace 对中国知网 CNKI 的 1992—2016 年检索结果进行关键词共现分析,以揭示中国学者在

土壤重金属污染评价方面的发展方向及热点主题,明确不同时期发展特点及中国土壤重金属污染评价的特色与优势。借助软件聚类功能得出相应聚类,并自行对所得聚类进行精简归纳,得出各时间段关键词共现图谱,如图 2 所示。对应时间区间的关键词 TOP 25 关键词列表如表 3 所示。

1992—2001 年关键词共现聚类结果如图 2a 所示,形成“土壤污染管控与重金属植物响应”、“重金属形态分析及污染评价”、“重金属污染空间分布及生态效应”三个主要聚类圈。在图中除关键词污染评价、环境质量评价、综合评价外,零星出现了模糊数学、灰色聚类法、评价模型、地统计学、模糊综合评判等评价方法,说明各污染评价方法在此时已经得到运用,但尚不成体系,也没能形成主流方法。图中复合污染及其生态效应已引起中国学者的兴趣,且环境容量概念的提出为土壤重金属污染管控提供了新的手段。

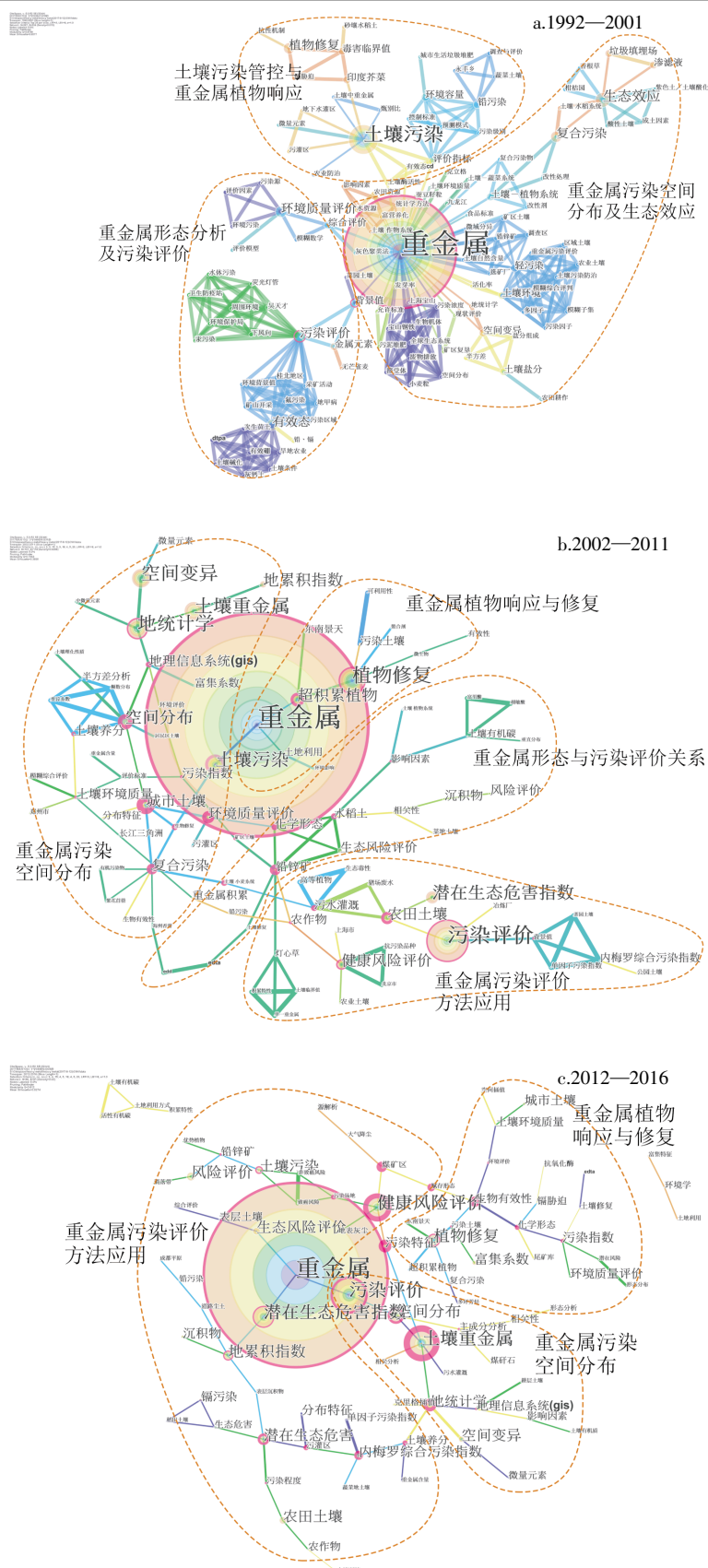


Figure 2 Keyword co-occurring networks of internal articles in related fields of different time periods

表 3 各时间区间中文核心论文高频关键词 TOP 25 列表

Table 3 TOP 25 high-frequency keywords in Chinese core journals in different time periods

序号 Number	1992—2001		2002—2011		2012—2016	
	关键词 Keywords	频次 Frequency	关键词 Keywords	频次 Frequency	关键词 Keywords	频次 Frequency
1	重金属	30	重金属	736	重金属	1023
2	土壤污染	8	污染评价	149	污染评价	196
3	粉煤灰	4	植物修复	105	土壤重金属	144
4	生态效应	4	空间变异	83	潜在生态危害指数	126
5	污染评价	3	土壤重金属	81	健康风险评价	116
6	复合污染	3	地统计学	74	空间分布	83
7	有效态	3	土壤污染	64	植物修复	80
8	植物修复	3	潜在生态危害指数	51	地累积指数	73
9	环境质量评价	3	空间分布	44	风险评价	66
10	金属元素	2	超积累植物	36	农田土壤	60
11	渗滤液	2	地累积指数	34	潜在生态危害	58
12	综合评价	2	健康风险评价	33	空间变异	57
13	垃圾填埋场	2	城市土壤	33	生态风险评价	55
14	土壤-植物系统	2	农田土壤	30	土壤污染	51
15	轻污染	2	环境质量评价	25	地统计学	49
16	评价指标	2	复合污染	23	内梅罗综合污染指数	40
17	背景值	2	地理信息系统(GIS)	22	富集系数	37
18	印度芥菜	2	污染指数	18	沉积物	33
19	环境容量	2	生态风险评价	18	污染指数	31
20	铅污染	2	土壤养分	17	污染特征	29
21	土壤重金属	2	沉积物	16	分布特征	28
22	土壤盐分	2	土壤环境质量	15	城市土壤	28
23	空间变异	2	风险评价	15	镉污染	27
24	毒害临界值	2	农作物	14	地理信息系统(GIS)	24
25	模拟湿地系统	2	铅锌矿	14	环境质量评价	23

同上 10 年关键词共现结果相比,2002—2011 年的聚类分化更加明显。由图 2b 所示,从“重金属污染评价方法应用”“重金属污染空间分布”“重金属形态与污染评价关系”“重金属植物响应与修复”四个聚类可见,土壤重金属污染评价方式多样化趋势明显,并在相应关键词节点周围形成大量相关节点,说明这些关键词在文章中经常同时出现,反映了当时的研究方向,如内梅罗综合污染指数、单因子污染指数、潜在生态危害指数、健康风险评价、地累积指数和富集系数等相继出现。此外“重金属污染空间分布”这一重要聚类形成,可见基于地统计学和地理信息系统(GIS)的污染评价手段在中国学者研究领域中成为一个主流,空间变异、空间分布、城市土壤和农田土壤等关键节点形成,说明重金属污染空间分布及研究对象土地类型的分化成为此时间段重要研究方向,也体现出污染评估由点及面的过程。重金属化学形态、有效性、可利

用性等诸多关键词反映出形态对重金属污染评价中有效含量及毒性评估的影响。

2012—2016 年聚类结果如图 2c 所示,分别为“重金属污染评价方法应用”“重金属污染空间分布”“重金属植物响应与修复”。同上两个时间段相比,各种土壤重金属污染评价方法应用普遍,在图谱中占有更大面积,其中潜在生态危害指数和健康风险评价成为主要方法,而健康风险评价关键词节点的中介中心性较强说明土壤污染评价与人类健康结合愈加紧密。值得注意的是,与健康风险评价相连的还有地表灰尘、大气降尘、源解析等,说明大气污染在土壤重金属污染源解析中的研究不断发展。而重金属污染空间分布聚类大小相较上个 10 年有所降低,反映此阶段研究侧重的改变。

2.2 近 25 年国内外常见重金属污染评价方法比较

建立重金属土壤污染评价方法是土壤环境质量

保护的一个重要内容,评价方法的科学合理性关乎研究区域重金属污染程度的评判和修复的必要性。不合理的污染评价方法往往造成研究者对污染危害的预估不足或是对研究区域“过保护”现象。对于农田土壤而言,更关系到土地利用可能性、作物种植类型选择、重金属在作物中累积而产生的农产品安全问题等。

结合文献计量学软件所得结果和国内外土壤重金属污染评价方法的使用现状,发现各评价方法中指数法如内梅罗综合污染指数法、富集因子法、地累积指数法和潜在生态危害指数法应用较为广泛;以指数法为基础的模型指数法,如模糊数学模型和灰色聚类法等应用时也有一定优势;基于地理信息系统(GIS)的地统计学评价法以及人体健康风险评价等方法从污染的空间分布到建立土壤中重金属含量与人体健康关系的途径等角度,多维度评价土壤中的重金属。我们选择几种应用广泛的指数法分析了其在实际评价中的优势与不足。

2.2.1 内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数法(Nemerow index)是一种应用于土壤重金属污染评价的传统指数评价法^[26,31]。

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\max}^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}\right)^2}{2}}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合指数; C_i 为*i*种金属的实测值; S_i 为*i*种金属在土壤环境质量标准(GB 15618—1995)

中二级标准的临界值^[32]; $\frac{C_i}{S_i}$ 为单项污染指数; $\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\max}$ 为*i*种金属的单项污染指数的最大值。

研究者直接利用单项指数法和内梅罗指数法,从重金属含量角度评估矿区^[33]或农田中重金属污染特征^[2,34],有对城市内公园土壤中重金属污染评价及来源分析^[3],也有很多学者利用内梅罗综合指数法结合其他污染评价手段的方式,从多角度反映土壤中重金属污染情况。如对金属矿周围牧区土壤样品中重金属评价时,运用内梅罗指数法、污染负荷指数法和聚类分析等方法综合分析该矿区周围土壤重金属的污染程度^[4];在对农田的重金属污染评价中,采用内梅罗指数同潜在生态危害指数^[5-7]或基于GIS的地统计学方法^[25-26,35]或人体健康风险评价^[27]等评价方法同时使用的方式,实现从重金属含量到生态毒性、人体健康影响及空间分布的综合考量;在对城市不同功能区土壤或街道面积尘中重金属污染评价过程中,利用内梅罗指数和主成分分析等方法^[36-37],对城市环境中重金

属的污染程度和源头进行了分析。

从本方法计算公式可知,其涵盖了各单项污染指数,并突出了高浓度污染在评价结果中的权重。相比单项污染指数法的单独应用,避免由于平均作用削弱污染金属权值,并提升了评价方法的综合评判能力。随着研究者对重金属在环境中赋存形态、迁移转化和毒性等方面认知的深入,发现仅仅提升高浓度污染在其中的比重,可能导致最大值或者不规范合理设置采样点、后续分析检测所带来的异常值对所得结果的影响过大,人为夸大了该元素的影响作用,从而降低了该评价方法的灵敏度^[1];同时,某种金属的单项污染指数的最大值的应用,并不具有生态毒理学依据。且方法中并没有消除重金属区域背景值的差异,使所得综合指数在区域间比较时不尽合理。因此,在实际运用中同其他评价方法联用使得评价结果更加全面合理。

2.2.2 富集因子法

富集因子法(Enrichment factor)是广泛应用于土壤和沉积物中的重金属污染评价的方法。该方法通过选择标准化元素对样品浓度进行标准化,再将二者比率同参考区域中两种元素比率相比,产生一个在不同元素间可相比较的因子^[38]。通过该指数可有效判断人类活动等方式所带来的重金属在土壤环境中的累积,并可有效避免天然背景值对评价结果的干扰。

富集因子法最初于1974年由Zoller提出^[39],用于溯源南极上空大气颗粒物中的化学元素,通过选择代表地壳成分的Al和海洋成分的Na作为参考物质,并用目标元素与参考物质在大气中质量浓度比值与二者在地壳中的比值相比较。若该值在一个单位左右,则南极大气颗粒物中元素来源于地壳(自然源),若比值较高则除此之外还有其他来源。方法提出后逐渐被借鉴延伸到其他领域,并在土壤重金属污染评价中得到较为广泛的应用。

$$EF = \frac{\left(\frac{C_i}{C_n}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{C_i}{C_n}\right)_{\text{baseline}}}$$

式中: C_i 为元素*i*的浓度; C_n 为标准化元素的浓度;sample和baseline分别表示样品和背景^[39-40]。

如研究选用Ca为参考元素,并以地壳中元素平均含量进行标准化,考察农田土壤重金属含量受工业影响程度^[8];也有选用Al作为参考元素,用非污染区的元素地球化学背景值标准化,以考察道路灰尘和路边土壤中重金属污染情况^[9];随着评价方法不断发展,也会利用Sc、Zr、Ti、Fe等元素作为参考元素,

对研究区域背景值或地壳元素平均含量进行归一化,评价矿区周边土壤、森林土壤或泥炭土中重金属富集程度受人类行为的影响情况^[10-13,41-43]。

但富集因子法在实际土壤重金属污染评价中还存在不少问题。由于土壤中重金属污染来源复杂,富集因子在此的应用仅能反映重金属的富集程度,而丧失其追溯到具体污染源及迁移途径的能力。其次是参考元素的选择,文献中曾采用 Al、Fe、Zr、Sc^[11]、Ti 或 TOC^[44]等,并没有统一的选择规范,且该方法尤其在对受 Al、Fe 或者有机污染物污染的土壤评价过程中受到限制。再者岩石风化或者不同的成土过程会使地壳或背景区域中目标元素与参考元素比值难以稳定,在应用中出现即使土壤不受污染,却出现富集因子可能差异较大的现象,造成评价失实^[38]。背景值的选择也是该评价方法应用的一个关键,选择不同背景值往往对评价结果造成较大差异。不少评价案例以地壳元素质量分数平均值或全球页岩元素质量分数平均值作为背景值^[8,10-11,42],而不同区域由于土壤成土母质组成差异较大,由此形成和发育而来的土壤中的背景元素含量往往差异明显,因此也有研究者应用研究区域的背景元素含量作为背景值^[40]。本方法中背景值的确定与选择并没有相应的标准,使得其在实际应用中的结果差异较大。

2.2.3 地累积指数法

地累积指数法(Geoaccumulation index)是德国研究者 Müller 于 1979 年首次提出^[45],用于研究河流沉积物的重金属污染程度。通过元素在环境介质中实测含量与目标元素地球化学背景值相比,减少环境地球化学背景值以及造岩运动可能引起的背景值变动的干扰^[14],后来也被用于土壤中重金属污染评价。其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n}$$

式中: C_n 为土壤或沉积物中实测含量; B_n 为该元素地球化学背景值;背景值乘以修正系数 1.5 以得到最小污染级别的界限值,是考虑到成岩作用等可能引起背景值波动的因素^[45-47]。

Müller 设定 C_n 为泥质沉积物组分($< 2 \mu\text{m}$)中重金属含量, B_n 为该元素全球页岩的平均值,并作为该元素的地球化学背景值。同富集因子法中问题类似,后续的研究者将 C_n 替换为表层土壤中重金属含量, B_n 替换为该元素在地壳中平均含量或当地土壤背景中的含量,因为对于 As、Hg 和 Sb 这些元素来说,其

在地壳中的含量要远高于 Müller 所使用的页岩中的含量^[41]。如地累积指数法曾用于评价矿山排水区土壤及周边农田土壤中重金属含量^[14-15,41],城市土壤尘埃中重金属污染程度^[48],耕作土壤受工业区、冶炼厂、煤矿等综合影响^[8,16,49-50]。

通过诸多地累积指数在土壤重金属污染中的应用发现,公式中原本用于沉积物重金属污染评价中的表征沉积特征、岩石地质及其他影响的修正系数,在随后土壤重金属污染的评价中却被直接应用。而重金属在土壤中的迁移能力与土壤物理化学性质紧密相关,同沉积物有较大差异。虽然有学者在文章中提出该修正系数应在土壤相关实际应用中加以调整,但是如何调整及调整幅度尚未说明^[51]。这些原因使得应用该方法所得的累积指数在原污染指数分级框架下的评价结果偏离实际。需格外注意的是,有学者专门对中文期刊论文中应用地累积指数法的论文的初始文献引用乱象进行探讨,发现几乎所有文章对原始文献的引用均为无中生有,并统计发现共有八大错误版本,几十种错误变种,经对作者分析表明,绝大多数作者在论文写作中引用该方法时只是简单抄写该方法,以致在抄写时出现错误,并由后续作者传播,以讹传讹,反映国内某些作者治学严谨性有待提高^[47]。

2.2.4 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法(The potential ecological risk index)是由 Håkanson^[52]从沉积学角度出发,根据重金属在“水体-沉积物-生物区-鱼-人”这一迁移累积主线,将重金属含量和环境生态效应、毒理学有效联系到一起。表达式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n T_r^i C_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_{\text{实测}}^i / C_n^i$$

式中: $C_{\text{实测}}^i$ 为表层沉积物中重金属实测含量; C_n^i 为元素的评价标准; C_i^i 即目标元素污染系数; T_r^i 为毒性响应系数,与目标污染物毒性系数和生物生产指数(Bio-production index, BPI)^[52]有关,将二者相关联以满足方法灵敏度的要求。原文给出的对应关系如表 4 所示。

随后很多学者将其应用于土壤中重金属污染评价,如对城市及道路两侧土壤^[17,53]、工业区^[18-21]及各矿区^[22,54]周边农田土壤中重金属污染状况进行评价等。但通过对原始文献研读可知,评价方法中毒性系数的推导,完全基于重金属在水体-沉积物-生物区-鱼-人的主线中的迁移转化规律,与重金属在自然界中的丰度,在水体和沉积物中的分配规律及湖泊的生产力密切相关。且原文中明确区分了毒性系数(S_i^i)与毒性

表4 污染物毒性系数和生物生产指数关系表

Table 4 The relationship between toxicological factor and toxic-response factor

目标污染物 Target contaminants	毒性系数 Toxicological factor	毒性响应系数 Toxic-response factor
PCB	40	$40 \times \text{BPI}/5$
Hg	40	$40 \times 5/\text{BPI}$
Cd	30	$30 \times \sqrt{5} / \sqrt{\text{BPI}}$
As	10	10
Pb	5	$5 \times \sqrt{5} / \sqrt{\text{BPI}}$
Cu	5	$5 \times \sqrt{5} / \sqrt{\text{BPI}}$
Cr	2	$2 \times \sqrt{5} / \sqrt{\text{BPI}}$
Zn	1	$1 \times \sqrt{5} / \sqrt{\text{BPI}}$

响应系数(T_i)的关系,如原文中几种目标污染物的毒性系数经推导已确定,PCB的毒性响应随着湖泊生产力的增加而提升,此时毒性响应系数大于毒性系数;其余几种重金属如Hg、Cd、Pb、Cu、Cr、Zn等的毒性响应随湖泊生产力增加而降低,毒性响应系数小于毒性系数,As则与该因素无关。而应用该方法至土壤重金属污染评价的时候,却直接使用该方法推导出的毒性系数,并省略湖泊生产力因素,直接当作毒性响应系数带入评价公式模型。况且,文献作者明确指出“一开始就必须强调的是,这里所推导的模型有一定的限制和前提条件:该方法只涉及湖泊系统”(The subsequent model has several limitations and presuppositions which should be stressed already from the very beginning: The approach concerns only limnic systems)。可见该模型在运用于土壤介质时不经修正,缺乏表征土壤理化性质对重金属毒性影响的特征指标,使所得的评价结果不够科学合理,参考意义不大。

2.3 土壤和农产品综合质量指数法

现有的一些评价方法建立之初并非用于土壤中重金属污染评价,而在相关学者引入到土壤污染评价体系中,对公式中各参数的假设条件、初始含义、适用范围研究不够透彻,并在使用时缺少表征土壤特征性质的因素,公式修正不足,使得污染指数同初始方法中标准相比与实际情况不尽相符。实际土壤重金属污染评价过程中,还往往针对不同的土壤利用类型,如工矿场地^[22,50]、城市街道公园^[9,18-19]、农田^[8,20-21,41]等。农田土壤中重金属污染关乎农产品安全,粮食作物中可食用部分重金属的累积对人体健康具有重大影响,因此发展出适用于农田重金属污染的评价方法显得尤为必要。

我们在总结前人工作基础上,提出了一种农田土

壤重金属影响评价的新方法:土壤和农产品综合质量指数法。该方法将农田土壤和农产品中重金属的含量有效结合,综合考量了元素价态效应、土壤环境质量标准、土壤元素背景值、特定土壤负载容量和农产品污染物限量标准等,可应用于评价农田中重金属的单独和复合污染^[55]。

在构建该综合质量指数法时,确立了污染元素种类和数量,并分别包含了超过土壤环境评价参比值、土壤背景值及农产品限量标准值的样品数量,分别记为X、Y、Z,这在最终判断和描述土壤环境质量状态和划分等级时有一定作用。

在对土壤中重金属含量的评价中引入土壤相对影响当量(Relative impact equivalent, RIE)、土壤元素测定浓度偏离背景值程度(Deviation degree of determination concentration from the background value, DDDDB)以及总体上土壤标准偏离背景值程度(Deviation degree of soil standard from the background value, DDSB)三个指标,三个指标表达式分别为:

$$\begin{aligned} \text{RIE} &= \left[\sum_{i=1}^N (P_{ssi})^{1/n} \right] / N = \left[\sum_{i=1}^N (C_i / C_{si})^{1/n} \right] / N \\ \text{DDDB} &= \left[\sum_{i=1}^N (P_{sBi})^{1/n} \right] / N = \left[\sum_{i=1}^N (C_i / C_{Bi})^{1/n} \right] / N \\ \text{DDSB} &= \left[\sum_{i=1}^N (C_{si} / C_{Bi})^{1/n} \right] \end{aligned}$$

式中: n 为测定元素 i 的氧化数,在实际评价中一般采用该元素在土壤中的稳定态氧化数; N 是测定元素的数目; C_i 为测定元素 i 的浓度; C_{si} 为元素 i 的土壤环境质量标准值(评价参比值); C_{Bi} 为元素 i 的背景值; P_{ssi} 为样品元素测定值与评价标准值的指数值; P_{sBi} 为样品元素测定值与背景值的指数值。

指标RIE在一般的综合评价方法中考虑了元素的氧化数及相应的毒性大小问题,并同相应参比值相比以区分元素氧化数相同无法区分其相对毒性大小的问题。指标DDDB可以体现外源物质偏离土壤背景值的程度,除了表明污染程度外,还可以量化污染元素在超过土壤背景值而未达到环境质量标准值或污染起始值的程度。DDSB通过土壤环境质量参比值同当地元素背景值相比,是当地土壤环境负载容量的一个量度,表现其对重金属等污染物的缓冲能力。

该方法在表征农产品质量的指标中引入农产品品质指数(Quality index of agricultural products, QIAP),表达式为:

$$QIAP = \left[\sum_{i=1}^N (P_{APi})^{1/n} \right] / N = \left[\sum_{i=1}^N (C_{APi} / C_{LSi})^{1/n} \right] / N$$

式中: C_{APi} 为土壤重金属采样点位对应的农产品中元素 i 的浓度; C_{LSi} 为农产品中元素 i 的限量标准^[56]; P_{APi} 为农产品样品重金属含量测定值与食品中污染物限量值的指数值。指标 QIAP 可以用于表征重金属对农产品质量状况的影响。

最终的综合质量影响指数(IICQ)包含土壤综合质量影响指数(IICQs)和农产品综合质量影响指数(IICQ_{AP}),定义:

$$IICQ_s = X \cdot (1 + RIE) + Y \cdot DDDDB / DDSB$$

$$IICQ_{AP} = Z \cdot (1 + QIAP/k) + QIAP / (k \cdot DDSB)$$

$$IICQ = IICQ_s + IICQ_{AP} = [X \cdot (1 + RIE) + Y \cdot DDDDB / DDSB] + [Z \cdot (1 + QIAP/k) + QIAP / (k \cdot DDSB)]$$

式中: k 为背景校正因子,一般取 5;其余含义同上文。并给出相应土壤环境质量状态描述与等级划分:IICQ ≤ 1 为清洁状态(I); $1 < IICQ \leq 2$ 为轻微污染或轻微超标状态(II); $2 < IICQ \leq 3$ 为轻度污染或轻度超标(III); $3 < IICQ \leq 5$ 为中度污染或者中度超标(IV); $IICQ > 5$ 为重度污染或重度超标(V)。本方法除了对土壤样品或样点的评价,还可用于区域样品的评价, $\bar{w}IICQ$ 为区域样品平均值,相应评价标准同上。夏芳等^[57]通过运用综合质量指数法评估铜冶炼厂周边土壤污染特征,发现该区域 $\bar{w}IICQ$ 指数均值为 10.07,属于重度污染;单个样点评价中只有 3%为轻微污染,其余均为重度污染,结果与其他方法的土壤和蔬菜重金属单项污染评价结果相符。

综合质量指数模型中还引入了亚污染或亚超标状态 sub-(II-V),即农田土壤重金属超标而农产品不超标($X \geq 1$ 或者 $IICQ_s > 1$,且 $Z=0$ 和 $IICQ_{AP} < 1$ 时)或农产品中重金属含量超标而农田土壤尚未超标($X=0$,且 $IICQ_s < 1$,而 $Z \geq 1$ 或 $IICQ_{AP} > 1$)的状态,并依据相应数值具体划分。该状态可解决之前文献中所遇到的某些土壤污染状态无法准确划分的问题。如在对 Cd 的农田污染研究中,研究者发现尽管土壤 Cd 含量并不超标,但该地所种植蔬菜如菠菜、茼蒿、小白菜^[58]和花生的子实及其种皮^[59]等却超出相应食品限量标准;又有其他研究者发现土壤中 Cd 含量超过土壤环境质量 II 级标准,所种植的胡萝卜中 Cd 却在相应限量标准以下的情况^[60]。尽管这些问题可能与所研究农作物自身的富集能力或土壤自身物理化学性质如 pH、有机质含量等有关,但在应用以往的重金属评价方法时,往往会造成相应误判,使人们低估或高估该片土

地的重金属污染情况,可能会阻碍农业生产,威胁食品安全等。而本方法引入的亚污染或亚超标状态,对以上现象均有相应类别划分,并可通过本评价方法指导农业生产。如有土壤没有超标而农作物超标的情况,可建议更换农作物类型并要求追踪污染来源;而在另一种状态下更应努力筛选,选种低累积作物。陆素芬等^[61]同样也利用了综合质量指数法对广西南丹县土壤-玉米重金属积累特征及其健康风险进行了评估,该地区综合质量影响指数均值为 2.70,土壤质量状态为轻度超标。他们在研究中发现当地土壤污染状况比较复杂,出现玉米及对应土壤重金属含量均超标,土壤超标而玉米符合相关标准,土壤未超标而玉米超标,玉米及对应土壤均未超标这四种土壤和农产品的综合质量状态,作者采纳了综合质量指数中亚污染或亚健康指数,提出了针对土壤超标而玉米符合相关标准的亚健康或亚污染状态提出密切关注的要求,对土壤未超标而玉米中 Pb 含量超标的状态提出追踪对应污染物来源的相应建议。

3 结论

本文利用 CiteSpace 软件可视化分析了近 25 年土壤重金属污染评价方法领域中的研究热点和发展方向,通过各时间段关键词共现图和 TOP 25 关键词列表,取得各时间段常用评价方法以及各评价方法随时间演进过程中所获得的关注变化。综合分析了几种常用的土壤重金属污染指数评价法,并对方法进行溯源,介绍其在不同类型土壤污染评价中的实际应用,发现一些方法在被推出之初,并非应用于土壤介质,而在后续的土壤污染评价中被直接使用或仅仅对少数参数进行调整,在土壤中的适用性值得推敲;在对土壤中重金属的富集或累积程度进行评价应用时,相应背景值或参考值的选择存在不合理现象;各评价方法中对重金属污染的生物效应缺乏科学和有效评估。

土壤和农产品综合质量指数法,综合考量了农田土壤和对应作物间品质评价。相比于之前的各指数评价法,该方法还将元素价态效应、土壤环境质量标准、土壤元素背景值、特定土壤负载容量等因素列入指数评价模型,力求科学评价农田土壤受重金属侵袭或累计的影响,全面评价农田重金属污染。

参考文献:

- [1] 师荣光,高怀友,赵玉杰,等.基于 GIS 的混合加权模式在天津城郊土壤重金属污染评价中的应用[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊1):17-20.

- SHI Rong-guang, GAO Huai-you, ZHAO Yu-jie, et al. Assessment of pollution of heavy metals in soils of Tianjin suburb by a mixed weighted model based on GIS[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (Suppl 1):17-20.
- [2] 郭跃品, 吴国爱, 付杨荣, 等. 海南省胡椒种植基地土壤中重金属元素污染评价[J]. 地质科技情报, 2007, 26(4):91-96.
- GUO Yue-pin, WU Guo-ai, FU Yang-rong, et al. Evaluation of heavy metal pollution of soil in pepper fields in Hainan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(4):91-96.
- [3] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海市区公园土壤重金属含量及其污染评价[J]. 土壤通报, 2006, 37(3):490-494.
- SHI Gui-tao, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Heavy metal concentrations of soils in Shanghai urban parks and their assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3):490-494.
- [4] 罗浪, 刘明学, 董发勤, 等. 某多金属矿周围牧区土壤重金属形态及环境风险评测[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1523-1531.
- LUO Lang, LIU Ming-xue, DONG Fa-qin, et al. Speciation distribution characteristics of heavy metals in soil of multi-metal mining pastoral area and pollution assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1523-1531.
- [5] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2152-2159.
- CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2152-2159.
- [6] 乔鹏炜, 周小勇, 杨军, 等. 云南个旧锡矿区大屯盆地土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 地质通报, 2014, 33(8):1253-1259.
- QIAO Peng-wei, ZHOU Xiao-yong, YANG Jun, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of Datun basin in the Gejiu tin mining area, Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8):1253-1259.
- [7] 耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等. 海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性[J]. 生态学报, 2012, 32(11):3477-3486.
- GENG Jian-mei, WANG Wen-bin, WEN Cui-ping, et al. Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11):3477-3486.
- [8] Loska K, Wiechula D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environment International*, 2004, 30(2):159-165.
- [9] Pagotto C, Remy N, Legret M, et al. Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway[J]. *Environmental Technology*, 2001, 22(3):307-319.
- [10] Hernandez L, Probst A, Probst J L, et al. Heavy metal distribution in some french forest soils: Evidence for atmospheric contamination[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 312(1):195-219.
- [11] Ragaini R C, Ralston H R, Roberts N. Environmental trace metal contamination in Kellogg, Idaho, near a lead smelting complex[J]. *Environmental Science and Technology*, 1977, 11(8):773-781.
- [12] 陈岩, 季宏兵, 朱先芳, 等. 北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2142-2151.
- CHEN Yan, JI Hong-bing, ZHU Xian-fang, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in soils around the gold mine of Detiangou-Qifengcha, Beijing City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2142-2151.
- [13] 郭海全, 郝俊杰, 李天刚, 等. 河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):786-791.
- GUO Hai-quan, HAO Jun-jie, LI Tian-gang, et al. Application of an enrichment factor in determining anthropogenic pollution of heavy metal in topsoil in Hebei plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):786-791.
- [14] 刘敬勇, 常向阳, 涂湘林, 等. 广东某硫酸冶炼工业区土壤铊污染及评价[J]. 地质论评, 2009, 55(2):242-250.
- LIU Jing-yong, CHANG Xiang-yang, TU Xiang-lin, et al. Pollution investigation and evaluation of thallium in soil around a sulphuric acid plant in Guangdong Province[J]. *Geological Review*, 2009, 55(2):242-250.
- [15] 李倩, 秦飞, 季宏兵, 等. 北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):2384-2394.
- LI Qian, QIN Fei, JI Hong-bing, et al. Contents, sources and contamination assessment of soil heavy metals in gold mine area of upstream part of Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12):2384-2394.
- [16] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(4):25-27, 31.
- TENG Yan-guo, TUO Xiao-guo, NI Shi-jun, et al. Applying the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in soil in Panzhihua region[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2002, 24(4):25-27, 31.
- [17] 刘坤, 李光德, 张中文, 等. 城市道路土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):124-127.
- LIU Kun, LI Guang-de, ZHANG Zhong-wen, et al. Heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of side roads in Tai'an[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2):124-127.
- [18] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1):455-462.
- [19] Hu Y N, Liu X P, Bai J M, et al. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(9):6150-6159.
- [20] 李军辉, 卢瑛, 张朝, 等. 广州石化工业区周边农业土壤重金属污染现状与潜在生态风险评价[J]. 土壤通报, 2011, 42(5):1242-1246.
- LI Jun-hui, LU Ying, ZHANG Chao, et al. The status quo and potential ecological risks' assesment of heavy metals in agricultural soils near a petrochemical complex in Guangzhou[J]. *Journal of Soil Science*, 2011, 42(5):1242-1246.

- [21] 杜平, 马建华, 韩晋仙. 开封市化肥河灌区土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 地球与环境, 2009, 37(4): 436-440.
DU Ping, MA Jian-hua, HAN Jin-xian. Assessment of potential ecological risk of soil heavy metals in the sewage irrigated area of the Huafei River, Kaifeng City[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(4): 436-440.
- [22] 杨净, 王宁. 夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 595-600.
YANG Jing, WANG Ning. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in soils from Jia-pi-gou gold mine area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 595-600.
- [23] 石晓翠, 钱翌, 熊建新. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 334-336.
SHI Xiao-cui, QIAN Yi, XIONG Jian-xin. Application of fuzzy mathematics models in the evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 334-336.
- [24] 谢志宜, 张雅静, 陈丹青, 等. 土壤重金属污染评价方法研究: 以广州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1329-1337.
XIE Zhi-yi, ZHANG Ya-jing, CHEN Dan-qing, et al. Research on assessment methods for soil heavy metal pollution: A case study of Guangzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1329-1337.
- [25] 崔邢涛, 栾文楼, 石少坚, 等. 石家庄污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 36-42.
CUI Xing-tao, LUAN Wen-lou, SHI Shao-jian, et al. Soil heavy metal pollution assessment in the sewage irrigation region of Shijiazhuang City[J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(1): 36-42.
- [26] Cheng J L, Zhou S, Zhu Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(1): 50-54.
- [27] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区土壤-蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境化学, 2013, 32(4): 671-677.
SUN Qing-bin, YIN Chun-qin, DENG Jin-feng, et al. Characteristics of soil-vegetable pollution of heavy metals and health risk assessment in Daye mining area[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(4): 671-677.
- [28] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 二版. 北京: 科学出版社, 2010: 6.
CHEN Huai-man. Environmental soil science[M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2010: 6.
- [29] 王玉军, 陈能场, 刘存, 等. 土壤重金属污染防治的有效措施: 土壤负载容量管控法——献给 2015 “国际土壤年”[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 613-618.
WANG Yu-jun, CHEN Neng-chang, LIU Cun, et al. Effective measures to prevent heavy metal pollution: Management and control methods based loading capacity of soil: To international year of soils, IYS 2015[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4): 613-618.
- [30] Chen C M. Citespace ii: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.
- [31] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 中华人民共和国环境保护行业标准 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
State Environmental Protection Administration of China. HJ/T 166—2004 The technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [32] 国家环境保护局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
State Environmental Protection Administration of China. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [33] 郭伟, 赵仁鑫, 张君, 等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3099-3105.
GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHANG Jun, et al. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(10): 3099-3105.
- [34] 马成玲, 王火焰, 周健民, 等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 751-755.
MA Cheng-ling, WANG Huo-yan, ZHOU Jian-min, et al. Investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland of a typical county in Yangtze River delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3): 751-755.
- [35] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 3-11.
GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 3-11.
- [36] 张云, 张宇峰, 胡忻. 南京不同功能区街道面积积尘重金属污染评价与源分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1376-1381.
ZHANG Yun, ZHANG Yu-feng, HU Xin. Assessment of heavy metal contamination and source identification of dust deposited on roads collected from different land-use zones in Nanjing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(11): 1376-1381.
- [37] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1561-1567.
GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, et al. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2013, 34(4): 1561-1567.
- [38] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1): 65-72.
ZHANG Xiu-zhi, BAO Zheng-yu, TANG Jun-hong. Application of the enrichment contamination in the factor in evaluating of heavy metals environmental geochemistry[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(1): 65-72.
- [39] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. *Science*, 1974, 183(4121): 198-200.
- [40] 滕彦国, 庾先国. 攀枝花工矿区土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 13-16.
TENG Yan-guo, TUO Xian-guo. Application of an enrichment factor in determining anthropogenic pollution of heavy metal in topsoil[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 13-16.
- [41] Bhuiyan Mohammad A H, Parvez L, Islam M A, et al. Heavy metal pol-

- lution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1):384-392.
- [42] Shoty W, Blaser P, Grünig A, et al. A new approach for quantifying cumulative, anthropogenic, atmospheric lead deposition using peat cores from bogs: Pb in eight swiss peat bog profiles[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 249(1):281-295.
- [43] 李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 等. 应用地积累指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(12):135-139.
- LI Juan-juan, MA Jin-tao, CHU Xiu-juan, et al. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in safety assessment of heavy-metal contamination in soil of copper refining[J]. *China Safety Science*, 2006, 16(12):135-139.
- [44] Zwolsman J J G, van Eck G Th M, Burger G. Spatial and temporal distribution of trace metals in sediments from the scheldt estuary, South-west Netherlands[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43(1):55-79.
- [45] Müller G. Schwermetalle in den sedimenten des rheinsveränderungen seit 1971[J]. *Umschau in Wissenschaft und Technik*, 1979, 79(24):778-783.
- [46] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(2):7-9.
- TENG Yan-guo, TUO Xian-guo, NI Shi-jun, et al. Applying geoaccumulation index to assess heavy metal pollution in sediment: Influence of different geochemical background[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(2):7-9.
- [47] 夏学齐, 杨忠芳, 郭晶晶, 等. 从一个概念的引文出处谈治学严谨性[J]. *中国地质教育*, 2015, 24(3):10-21.
- XIA Xue-qi, YANG Zhong-fang, GUO Jing-jing, et al. Lack of meticulous scholarship of some authors reflected by a citation for a concept[J]. *Chinese Geological Education*, 2015, 24(3):10-21.
- [48] Ji Y Q, Feng Y C, Wu J H, et al. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(5):571-578.
- [49] Loska K, Wiechula D, Barska B, et al. Assessment of arsenic enrichment of cultivated soils in Southern Poland[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2003, 12(2):187-192.
- [50] Gowd S Srinivasa, Reddy M Ramakrishna, Govil P K. Assessment of heavy metal contamination in soils at Jajmau (Kanpur) and Unnao industrial areas of the Ganga Plain, Uttar Pradesh, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1):113-121.
- [51] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. *广东微量元素科学*, 2007, 14(8):13-17.
- PENG Jing, LI Ze-qin, HOU Jia-yu. Application of the index of geo-accumulation index and ecological risk index to assess heavy metal pollution in soils[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(8):13-17.
- [52] Håkanson L. The quantitative impact of pH, bioproduction and Hg-contamination on the Hg-content of fish(pike)[J]. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 1980, 1(4):285-304.
- [53] 陈江, 张海燕, 何小峰, 等. 湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价[J]. *土壤*, 2010, 42(4):595-599.
- CHEN Jiang, ZHANG Hai-yan, HE Xiao-feng, et al. Distribution and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soils of Huzhou[J]. *Soils*, 2010, 42(4):595-599.
- [54] 金昭贵, 周明忠. 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤的镉污染及潜在生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12):2367-2373.
- JIN Zhao-gui, ZHOU Ming-zhong. An assessment on contamination and potential ecological risk of cadmium and arsenic in the cultivated soils around the Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12):2367-2373.
- [55] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 一种农田土壤重金属影响评价的新方法: 土壤和农产品综合质量指数法[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7):1225-1232.
- WANG Yu-jun, LIU Cun, ZHOU Dong-mei, et al. A new approach for evaluating soil heavy metal impact: A comprehensive index combined soil environmental quality and agricultural products quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7):1225-1232.
- [56] 中华人民共和国卫生部. GB 2672—2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Ministry of Health of PRC. GB 2672—2012 National food safety standard maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [57] 夏芳, 王秋爽, 蔡立梅, 等. 有色冶金区土壤-蔬菜系统重金属污染特征及健康风险分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(6):865-873.
- XIA Fang, WANG Qiu-shuang, CAI Li-mei, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in non-ferrous metals smelting area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(6):865-873.
- [58] 江解增, 许学宏, 余云飞, 等. 蔬菜对重金属生物富集程度的初步研究[J]. *中国蔬菜*, 2006(7):8-11.
- JIANG Jie-zeng, XU Xue-hong, YU Yun-fei, et al. Primary study of biological accumulation to heavy metals in vegetables[J]. *China Vegetables*, 2006(7):8-11.
- [59] 王姗姗, 王颜红, 张红. 污染花生籽实中镉的分布特征及其对膳食健康的风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊):12-16.
- WANG Shan-shan, WANG Yan-hong, ZHANG Hong. Cd-contaminating peanut seeds: Distribution characteristics of cadmium and risk assessment on dietary health[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl):12-16.
- [60] Ding C F, Zhang T L, Wang X X, et al. Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43):10273-10282.
- [61] 陆素芬, 张云霞, 余元元, 等. 广西南丹土壤-玉米重金属积累特征及其健康风险[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(8):706-714.
- LU Su-fen, ZHANG Yun-xia, YU Yuan-yuan, et al. Characteristics of heavy metal accumulation in soil-corn system contents and their health risks in Nandan, Guangxi[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(8):706-714.