

北方主要农产地土壤污染风险评估与综合防治战略

李瑞¹, 席北斗¹, 姜玉^{1,2}, 许铮^{1,3}, 李鸣晓¹, 郝艳¹, 孟繁华¹, 高绍博¹, 陈雷^{3,4}, 朱骊旭¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100020; 2. 上海大学, 上海 200444; 3. 吉林建筑大学, 长春 130118;
4. 吉林省人大环境与资源保护委员会, 长春 130000)

摘要: 东北及黄淮海平原是我国最大的两座“粮仓”, 是北方主要农产品产地, 其土壤环境风险管控关系着全国粮食安全供给命脉。本研究通过潜在生态指数法分析了北方主要农产品产地土壤重金属污染风险, 研究表明, Cd 污染高风险区域主要集中在分布于辽河平原东部的沈阳市、南部的锦州市与葫芦岛市, 三江平原双鸭山市, 海河平原天津市, 以及黄泛平原西南部的新乡市; Hg 污染高风险区域主要分布于海河平原北京市、天津市, 辽河平原沈阳市周边。化工行业是导致东北及黄淮海平原农产品产地土壤重金属污染的最主要潜在污染源, 其次为畜禽养殖业、金属冶炼加工业。本研究从农产品产地环境监测预警、工矿企业清洁生产、畜禽养殖污染综合治理等方面, 以因地制宜、分类指导为原则, 提出了“一区一策”的污染防治战略及重点环保工程。本研究对我国北方主要农产品产地生态环境可持续发展战略规划具有重要参考意义。

关键词: 北方农产品产地; 重金属; 土壤污染; 风险; 防治战略

中图分类号: X53 **文献标识码:** A

Soil Pollution Risk Assessment and Comprehensive Prevention Strategy for Major Agricultural Producing Areas in North China

Li Rui¹, Xi Beidou¹, Jiang Yu^{1,2}, Xu Zheng^{1,3}, Li Mingxiao¹, Hao Yan¹, Meng Fanhua¹,
Gao Shaobo¹, Chen Lei^{3,4}, Zhu Lixu¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100020, China; 2. Shanghai University, Shanghai 200444, China;
3. Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 4. Jilin Provincial People's Congress Environment and Resources Protection Committee, Changchun 130000, China)

Abstract: As the two largest “granaries” in China, the Northeast and Huang-Huai-Hai Plains are the main agricultural producing areas in North China, and the soil environmental risk management and control of these areas are vital to the national food security supply lifeline. This study analyzed the soil heavy metal pollution risks of main agricultural producing areas in North China by the potential ecological risk index method. The high-risk areas of Cd pollution are mainly distributed in Shenyang City in the east of Liaohe Plain, Jinzhou City and Huludao City in the south of Liaohe Plain, Shuangyashan in the Sanjiang Plain, Tianjin City in the Haihe Plain, and Xinxiang City in the southwest of the yellow river flood plain; Hg pollution high-risk areas are mainly distributed in Beijing and Tianjin of the Haihe Plain, and around the Shenyang City of the Liaohe Plain. The chemical industry, followed by the livestock and poultry industry, as well as the metal smelting and processing industry, is the major potential source of heavy metal pollution of soil in the Northeast and Huang-Huai-Hai Plains. This study proposed the “one area, one policy” pollution prevention strategy and key

收稿日期: 2018-08-15; 修回日期: 2018-08-23

通讯作者: 席北斗, 中国环境科学研究院, 研究员, 研究方向为村镇环境综合整治、固废资源化与地下水污染防治; E-mail: xibd@caes.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国农业资源环境若干战略问题研究”(2016-ZD-10)

本刊网址: www.ensci.cn

environmental protection projects from the aspects of environment monitoring and warning of agricultural products producing areas, clean production of industrial and mining enterprises, and comprehensive treatment of livestock and poultry pollution, which is based on local conditions and classification guidance. This study can provide important references for the strategic planning of sustainable development of the ecological environment of major agricultural producing areas in North China.

Keyword: agricultural products producing areas in North China; heavy metals; soil pollution; risks; prevention strategies

一、前言

近年来,随着我国城市化和工业化的发展,“湖南 Cr 大米”“海南毒缸豆”等污染事件层出不穷,农田土壤重金属污染越发严重 [1~3]。2016 年国务院在《土壤污染防治行动计划》中指出以农用地为重点,开展土壤污染状况详查。2017 年 10 月,党的“十九大”报告进一步提出强化土壤污染管控和修复,坚持源头防治,实施重要生态系统保护和修复重大工程,完成生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界三条控制线划定工作。东北及黄淮海平原是我国最大的两座“粮仓”,其生态环境安全在农业资源可持续发展方面具有重要的战略地位。农产品产地土壤污染防治是保护生态红线、保障永久基本农田的必要条件,更是打好防范化解重大风险、精准脱贫、污染防治三大攻坚战的重要保障。相关资料表明,三江、松嫩、淮北平原土壤重金属点位超标率相对较低,分别为 1.35%、0.81%、0.62%;海河、辽河、黄泛平原点位超标率相对较高,分别为 4.28%、3.70%、2.10%。东北及黄淮海平原农产品产地土壤主要超标重金属污染物依次为 Cd (1.18%)、Hg (0.40%)、Cu (0.17%)、As (0.11%)。北方主要农产品产地土壤重金属超标问题较为突出的区域主要位于辽河平原东部、南部,以及海河平原京津冀交汇区。Cd 超标点位集中分布在辽河平原的沈阳市和锦州市,海河平原天津市,黄泛平原济源市、新乡市、安阳市;Hg 超标点位集中分布在海河平原天津市、北京市。

土壤重金属污染及其潜在风险是目前环境科学和医学领域关注的热点。目前,大部分关于重金属生态风险评价的研究还停留在理论框架和技术路线探讨阶段,相关应用研究案例聚焦于生态环境中重金属的测定或简单的风险指数计算,生态风险的判定结果存在众多不确定性因素。地质累积指数法、单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法或基于人体健康的风险评价等较为常用的土壤重金属污染

风险评价方法,没有考虑生物特性对重金属毒性的响应特征。瑞典著名地球化学家 Hakanson 提出的基于土壤重金属的性质及环境行为特点的潜在生态指数评价方法 [4,5],从沉积学、生态学角度出发,综合考虑土壤重金属含量及其生态效应、环境效应、人体毒理学效应 [6,7],对土壤重金属污染风险等级进行评价,可作为北方农产品产地环境污染综合防治战略的重要依据。

本研究依托中国工程院咨询项目“中国农业资源环境若干战略问题研究”,旨在系统分析我国北方主要农产品产地土壤污染风险现状、趋势与成因,提出具有针对性的治理模式,形成我国北方农产品产地污染综合防治战略,为我国北方主要农产品产地土壤污染风险管控提供参考。

二、数据来源与研究方法

本研究收集了 2008—2014 年东北及黄淮海平原农产品产地土壤 8 种重金属 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn、Ni 单因子污染指数评价结果数据,数据来源于农业、环保等相关土壤环境监测单位,共 31 229 个监测点位。

本研究依据 Hakanson 提出的土壤重金属潜在生态指数评价方法,综合考虑土壤重金属含量及其生态效应、环境效应、人体毒理学效应,对土壤重金属污染风险进行评价。

$$C_f^i = C_i/C_n^i, E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (1)$$

式(1)中, C_f^i 、 T_r^i 和 E_r^i 分别为第*i*种重金属污染系数、农产品毒性系数和潜在生态危害系数(污染风险等级); C_i 为土壤重金属含量实测值; C_n^i 为当地土壤重金属含量背景参考值。通过查阅研究区域各省份国民经济统计年鉴、相关文献,对研究区域内主要农作物类型进行统计,确定不同土壤重金属相对于不同农作物的毒性系数。参考全国和各省份土壤污染状况调查公报、《中国土壤元素背景值》等资

料, 确定土壤重金属含量背景参考值 [8~19]。对北方农产品产地 8 种重金属污染指数、土壤重金属背景参考值进行无量纲化处理, 最后计算得到土壤重金属污染风险指数。

本研究综合考虑土壤超标污染物与各类污染源之间的相关性、污染源规模、距离、污染物排放量及环保配套设施建设情况, 通过多指标综合评价法及卫星遥感数据检索, 追溯统计土壤重金属超标点位附近的潜在污染源, 分析环境问题成因。

三、结果与讨论

(一) 北方主要农产品产地土壤污染风险评价

北方主要农产品产地土壤重金属 Cd 高等污染风险区域主要集中分布于辽河平原东部的沈阳市, 以及平原南部的锦州市、葫芦岛市。Cd 高等污染风险区域面积在辽河平原、黄泛平原、海河平原、三江平原分别占 4.26%、0.18%、0.16%、0.25%, 中等污染风险区域面积分别占 11.40%、9.44%、9.26%、1.75%。三江平原双鸭山市土壤重金属 Cd 含量平均值为 0.10 mg/kg, 无明显超标, 但 Cd 污染风险呈上升趋势。天津市郊农田 7.6% 的土壤监测点位 Cd 污染风险较高。新乡市农田土壤 Cd 污染风险较高, 点位超标率为 63.60%。沈阳市、锦州市土壤 Cd 污染风险不容忽视。

土壤重金属 Hg 高等污染风险区域主要分布于海河平原北京市、天津市, 辽河平原沈阳市周边, 高等污染风险区域面积在海河平原、辽河平原分别占 1.93%、1.42%, 中等污染风险区域主要分布于辽河平原东南部锦州市、辽阳市、沈阳市, 海河平原天津市、唐山市、安阳市, 淮北平原北部洛阳市、济源市、平顶山市周边, 风险区域面积在海河平原、辽河平原、淮北平原、黄泛平原分别占 4.99%、9.92%、3.11%、1.32%。北京市土壤 Hg 元素污染风险呈上升趋势。相比于 2006 年, 2009 年北京顺义区土壤中的 Hg 元素含量有明显升高, 且在调查结果中显示其生态风险系数高区域与污灌范围明显关联 [20]。天津市 Hg 污染风险不容忽视。2005 年天津市西青区农产品产地土壤环境质量的研究结果发现, 重金属 Hg 在该区域仅存在一个点位处于中等生态风险水平, 其他均处于轻微生态风险水平。据沈阳市农田土壤与污灌区土壤环境质量监测结果

显示, 2005—2008 年, 土壤总汞含量均值超出背景值 80%, 重金属汞点位的超标率为 2.5%。

(二) 北方主要农产品产地土壤污染成因分析

北方主要农产品产地最重要潜在污染源为化工行业, 金属冶炼加工业是三江平原的重要潜在污染源, 其相对贡献率为 29%; 畜禽养殖业是松辽黄三个平原的重要潜在污染源, 分别占 17%、17%、16%; 煤炭产业是海河平原的重要潜在污染源, 占 20%; 金属冶炼加工业以及畜禽养殖业是淮北平原重要潜在污染源, 占比约为 16%。

塑料厂、纺织厂、电镀厂、化肥厂、制药厂是导致沈阳市土壤 Cd、Hg 超标及高风险的最主要潜在污染源。化工厂、金属制造厂、纺织厂是导致天津市土壤 Cd、Hg 超标及高风险的最主要潜在污染源。纺织厂、冶金厂、塑料厂是导致锦州市土壤 Cd 超标及高风险的最主要潜在污染源。冶金厂、化工厂是导致济源市土壤 Cd 超标及高风险的最主要潜在污染源。冶金厂、电镀厂、制药厂是导致安阳市土壤 Cd 超标及高风险的最主要潜在污染源。制药厂、畜禽养殖业是导致新乡市土壤 Cd 超标及高风险的最主要潜在污染源。电镀厂是导致北京市土壤 Hg 超标及高风险的最主要潜在污染源。上述潜在污染源由于环保配套设施缺失或运行监管不当, 近年来引发的环境污染事件屡见不鲜。污染物一旦在源头失去控制并进入环境介质, 造成的风险和成本是巨大的。加强污染源的监督管理, 从源头上防患于未然, 是农产品产地环境保护的首要重任。

(三) 北方主要农产品产地土壤污染防治战略

1. 总体思路

以“坚守生态红线、强化风险管控”为准则, 统筹部署“天地一体化”农产品产地环境监测体系。以“环保督查常态化”为契机, 落实工矿企业清洁生产, 推进畜禽养殖污染综合治理。因地制宜, 实施“一区一策”污染防治策略; 循序渐进, 率先开展天地一体化监控预警、生态环境良好农产品产地土壤环境保护等重点工程。

2. 分区防治对策

东北平原废水 Cd、Hg 排放总量不高 (分别占全国 0.36%、1.12%), 工业污染治理投资力度相

对较低（占全国 6.52%），土壤重金属高污染风险市县个数相对较少（20 个），宜采用经济性高、环境扰动小、污染风险低的防治和修复技术。对 Cd、Hg 超标地块种植富集能力较强的植物，例如野古草、大米草等，使土壤中重金属污染物不断向植物中转移，净化后土壤可逐步恢复玉米、小麦等对重金属不敏感的农作物种植或永久退耕。中等、低等污染风险市县个数共计 76 个，但监测点位无超标现象，应以预防为主，采取保育措施。严控化肥、饲料添加剂含量，倡导生产种植有机农产品，重点保护三江平原土壤环境质量。对辽河流域及松花江流域水质较差水体优先启动河道生态湿地治理工程，提高水体自净能力。

黄淮海平原废水 Cd、Hg 排放总量较高（分别占全国 7.81%、17.80%），工业污染治理投资力度相对较高（占全国 28.50%），土壤重金属高污染风险市县个数相对较多（36 个）。应在精准测算高污染风险区域和重污染农田面积及土方量的基础上，对高污染风险、重污染地块在休耕季节进行客土更换，被置换的污染土壤应采取异位淋洗或固化稳定化技术处理。土壤淋洗液可送往周边工业园区废水处理设施集中处理，或新建污水处理设施就地处理；经重金属固化稳定化或淋洗处理后的土壤可参照相关标准资源化应用于填埋场覆土、矿坑修复、建材。黄淮海平原土壤重金属中等、低等污染风险市县共计 239 个，监测点位无超标现象，中等、低等污染风险区域应进一步强化监管、防患于未然。开展黄淮海平原重点流域重金属污染防治专项规划编制工作。科学划定污染控制单元，统筹防治地表水、地下水、近岸海域等各类水体污染。加强南水北调工程沿线环境保护，着力推进工业节水及清洁生产。

（1）三江平原

三江平原 1990 年的农药用量为 1.55 kg/hm^2 ，1994 年增至 2.08 kg/hm^2 ，平均每年增加 0.13 kg/hm^2 。虽然该区使用的农药多是高效低毒、低残留的农药，但是其中有些农药所含杂质或代谢物成分的毒性却很强，长期大量的使用仍会对该区的农业土壤环境和生态系统的健康构成威胁。因此，需根据该区生态环境现状，推广生态农业建设，建立绿色食品和有机食品基地，绿色食品生产宜采用生物防治技术；推广施用有机肥、复合肥和生物肥，避免或最大程度限制化学合成肥、化学农药、植物生产调节剂等

的使用；建立废弃农膜回收和加工企业，促进残膜回收；加大环保投资力度及执法力度，鼓励工业企业实行清洁生产，加强“水、土、气、生、人”等环境要素的质量监测，开展“三废”综合利用，实现“三废”资源化；建立三江平原自然保护区和生态功能保护区，采取生物与工程相结合的措施，完善现有防护林体系，严禁开垦湿地，形成合理的农林牧业结构；加强生态环境较好耕地区域的保育，通过加强区域环境污染综合治理实现区域生态环境的健康发展。

（2）松嫩平原

松嫩平原主要生态环境污染严重，包括大气污染、水体污染、土壤污染、生物污染；水土流失严重，地力普遍下降；林地面积减少，自然灾害增多；自然资源利用不合理。应做好流经松嫩平原农区的松花江、嫩江等江河的污染防治工作，严格控制沿江工业企业向江内排放各种污染物，强化城市污水的处理技术、处理能力、处理水平；科学利用污水，加强对再生水资源以及污泥的管理，加强污灌区农业环境质量的监测和科学管理工作；对病虫害要进行综合治理，有组织地协调应用多种防治技术，重点发展生物防治，以控制农药污染。建立健全农村环境保护机构，实行行政、经济和法制的综合管理，坚决制止排放剧毒污染物、强致癌物和严重污染环境的项目，严格控制小电镀、小石棉、小造纸、小冶金、小化工等重点污染行业的发展，对污染源进行监督，充分利用经济杠杆作用对“三废”综合利用。根据农业持续发展和地力下降的现状，补偿更新土壤有机质，增施有机质，秸秆还田，使用草炭，种植绿肥等。

（3）辽河平原

辽河平原存在点源污染与面源污染共存、生活污染和工业污染叠加、各种新旧污染相互交织、工业及城市污染向农村转移等问题，导致农业环境恶化。至 2015 年，辽河平原 8 个主要灌溉区农业使用城市和工业污水灌溉，面积达 $6.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。辽宁人均耕地少，化肥、农药、农膜等农业投入品的大量投入，以及过度利用和有机肥施用不足，导致农田质量下降，农业环境和农产品污染程度加剧。规模化畜禽养殖污染，包括畜禽滥用药和粪便乱排放，造成耕地面源污染，给畜禽和作物农产品质量带来安全隐患。

首先, 辽河平原应转变农业生产方式, 建设环境友好型农业和循环农业。其次, 建立健全生态环境监测预警体系, 加强农业环境保护执法检查力度。其次, 建议加强环境综合治理, 将农业环境保护纳入环保工作重心。通过环境综合治理, 改善空气、水源和耕地质量, 实现工业与农业、种植业与旅游业、人与自然的和谐发展。

(4) 海河平原

海河平原农产品产地土壤环境问题较为突出的区域主要分布在北京市、天津市, 以及河北部分工业发展较为迅速的城市, 污水灌溉、散乱污工矿企业是环境污染风险的主导因素。随着近年来的气候条件变化和环境污染, 海河流域生态环境质量快速下降, 水资源开发开采过度, 河道干涸、水体污染、地表沉降、海水入侵等生态问题不断发生, 损害了部分地区人民群众的环境权益, 制约了海河流域经济社会健康发展。

首先, 建议在海河平原进一步加强、健全环保法制体系, 从源头上严格控制污染。健全海河平原农产品产地环境保护规划体系, 发挥引领约束作用。完善监测预警管理, 主动防范环境风险。构建“水、土、气、生、人”一体化监测站网体系, 建立常规与自动相结合、定点与机动相结合、定时与实时相结合的监测模式, 实现水环境监测及时、准确、有效。其次, 建设生态补偿机制, 促进源头生态保护, 实现从源头上保护生态环境。最后, 加强区域部门协作, 有效开展应急管理。要不断健全完善区域、部门之间环境保护协作机制。建设突发环境污染处置管理平台, 实现环境污染事件风险源空间信息、风险等级信息、风险预警信息的共享查询。

(5) 黄泛平原

黄泛平原土壤环境污染突出问题主要分布在济源市、新乡市、安阳市等地, 污染源类型多样, 点源面源污染形式复杂。首先, 应系统开展黄泛平原农用地土壤污染状况详查, 按照“统一规划、整合优化”的原则, 布设土壤环境质量国家级监测点位, 开展土壤污染治理与修复试点示范。其次, 应完善黄泛平原农产品产地法律标准体系, 通过制定农产品产地土壤、大气、水污染防治相关法律法规、部门规章、标准体系等, 在“水、土、气十条”的大背景下, 明确落实地方政府主体责任, 形成政府主导、公众参与、社会监督的环境污染防治格局。最

后, 应加强农药、化肥、种子等农业投入品的监督管理, 杜绝高毒、高残留农药、化肥、饲料等不合格农资在市场上的流通, 推广新型农资替代品, 降低农业投入品对农产品的污染。

(6) 淮北平原

淮北平原土壤环境污染突出问题主要分布在洛阳市、信阳市、郑州市等地, 随着淮北平原工业化、城市化水平不断提高, 环境问题正日趋严重, 农业生态环境不断恶化。以城市为中心的工业污染仍在发展, 并向农村蔓延; 化肥和农药的大量施用, 导致农业非点源污染日趋严重; 人们对资源的需求和消耗日益增大, 人口、资源和环境之间的矛盾日益尖锐; 在资源开发过程中忽视了生态保护。按照农业部、财政部《关于印发〈农产品产地土壤重金属污染综合防治实施方案〉的通知》等国家相关文件的要求, 开展淮北平原农产品产地土壤重金属污染调查、监测和评价, 推进农产品产地土壤重金属污染修复试验区建设, 探索不同类型污染源、不同作物种植结构和不同作物品种的修复方法和技术。建立重点区域、重点流域农业生态环境质量评价模型, 开展生态环境质量评价。强化农科教结合, 加大科技创新力度, 着力破解农作物秸秆综合利用、农业面源污染防治等亟待解决的难点、焦点和热点问题。促进农耕农艺农机技术结合、新品种新技术新模式协调、良种良法良制配套。强化技术培训, 推广应用规范、成熟的现代生态农业模式及技术。

3. 重大工程建议

(1) “天地一体化”农产品产地环境监控预警平台

集成卫星和无人机航空遥感技术、土壤环境原位在线监测技术、土壤样品快速精准分析技术、土壤污染物模拟预警技术, 构建地面环境监测网点与数据传输系统, 建立农产品产地“天地一体化”环境监测及“物联网+”大数据分析预警平台, 重点监测农产品产地“水、土、气、生、人”五要素与污染源, 整合农产品质量与流通、化肥农药饲料施用情况信息数据。

(2) 京津冀地区农产品产地环境污染综合防治

2015年京津冀地区废水排放总量为 5.553×10^9 t, 占全国7.55%。其中, 废水中化学需氧量(COD)排放总量为 1.579×10^6 t, Hg排放总量为174.8 kg, Cd排放总量为16.2 kg, Pb排放总量为437.1 kg。

2014年京津冀地区有涉水工业企业约1.53万家,其中化工行业污染源对农田土壤污染的相对贡献率最高(51%),其次为畜禽养殖业(27%)、金属冶炼加工业(9%)、电镀业(7%)。京津冀污染源点多面广,单位面积涉水工业污染源密度是全国平均水平的5.4倍,40%的地下污染源周边存在地下水污染。区域地下水水质IV~V类比例约占78%;重金属污染浅层地下水指标主要以As、Pb、Cd为主,污染比例为7.98%;浅层地下水挥发性有机物污染比较严重,污染比例为29.17%。

首先,建设京津冀区域环境质量动态监测网络,按照统一规划、统一监测、统一评价的原则,实行农作物和土壤环境质量协同监测,界定京津冀农产品产地污染区,识别重点污染行业,全面分析京津冀地区农产品产地污染时空分布及变化趋势。开展农产品质量全程追踪监控工程示范。

其次,开展化工行业、金属冶炼加工业、电镀业、畜禽养殖业、垃圾填埋场等重点污染源在线监控预警。推进化工、冶金行业清洁生产,淘汰落后工艺,鼓励技术改造,减少有害重金属源头排放量,提高有害金属回收率。

最后,开展土壤污染源及演化过程、污染物在不同土壤母质中的吸收迁移转化规律、污染物赋存形态对农产品质量及环境风险的影响等基础科学研究,研发、推广、应用经济高效的污染土壤原位/异位修复技术,通过湿地重建提高环境净化能力。

(3) 生态环境良好农产品产地土壤环境保护

目前,我国北方主要农产品产地局部土壤污染风险较高,但大部分区域土壤环境质量良好,需重点保护土壤污染低风险区域生态环境。建设土壤质量保育示范工程。通过增施有机肥、种植绿肥提高土壤有机质含量和环境容量。在东北老工业基地振兴发展的同时,严格把控工矿企业污染源准入门槛及污染物排放。在秸秆及畜禽养殖集中区建设有机肥生产基地,在秸秆及畜禽养殖分散区建设小规模有机肥堆沤池(站),鼓励秸秆粉碎深翻还田、秸秆免耕覆盖还田、粮豆轮作、粮草(饲)轮作,推广深松深耕和水肥一体化技术。

四、结语

(1) 北方主要农产品产地土壤重金属污染高风

险较为突出的是Cd、Hg,土壤重金属Cd高等污染风险区域主要集中分布于辽河平原东部的沈阳市,以及平原南部的锦州市、葫芦岛市;土壤重金属Hg高等污染风险区域主要分布于海河平原北京市、天津市,辽河平原的沈阳市周边。

(2) 对六大平原主要潜在污染源占比进行统计分析,各平原的最主要潜在污染源均为化工行业。其次,金属冶炼加工业是三江平原的重要潜在污染源,其相对贡献率占比为29%;畜禽养殖业是松嫩、辽河、黄泛平原的重要潜在污染源,占比分别为17%、17%、16%;煤炭产业是海河平原的重要潜在污染源,占比为20%;金属冶炼加工业、畜禽养殖业是淮北平原的重要潜在污染源,占比均为16%。

(3) 以“坚守生态红线、强化风险管控”为准则,统筹部署“天地一体化”农产品产地环境监测体系。以“环保督查常态化”为契机,落实工矿企业清洁生产,推进畜禽养殖污染综合治理。因地制宜,实施“一区一策”污染防治策略;循序渐进,率先开展天地一体化监控预警、京津冀地区农产品产地环境污染综合防治、生态环境良好农产品产地土壤环境保护等重点工程。

参考文献

- [1] 韩平,王纪华,陆安祥,等.北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J].农业环境科学学报,2012,31(1):106-112.
Han P, Wang J H, Lu A X, et al. Distribution and environment quality evaluation of heavy metals in soil in Shunyi of Beijing, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(1): 106-112.
- [2] 陈秀端.中国城市土壤重金属空间分布与污染研究[J].环境科学与技术,2011,34(12):60-65.
Chen X D. Study on the spatial distribution and pollution evaluation of heavy metal in urban soil of China [J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(12): 60-65.
- [3] 国家环境保护局.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
National Environmental Protection Agency. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [4] 林丽钦.应用毒理学安全评价数据推算重金属毒性系数的探讨[C].青岛:重金属污染监测、风险评估及修复技术高级研讨会,2009.
Lin L Q. Application of toxicological safety evaluation data to calculate the toxicity coefficient of heavy metals [C]. Qingdao: Advanced Seminar on Heavy Metal Pollution Monitoring, Risk Assessment and Remediation Technology, 2009.

- [5] 秦鱼生, 喻华, 冯文强, 等. 成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价 [J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6335–6344.
Qin Y S, Yu H, Feng W Q, et al. Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6335–6344.
- [6] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112–115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 112–115.
- [7] 陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价 [J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3487–3496.
Chen J D, Dai Q G, Xu X H, et al. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3487–3496.
- [8] 郑喜, 王申, 鲁安怀, 等. 土壤中重金属污染现状及防治方法 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79–84.
Zheng X, Wang S, Lu A H, et al. Present situation and control methods of heavy metal pollution in soil [J]. *Journal of Soil and Environment*, 2002, 11(1): 79–84.
- [9] Facchinell I A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114: 313–324.
- [10] 何冰, 杨肖娥, 魏幼璋. 铅污染土壤的修复技术 [J]. 广东微量元素科学, 2001, 8(9): 12–17.
He B, Yang X E, Wei Y Z. Remediation technology of lead-contaminated soil [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2001, 8(9): 12–17.
- [11] 马溪平, 李法云, 肖鹏飞, 等. 典型工业区周围土壤重金属污染评价及空间分布 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 32(2): 326–329.
Ma X P, Li F Y, Xiao P F, et al. Assessment of heavy metal pollution and characteristics of its spatial distribution in soil near the typical industry area [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 32(2): 326–329.
- [12] 张宇, 刘俊杰, 梁成华, 等. 原沈阳市某冶炼厂厂区土壤重金属污染现状研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(15): 6481–6483.
Zhang Y, Liu J J, Liang C H, et al. Study on pollution status of heavy metal in soil from factory district of a former smelter in Shenyang City [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(15): 6481–6483.
- [13] 吕晓男, 孟赐福, 麻万诸. 重金属与土壤环境质量及食品安全问题研究 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 193–200.
Lv X N, Meng C F, Ma W Z. Review of heavy metals, soil environmental quality and food safety [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 193–200.
- [14] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
Liao Z J. *Environmental chemistry and biological effects of trace elements* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992.
- [15] 杨景机. 土壤污染与防治 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
Yang J H. *Soil pollution and control* [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 1995.
- [16] 刘玉机, 房聚燕, 刘绮, 等. 辽宁省环境重金属研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
Liu Y J, Fang J Y, Liu Q, et al. *Research on environmental heavy metals in Liaoning Province* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
China National Environmental Monitoring Center. *Background values of soil elements in China* [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 1990.
- [18] 和莉莉, 李冬梅, 吴钢. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望 [J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1210–1216.
He L L, Li D M, Wu G. Heavy metal contamination of urban soils in China: State and prospect [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1210–1216.
- [19] 陈英旭. 土壤重金属的植物污染化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Chen Y X. *Plant pollution chemistry of heavy metals in soil* [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 2008.
- [20] 安永龙, 黄勇, 刘清俊, 等. 北京城区表层土壤多元素分布特征及重金属元素污染评价 [J]. 地质通报, 2016, 35(12): 2111–2120.
An Y L, Huang Y, Liu Q J, et al. The distribution of surface soil elements and the pollution assessment of heavy metal elements in Beijing [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(12): 2111–2120.