

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第4期

Vol.52 No.4



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

目 次

综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田N₂O和CH₄排放的影响····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对¹⁵N利用及土壤累积的影响····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片: 离子型稀土矿废弃地全景 (由汤叶涛、刘文深提供)

DOI: 10.11766/trxb201406260325

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究*

蒋红群¹ 王彬武^{1†} 刘晓娜² 张微微² 李红² 孙丹峰¹

(1 中国农业大学土地资源管理系, 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

(2 北京市农林科学院综合发展研究所, 北京 100097)

摘要 区域土壤重金属的潜在环境质量风险预警研究是区域土壤重金属管理研究的热点之一。以北京市为研究区, 在镇域尺度上建立土壤重金属输入-输出通量模型和重金属年累积率模型, 计算2006年北京市各乡镇Cr、Ni、Zn、Hg、Cu、As、Cd、Pb八种重金属的通量和累积量。以2006年作为基期年, 采用指示克里格法预测北京市未来30 a土壤重金属含量变化趋势和环境质量风险。研究表明, 在当前发展趋势下, 未来30a北京市Pb、Cr和Ni土壤环境污染风险较小, 含量均处于国家土壤环境质量二级标准以下; Cu、As和Zn最高达到中警级别, Hg和Cd的污染风险变异较大, 各预警级别均有出现, 但概率大小不等, 其中Cd的环境风险最为严重, 高风险区部分位于北京市东部, 呈带状分布; Hg的环境高风险区域随城市的扩张而蔓延。采用地统计学与区域物质流通量模型结合的方法, 可为区域土壤重金属的宏观预警研究提供技术支撑。

关键词 土壤重金属管理; 通量模型; 指示克里格; 风险预警; 北京市

中图分类号 X825 **文献标识码** A

作为危害区域生态系统与人类健康的区域土壤重金属污染研究已成为热点^[1-5]。目前, 对重金属来源的研究主要侧重于识别其自然来源和人为来源, 局限于定性描述和相关分析^[6-8]。而定量分析重金属来源比率, 估算土壤重金属年盈余率等相关研究尚且缺乏。由于土壤环境的复杂性和不确定性, 基于大量的观测资料, 在建立通量模型^[9-10]的基础上, 预测区域环境风险概率、刻画重金属的空间分布特征的研究较为少见, Luo等^[11]对中国的土壤重金属清单和来源比率进行了定量研究, 但也局限于属性数据统计, 未见空间数据度量。目前, 区域土壤重金属污染级别和风险评价方法主要有指数法和克里金插值法两种。常用的指数法有内梅罗指数^[12]、地质累积指数^[13]、潜在生态污染指数^[14]等, 这些方法能较客观地说明样本点重金属的污染级别, 但无法体现重金属的面源污染状

况; 基于地统计学的克里金插值法, 借助空间插值算法, 可实现重金属含量点状数据到面源分布信息的表达, 从而克服了指数法的相关缺点。

随着城市化, 工业化和农业现代化的推进, 北京市废气排放量、污水灌溉量以及农药化肥施用量急剧增加, 使重金属、有机污染物等有害物质在土壤中逐渐积累, 因此宏观尺度上分析这些活动产生的区域环境压力, 可为北京市建设世界城市目标提供决策参考^[15]。本文根据大量文献报道数据和北京统计年鉴数据, 在2006年系统样点研究基础上, 在镇域尺度上, 根据物质流平衡定律, 建立通量模型, 估算土壤重金属通量和累积量。并运用克里金插值算法预测未来30 a北京市各乡镇的重金属空间分布特征和风险状况, 以期北京市重金属污染风险控制提供参考和方法借鉴。

* 国家自然科学基金重点项目 (No. 41130526)、中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2013YJ003)、环保公益性项目 (No. 201309001) 资助

† 通讯作者, E-mail: binw_w@cau.edu.cn

作者简介: 蒋红群 (1988—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事资源环境信息技术研究。E-mail: jianghongsoil@163.com

收稿日期: 2014-06-26; 收到修改稿日期: 2014-12-21

1 研究区概况与数据基础

1.1 研究区概况

北京市包括18个区县254个乡镇,总面积16 801 km²。属于典型的半湿润的大陆性季风气候,年平均降雨量为584.1mm左右^[12]。地形西高东低,母质类型多样。受地形和母质类型的影响,北京市主要产粮区为顺义、通州、房山、大兴、昌平、平谷、密云等远郊区,以生产小麦、玉米和水稻为主,而朝阳、海淀、丰台和石景山等近郊区以蔬菜和果树生产为主^[16]。随着农业现代化的发展,北京市的农业劳动力的投入比例不断减少,农药化肥的投放量持续增加,截止2012年底,北京市单位面积农化比达到703.81 kg hm⁻²。

北京市的污灌面积随工业及城市废水的排放量和农业用水的增加而急剧增加。自解放初期就开始利用污水进行灌溉,发展至今,污灌面积已近6.67 × 10⁴ hm²^[16],主要分布在通州、大兴、朝阳和丰台区等北京东南地区。作为较早进入工业化阶段的大城市,随着“三化”进程的推进,北京市土壤重金属污染愈加严重,而北京市的现状可能为其他二三线城市将来所需面对,因此迫切需要对北京市的环境风险进行评估,以便为其他城市的发展提供借鉴。

1.2 数据基础

本研究基于数据的可获取性以及当前土壤重金属研究的主要考量元素,选取Zn、Pb、Cr、Ni、Cu、Cd、As、Hg八种重金属元素进行探索研究。土壤重金属的输入途径主要有大气沉降、农药化肥、污水灌溉、禽畜粪便、其他^[11];输出途径主要有作物收割、地表排水、淋溶渗漏等^[17-18]。

本研究所涉及的土壤重金属输入输出途径如:灌溉水、畜禽粪便、化肥中的重金属浓度数据均来自于大量文献的查阅,进行汇总统计之后取均值或中值所得。北京市各乡镇化肥使用量、作物种植面积及产量、畜禽出栏量等指标均来自2008年《北京统计年鉴》^[19]及各区县统计年鉴。基准年2006年的土壤重金属含量数据依托北京市农业生态环境质量监测与评价项目获得^[12, 14, 20]。此外,还包括北京市2008年1:10万乡镇界限图、区县界限图、土壤类型图以及北京市土壤普查资料。模型中所涉及到的主要参数来源见表1。

2 风险预警模型构建

2.1 输入量估算

本文所考虑的重金属输入途径主要是大气沉降、化肥、禽畜粪便、污水灌溉和其他等。以乡镇为基本单元,计算各乡镇输入途径带来的重金属量。考虑到数据量较大,难以表述,故本文中所有的计算过程表将不列出。

大气沉降:大气沉降包括大气降尘、降水等两种干湿沉降物,大气沉降通量是大气干湿沉降之和。文献记载干湿沉降的测量方法是通过回收的年集尘罐样直接计算,或者是通过半年集尘罐和季集尘罐分别计算^[12]。大量研究表明,大气沉降是土壤重金属的重要输入源之一^[23, 31, 9]。丛源等^[12]以区县为单位对北京平原区重金属元素的大气沉降通量进行研究,得出8种主要重金属元素的大气沉降通量。本文是在此数据基础上,并补充主城区干湿沉降通量数据,借助GIS软件,进行反距离权重插值和空间统计,得出北京市各乡镇级别的八种重金属的大气沉降通量。

化肥投入:农业生产过程中会投入大量的化肥,而目前市售的一些化肥大都含有大量的重金属元素^[23, 38],因此化肥投入也是土壤重金属的重要输入源之一。根据年鉴数据,在计算施用化肥带入土壤中的重金属量时仅考虑了氮肥、磷肥、钾肥和有机肥,各种肥料中的重金属含量是基于对大量的文献数据进行统计分析取其均值或平均值。具体估算公式如下:

$$FI_j = \sum_{i=1}^4 (C_{ij} F_i) \quad (1)$$

式中, FI_j 表示化肥带来的 j 重金属含量(mg hm⁻²a⁻¹), C_{ij} 表示 i 中肥料中 j 中重金属的浓度(mg kg⁻¹), F_i 为每年 i 中化肥的使用量(kg hm⁻²)。

畜禽粪便:畜禽粪便大部分用于还田,在农田系统中,畜禽粪便也是土壤重金属的来源之一。本文在计算禽畜粪便所带来的重金属量时基于年鉴资料数据,仅考虑了猪粪、牛粪、羊粪、鸡粪和大牲畜五种粪便带入土壤中的重金属量。其中,家禽类如肉鸡、蛋鸡、鸭、鹅等粪便排放量均按鸡的粪便排放量及其相关参数指标进行估算。此处,大牲畜是指体型较大,须饲养2~3 a以上才发育成熟的牲畜,本文中大牲畜的一些参数指标按牛的参数指标

表1 模型参数来源

Table 1 Source of the parameters in the model

输入—输出类型 Type of Input—Output	参数Parameters ¹⁾	时间范围 The range of time	样本范围 The range of sample	来源Source
大气沉降 Atmospheric deposition	大气沉降通量 Atmospheric deposition fluxes	2005—2008	10 ~ 39	丛源等 ^[12] 、周瑞 ^[21] 、 潘月鹏等 ^[22]
	氮肥施用量 Nitrogen fertilizer applied into the soil	2008	—	北京统计年鉴 ^[19]
	磷肥施用量 Phosphate fertilizer applied into the soil	2008	—	北京统计年鉴 ^[19]
	钾肥施用量 Potassium fertilizer applied into the soil	2008	—	北京统计年鉴 ^[19]
	复合肥施用量 Compound fertilizer applied into the soil	2008	—	北京统计年鉴 ^[19]
化肥投入 Fertilizer	氮肥中各种金属含量 Content of each metal elements in nitrogen fertilizer	2001—2007	10	王起超和麻壮伟 ^[23] 、 芮玉奎等 ^[24]
	磷肥中各种金属含量 Content of each metal elements in phosphate fertilizer	2001—2008	10 ~ 225	王起超和麻壮伟 ^[23] 、 封朝晖等 ^[25]
	钾肥中各种金属含量 Content of each metal elements in potassium fertilizer	2001	10	王起超和麻壮伟 ^[23]
	复合肥中各种金属含量 Content of each metal elements in compound fertilizer	2001	10	王起超和麻壮伟 ^[23]
	畜禽出栏数 The total of livestock per year	2008	—	北京统计年鉴 ^[19]
	猪粪便中重金属含量 Content of each metal elements in pig manure	1996—2006	15 ~ 72	李书田等 ^[26] 、刘荣乐等 ^[27] 、 秀丽等 ^[28] 、诸春强 ^[29] 、 张树清等 ^[30]
	羊粪便中重金属含量 Content of each metal elements in sheep manure	2004—2009	19 ~ 162	李书田等 ^[26] 、刘荣乐等 ^[27]
	牛粪便中重金属含量 Content of each metal elements in cow manure	2004—2010	52 ~ 162	李书田等 ^[26] 、刘荣乐等 ^[27] 、 沈秀丽等 ^[28]
畜禽粪便 Livestock manures	鸡粪便中重金属含量 Content of each metal elements in chicken manure	1999—2009	59 ~ 162	李书田等 ^[26] 、刘荣乐等 ^[27] 、 沈秀丽等 ^[28] 、诸春强 ^[29]
	大牲畜粪便中重金属含量 Content of each metal elements in large livestock manure	2004—2010	52 ~ 162	李书田等 ^[26] 、刘荣乐等 ^[27] 、 沈秀丽等 ^[28]
	粪便利用率 Fecal utilization rate	2010	—	仇焕广等 ^[31]
	粪便排泄系数 Fecal excretion coefficient	2006—2007	—	王晓燕等 ^[9]

续表

输入—输出类型 Type of Input—Output	参数Parameters ¹⁾	时间范围 The range of time	样本范围 The range of sample	来源Source
	种植作物类型Crop types	2008	—	北京统计年鉴 ^[19]
灌溉水 Irrigation water	小麦、玉米、水稻、高粱、油料作物蔬菜灌溉需水量 Irrigation water consumed by wheat, corn, rice, sorghum, oil crops and vegetables	2005	—	周尧龙 ^[32]
	污水中重金属浓度Concentration of heavy metals in wastewater	1980—2010	71 ~ 303	辛术贞等 ^[33]
	未污染水中重金属浓度Concentration of heavy metals in water without pollution	2013	—	张倩 ^[34]
作物带走 Crop absorption	小麦籽粒中重金属含量Content of heavy metals in wheat grain	2004	21	杨军等 ^[35]
	玉米籽粒中重金属含量Content of heavy metal in corn grain	2008	40	王四新等 ^[36]
	水稻籽粒中重金属含量Content of heavy metal in rice grain	2013	—	张倩 ^[34]
	蔬菜籽粒中重金属含量Content of heavy metal in vegetables	2001	157	吴泓涛 ^[37]
地表排水 Surface drainage	地表排水中重金属浓度Concentration of heavy metals in surface-drainage	2013	—	张倩 ^[34]
	农业耗水率Agricultural water consumption rate	2007	—	周永章 ^[10]

1) 表示各参数中重金属浓度1) represent the heavy metal concentrations of the parameters

估算。家禽类年产量按照出栏量估算。粪利用率和粪便排泄系数参照全国统一产污系数核算方法和文献资料数据估算^[9, 31]。具体估算公式如下：

$$LMP_j = \sum_{i=1}^5 (C_{ij} W_j R_i \alpha_i / T) \quad (2)$$

式中， LMP_j 表示畜禽粪便带入土壤中的重金属含量 ($\text{mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)， C_{ij} 表示*i*畜禽粪便中重金属浓度 (mg kg^{-1})， R_i 表示*i*畜禽粪便的排泄系数 ($\text{kg 头}^{-1} \text{a}^{-1}$)， α_i 表示粪利用率 (%)， T 表示农作物种植面积 (hm^2)。

灌溉水：北京市污水灌溉由来已久，自解放初期就开始进行污水灌溉^[16]，经过长期的污水灌溉，污灌农田土壤表层已有明显的重金属累积现象。北京市的污灌区域主要分布于通州、朝阳、大兴、海淀的部分乡镇^[39]。本文污灌区域按污灌水中重金属浓度估算，非污灌区域按非污灌水中重金属浓度估算。农田系统中种植作物类型仅考虑北京市主要种植作物类型，即，小麦、玉米、水稻、高粱、油料作物和蔬菜。各作物需水量参照周宪龙^[32]的相关结果，以北京市月均降雨量和作物物候参数为参照，从各类作物需水量中分别扣除自然降雨量，获得作物实际需灌溉水量。重金属输入量估算公式如下：

$$SI_j = \sum_{i=1}^6 (W_i C_j) \quad (3)$$

式中， SI_j 表示污水灌溉带入土壤中的重金属含量 ($\text{mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)， W_i 表示*i*作物的年需灌溉水量 (mm)， C_j 表示污灌水（或非污灌水）中重金属含量 (mg L^{-1})。

其他来源：输入到土壤中的其他重金属来源主要有：（1）工业废弃物，如：造纸厂、食品厂等废弃物一般用于堆肥，在计算化肥带入土壤中的重金属含量时已经考虑，本文不再重复计算；（2）作物秸秆，由于其来源于农田最终又通过多种方式归还于土壤^[40]，故也不做考虑；（3）城市固体废弃物、电子废弃物，作为一个新的污染源^[37]，每年从城市和工厂排放的量超过百万t，占重金属污染的3%，且处理方式大部分都是采取原始方法处理，如：露天燃烧、强酸入侵等缺乏排放控制措施的处理方式^[11]，尽管这些处理方式给周边环境带来了土壤污染和多卤代物的污染，但由此带入土壤中的有毒重金属的量很少，贡献率不大。此外，在大气沉降通量计算中也涉及由这些废弃物燃烧间

接带入土壤中的重金属含量，因此，本文也将不再考虑。

2.2 输出量估算

北京市土壤重金属的输出途径主要有作物吸收、地表排水、蒸腾作用、淋溶、渗漏等。北京市的母质类型主要是褐土和潮土，重金属和腐殖质的整合，吸附作用明显，通过淋溶和渗漏向下迁移的能力较弱，故本文将不考虑淋溶渗漏的影响。另外蒸腾作用相对于总的输入量的比率一般较小^[41]，也可忽略不计。重金属的输出途径主要有作物收获、地表排水、风的搬运等，其中风的搬运作用属于水平尺度上重金属的迁移和转化，本文主要针对垂直尺度上重金属的通量进行研究分析，故不在本文考虑范围。因此本文重金属的输出途径主要考虑作物吸收和地表排水两种。

作物吸收：北京市的主要种植作物类型有小麦、玉米、水稻、高粱、油料作物和蔬菜等。根据《北京统计年鉴》（2008）记载，高粱和油料作物的种植面积较小，考虑到搜集资料数据的可获取性，本文仅考虑小麦、玉米、水稻和蔬菜四种主要作物种植类型进行估算。其中，蔬菜考虑了根茎类包括萝卜、胡萝卜、芹菜、莴苣，叶菜类包括菠菜、大白菜、小白菜、圆白菜、大葱和瓜果类包括大椒、冬瓜、黄瓜、辣椒、茄子和西红柿三大类十六种蔬菜类型^[37]。各作物类型中可食部分重金属含量值来源于文献资料（见表1），在对数据进行统计分析的基础上选择相应的均值或者中值进行估算。具体估算方法如下：

$$CA_j = \sum_{i=1}^4 (C_{ij} \frac{Y_i}{T_i}) \quad (4)$$

式中， CA_j 表示作物对*j*中重金属的吸收总量 ($\text{mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)， C_{ij} 表示*i*中作物中*j*重金属的浓度 (mg kg^{-1})， Y_i 表示*i*作物产量 (kg a^{-1})， T_i 表示*i*作物种植面积单元。

地表排水：本文地表排水按照灌溉水中农业耗水后多余的水通过地表排出进行计算，对于地表径流量，由于其净流量较小，暂不考虑在内。调查数据显示，北京市主要产量区为顺义、通州、房山、大兴、平谷、密云等远郊区，蔬菜产区为朝阳、海淀、丰台、石景山等近郊区。产量区的作物需水量按照冬小麦—夏玉米的灌溉定额本文取 $7128 \text{ m}^3 \text{hm}^{-2}$ 来计算，近郊区根据蔬菜的灌溉定额取 $16305 \text{ m}^3 \text{hm}^{-2}$ 来计算^[31]。故地表排水估算公式如下：

表2 模型参数所取数值

Table 2 Values cited for the parameters of the model

输入-输出类型 Type of input-output	参数 Parameters	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As	Cu	单位 Unit	粪便利用率 Fecalutilization rate (%)	粪便排泄系数 Fecal excretion coefficient (kg ind. ⁻¹ a ⁻¹)	农业耗水率 Agricultural water consumption rate (%)
化肥 Fertilizer	氮肥 N fertilizer	4.87	0.012	0.022	1.85	0.38	0.094	—	0.41				
	磷肥 P fertilizer	60.96	0.93	0.5	3.6	—	0.052	—	7.36				
	钾肥 K fertilizer	9.63	<0.000 8	0.05	—	—	0.207	—	3.22		—	—	
	复合肥 Compound fertilizer	348.2	0.64	0.18	—	—	0.903	—	10.79				
	猪粪 Pig manure	1 064	9.75	0.8	42.2	9.98	0.05	59.96	1 018	mg kg ⁻¹	62.5	300	—
	牛粪 Cow dung	151.9	15.7	0.7	15.2	14.1	0.1	2.01	46.5		62.5	7 300	
	羊粪 Sheep manure	2	12.4	1.3	8	12.4	0.19	1.46	28.7		75	474.5	
	家禽粪便 Livestock manures	309.5	23.3	0.5	98.3	20.5	0.12	2.53	91.6		65	6	
	大牲畜 Large livestock	151.9	15.7	0.7	15.2	14.1	0.1	2.01	46.5		62.5	7 300	

续表

输入-输出类型 Type of input-output	参数 Parameters	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As	Cu	单位 Unit	粪便利用率 Fecalutilization rate (%)	粪便排泄系数 Fecal excretion coefficient (kg ind. ⁻¹ a ⁻¹)	农业耗水率 Agricultural water consumption rate (%)	
灌溉水 Irrigation water	污灌水 Sewage irrigation	200	49	7.3	9.1	6.5	0.14	12	31	$\mu\text{g L}^{-1}$	—	—		
	非污灌水 Non sewage irrigation	14.4	5	1	4	3.01	0.029	4	3.44		—	—		
	冬小麦 Winter wheat				548									
作物需灌溉水量 Crop irrigation water	夏玉米 Summer corn				380.2									
	水稻 Rice				821.5					mm				
	高粱 Sorghum				421.3									
	油料作物 Oil crops				289.8									
	蔬菜 Vegetables				1 631									
	小麦籽粒 Wheat grain	32.7	0.39	0.02	0.13	0.39	0.004	0.036	6.29					
	玉米籽粒 Maize grain	22.75	0.167	0.02	0.338	—	—	0.015	3.304					
	水稻籽粒 Rice grain	18	0.2	0.07	0.508	0.265	0.007	0.117	3.35					
	蔬菜 Vegetables	0.255	0.099 6	0.02	0.093	0.105	—	—	0.879					
	作物带走 Removal by crop	重金属含量 The content of heavy metals	28.5	2.95	0.79	2.33	1.72	0.22	4.68		5.71	$\mu\text{g L}^{-1}$		
地表排水 Surface drainage														

$$SD_j = C_j I_j (1 - \omega) \quad (5)$$

式中, SD_j 表示地表排水带走的重金属量 ($\text{mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), C_j 表示地表排水中的重金属浓度 (mg L^{-1}), I_j 表示主要作物的灌溉定额 ($\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$), ω 表示农业耗水率 (%), 此处参照周永章的相关研究结果^[10]。计算时参数所选的数值具体见表2。

2.3 通量模型

物质流分析是指在一定时空范围内对特定系统的物质流动的源、路径及汇进行系统性分析。根据质量守恒定律, 物质流分析结果通过其所有的输入、贮存及输出过程能最终达到物质平衡^[9]。因此根据物质流平衡分析可知, 土壤中重金属的通量估算模型为:

$$NF = \sum I - \sum O \\ = Q + FI + LMP + SI - CA - SD \quad (6)$$

式中, Q 、 FI 、 LMP 、 SI 分别表示大气沉降、化肥、畜禽粪便、污水灌溉带入土壤中的重金属量。 CA 、 SD 分别表示作物吸收和地表排水从土壤中带走的重金属量。

2.4 重金属年累积率模型

本文在计算时以2006年为基准年, 由于2006

年和2008年时间间隔较短, 故重金属累积率参照2008年估算的累积率。假设土壤有效土层厚度为20cm。土壤容重是在土壤类型图的基础上, 根据土壤类型以及查找北京市土壤普查资料, 根据不同的土壤类型给予各乡镇不同的土壤容重, 则重金属年累积率模型估算公式如下:

$$\gamma = \frac{NF}{\rho h} \pi \quad (7)$$

式中, γ 表示重金属年累积率 (mg kg a^{-1}), NF 表示重金属的年净输入量 ($\text{mg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), ρ 表示土壤容重 (g cm^{-3}), h 表示土层厚度 (cm), π 表示单位换算系数 (本文中 π 为 10^{-2})。

2.5 潜在生态环境风险预测预警

本文参考吴春发^[42]的研究将北京市土壤重金属的潜在生态风险预警类型分为五级: 无警、轻警、中警、重警和巨警。王彬武等^[43]研究表明指示克里格不要求原始数据服从正态分布, 并能有效抑制特异值对变异函数稳健性的影响, 是处理有偏数据的有力工具, 故借助GIS软件中的指示克里格概率模型, 设置阈值大小, 获得预警因子的概率图, 各预警级别的具体内涵见表3, 表4。

表3 预警类型及内涵

Table 3 Types of early warning and their connotation

预警类型 Type of early warning	阈值概率 p Threshold probability (%)	警情描述 Description of early warning
无警 Level zero	$p \leq 10$	含量接近土壤环境背景值, 基本无环境问题 Content is close to the background value of the soil environment, but no environmental problems
轻警 Level One	$10 < p \leq 30$	含量有所增加, 有轻微环境问题 Content increasing with slight environmental problems
中警 LevelTwo	$30 < p \leq 60$	含量明显增加, 环境问题明显 Content significantly increasing with obvious environmental problems
重警 Level Three	$60 < p \leq 90$	含量增加急剧, 环境问题较大 Content increasingdrastically, withquite seriousenvironmental problems
巨警 Level Four	$p > 90$	含量达到国家环境二级标准, 环境问题严重 Content reaching to Grade II criteria of the National Standard for Environment Quality, with serious environmental problems

表4 各元素阈值大小

	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As	Cu
阈值 Threshold	250	300	0.3	300	50	0.5	25	100

注：数据来源于《土壤环境质量标准（GB15618-1995）》 Note: The data are sourced from the soil environment quality standard (GB15618-1995)

3 结果与讨论

以2006年为基准年，在维持现有的土壤重金属累积率不变的情况下，根据设定的预警模式，北京市未来30 a，八种重金属中，Pb、Ni和Cr均在所设定的阈值以内，处于无警级别以下，基本不存在环境风险，故文中重点对其含量进行空间分析；而Zn、As和Cr均处于中警级别以下，Hg和Cd出现了不同程度的重警和巨警潜在风险区。五种元素均存在不同程度的环境风险，因此，本文利用地统计学的指示克里格概率模型绘制五种重金属的环境风险预警等级图，主要对五种元素的环境风险状况进行分析。

3.1 Pb、Cr、Ni含量的空间分析

北京市2006—2036年的30a间，重金属Pb、Ni和Cr都处于无警级别以下，风险概率很小，这与姜菲菲等^[5]2006年重金属风险概率研究结果相吻合。为分析Pb、Ni、Cr 30 a后的重金属风险区域，利用ArcGIS软件得出克里格的预测图（图1）。根据预测2036年Pb的空间趋势图（图1a），北京市Pb的含量自北向南含量逐渐增加，较高含量 $50 \sim 63 \text{ mg kg}^{-1}$ 区域位于昌平区的北七家镇，房山区的大石窝镇、长沟镇和琉璃河等南部地区，大兴区的亦庄镇、青云店镇、长子营镇和采育镇等东部地区以及通州区除宋庄镇的大部分地区，此外还包括朝阳区的豆各庄等东南部的小部分地区。但北京市Pb的含量均未超过国家土壤环境质量二级标准。延庆、怀柔、密云和平谷地区Pb的含量值在 $30 \sim 40 \text{ mg kg}^{-1}$ ，远远低于国家土壤环境质量二级标准，其余地区均处于 $40 \sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ ，而根据Pb的物质流分析知，Pb的高含量区大气沉降或复合肥的输入量较多，说明土壤中Pb含量可能与当地大气沉降量和肥料施用量过多有关，这也与郑袁明等^[44]的研究结果相符。

北京市2036年的Ni的含量值处于 $3 \sim 43 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间，也均处于国家土壤环境质量二级标准之下。其高值（ $34 \sim 43 \text{ mg kg}^{-1}$ ）区大多位于北京市的边缘地带（图1b）。而北京市远郊区是主要产粮区，故近30 a Ni的累积可能与大量使用农药化肥以及灌溉频繁带来较多重金属有关。此外，郑袁明等^[45]分析Ni的空间分布时指出，北京近郊区土壤Ni含量主要是受土壤母质的影响。Ni在密云水库北部地区也出现高值现象，主要原因可能是由于Ni含量可能也受到土壤矿物的影响，密云县北部地区的采矿业分布可能同时引起了土壤中Ni含量的增加。此外，Ni含量的增加可能还受到石油燃烧等人类活动的影响。

北京市2036年Cr处于 $18 \sim 107 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间，均在国家土壤环境质量二级标准以下（图1c）。高值（ $73 \sim 107 \text{ mg kg}^{-1}$ ）区域位于密云县东北的大部分区域、平谷的镇罗营镇等小部分地区、通州区的潮县镇和朝阳区的东部地区。这可能与密云采矿业以及成土母质有关，密云采矿往往与多种重金属共生，开发过程和尾矿处理不当很容易造成大量重金属在周围土壤中积累，成土母质中棕壤和褐土的Cr含量高于其他母质土壤，同时，霍霄妮等^[3]指出Cr、Ni含量的影响因素主要是土地利用强度和成土母质。虽然Cr的含量值尚未达到国家土壤环境二级标准预警线，但是密云县大部分区域以及通州和朝阳的个别区域仍存在Cr污染风险，应当采取相应的规避措施，以防止土壤和密云水库受到Cr的污染。

3.2 Zn、Cd、Hg、As、Cu的环境预警分析

根据本文所设定的预警级别，运用指示克里格方法得到北京市2036年五种元素的环境污染风险概率图，以此为依据进行各元素的预警分析（图2a）。北京市Zn的预警级别大部分处于无警区，仅朝阳区的来广营地区以及小红门地区风险较高（中警），Zn的环境风险概率不高。具体看来，以来广营和小红门地区为中心外扩一定范围（最大距离

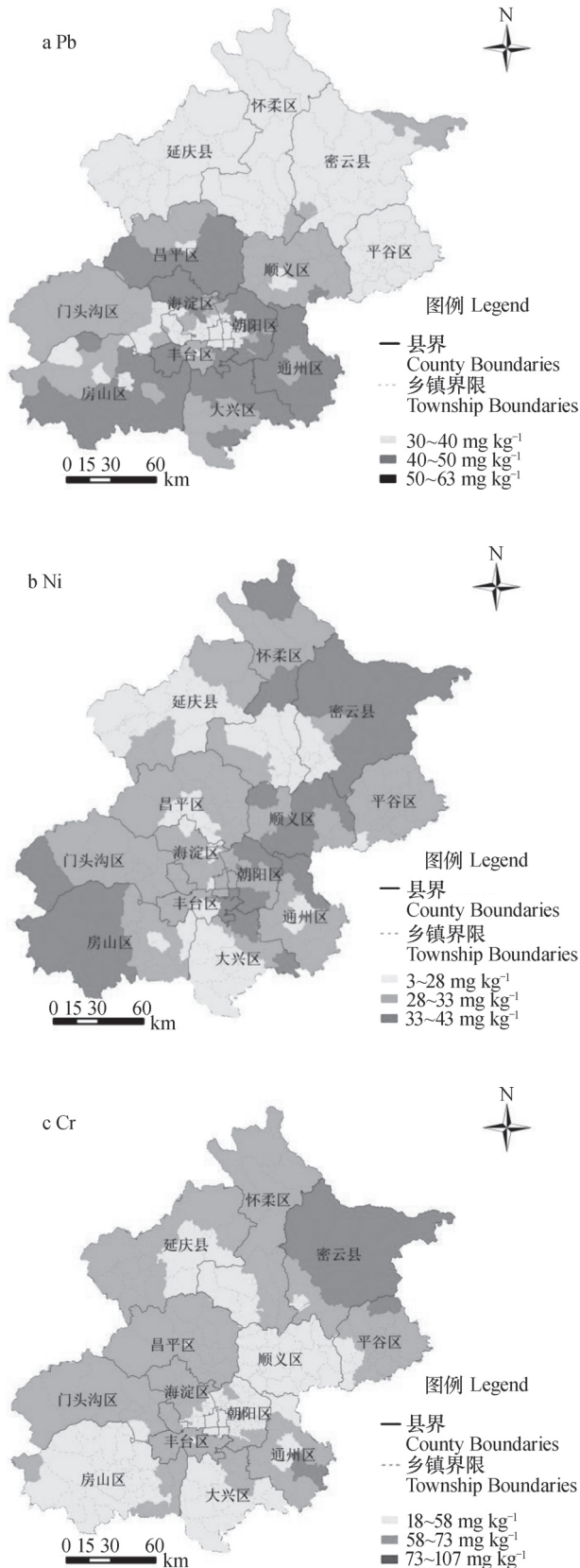


图1 北京市2006—2036年Pb、Ni、Cr三种重金属空间分布图

Fig.1 A spatial distribution map of Pb, Ni, Cr in Beijing in the period of 2006—2036

为1 685 m)的环形区域为轻警区级别,主要乡镇有昌平区的东小北口镇和北七家镇南部的少部分地区,朝阳区的奥运村地区、大屯地区、望京街道、崔各庄地区以及孙和地区办事处等毗邻来广营地区的小部分区域,此外还包括朝阳区西南部的十八里店地区、丰台区的南苑乡、大兴区的亦庄镇和旧宫镇等毗邻小红门地区的小部分区域。但总体看来,根据对Zn的物质流分析知,朝阳区的大气沉降中Zn通量较高,高达779 ($\text{mg hm}^{-2}\text{a}^{-1}$),因此朝阳区较北京市其他地区Zn的预警级别高的原因可能是市区交通密度较高。汽车尾气排放量较大,降尘量也相应较大,从而使得Zn的含量较高;远郊区的丰台区Zn风险概率也相对较高,或因作为重要的果蔬种植生产基地,土壤施用锌肥或含锌农药以及畜禽粪便等有机肥的大量施用所致^[46]。

北京市Cd未来的环境风险概率较高,高风险区域主要集中在北京东南部的通州、大兴、朝阳地区以及顺义和密云的部分地区(图2b)。昌平和房山西南等部分地区的风险高于其周围地区,但都处于中警以下。根据上文通量模型知:重金属四类来源途径对Cd的贡献率大小为污水灌溉(69.8%)>禽畜粪便(29.7%)>化肥(0.5%)>大气沉降(0.2%)。由此可见,污水灌溉和禽畜粪便对Cd的贡献较大,因此在Cd的治理中,要重视对这两类来源的管理与控制。此外,Ratha和Sahu^[47]指出Cd是由人类活动进入环境的典型元素,农业灌溉,大气沉降,采矿活动以及人类的其他活动均会带来重金属Cd的环境污染^[42, 48]。因此,北京市2036年的Cd的含量增加可能是与农业灌溉等农业活动有关。对于通州和大兴等北京的污水灌溉区Cd的污染可能是由于20世纪中后期大量的污水滞留农业土壤而造成的,顺义Cd的污染可能来自于设施农业的种植,密云采矿业则是导致密云东北部Cd风险相对较高的主要原因。因此,应按照“因区治污”原则,提出差异化Cd污染防治措施。

北京市未来Hg的环境风险概率主要分布在人类活动密集的城区附近和工矿用地边缘,主要是以城区为中心,等值线以同心圆的形式向外逐渐降低^[49](图2c)。巨警级别区为以西城区的中心为圆心,以最大距离为20455m为半径而组成的一个不规则圆形区域;外扩依次为重警、中警、轻警级别区,但范围较小。而北京市远郊区Hg均处于无警区级

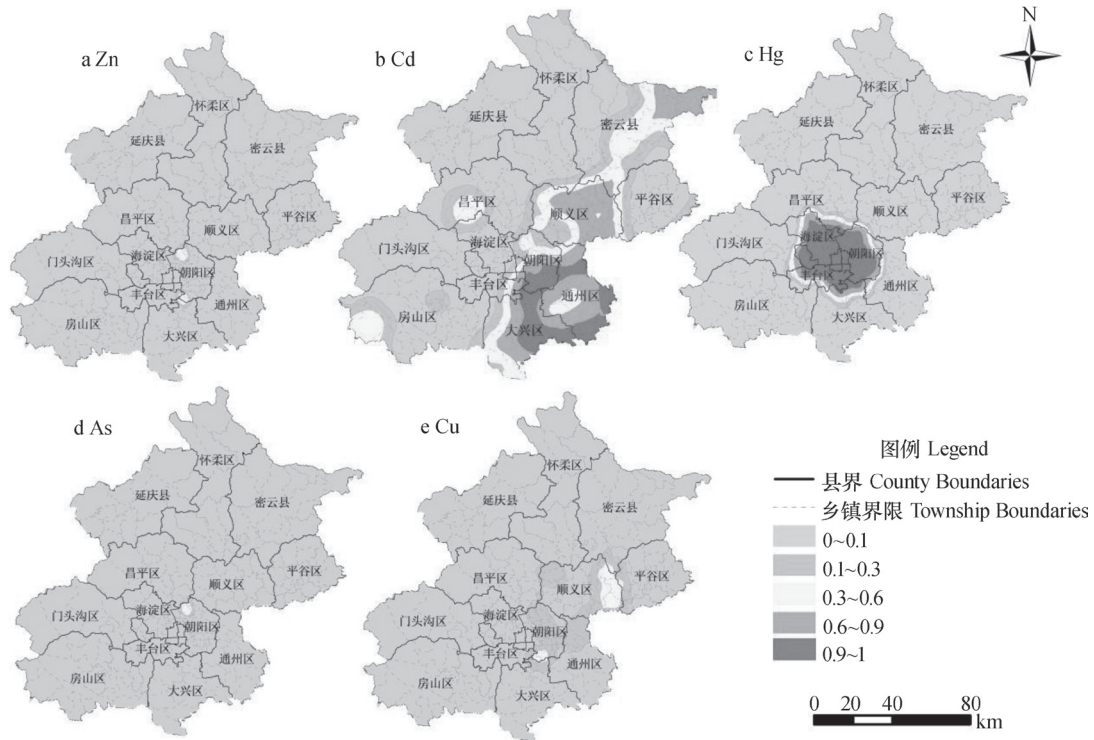


图2 北京市2006—2036年Zn、Cd、Hg、As、Cu五种重金属潜在风险预警图

Fig.2 Potential risk probability maps of Zn, Cd, Hg, As and Cu in Beijing in the period of 2006—2036

别区，同时成杭新也指出北京市土壤中Hg主要来源于燃煤和冶金以及汽车尾气的释放，通过大气干湿沉降在活化后进入地表土壤中^[50]。故Hg受人类活动的影响较大，且随着北京城区的扩张，Hg污染逐年向四周扩散。

北京市未来As的环境风险不大，预警级别趋势与Zn的预警趋势图类似，均处于无警、轻警和中警级别区，其高风险概率区为朝阳区的来广营地区（图2d）。而以来广营地区外扩一定距离（最大距离为4 500 m）为轻警级别区，其余为无警级别区。陈同斌等^[51]指出自然土壤的As的含量最低也最接近背景值。根据统计年鉴资料^[19]计算分析知，朝阳区来广营地区的As的环境风险相对较高，也可能是与当地的人类活动如农业活动有关。此外，整体而言As与Zn的预警趋势图的空间分布结构大致相似，说明Zn和As具有一定的同源性，且风险值均偏低，这与成土母质有关。

北京市Cu的未来环境风险也处于无警、轻警和中警三个预警级别（图2e），Cu的环境风险概率不高。且风险概率较高的中警级别区为顺义区的张镇、龙湾屯镇、大孙各庄镇和杨镇地区的全部或大部分地区，以及朝阳区的十八里店和小红

门地区的大部分地区。Cu元素一般存在于农药和城市污水中，高风险概率区可能是由于农业生产作用的结果^[52]。根据物质流分析知，各来源对土壤中Cu的贡献率大小为畜禽粪便（77.50%）>灌溉水（22.41%）>化肥投入（0.07%）>大气沉降（0.01%）。

4 结 论

2006–2036年间，北京市Pb、Cr、Ni三种重金属预警级别均处于无警级别，未达到土壤环境质量二级标准，环境风险概率较小。Pb的高值区主要分布在主城区附近，大气沉降可能是其主要来源；东北部的Cr、Ni含量都较高，潜在风险大，应当采取相应的规避措施。北京市Zn、As、Cu处于中警级别以下；Hg和Cd出现了不同程度的重警和巨警级别区域；五种重金属元素含量均可能出现超过土壤环境二级标准的现象，且概率大小不等。其中Hg随着北京城区的扩张，污染逐年向四周扩展，说明其受人类影响较大。Cd的高风险区域面积较大，沿东部呈带状分布。以此为参考，相关部门可以针对不同区域不同环境风险等级和不同重金属污

染类型, 制定差异化的管控政策。

由于数据参数的局限性与土壤环境管理的复杂性, 该研究仍存在不确定性, 如在考虑重金属的输入输出途径时, 风蚀、农化淋溶渗漏以及作物籽粒作为饲料后转化为畜禽粪便还回土壤的量等途径忽略未计, 这些均可能导致土壤重金属累积通量被人为缩小或者放大。另外, 模型中的部分参数来自文献数据, 部分乡镇采用同一数值, 未进行差异化处理, 可能使通量模型存在不足。今后应进一步在土地利用系统物质流模型不确定性分析、多尺度下土壤重金属风险预警防控、不同人地关系系统土壤重金属源-汇特征分析等方面开展深入研究。

参考文献

- [1] Hu K L, Zhang F R, Li H, et al. Spatial patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing. *Pedosphere*, 2006, 16 (6) : 690—698
- [2] Wang B W, Li H, Sun D F. Social-Ecological patterns of soil heavy metals based on a self-organizing map (SOM) : A case study in Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11 (4) , 3618—3638
- [3] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京市农业土壤重金属状态评价. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (1) : 66—71. Huo X N, Li H, Sun D F et al. Status assessment of heavy metals in Beijing agricultural soils (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (1) : 66—71
- [4] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素. *农业工程学报*, 2010, 26 (5) : 78—82. Huo X N, Li H, Sun D F, et al. Spatial autogression model for heavy metals in cultivated soils of Beijing (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26 (5) : 78—82
- [5] 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价. *农业工程学报*, 2011, 27 (8) : 330—337. Jiang F F, Sun D F, Li H, et al. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2011, 27 (8) : 330—337
- [6] 赵多勇, 王成, 杨莲, 等. “环境—植物—人体”体系中重金属来源及迁移途径. *农业工程*, 2013, 3 (3) : 55—58. Zhao D Y, Wang C, Yang L, et al. Source identification and transfer route of heavy metal pollution in environment-plant-human system: A review (In Chinese). *Agricultural Engineering*, 2013, 3 (3) : 55—58
- [7] Luo X S, Yu S, Zhu Y G, et al. Trace metal contamination in urban soils of China. *Science of the Total Environment*, 2012, 421/422: 17—30
- [8] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2012, 425: 66—74
- [9] 王晓燕, 阎恩松, 欧洋, 等. 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征. *环境科学学报*, 2009, 29 (7) : 1549—1560. Wang X Y, Yan E S, Ou Y, et al. Material flow analysis of the phosphorus cycle in the upper watershed of the Miyun Reservoir in Beijing (In Chinese). *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 29 (7) : 1549—1560
- [10] 周永章, 沈文杰, 李勇, 等. 基于通量模型的珠江三角洲经济区土壤重金属地球化学累积预测预警研究. *地球科学进展*, 2012, 27 (10) : 1115—1125. Zhou Y Z, Shen W J, Li Y, et al. A study of prediction and early-warning forecast on geochemical accumulation of soil heavy metals based on flux model in Pearl River delta Economic zone (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2012, 27 (10) : 1115—1125
- [11] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 2524—2530
- [12] 丛源, 陈岳龙, 杨忠芳, 等. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量. *地质通报*, 2008, 27 (2) : 257—264. Cong Y, Chen Y L, Yang Z F, et al. Dry and wet atmospheric deposition fluxes of elements in the plain area of Beijing Municipality (In Chinese). *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (2) : 257—264
- [13] 孙崇玉. 吉林省典型黑土区农田土壤重金属环境风险研究. 北京: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2013. Sun C Y. Environmental behaviors and ecological effects of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Jilin Province (In Chinese). Beijing: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2013
- [14] 姜菲菲. 北京市农业土壤重金属环境风险评价及物质流分析. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2011. Jiang F F. Environmental risk assessment of heavy metals in Beijing agriculture soils and material flow analysis (In Chinese). Beijing: College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, 2011
- [15] 张凤荣, 郭力娜, 关小克, 等. 基于养分平衡和环境保护的北京市城市结构探讨. *土壤通报*, 2012, 43

- (4): 769—773. Zhang F R, Guo L N, Guan X K, et al. The multi-cluster city structure is good for nutrient recycle and environmental protection (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (4): 769—773
- [16] 杨华峰. 北京地区污水灌溉农田若干特征研究. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2005. Yang H F. Study on some characteristics about sewage irrigation farmland of Beijing region (In Chinese). Beijing: College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, 2005
- [17] 任旭喜. 土壤重金属污染及防治对策研究. *环境保护科学*, 1999, 25 (5): 31—33. Ren X X. The heavy metal pollution in soil and the prevention measurement (In Chinese). *Environmental Protection Science*, 1999, 25 (5): 31—33
- [18] 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 土壤重金属污染来源及其解析研究进展. *广东微量元素科学*, 2007, 14 (4): 1—6. Shao X X, Wu M, Jiang K Y. Research progress in sources identification of soil heavy metal pollution (In Chinese). *Guangdong Weiliang Yuansu Kexue*, 2007, 14 (4): 1—6
- [19] 北京市统计局. 北京统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2008. Beijing Municipal Statistics Bureau. Beijing statistical yearbook (In Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2008
- [20] 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕作土壤4种重金属空间分布的网络特征分析. *农业工程学报*, 2012, 28 (23): 208—215. Li S M, Li H, Sun D F, et al. Network analysis of agricultural soil heavy metals spatial distribution in Beijing (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2012, 28 (23): 208—215
- [21] 周瑞. 北京地区大气降水的化学性质及其影响因素研究. 山东: 济南大学资源与环境学院, 2011. Zhou R. Study on chemical characteristics and influence factors of atmospheric precipitation in Beijing (In Chinese). Shandong: College of Resources and Environmental Sciences, University of Jinan, 2011
- [22] 潘月鹏, 王跃思, 杨勇杰, 等. 区域大气颗粒物干沉降采集及金属元素分析方法. *环境科学*, 2010, 31 (3): 553—559. Pan Y P, Wang Y S, Yang Y J, et al. Determination of trace metals in atmospheric dry deposition with a heavy matrix of PUF by inductively coupled plasma mass spectroscopy after microwave digestion (In Chinese). *Environmental Science*, 2010, 31 (3): 553—559
- [23] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险. *农村生态环境*, 2004, 20 (2): 62—64. Wang Q C, Ma Z W. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks (In Chinese). *Rural Eco-Environment*, 2004, 20 (2): 62—64
- [24] 芮玉奎, 申建波, 张福锁, 等. 应用 ICP-MS 测定两种氮肥中重金属含量. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28 (10): 2425—2427. Rui Y K, Shen J B, Zhang F S, et al. Application of ICP-MS to determination of heavy metal content of heavy metals in two kinds of N fertilizer (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28 (10): 2425—2427
- [25] 封朝晖, 刘红芳, 王旭. 我国主要肥料产品中有害元素的含量与评价. *中国土壤与肥料*, 2009 (4): 44—47. Feng C H, Liu H F, Wang X. Toxic substances contents in fertilizers and its environmental risk assessment in China (In Chinese). *China Soil and Fertilizer*, 2009 (4): 44—47
- [26] 李书田, 刘荣乐, 陕红, 等. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (1): 179—184. Li S T, Liu R L, Shan H, et al. Nutrient contents in main animal manures in China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (1): 179—184
- [27] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析. *农业环境科学学报*, 2005, 24 (2): 392—397. Liu R L, Li S T, Wang X B, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24 (2): 392—397
- [28] 沈秀丽, 杨增玲, 韩鲁佳. 畜禽粪便引发的重金属污染的研究现状. *中国农业工程学会2011年学术年会论文集*, 2011. Shen X L, Yang Z L, Han L J. Research status of heavy metals pollution caused by livestock and poultry manures. *Academic essays of the Chinese Society of Agricultural Engineering in 2011 (In Chinese)*, 2011
- [29] 诸春强. 畜禽粪便中重金属残留及对青菜与萝卜的影响. 江苏: 扬州大学兽医学院, 2008. Zhu C Q. Study on the heavy metals in livestock and poultry manures and their effects on the pakchoi and radish (In Chinese). Jiangsu: College of Veterinary Medicine, University of Yangzhou, 2008
- [30] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (6): 822—829. Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11 (6): 822—829
- [31] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 等. 我国畜禽粪便污染的

- 区域差异与发展趋势分析. 环境科学, 2013, 34 (7): 2766—2774. Qiu H G, Liao S P, Jing Y, et al. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China (In Chinese). Environmental Science, 2013, 34 (7): 2766—2774
- [32] 周宪龙. 北京地区种植业水资源优化利用研究. 北京: 中国农业大学农学与生物技术学院, 2005. Zhou X L. Optimization of water resources utilization for crop ping system in Beijing (In Chinese). Beijing: College of Biology and Technology, China Agricultural University, 2005
- [33] 辛术贞, 李花粉, 苏德纯, 等. 我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律. 农业环境科学学报, 2011, 30 (11): 2271—2278. Xin S Z, Li H F, Su D C, et al. Concentration characteristics and historical changes of heavy metals in irrigation sewage in China (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30 (11): 2271—2278
- [34] 张倩. 水稻田系统土壤重金属流及阈值分析. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2013. Zhang Q. Heavy metals flow analysis and threshold values of fertilizer in rice system of cropland (In Chinese). Beijing: College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, 2013
- [35] 杨军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉风灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析. 环境科学学报, 2005, 25 (12): 1661—1668. Yang J, Chen T B, Zheng Y M, et al. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human health risks (In Chinese). Journal of Environmental Sciences, 2005, 25 (12): 1661—1668
- [36] 王四新, 张董燕, 季海峰, 等. 玉米中重金属与农药残留的检测和分析. 饲料研究, 2008, 12: 40—41. Wang S X, Zhang D Y, Ji H F, et al. Detection and analysis of heavy metal and pesticide residue in corn (In Chinese). Feed Research, 2008, 12: 40—41
- [37] 吴泓涛. 北京市土壤和蔬菜重金属的区域分布与污染评价. 重庆: 西南农业大学资源与环境学院, 2001. Wu H T. Regional distribution of heavy metals in soils and vegetables of Beijing and their pollution assessments (In Chinese). Chongqing: College of Resources and Environmental Sciences, Southwest Agricultural University, 2001
- [38] 谭晓冬, 董文光. 商品有机肥中重金属含量状况调查. 环境管理, 2006 (1): 50—51. Tan X D, Dong W G. Investigation of the content of heavy metals in commercial organic fertilizer (In Chinese). Environmental Management, 2006 (1): 50—51
- [39] Wong M H, Wu S C, Deng W J, et al. Export of toxic chemicals-A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling. Environmental Pollution, 2007, 149: 131—140
- [40] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析. 土壤肥料, 2006 (1): 3—8. Huang H X, Li S T, Li X L, et al. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China (In Chinese). Soils and Fertilizers, 2006 (1): 3—8
- [41] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. Science of the Total Environment, 2003, 311: 205—219
- [42] 吴春发. 复合污染土壤环境安全预测预警研究——以浙江省富阳市某污染场地为例. 浙江: 浙江大学环境与资源学院, 2008. Wu C F. Prediction and early-warning for soil environmental safety in a mixed contaminated area: A case study in Fuyang City, Zhejiang Province, China (In Chinese). Zhejiang: College of Environmental and Resources, Sciences Zhejiang University, 2008
- [43] 王彬武, 李红, 蒋红群, 等. 北京市耕地土壤重金属时空变化特征初步研究. 农业环境科学学报, 2014, 33 (7): 1405—1414. Wang B W, Li H, Jiang H Q, et al. Spatio-temporal variation of heavy metals for agricultural land in Beijing (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33 (7): 1405—1414
- [44] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用方式下的土壤铅的积累. 地理学报, 2005, 60 (5): 791—797. Zheng Y M, Chen T B, Chen H, et al. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2005, 60 (5): 791—797
- [45] 郑袁明, 陈煌, 陈同斌, 等. 北京市土壤中Cr、Ni含量的空间结构与分布特征. 第四纪研究, 2003, 23 (4): 436—445. Zheng Y M, Chen H, Chen T B, et al. Spatial distribution patterns of Cr and Ni in soils of Beijing (In Chinese). Quaternary Sciences, 2003, 23 (4): 436—445
- [46] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险. 自然资源学报, 2006, 21 (1): 64—72. Zheng Y M, Song B, Chen T B, et al. Zn accumulation and pollution risk in soils under different land use types in Beijing (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2006, 21 (1): 64—72
- [47] Ratha D S, Sahu B K. Source and distribution of metals in urban soil of Bombay, India, using multivariate statistical techniques. Environmental Geology, 1993,

- 22: 276—285
- [48] 杨忠芳, 成杭新, 奚小环, 等. 区域生态地球化学评价思路及建议, 2005, 24 (8): 134—139. Yang Z F, Cheng H X, Xi X H, et al. Regional ecological geochemical assessment: ideas and prospects. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (8): 134—139
- [49] 李玉浸, 高怀友. 中国主要农业土壤污染元素背景值图集. 天津: 天津教育出版社, 2006. Li Y J, Gao H Y. The background values atlas of pollution elements in agricultural soil in China (In Chinese). Tianjin: Tianjin Education Press, 2006
- [50] 成杭新, 庄广民, 赵传冬, 等. 北京市土壤Hg污染的区域生态地球化学评价. 地学前沿, 2008, 15 (5): 126—145. Cheng H X, Zhuang G M, Zhao C D, et al. Regional eco-geochemical assessment of mercury in soils in Beijing (In Chinese). Earth Science Frontiers, 2008, 15 (5): 126—145
- [51] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征. 地理研究, 2005, 24 (2): 229—235. Chen T B, Zheng Y M, Chen H, et al. Arsenic accumulation in soils for different land use types in Beijing (In Chinese). Geographical Research, 2005, 24 (2): 229—235
- [52] 刘洪涛, 郑国砥, 陈同斌, 等. 农田土壤中铜的主要输入途径及其污染风险控制. 生态学报, 2008, 28 (4): 1774—1785. Liu H T, Zheng G D, Chen T B, et al. Major input of copper to farm lands and control for its pollution risk (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (4): 1774—1785

EARLY WARNING OF HEAVY METALS POTENTIAL RISK GOVERNANCE IN BEIJING

Jiang Hongqun¹ Wang Binwu^{1†} Liu Xiaona² Zhang Weiwei² Li Hong² Sun Danfeng¹

(1 Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Land and Resources, Department of Land Resources Management, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

(2 Institute of Comprehensive Research, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract The probability of heavy metal potential risk is gradually increased with the development of industry, agriculture and urbanization. Early warning of heavy metal potential risk becomes one of the hot topics of the land environmental risk management. The methods and strategies for risk countermeasures of heavy metal pollution was developed in Beijing study area, and the prediction of variation trend and environmental quality risk was calculated for the next 30 years. In Beijing study area, input-output flux model and heavy metals accumulation rate model were established at town-wise units by taking into account the datasets acquired from the literatures, statistical yearbooks and field survey. Fluxes and accumulation of Cr, Ni, Zn, Hg, Cu, As, Cd and Pb were calculated following the material balance principle in 2006. 2006 results as a reference base, the trend and environmental quality risk of each heavy metal was estimated based on criteria of the early warning system for the next 30 years. The spatial pattern of the trend and early warning for each heavy metal was interpolated by the probability model of Kriging. Results show in the next 30 years, (1) the risk of Pb, Cr, and Ni were relative lower, and their concentrations will linger below Grade II criteria of the national standard for soil environmental quality, and the other metals will be over Grade II criteria of the national standard with different degrees of environmental risk. (2) Compared with Ni and Cr, the high risk values of Pb are mainly distributed in the urban area, where primary atmospheric deposition. Cr and Ni content are higher in the northeast of Beijing, where the corresponding control measures should be taken. (3) Cu, As and Zn will maybe reach medium level, while Hg and Cd may be up to alarm level three and level four. As and Zn have low potential risk with the similar tendency of heavy metal potential risk early warning, indicating their homology sources from soil parent materials. The risk of Hg and Cd will vary spatially in warning levels and probability. Among the 8 heavy metals, Cd will be highest in environmental risk with the large areas, and some of the risk will mainly spread in the far-reaching suburban related to

agricultural activities. The high Hg risk areas will expand with the urban sprawl largely by human influence. Firstly, eight heavy metals show different environmental risk levels, relevant departments should make difference control measures for different regions according to specific environment risk levels and types of soil heavy metal pollution. Secondly, the geostatistics technology coupled with the regional flux model could provide an excellent technical tool for macro-scaled early-warning of regional soil heavy metals pollution.

Key words Soil heavy metals management; Input-output flux model; Probability Kriging; Risk early-warning; Beijing

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation Shen Lidong (721)

Soil Science and Modern Agriculture

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. (730)
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. (745)
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen (758)
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. (766)
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. (774)

Research Articles

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. (781)
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. (790)
- Research on soil water movement based on stable isotopes Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. (800)
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. (816)
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. (827)
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. (837)
- Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. (847)
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. (857)
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. (867)
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site Li Shiye, Cheng Jiemin (877)
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. (887)
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. (900)
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. (909)
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. (917)

Research Notes

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. (924)
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. (933)
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. (941)
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. (949)
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ¹⁵N in apple orchard Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. (955)

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址:南京市北京东路71号 邮政编码:210008
电话:025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
电话:010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱 邮政编码:100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号:CN 32-1119/P

国内邮发代号:2-560

国外发行代号:BM45

定价:60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156