

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王伟,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升革,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素去除及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛亿达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)

土壤环境质量预警体系构建与应用

李笑诺¹, 丁寿康^{1,2}, 陈卫平^{1,2*}, 王夏晖³, 吕斯丹⁴, 刘睿⁵

(1. 中国科学院生态环境研究中心土壤环境科学与技术实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 生态环境部环境规划院土壤环境保护中心, 北京 100012; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟院重点实验室, 北京 100101; 5. 河南省科学院科技创新战略研究院, 郑州 450002)

摘要: 土壤环境质量预警是实施土壤污染风险分类分级管控措施的重要依据。为快速了解区域土壤环境质量水平, 在土壤环境质量恶化前及时采取有效措施遏制土壤污染持续加重的态势, 基于环境容量和污染物输入-输出通量理论分别构建了简易、有效和可量化的农用地和建设用地的土壤环境质量预警体系, 进一步结合土壤环境质量标准、食品安全标准和致癌风险系数提出相应的预警方法和预警机制, 并以攸县农用地和北京市五环内建设用地为研究区域, 评价土壤环境质量现状, 预测不同情景下的土壤环境质量超标风险。结果表明, 攸县网岭和桃水镇两地农用地土壤环境质量均隶属五级预警水平, 相对其他修复措施, 污染秸秆不还田可在较短时间内将土壤中镉含量降低至风险筛选值水平以下。北京市五环内建成区土壤质量状况良好, 较长时间内不存在健康风险隐患, 无突变情景和乐观情景下 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的风险超标年限均远高于 50 a, 隶属一级预警水平。

关键词: 土壤预警体系; 预测方法; 预警级别; 农用地; 建设用地

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2834-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911160

Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality

LI Xiao-nuo¹, DING Shou-kang^{1,2}, CHEN Wei-ping^{1,2*}, WANG Xia-hui³, LÜ Si-dan⁴, LIU Rui⁵

(1. Laboratory of Soil Environmental Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center for Soil Environmental Protection, Chinese Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 4. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. Academy of Science and Technology Innovation Strategy, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Early warning of soil environmental quality is an important basis for implementing classified and graded soil risk management measures. To quickly understand the regional soil environmental quality and take effective measures in time to prevent continuous soil pollution before deterioration of soil environmental quality, a simple, effective, and quantifiable early warning system for soil environmental quality of agricultural land and development land was respectively established based on environmental capacity and pollutant input-output flux theory. Furthermore, corresponding method and mechanism for early warning were defined based on soil environmental quality standards, food safety standards, and carcinogenic risk coefficients. The agricultural land in Youxian county and the development area within the fifth-ring in Beijing were chosen to assess the soil environmental quality and predict risks of heavy metals exceeding standards in different scenarios. The results show that the soil environmental quality of the agricultural land in Wangling and Taoshui Town both can be classified to the fifth early warning level. Compared with other remediation measures, the Cd contents of soil can be lowered to risk screening levels in the short term by the scenario of "paddy straw not returned to the field". The soil quality in the development area within the fifth-ring in Beijing belongs to the first early warning level under both the "no intervention" and the "decreased input" scenarios, which means that Cd, Cu, Pb, and Zn all need more than 50 years to reach their threshold values to pose potential health risks.

Key words: soil early warning system; prediction methods; early warning level; agricultural land; development land

据文献[1]显示,我国土壤环境状况总体形势不容乐观,全国土壤点位超标率为16.1%,部分地区土壤污染较重,耕地和工矿矿业废弃地土壤环境问题尤为突出。土壤污染问题已严重影响到生态环境质量、人体健康、食品安全和社会经济的协调发展。掌握土壤环境质量及其污染风险状况,并以此为基础开展土壤环境质量预警研究和风险管理,是“土十条”中“预防为主、保护优先和风险管控”原则的基

本体现,有利于土壤环境风险的全面管控和土壤污染防治工作的有效落实。

土壤环境质量预警是以土壤环境质量现状为基

收稿日期: 2019-11-18; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 生态环境部环境规划院2017年度生态环境保护规划重点问题研究专项(2017A118)

作者简介: 李笑诺(1988~),女,博士研究生,助理研究员,主要研究方向为污染场地可持续管理, E-mail: xnli@rcees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

础,分析特定时期内污染物在一定空间范围内的输入、输出和污染物在土壤中的迁移转化,最后采用数学模型等方法模拟土壤环境质量在人类社会经济活动影响下的时空变化趋势,预测达到某标准(如风险筛选值和管制值)的面积、时间,从而对土壤环境质量恶化进行提前预警.目前土壤环境质量预警研究多以土壤重金属污染物为研究对象,针对不同空间尺度(区域、城市和乡镇等)的不同土地用途(农用地、建设用地区和矿区等),利用回归模型^[2~4]、风险/污染指数^[5~7]、灰色理论模型^[8,9]、指标预警模型^[10,11]、STEM-profile 模型^[12]、累积通量模型^[13~15]和累积速率模型^[16~20]等开展土壤质量现状预测、土壤污染风险预测、土壤污染超标年限预测和土壤污染累积趋势预测.考虑到土壤采样的不确定性和土壤污染较强的空间异质性,越来越多的研究学者开始采用人工神经网络^[21~23]和克里格插值^[24~28]等方法对已知采样点数据进行空间插值分析,预测土壤重金属的空间分布规律.

目前,土壤环境质量预警已在土壤环境质量评价和污染风险评估等相关基础领域开展了较多研究,但预警方法、预警体系和预警机制等方面存在较大可研空间.开展土壤污染物变化趋势预测所采用的预测方法或模型都具有一定的局限性,而数据获取、污染影响因子和土壤特征及区域环境等因素都会影响预测方法的选取.为快速识别土壤污染水平和及时掌握土壤污染动态变化趋势,本文基于土壤环境容量和污染物累积通量理论,分别构建农用地和建设用地区域土壤环境质量预警体系,提出易于理解和操作的预测方法.本文选取攸县农用地和北京市五环内建设用地区域为研究对象对所构建体系进行验证.

湖南攸县是我国南方酸性土壤区域最重要的水稻和蔬菜生产基地之一,近年频发的“镉米”事件对该地农业生产造成了巨大的经济损失,严重威胁当地民众健康.北京市作为全国的政治经济文化中心,经历了快速的工业化和城市化发展进程,对环境问题具有较高的社会关注度和敏感性.以攸县农用地和北京市五环内为研究对象,评价研究区域土壤环境质量现状,预测不同情景下土壤环境质量变化趋势,对于及时采取管控措施、有效防止土壤污染、保障食品安全和人体健康具有非常重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 土壤环境质量预警体系

从土壤环境质量预警的内涵来看,评价标准和评价方法是开展土壤环境质量预警的理论基础.从物质平衡的角度来看,土壤污染关键影响因素分析及污染物输入-输出通量分析是预测污染物累积变化趋势的关键步骤.基于污染物实测含量、评价标准和累积情景所预测的污染超标风险,及结合评价标准所划分的土壤环境质量预警等级是土壤环境质量预警体系的核心内容(图1).此外,土壤质量和累积状况随土地利用方式表现出较大差异性,因此有必要建立基于不同土地利用方式的土壤环境质量预警体系.

对于农用地而言,仅以土壤环境质量现状或变化趋势开展预警存在很大的不足,必须统筹考虑农产品质量以及土地资源的可持续利用,建立配套的预警管理机制.如图1所示,从食品安全的角度出发,同时考虑土壤超标和农作物超标风险,结合土壤污染累积情景构建涵盖土壤质量超标风险和农作物

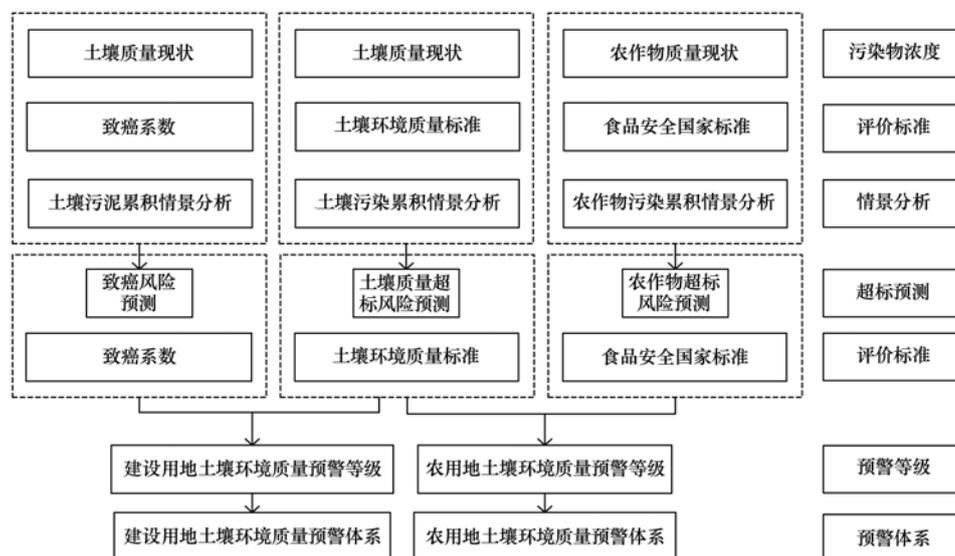


图1 土壤环境质量预警体系

Fig. 1 Early warning system for soil environmental quality

超标风险两个维度的农用地土壤环境质量预警体系. 而对于建设用地而言, 人群暴露为土壤污染的主要风险受体, 因此建设用地土壤环境质量预警体系应同时涵盖土壤质量超标风险和人体健康风险(致癌风险)两个维度.

1.2 超标风险预测

1.2.1 土壤质量超标风险预测

以土壤污染风险筛选值或土壤污染风险管制值为上限, 预测不同累积情景下土壤污染超标年限, 计算方法如下:

$$Y_{\text{soil}} = \frac{(C_{\text{soil}_s} - C_{\text{soil}_o}) \times d \times \rho \times A}{\Delta_{\text{acc}_{\text{soil}}}} \quad (1)$$

式中, Y_{soil} 为土壤污染超标年限(a); C_{soil_s} 为风险筛选值或管制值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 通过查阅国家或地方标准获取; C_{soil_o} 为污染物观测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 通过实验室测定土壤样品获得; d 为土壤深度(m), 一般取值为表层土壤 0.2 m; ρ 为土壤容重($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 通过实验室测定土壤样品获得; A 为研究区域面积(m^2), 通过查阅地方统计年鉴获取; $\Delta_{\text{acc}_{\text{soil}}}$ 为土壤污染年累积量($\text{mg} \cdot \text{a}^{-1}$), 取决于污染物输入和输出量的差值.

对于建设用地, 土壤污染年累积量主要考虑大气沉降、交通排放两种输入途径以及地表径流、淋溶、挥发、降解等输出过程. 由于污染物在土壤中的迁移、转化过程复杂, 模型参数多且部分数据不易获取, 因此实际操作中常利用污染物输入量与土壤污染物残留率(K)的乘积估算其年净累积量. K 值可通过实验测定, 也可参阅文献数据获得.

对于农用地, 土壤污染年累积量主要考虑大气沉降、灌溉水、施肥和石灰输入等 3 种输入途径, 以及作物收获、秸秆移除和排水这 3 个输出过程. 以水稻镉为例, 水稻收获输出通量通过产量和籽粒镉含量乘积计算, 籽粒镉含量可通过区域大田调查数据逐步回归建立^[13]; 秸秆移除量通过移除生物量及其重金属含量计算, 秸秆重金属含量通过籽粒重金属含量进行预测; 排水输出量首先通过水量平衡(降雨量 + 灌溉量 - 蒸发蒸腾量)获得排水量, 利用固液分配系数 K_d , 获得排水中重金属浓度, 乘积获得排水输出量.

1.2.2 农作物超标风险预测

以食品安全国家标准为上限, 预测不同累积情景下农作物污染超标年限, 计算方法如下:

$$Y_{\text{crop}} = \frac{(C_{\text{crop}_s} - C_{\text{crop}_o}) \times d \times \rho \times A}{\Delta_{\text{acc}_{\text{crop}}}} \quad (2)$$

式中, Y_{crop} 为农作物超标年限(a); C_{crop_s} 为食品安全国家标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 通过查阅国家标准获取;

C_{crop_o} 为农作物中污染物观测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 通过实验室测定土壤样品获得; $\Delta_{\text{acc}_{\text{crop}}}$ 为农作物中污染物年累积量($\text{mg} \cdot \text{a}^{-1}$), 为农作物产量和其污染物含量的乘积; d 、 ρ 和 A 的含义同公式(1).

1.2.3 致癌风险预测

根据文献[29], 建立建设用地土壤中污染物暴露的致癌风险计算模型. 计算通式如下:

$$\text{CR}_n = \text{CR}_{\text{ois}} + \text{CR}_{\text{des}} + \text{CR}_{\text{pis}} \quad (3)$$

$$\text{CR}_k = \text{KER}_k \times \text{SF}_k \times C \quad (4)$$

式中, CR_n 为土壤单一污染物经各可能暴露途径的总致癌风险, 无量纲; CR_{ois} 为经口摄入土壤的致癌风险, 无量纲; CR_{des} 为经皮肤接触途径的致癌风险, 无量纲; CR_{pis} 为呼吸吸入土壤颗粒物途径的致癌风险, 无量纲; CR_k 为 k 暴露途径下的致癌风险, 无量纲; KER_k 为经由暴露途径 k 的每日土壤暴露量, $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; C 为土壤中污染物含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; SF_k 为经 k 途径的致癌斜率因子.

1.3 预警等级

1.3.1 农用地土壤环境质量预警等级

考虑土壤污染与农产品超标的差异性, 将土壤和农产品质量同时纳入农用地土壤环境质量预警考核指标, 以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)》^[30] 和《食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762-2012)》^[31] 为评价标准, 将农用地土壤环境质量划分为 5 个等级, 级别越高风险越高, 如图 2 所示.

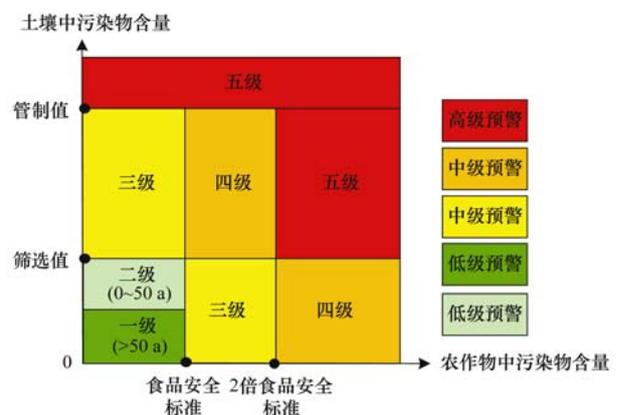


图 2 农用地土壤环境质量预警等级

Fig. 2 Early warning level for soil environmental quality of agricultural land

一级预警和二级预警属于低级预警, 对应“土十条”优先保护类, 土壤镉含量小于风险筛选值且农产品不超标. 一级预警和二级预警的区别在于土壤质量超标预测年限, 按照当前累积数量, 一级预警大于 50 a, 而二级预警介于 0 ~ 50 a. 三级预警和四级预警属于中级预警, 对应“土十条”安全利用类, 各级别按土壤超标情况和农产品超标情况又可细分

如图两种情景. 五级预警属于高级预警, 对应“土十条”风险管控类. 在此情景下, 土壤中污染物含量介于风险筛选值与管制值之间且农作物中污染物含量超过食品安全标准 2 倍以上, 或土壤中污染物含量超过风险管制值.

1.3.2 建设用地土壤环境质量预警等级

与农用地不同, 人体暴露是建设用地污染的主要风险受体, 因此将土壤质量和致癌风险作为建设用地土壤环境质量预警考核指标, 以《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 36600-2018)》^[32] 和致癌风险值为评价标准, 将建设用地土壤环境质量划分为 5 个等级, 级别越高风险越高, 如图 3 所示. 一级预警和二级预警属于低级预警, 土壤中污染物含量小于风险筛选值, 一级预警和二级预警的区别在于土壤污染物含量达到风险筛选值的预测年限: 一级预警达到风险筛选值的预测年限超过 50 a, 而二级预警介于 0~50 a 之间. 三级预警和四级预警属于中级预警, 土壤中污染物含量介于风险筛选值和风险管制值, 三级预警和四级预警的区别在于致癌风险系数, 三级预警致癌风险系数不高于 10^{-5} , 四级预警致癌风险系数高于 10^{-5} . 五级预警属于高级预警, 土壤中污染物含量超过风险管制值.

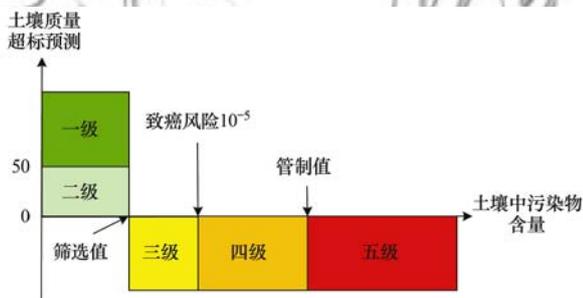


图3 建设用地土壤环境质量预警等级

Fig. 3 Early warning level for soil environmental quality of development land

2 案例研究: 农用地

攸县为湖南省株洲市辖县, 位于湖南省东南部, $E113^{\circ}09'09'' \sim 113^{\circ}51'30''$, $N26^{\circ}46'34'' \sim 27^{\circ}26'30''$, 为中亚热带季风湿润气候. 攸县地形以丘陵和山地为主, 总面积为 2648 km^2 , 总人口为 80.4 万, 其中耕地面积占 83.7%, 农业人口占 86%, 是湖南省重要的粮食和蔬菜基地^[33]. 本研究以湖南省攸县网岭和桃水镇为研究区域, 基于 2013~2015 年稻田土壤和稻米中 Cd 含量普查数据及年均累积量, 评价 Cd 污染状况并预测不同情景下其风险超标年限.

2.1 数据来源

本案例引用的网岭和桃水镇两地土壤和稻米中

Cd 含量数据为本课题组前期实验室测量值^[33].

样品采集方法为: 在每个采样稻田随机布设 2~3 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的样方, 采集 5~10 穴完整水稻, 水稻样本以当地主产的晚稻为主, 在每个水稻采样点按 5 点混合采样法采集土壤样品 1 份. 同时, 在 2007 年土壤调查样品库中, 对应于每个进行采样的村随机抽取一个土壤样品. 网岭和桃水镇分别采集土壤样品 26 个和 93 个, 分别采集水稻样品 22 个和 70 个. 实验检测方法为: 土壤样品测定采用四酸法消煮 (10 mL HCl 、 5 mL HNO_3 、 5 mL HF 和 3 mL HClO_4), 稻谷样品采用硝酸-高氯酸法, 电热板消煮. 应用电感耦合等离子体发射质谱仪 (ICP-MS) 检测样品 Cd 含量, 采用土壤标准物质 GSS-5 和湖南稻米标准物质 GSB-23 分别对土壤和稻米进行严格的质量控制, 同时做空白实验.

2.2 Cd 污染现状评价

根据《DZ/T 0295-2016 土地质量地球化学评价规范》^[34], 土壤酸碱度低于 6.5 呈酸化, 网岭和桃水镇两地稻田土壤 pH 值低于 5.5 所占比例分别为 57.7% 和 77.4%, 说明网岭和桃水镇两地稻田土壤酸化严重. 相关研究表明土壤 pH 与土壤 Cd 生物可利用态含量呈极显著相关, 说明土壤酸化增加了土壤 Cd 的生物可利用性^[33]. 从表 1 可以看出, 两地稻田土壤中 Cd 平均含量介于农用地土壤污染风险筛选值和管制值之间, 两地稻米中 Cd 平均含量均超过食品安全标准 2 倍以上, 按农用地土壤环境质量预警等级划分(图 2), 目前两地农用地土壤环境质量均隶属五级预警水平.

表 1 网岭和桃水镇土壤和稻米中 Cd 污染状况¹⁾

Table 1 Cd concentrations in soil and rice samples in Youxian county

采样点	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		评价标准/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	土壤	稻米	土壤	稻米
网岭	0.427	0.737	风险值: 0.3	0.2
桃水镇	0.663	0.505	管制值: 1.5	0.2

1) pH 和平均值数据参考文献[33]; 土壤评价标准参考文献[30]; 稻米评价标准参考文献[31]

2.3 土壤环境质量超标预测

考虑到攸县水稻种植面积大且收入低的现实情况, 降镉措施首先必须易于实施且成本低廉, 因此设置两种 Cd 持续累积情景和 3 种降镉情景, 基于物质平衡理论构建污染累积模型, 计算各情景下网岭和桃水镇土壤 Cd 的年均累积量. 其中, Cd 持续累积情景包括传统耕作与管理(A)和添加石灰(B)两种模式; 降镉情景包括减少工厂排放(C)、秸秆移除(D)和综合管理(E, 即综合 B、C 和 D)这 3 种模式. 为验证预警方法的实用性, 方便计算, 上述情景模式及各

情景下土壤 Cd 的年均累积量均参考已有研究成果^[13],具体结果如表 2 所示.最后,利用公式(1)分

别预测 Cd 持续累积情景下的风险管制值超标年限和降镉情景下降低至风险筛选值的年限(表 3).

表 2 不同情景下 Cd 污染年均累积量/ $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

Table 2 Accumulation per year of Cd content in soil in different scenarios/ $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

采样点	传统耕作与管理方式 (A)	添加石灰调节土壤 pH (B)	减少工厂排放 (C)	秸秆移除 (D)	综合模式 (E)
网岭	0.252	2.742	-1.69	-7.91	-6.296
桃水镇	1.526	5.784	-3.29	-15.36	-13.29

表 3 不同情景下土壤超标预测/a

Table 3 Prediction of pollutant content in soil exceeding standards in different scenarios/a

采样点	传统耕作与管理方式 (A)	添加石灰调节土壤 pH (B)	减少工厂排放 (C)	秸秆移除 (D)	综合模式 (E)
网岭	8601	790	152	32	41
桃水镇	1108	292	223	48	55

从表 3 可以看出,基于现有污染水平,不采取任何土壤污染防治措施,传统的耕作与管理方式下土壤中镉含量超过土壤管制值所需时间远高于长期施用石灰的管理方式.若采取土壤修复或农艺管控措施,污染秸秆不还田是相对有效的降镉方式,可在相对较短的时间内将土壤中镉含量降低至风险筛选值水平以下.在稻田管理中,各措施对土壤 Cd 累积的影响还需结合实际情况作深入研究.

对比表 1 可知,网岭和桃水镇水稻籽粒中 Cd 已超标,平均含量都超过食品安全标准 2 倍以上.因此本文不再对其超标风险进行预测.

3 案例研究:建设用地

北京市是全国的政治、经济、文化中心,地处华北平原北部,位于东经 $115^{\circ}25'$ ~ $117^{\circ}30'$,北纬 $39^{\circ}26'$ ~ $41^{\circ}03'$,行政管辖 14 区 2 县,2016 年常住人口约 2 172.9 万人.为典型的北温带半湿润大陆性季风气候,地势呈西北高东南低,地貌以山地、平原为主,总面积约 $16\ 400\ \text{km}^2$,其中平原面积约占全市面积的五分之二.北京市土壤类型以褐土和潮土为主,质地大部分为壤质.根据文献调研,Pb、Cd、Cu 和 Zn 是北京城市土壤中广泛存在的污染物,且污染水平逐年增加^[35-37].本研

究以北京市五环内建成区为研究区域,利用建设用地土壤环境质量预警体系预测北京市五环内建成区 Pb、Cd、Cu 和 Zn 等 4 种特征污染物的累积变化趋势.

3.1 数据来源

3.1.1 重金属现状值与评价基准

本案例中所采用的 Cd、Cu、Pb 和 Zn 数据来源于本课题组前期实验室测量值^[36].

样品采集方法为:以 Google Earth 遥感影像为底图,叠加 $1\ \text{km}\times 1\ \text{km}$ 网格,避开硬化地表及水体,均匀选择不同的土地利用类型的附属绿地,最终得到 232 个样点,每个样点取土壤表层 5 个子样制作一个混合样.实验检测方法为:土壤样品采用四酸法消煮($10\ \text{mL}\ \text{HCl}$ 、 $5\ \text{mL}\ \text{HNO}_3$ 、 $5\ \text{mL}\ \text{HF}$ 和 $3\ \text{mL}\ \text{HClO}_4$).消煮完全后用 1:1 盐酸溶液分别稀释 50 倍和 250 倍,分别利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)和电感耦合等离子体发射质谱仪(ICP-MS)测定 Cu、Zn 和 Cd、Pb.以同样的方法对国家土壤成分分析标准物质 GSS-13 进行消煮,每批次至少包括 2 个空白样品和 2 个标准物质,并随机抽取 10% 的样品进行重复测定(对照样)用以对消煮实验结果的质量控制. Cd、Cu、Pb 和 Zn 实测值及相应筛选值如表 4 所示.

表 4 重金属元素相关参数¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Relative parameters for heavy metals/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Cd	Cu	Pb	Zn
最大值	0.486	213.147	135.371	225.211
最小值	0.066	8.408	11.178	26.711
平均值	0.138 ± 0.058	20.810 ± 17.45	25.357 ± 14.565	80.278 ± 29.485
风险筛选值	19	2 000	400	3 500

1) 最大值、最小值和平均值参考文献[36];Cd、Cu 和 Pb 风险筛选值参考文献[32];Zn 风险筛选值参考文献[38]

3.1.2 土壤重金属年均累积量

北京市城市土壤污染途径多样,累积影响因素

复杂,其根源在于快速城市化进程及人为活动对城市土壤的扰动,如重金属伴随机动车尾气排放、工业

三废排放、施工粉尘和燃煤排放等进入大气,经自然沉降或雨水淋溶进入土壤,因此大气中的重金属浓度直接影响土壤质量。另外,北京市汽车保有量大且持续增加,由汽车轮胎及刹车片磨损造成的重金属释放(以下统称为交通排放)也是北京市建成区重金属累积的重要影响因素^[39]。相关数据来源及假设为:①假设大气沉降中90%的重金属进入北京市五环内土壤,利用北京市2007~2010年大气中各重金属的干湿沉降年均通量^[40],估算北京市五环内土壤中重金属的大气年均输入量。②假设汽车轮胎及刹车片磨损中90%的重金属进入北京市五环内土壤,利用北京市2002~2012年机动车重金属年排放量^[39],估算北京市五环内土壤中重金属的交通年均输入量。③相关研究表明,重金属在土壤中不易淋溶迁移,残留率一般在90%左右,且因自然条件、土壤性质和重金属种类等不同。本研究中各重金属元素K值均取0.95。

基于以上数据,计算北京市五环内建成区的重金属年均输入总量,乘以残留率最终获得北京市五环内建成区Cd、Cu、Pb和Zn的年均累积量分别为0.289、17.405、11.913和66.202 t。

3.2 情景设置

基于北京市土壤重金属主要来源,设置无突变情景和乐观情景两种情景对北京市土壤重金属累积趋势和超标年限进行预测。

(1)无突变情景 假设研究区内交通运输、人类活动和工业生产的排污状况保持不变,重金属以现有速度持续输入、累积。考虑到土壤污染的异质性,取所有样点Cd、Cu、Pb和Zn实测含量的最大值为评价安全阈值(表4),以建设用地土壤风险筛选值为上限。利用公式(1)计算Cd、Cu、Pb和Zn的风险超标年限。

(2)乐观情景 自2013年《大气污染防治行动计划》和“北京市2013-2017清洁空气行动计划”实施以来,北京市通过采取调整能源结构、严控扬尘污染、推动企业清洁生产和提升机动车污染排放控制能力等措施,带来的污染物减排和空气质量改善效果显著。截至2015年底,大气中各种污染物平均减排30%左右。因此,假设此情景下,Cd、Cu、Pb和Zn以现有水平的70%匀速输入、累积,则Cd、Cu、Pb和Zn的土壤年均累积量分别为0.202、12.184、8.339和46.342 t,其他数据来源同无突变情景。利用公式(1)计算Cd、Cu、Pb和Zn的风险超标年限。

3.3 预警分析

如表5所示,两种情景下,Cd、Cu、Pb和Zn的风险超标年限均远高于50 a,隶属一级预警水平。总体看来,北京市五环内建成区土壤质量状况良好,较长时间内不存在健康风险隐患,应以土壤环境保护为主,加强污染热点区域及重点地块的监督管理,防范新增污染。

表5 两种情景下土壤污染超标预测/a

Table 5 Prediction of soil pollution exceeding standards under two scenarios/a

项目	Cd	Cu	Pb	Zn
无突变情景	25 010 ~ 25 252	42 942 ~ 44 048	11 050 ~ 12 518	19 531 ~ 20 176
乐观情景	17 507 ~ 17 676	30 059 ~ 30 833	7 735 ~ 8 763	13 672 ~ 14 123

4 结论

(1)土壤环境质量和土壤污染累积影响因素是开展土壤环境质量预警的关键,且土壤质量和累积状况随土地利用方式表现出较大差异性。对于农用地,必须统筹考虑农产品质量以及土地资源的可持续利用,建立配套的预警管理机制;而对于建设用地,应同时涵盖土壤质量超标风险和人体健康风险(致癌风险)两个维度。

(2)基于本研究所提出的预警体系,综合土壤环境质量和标准、食品安全国家标准和致癌风险系数可将农用地和建设用地土壤环境质量划分为五级预警水平,预警级别不同,所采取的土壤环境管理措施不同。

(3)网岭和桃水镇两地稻田土壤环境质量均隶属五级预警水平,应立即采取种植结构调整或土壤

修复措施确保食品安全和土地的可持续利用。相对于其他管理方式,污染秸秆不还田可在相对较短的时间内降低土壤镉含量至风险筛选值水平以下。

(4)目前,北京市五环内建成区土壤环境质量状况良好,隶属一级预警水平,且较长时间内不存在健康风险隐患。土壤环境管理应以保护为主,加强污染热点区域及重点地块的监督管理,防范新增污染。

(5)本研究所提出的土壤环境质量预警体系和方法适用范围广、易于理解、可操作性强,有助于土壤环境质量现状的准确识别和土壤污染变化趋势的快速预测。

(6)需要指出的是,本研究所构建的土壤环境质量预警体系,及基于此所提出的土壤环境质量预测方法还不完善,存在一定的不确定性,体系精度和方法的可靠性有待进一步考证。另外,为验证预警体系与方法的实用性和可操作性,本研究选取攸县农

用地和北京市五环内建设用地区域,为便于计算,并未结合现实情况设置污染累积情景,也未对污染物输入输出的环境过程作深入分析,而是直接引用已有研究结果作为公式输入,评价土壤环境质量现状及预测土壤环境质量超标年限,预测结果的可靠性也需要深入探讨.这些都是后期研究中需要重点改善的方面.但是,本研究的目的在于为预警体系关键因素的考量和预测预警方法的量化实施提供重要的理论基础和研究思路,验证所构建的预警体系和方法具有广泛的适用性和简易的操作性,并通过今后的深入研究不断提高体系精度和降低方法的不确定性,最终基于可靠结果推动我国土壤环境质量分类分级管控措施的有效落实.

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [2] Peng C, Wang M E, Chen W P, *et al.* Mass balance-based regression modeling of Cd and Zn accumulation in urban soils of Beijing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **53**: 99-106.
- [3] Kumar V, Thakur R K, Kumar P. Assessment of heavy metals uptake by cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) grown in integrated industrial effluent irrigated soils: a prediction modeling study[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, **257**: 108682.
- [4] Razanamahandry L C, Andrianisa H A, Karoui H, *et al.* Prediction model for cyanide soil pollution in artisanal gold mining area by using logistic regression[J]. *CATENA*, 2018, **162**: 40-50.
- [5] Manna A, Maiti R. Geochemical contamination in the mine affected soil of Raniganj Coalfield—a river basin scale assessment [J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, **9**(5): 1577-1590.
- [6] Chon H T, Lee J S, Lee J U. Heavy metal contamination of soil, its risk assessment and bioremediation [J]. *Geosystem Engineering*, 2011, **14**(4): 191-206.
- [7] Cachada A, Da Silva E F, Duarte A C, *et al.* Risk assessment of urban soils contamination: the particular case of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 271-284.
- [8] 王斌. 土壤重金属污染预测及其生态风险评价预警研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
Wang B. Research on prediction of soil heavy metal pollution and evaluation-early warning of ecological risk[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [9] 孙永亮. 基于灰色理论的川西某县某铅锌矿土壤重金属污染影响预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Sun Y L. Prediction on heavy metal contamination in Zinc-Lead mine soil of county in western Sichuan based on the gray system theory[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [10] 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[D]. 杭州: 浙江大学, 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[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [11] 高彦鑫, 王夏晖, 李志涛, 等. 我国土壤环境风险评估与预警机制研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(6P): 410-414.
- [12] 赵志明, 陈卫平, 焦文涛, 等. 再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4115-4120.
Zhao Z M, Chen W P, Jiao W T, *et al.* Modeling the Cd accumulation in agricultural soil irrigated with reclaimed water [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4115-4120.
- [13] Peng C, Wang M E, Chen W P. Modelling cadmium contamination in paddy soils under long-term remediation measures: model development and stochastic simulations [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 146-155.
- [14] 石陶然. 基于输入输出清单的浙江省农田土壤重金属预测预警及污染状况研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
Shi T R. Prediction and early-warning forecast on heavy metals and their pollution status in agricultural soils in Zhejiang Province, China based on input-output inventory[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019.
- [15] Zhang Y M, Li S, Lai Y X, *et al.* Predicting future contents of soil heavy metals and related health risks by combining the models of source apportionment, soil metal accumulation and industrial economic theory[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 211-221.
- [16] 薛强. 江西德兴铜矿重金属环境质量演化与预警模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Xue Q. Evolution of the environmental quality and the early warning model research on heavy metals in Dexing copper mine [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [17] 郑雄伟, 严向军, 郑国权. 湖北省钟祥市竹皮河污灌区土壤重金属 Cd 和 As 污染预测探讨[J]. *资源环境与工程*, 2018, **32**(1): 61-67.
Zheng X W, Yan X J, Zheng G Q. Discussion on soil heavy metal Cd and As pollution prediction of Zhupi river sewage irrigation area of Zhongxiang City, Hubei Province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, **32**(1): 61-67.
- [18] 燕玉超. 基于 GIS 的渭北旱原土壤重金属污染评价与变化趋势模拟[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [19] 韩梅. 青海省绿色农业产地环境评估及风险预警研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
Han M. Green agriculture producing area in Qinghai Province and environmental assessment risk early warning research[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2014.
- [20] Zhao C, Yang J, Zheng Y M, *et al.* Effects of environmental governance in mining areas: The trend of arsenic concentration in the environmental media of a typical mining area in 25 years[J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 849-857.
- [21] 范俊楠, 张钰, 贺小敏, 等. 基于 BP 神经网络的重点行业企业周边土壤重金属污染预测及评价[J]. *华中农业大学学报*, 2019, **38**(4): 55-62.
Fan J N, Zhang Y, He X M, *et al.* BP neural network based prediction and evaluation of heavy metal pollution in soil around the enterprises in key areas of Hubei Province [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, **38**(4): 55-62.
- [22] 樊宁, 崔云霞, 彭月, 等. 基于 BP 神经网络的燃煤电厂周围土壤重金属浓度预测及评价[J]. *环境科技*, 2018, **31**(2): 52-56.
Fan N, Cui Y X, Peng Y, *et al.* Prediction and evaluation of soil heavy metal concentration around coal-fired power plant based on BP neural network[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, **31**(2): 52-56.

- [23] 李杨, 李海东, 施卫省, 等. 基于神经网络的土壤重金属预测及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(4): 591-597.
Li Y, Li H D, Shi W X, *et al.* Prediction and ecological risk assessment of heavy metals in soil based on neural network[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, **26**(4): 591-597.
- [24] Sun X L, Wu Y J, Zhang C S, *et al.* Performance of median kriging with robust estimators of the variogram in outlier identification and spatial prediction for soil pollution at a field scale[J]. Science of the Total Environment, 2019, **666**: 902-914.
- [25] 刘庚, 牛俊杰, 张朝, 等. 某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4712-4719.
Liu G, Niu J J, Zhang C, *et al.* Spatial distribution prediction of surface soil Pb in a battery contaminated site[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4712-4719.
- [26] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警[J]. 生态学报, 2018, **38**(3): 1075-1086.
Mamattursun E, Ajigul M, Anwar M. Soil heavy metal pollution and ecological risk warning assessment of pepper field in Yanqi Basin, Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(3): 1075-1086.
- [27] 蒋红群, 王彬武, 刘晓娜, 等. 北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究[J]. 土壤学报, 2015, **52**(4): 731-746.
Jiang H Q, Wang B W, Liu X N, *et al.* Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(4): 731-746.
- [28] 陶美霞, 陈明, 杨泉, 等. GIS 在土壤重金属污染评价和安全预警的应用[J]. 有色金属科学与工程, 2017, **8**(6): 92-97.
Tao M X, Chen M, Yang Q, *et al.* Assessment in soil heavy metal pollution and safety pre-warning based on GIS [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, **8**(6): 92-97.
- [29] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
HJ 25.3-2014, Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites[S].
- [30] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
GB 15618-2018, Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [31] GB 2762-2012, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [32] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
GB 36600-2018, Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of development land[S].
- [33] 杨阳. 南方典型酸性土壤区域稻米镉富集机理与风险调控[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2018.
Yang Y. Enrichment mechanism and risk management of cadmium accumulation in rice grain in typical acidic soil region of southern China [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [34] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
DZ/T 0295-2016, Determination of land quality geochemical evaluation[S].
- [35] 曹振宇, 张昕蕊, 杨小明, 等. 北京城区土壤与灰尘中重金属的健康风险评价[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2014, **41**(2): 93-98.
Cao Z Y, Zhang X R, Yang X M, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in dust and soil samples from Beijing[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2014, **41**(2): 93-98.
- [36] Liu R, Wang M E, Chen W P, *et al.* Spatial pattern of heavy metals accumulation risk in urban soils of Beijing and its influencing factors[J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 174-181.
- [37] Wang M E, Markert B, Chen W P, *et al.* Identification of heavy metal pollutants using multivariate analysis and effects of land uses on their accumulation in urban soils in Beijing, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(10): 5889-5897.
- [38] DB11/T 811-2011, 场地土壤环境风险评价筛选值[S].
DB11/T 811-2011, Screening levels for soil environmental risk assessment of sites[S].
- [39] 游娟. 北京市机动车重金属排放通量的估算及影响研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2017.
You J. Estimating the annual heavy metal emission of vehicles and its affection in Beijing[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [40] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(2): 951-972.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i>	(2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i>	(2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i>	(2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i>	(2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i>	(2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian	(2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin	(2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i>	(2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i>	(2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i>	(2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun	(2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i>	(2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min	(2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i>	(2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i>	(2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao	(2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Gang, <i>et al.</i>	(2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i>	(2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i>	(2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i>	(2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i>	(2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i>	(2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i>	(2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i>	(2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i>	(2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i>	(2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i>	(2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i>	(2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i>	(2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i>	(2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen	(2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i>	(2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i>	(2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i>	(2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i>	(2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu	(2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i>	(2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i>	(2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Ximiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i>	(2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i>	(2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i>	(2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i>	(2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i>	(2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i>	(2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i>	(2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i>	(2972)