

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与磷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图

施亚星, 吴绍华*, 周生路, 王春辉, 陈浩

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要: 我国高速发展的工业化和城市化造成土壤重金属污染问题日益严重, 威胁到生态环境和人体健康, 因此重金属污染的防控与管理变得尤其重要. 临界负荷是重金属风险管理的重要工具, 可以用来防范重金属污染危害的发生. 本文基于现状平衡、水环境效应以及健康风险这3种情形, 采用稳态质量平衡模型, 分别计算Cd、Cu、Pb和Zn元素在不同效应水平下的临界负荷值并进行制图, 分析重金属临界负荷及其空间分布特征, 利用长三角地区 and 中国的农田重金属输入通量, 估算出超临界负荷的面积比例. 结果表明, Cd的临界负荷值最小, Pb次之, Cu和Zn较大. 研究区内各元素的临界负荷在空间上存在差异, 低值区主要分布在林地, 高值区零散地分布于城市东部与西南部, 农田以中值区和中高值区为主. 与通量监测数据比较发现, 各重金属元素均出现超临界负荷现象, 其中研究区90%以上面积的Pb、Zn元素均超出不同效应下的临界负荷, Cd元素主要在现状平衡与健康风险下出现超临界负荷, Cu元素在现状平衡与水环境效应下出现大面积超临界负荷. 本文研究的不同效应水平下的重金属临界负荷可以作为重金属排放控制的参考, 从而有效地控制重金属的排放来防止重金属污染风险的发生.

关键词: 重金属; 临界负荷; 土壤制图; 环境效应; 健康风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4600-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.036

Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects

SHI Ya-xing, WU Shao-hua*, ZHOU Sheng-lu, WANG Chun-hui, CHEN Hao

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: China's rapid development of industrialization and urbanization causes the growing problem of heavy metal pollution of soil, threatening environment and human health. Therefore, prevention and management of heavy metal pollution become particularly important. Critical loads of heavy metals are an important management tool that can be utilized to prevent the occurrence of heavy metal pollution. Our study was based on three cases: status balance, water environmental effects and health risks. We used the steady-state mass balance equation to calculate the critical loads of Cd, Cu, Pb, Zn at different effect levels and analyze the values and spatial variation of critical loads. In addition, we used the annual input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta and China to estimate the proportion of area with exceedance of critical loads. The results demonstrated that the critical load value of Cd was the minimum, and the values of Cu and Zn were larger. There were spatial differences among the critical loads of four elements in the study area, lower critical loads areas mainly occurred in woodland and high value areas distributed in the east and southwest of the study area, while median values and the medium high areas mainly occurred in farmland. Comparing the input fluxes of heavy metals, we found that Pb and Zn in more than 90% of the area exceeded the critical loads under different environmental effects in the study area. The critical load exceedance of Cd mainly occurred under the status balance and the water environmental effect, while Cu under the status balance and water environmental effect with a higher proportion of exceeded areas. Critical loads of heavy metals at different effect levels in this study could serve as a reference from effective control of the emissions of heavy metals and to prevent the occurrence of heavy metal pollution.

Key words: heavy metals; critical loads; soil mapping; environmental effects; health risks

全球人口、经济的高速增长以及资源的高消耗利用深刻地影响着地球系统的变化, 产生了环境污染、土地退化等一系列的全球性的重大问题. 过去100年来全球的Cd、Cu、Pb、Zn等重金属年产量分别增加了9、17、3和15倍^[1]. 每年排放到全球环境中的Cd、Cu、Pb、Zn等重金属大部分会进入土壤中, 引起土壤重金属污染, 这会引起土壤的组成、结构和功能的变化, 还会通过食物链迁移到动物和人体内^[2, 3]. 土壤重金属污染是当今环境污染中污染面积最广、危害最大的环境问题之一, 受到人们

的广泛关注^[4]. 而土壤重金属总量作为评估土壤污染的重要指标被广泛地用于各国的土壤环境标准^[5]. 随着经济增长方式的改变、产业转移以及人为调控的增强, 部分发达国家的重金属元素排放量已经开始下降. 我国正处出于城市化和工业化高速发展阶段, 重金属污染物的产生量和排放量巨大且重

收稿日期: 2015-06-29; 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001047)

作者简介: 施亚星(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用与生态环境效应, E-mail: syxnju@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wsh@nju.edu.cn

金属污染事件频发,形势非常严峻^[6,7]. 因此,在我国经济快速发展的背景下,开展经济快速发展地区土壤重金属的污染来源控制与管理迫在眉睫.

土壤临界负荷的研究最初始于地表水酸化问题,随着对重金属研究的深入,临界负荷开始用于土壤重金属的预防和控制^[8]. 临界负荷指从长远前景来看,根据目前所掌握的知识,对人体健康或生态系统结构和功能不产生有害效应时,土壤所能承受的最大污染物总输入率(大气沉降、化肥、其他人为输入源)^[9]. 临界负荷的含义类似于环境容量,环境容量对应的是重金属全量,而临界负荷对应的是输入通量,因此临界负荷比环境容量更易于污染控制与管理. 临界负荷是有害物质排放控制和管理的重要工具,在大气和水环境的管理中被广泛应用^[10~13],由于土壤中有害物质来源的多源性、迁移转化的复杂性,关于土壤污染物质的临界负荷研究相对较少. 本研究在传统方法的基础上分别考虑了水环境效应以及健康风险,通过估算不同效应下土壤重金属的临界负荷,以期在不同的管理目标下的

重金属的输入控制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宜兴市位于北纬 $31^{\circ}07' \sim 31^{\circ}37'$, 东经 $119^{\circ}31' \sim 120^{\circ}03'$, 地处长江三角洲太湖流域, 位于江苏省南端, 沪宁杭三角中心, 东临太湖, 北频隔湖, 隶属无锡市, 市域总面积 $2\,038.7\text{ km}^2$, 城市化水平为 60.54% . 宜兴市地势南高北低. 南部为丘陵山区, 北部为平原区; 东部为太湖滨湖区, 西部为低洼圩区. 宜兴属中亚热带北缘过渡地区, 气候、土壤、生物具有过渡特点. 该地区四季分明、雨量充沛. 年平均气温 15.7°C , 年平均降水量为 $1\,177\text{ mm}$. 宜兴处于上海、南京、杭州的几何中心上、与特大城市相对较远, 环境受大城市的影响相对较小, 位置上相对独立; 改革开放 30 年来宜兴的经济飞速发展, 国民生产总值比 1978 年增长 134.8 倍, 年均增长 18.5% . 本文选择苏南的宜兴市的城区及周边地区 150 km^2 的土地作为研究区域 (图 1), 具有典型的代表意义.

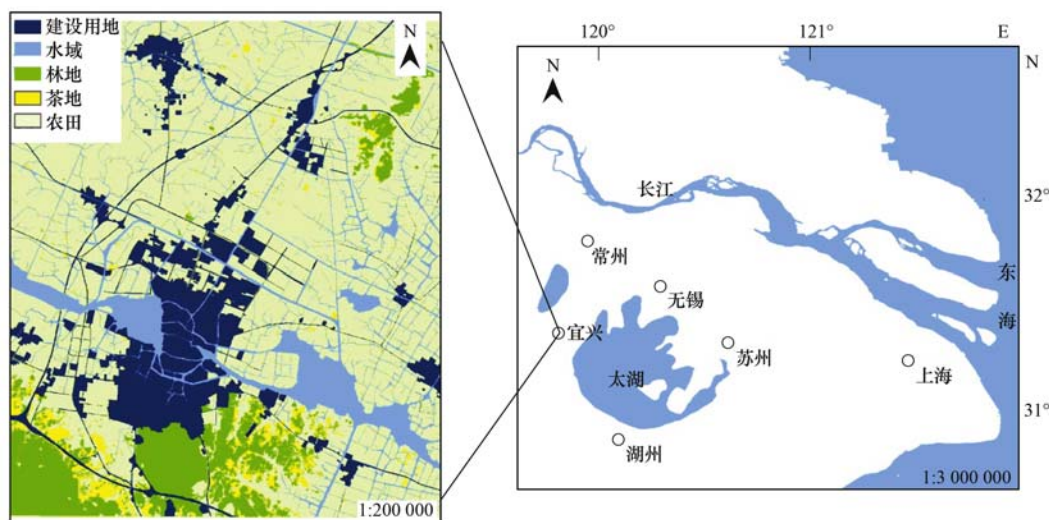


图 1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 临界负荷研究方法

临界负荷是有害物质排放控制和管理的重要工具,可以预防污染物的人为输入,在大气和水环境的管理中被广泛应用. 临界浓度和临界负荷模型参数的确定是临界负荷估算的关键核心内容^[8]. 本研究用两种算法估算临界负荷,一种是现状平衡法,即土壤重金属的外界输入量等于重金属的流失量,土壤重金属含量保持现状水平,不再增加;另一种是环境效应法,即基于生态或人体健康效应,确保重金属的积累量不会超过环境质量标准.

1.2.1 现状平衡法

$$CL(M) = M_{cr} + M_{le(crit)} - M_w \quad (1)$$

式中, $CL(M)$ 为重金属元素 M 的临界负荷 $[\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, M_{cr} 为重金属元素的生物净吸收通量 $[\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, $M_{le(crit)}$ 为重金属随土壤水的淋失通量 $[\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, M_w 为重金属的风化释放通量 $[\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, 由于在百年尺度内, 在平原地区重金属风化释放量影响甚微, 因此不加考虑^[14].

$$M_{cr} = f_{cr} \cdot Y_{ha} \cdot [M]_{ha} \quad (2)$$

$$[M]_{\text{ha}} = K_{\text{crop}} \cdot M \quad (3)$$

式中, M_{cr} 为重金属元素的生物净吸收通量 $[\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, f_{cr} 为生物净吸收因子, Y_{ha} 为作物的产量 $[\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, $[M]_{\text{ha}}$ 为收获的作物中含的重金属量 $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$; K_{crop} 为作物籽粒的重金属富集系数, M 为土壤重金属含量 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$.

$$M_{\text{le(crit)}} = c_{\text{le}} \cdot Q_{\text{le}} \cdot [M]_{\text{ss(crit)}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{le}} = P - E_i - E - f_{\text{cr}} \cdot E_t \quad (5)$$

$$[M]_{\text{ss(crit)}} = \left(\frac{M}{K_f} \right)^{1/n} \quad (6)$$

$$K_f = K \cdot \text{SOM}^a \cdot \text{clay}^b \cdot \text{pH}^c \quad (7)$$

式中, $M_{\text{le(crit)}}$ 为重金属随土壤水的淋失通量 $[\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, c_{le} 为流量单位转换因子, 数值为 10 $[\text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot (\text{mg} \cdot \text{hm}^2)^{-1}]$, Q_{le} 为水淋失通量 $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$, $[M]_{\text{ss(crit)}}$ 为土壤水中重金属的临界浓度 $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$; P 为降水量 $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$, E_i 为截留蒸发量 $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$, E 为土壤蒸发量 $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$, E_t 为土壤蒸腾量 $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$, f_{cr} 同式(2). K_f 为 Freundlich 吸附常数, n 为拟合值; K_f 是关于土壤理化性质的函数, 实验研究表明土壤有机质 SOM(%)、黏粒含量 clay(%) 和 pH 值是决定水溶性重金属含量的关键因子^[15, 16]; K 、 a 、 b 、 c 为常数.

1.2.2 环境效应法

基于环境效应法计算临界负荷时需要计算不同环境效应临界含量. 本研究考虑两种环境效应, 其一为水环境质量, 其二为人体健康. 在研究水环境质量和人体健康的临界含量时, 需要分别了解重金属的溶解与吸附过程以及重金属的食物吸收过程.

(1) 重金属溶解与吸附过程

溶解与吸附是重金属在土壤中的主要反应过程, 水溶性重金属可以随着土壤水迁移, 因此分离水溶性重金属含量是计算重金属迁移量的关键. Freundlich 等温吸附通常用来表达溶解态与吸附态之间的关系:

$$c_i = K_f \cdot c_s^n \quad (8)$$

式中, c_i $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 和 c_s $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 分别为吸附态和溶解态的重金属含量; 重金属的可溶态对于吸附态来说量非常小, 因此重金属的水溶态可以近似表示为:

$$c_s \approx \left(\frac{M}{K_f} \right)^{1/n} \quad (9)$$

式中, M 为土壤重金属含量 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$.

(2) 重金属的食物吸收过程

重金属的食物吸收主要指重金属通过消费当地

生产的粮食、蔬菜、水果等粮食作物而吸入体内的过程.

$$\text{ADI}_{\text{cereals}} = \frac{\text{CS} \cdot \text{BCF} \cdot \text{IR} \cdot \text{EF} \cdot \text{ED}}{\text{BW} \cdot \text{AT}} \quad (10)$$

式中, $\text{ADI}_{\text{cereals}}$ 为直接食入土壤的日摄入量 $[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]$, CS 为土壤重金属含量 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$, BCF 为作物的重金属富集系数, IR 为摄入量 $(\text{kg} \cdot \text{d}^{-1})$, EF 为暴露频率, ED 为暴露持续时间(a), AT 为平均时间 $(365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1})$, BW 为体重(kg).

1.2.3 不同环境效应临界含量估算

基于水环境质量的临界含量的算法采用的是地表水的一级质量标准来反推土壤重金属的最大限制量, 具体算法为:

$$M_{\text{water(crit)}} = \frac{\text{Water criteria}}{K_d} \quad (11)$$

$$K_d = \frac{1}{K_f} \quad (12)$$

式中, $M_{\text{water(crit)}}$ 为土壤重金属的最大限制量 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$, Water criteria 为地表水的一级质量标准 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$, K_d 为土壤重金属水溶态的分离系数.

儿童群体对土壤重金属积累的风险最大, 在基于健康风险的临界含量时针对的是儿童群体, 期望土壤重金属的积累量不会影响儿童的健康. 在基于健康风险的临界含量的算法是通过日摄入量的限值来反推健康风险土壤重金属的临界含量, 具体算法是:

$$M_{\text{health(crit)}} = \frac{\text{BW} \cdot \text{RfD}}{\text{BCF} \cdot \text{IR}} \quad (13)$$

式中, $M_{\text{health(crit)}}$ 为土壤重金属的临界含量 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$, RfD 为日摄入量的限值 $[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]$. 在计算得到不同效应的重金属临界含量 $M_{\text{water(crit)}}$ 和 $M_{\text{health(crit)}}$ 后, 根据公式(2)、(3)可以计算得到 M_{cr} 和 $M_{\text{le(crit)}}$, 最后根据公式(1)估算不同环境效应下的重金属临界负荷.

1.3 参数及来源

本研究将 $13 \text{ km} \times 14 \text{ km}$ 的研究区划分为 430×470 个空间单元, 空间单元的分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$. 作物产量、降水数据、蒸发数据等数据均转化为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 空间分辨率的栅格数据. 用于建模分析所需的数据主要分为农业、土壤、气象和其他相关数据, 其中作物产量、摄入量以及体重等数据主要来源于宜兴市统计年鉴(2010), 土壤类型和属性数据来源于宜兴市土壤志(1988), 重金属的含

量、输入通量、生物净吸收因子以及流量单位转换因子等数据则是参考已有的研究成果. 各参数及其数据来源见表 1.

表 1 主要参数及其来源

Table 1 Main parameters and their source		
数据类型	参数	文献
农业数据	生物净吸收因子 f_{cr}	[14]
	产量 Y_{ha}	[17]
	作物的重金属富集系数 K_{crop}	[18]
土壤数据	有机质 SOM	[19]
	黏粒含量 clay	[19]
	酸碱度 pH	[19]
	重金属含量 M	[20,21]
气象数据	自然大气重金属沉降通量 Dep	[20,21]
	年降水量 P	[19]
	年蒸发量 E	[19]
输入通量	长三角农田重金属输入通量 Q_1	[24]
	中国农田重金属输入通量 Q_2	[25]
其他数据	摄入率 IR	[17]
	流量单位转换因子 c_{le}	[26]
	地表水质量标准 Water criteria	表 2
	日摄入量参考计量 RfD	表 3
	土壤重金属水溶态分离系数 K_d	表 4

本研究是基于水环境效应以及健康风险的临界负荷,主要是通过地表水的一级质量标准和日摄入

量的限值来反推土壤重金属的临界含量来实现,其中水环境质量标准以及各元素日摄入参考计量分别见表 2 和表 3.

表 2 水环境质量标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Water environment quality criteria/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
元素	I 级	II 级	III 级
Cd	0.001	0.005	0.01
Cu	0.01	0.1	1
Pb	0.01	0.01	0.1
Zn	0.05	1	2

表 3 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的日摄入参考计量

Table 3 RfD of Cd, Cu, Pb and Zn		
元素	参考计量/ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	来源
Cd	0.000 5	[27]
Cu	0.14	[28]
Pb ¹⁾	0.004	—
Zn	0.3	[27]

1) Pb 的参考剂量通过应用水的参考剂量换算

土壤重金属水溶态的分离系数 K_d 是计算重金属淋失、对土壤水环境影响的重要参数. 本研究利用宜兴土壤数据库中的数据^[20],对重金属元素与土壤理化性质(pH、有机质、黏粒含量)进行回归分析,获得回归系数. 土壤重金属水溶态分离回归方程见表 4.

表 4 土壤重金属水溶态分离回归方程

Table 4 Regression equations to calculate K_d for heavy metals in soil						
元素	常数项	pH	SOM	clay	F	P
Cd	-1.55	0.04	0.49	0.10	3.14	0.01
Cu	0.71	0.03	0.45	0.23	8.90	0.00
Pb	0.70	0.04	0.47	0.21	6.50	0.00
Zn	1.18	0.04	0.47	0.11	5.70	0.00

2 结果与分析

2.1 基于不同效应的临界负荷比较分析

不同元素在相同效应下的临界负值差异明显,其中 Cd 的临界负荷值最小,Pb 次之,Cu 和 Zn 较大. 而同种元素在不同的环境效应下的临界负荷值也存在差异(见表 5),基于水环境效应

下 Cd、Pb 的临界负荷以及基于健康风险下 Cu、Zn 的临界负荷平均值最大. 对 Cd 元素来说,其维持现状平衡的临界负荷值最小,基于健康风险的次之,基于水环境效应的最大,均值分别为 0.08 (a) 、 0.13 (c) 和 $1.20\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}\text{ (b)}$,最小值为 $0.03\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}\text{ (a)}$,最大值也只有 $1.70\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}\text{ (b)}$.

表 5 重金属临界负荷的统计参数/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$

Table 5 Basic statistical parameters of the critical loads of heavy metals/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$									
元素	基于现状平衡(a)			基于水环境效应(b)			基于健康效应(c)		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Cd	0.03	0.12	0.08	0.43	1.70	1.20	0.05	0.19	0.13
Cu	7.23	25.49	17.58	4.31	14.08	9.33	25.31	82.54	54.68
Pb	1.14	3.24	2.00	4.80	9.66	7.18	2.07	4.17	3.10
Zn	10.60	69.04	36.51	17.89	100.78	59.06	24	138	80.44

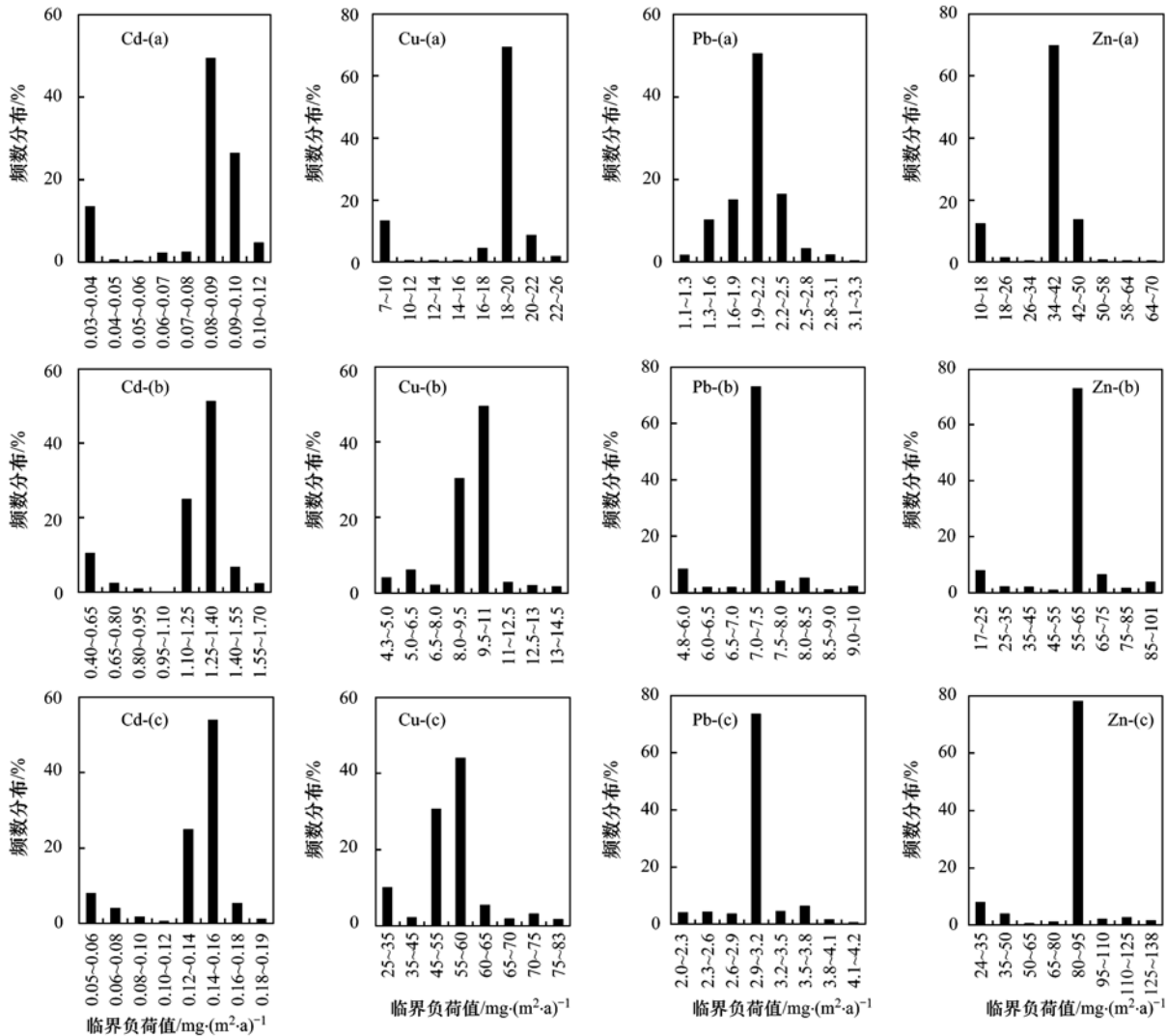
Cu 元素基于现状平衡的临界负荷值大于基于水环境效应的估值,但比基于健康效应的值要小,其均值分别为 17.58 (a)、9.33 (b) 和 54.68 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (c),最小值为 4.31 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (a),而最大值达到 82.54 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (c)。

而对于 Pb 元素来说,3 种算法的临界负荷值均较小,这主要是由于土壤中 Pb 元素可溶性含量低,可迁移和植物提取的含量都很低。其均值分别为 2.0 (a)、7.18 (b) 和 3.10 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (c),Pb 元素的临界负荷值仅大于 Cd。

通过比价 Zn 元素不同效应下的临界负荷,发现维持现状水平、基于水环境质量、基于健康风险的临界负荷三者的差距不是非常明显,其中基于水环境质量的临界负荷略高于基于维持现状平衡的值,均值为 59.06 (b)、80.44 (c) 和 36.51

$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (a),最小值为 10.60 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (a),最大值为 138 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (c)。

Cd、Cu、Pb 和 Zn 元素基于现状平衡的临界负荷值主要集中在 0.08 ~ 0.10、18 ~ 20、1.9 ~ 2.2 和 34 ~ 42 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 区间内(图 2),分别占到了 76%、69.40%、50.56% 和 69.82%。基于水环境效应和健康效应时,Pb 和 Zn 元素的临界负荷值相比基于现状平衡时更加集中,分别集中在 7.0 ~ 7.5、55 ~ 65 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 区间和 2.9 ~ 3.2、80 ~ 95 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 区间,分别占 73.17% (b)、73.07% (b)、73.59% (c) 和 78.19% (c),相反,Cu 元素其他两种情形下的临界负荷值相比基于现状平衡时较为分散。Cd 元素在基于现状平衡、水环境效应和健康风险的临界负荷分布情况较为类似,分别集中在 0.08 ~ 0.10、1.10 ~ 1.40 和 0.12 ~ 0.16



(a) 基于现状平衡, (b) 基于水环境效应, (c) 基于健康效应

图 2 重金属临界负荷频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of critical loads of heavy metals

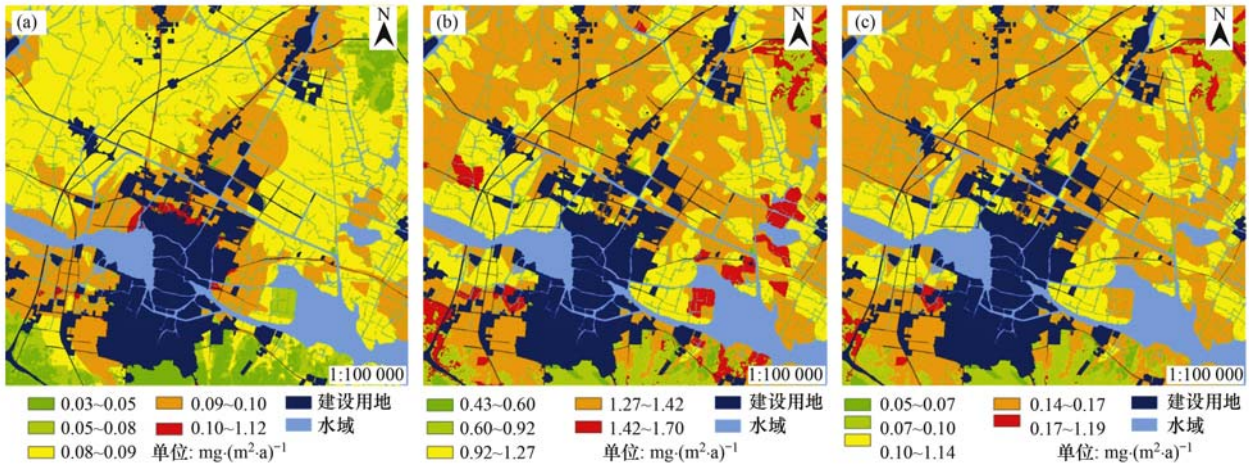
$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 区间内。

2.2 基于不同效应的临界负荷的制图

2.2.1 Cd 的临界负荷

Cd 元素不同效应的临界负荷量空间分布情况见图 3。3 种情形下临界负荷的低值区都主要出现在城市南部、西南部以及东北部地区,而这些地区的土地利用类型是以林地为主,这说明林地的重金属临界负荷值要比农田小。基于现状平衡[图 3

(a)]的临界负荷高值区以及中高值区主要分布在城市建设用地周边,而中值区覆盖了大部分地区。而基于水环境效应[图 3(b)]与基于健康风险[图 3(c)]下的临界负荷中值区和中高值区分布较为均匀。基于现状平衡的临界负荷高值区仅分布在城市中部建设用地周围很小一部分,后两种情形下的临界负荷高值区主要集中分布在城市的东部与西南部的部分地区,范围比现状平衡情形下大。



(a) 基于现状平衡, (b) 基于水环境效应, (c) 基于健康效应, 下同

图 3 Cd 的临界负荷制

Fig. 3 Mapping critical loads of Cd

2.2.2 Cu 的临界负荷

Cu 元素不同效应的临界负荷量的空间分布见图 4。临界负荷的低值区依然出现在林地为主的地区,主要分布在城市南部、西南部地区,东北部的低值区范围减少明显。基于现状平衡[图 4(a)]的临界负荷中高值区沿建设用地周边分布更为明显,水域周边的中高值区范围增加。高值区在城市北部建

设用地周边出现,农田主要是中值区和中高值区这 2 种。基于水环境效应[图 4(b)]下中、中高、高值区的分布与 Cd 元素相同情形下临界负荷的分布情况相近,中值和中高值均匀分布。基于健康风险[图 4(c)]时,农田也是以中值区和中高值区为主,高值区分布与水环境效应下高值区分布情况相近,主要分布在城市的东部与西南部的部分地区。

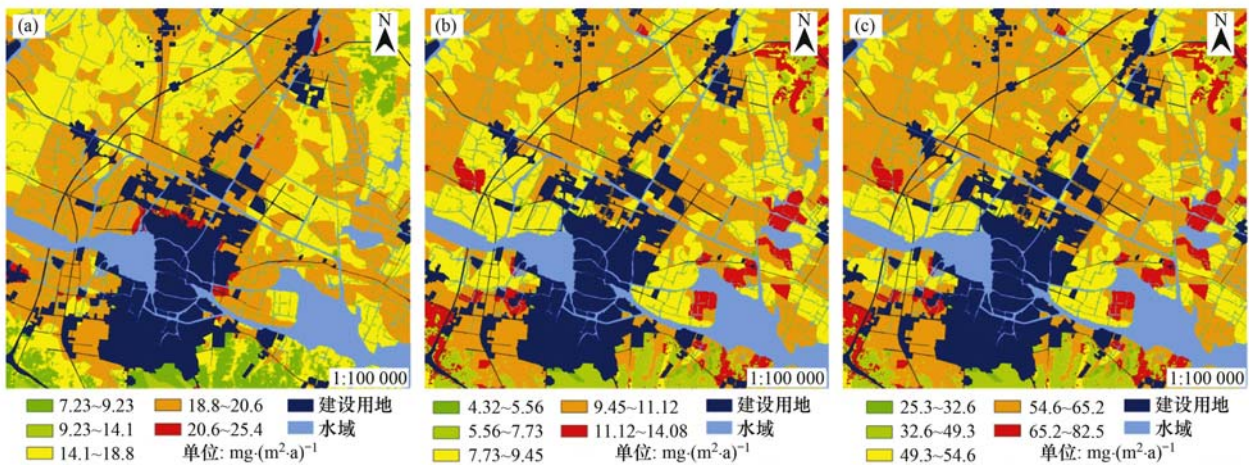


图 4 Cu 的临界负荷制

Fig. 4 Mapping critical loads of Cu

2.2.3 Pb 的临界负荷

Pb 元素不同效应的临界负荷空间分布情况见图 5, 由于土壤中 Pb 元素可溶性含量低, 可迁移和植物提取的含量都很低, 3 种算法的临界负荷值均非常小. 基于现状平衡[图 5(a)]的临界负荷低值区与中低值区范围增加明显, 中高值区出现在城市

建设用地的周边, 中值区分布在中高值区的外围, 高值区面积依然很小. 基于水环境效应[图 5(b)]与健康风险[图 5(c)]的两种情形分布情况相近, 低值区都出现在林地为主的地区, 农田中值区占了很大的比重, 而中高值区与高值区零散地分布于城市中.

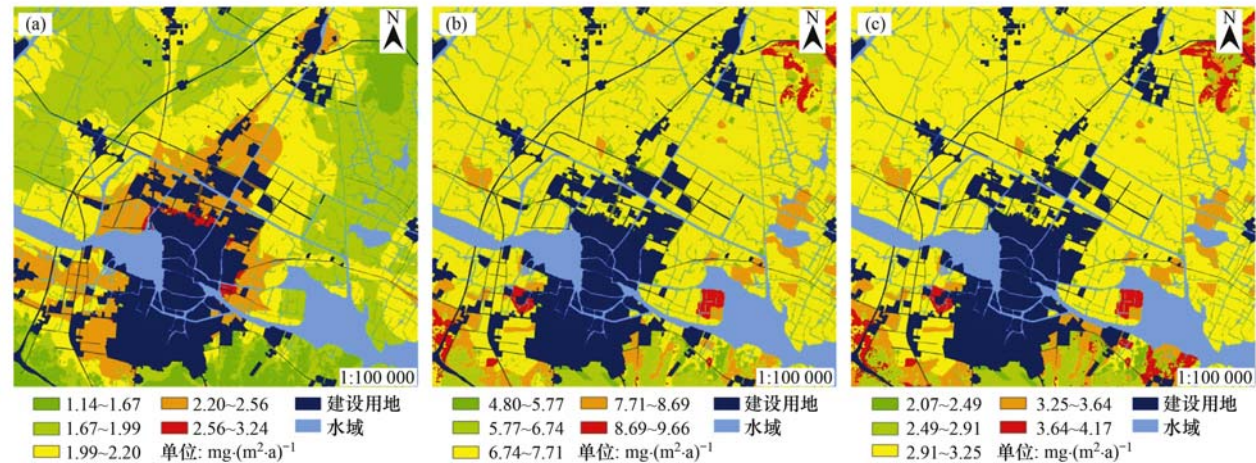


图 5 Pb 的临界负荷制
Fig. 5 Mapping critical loads of Pb

2.2.4 Zn 的临界负荷

对比不同效应下 Zn 元素的临界负荷空间分布 (见图 6), 维持现状水平、基于水环境质量以及基于健康风险的临界负荷三者空间分布情况相似. 其中数值方面, 基于水环境质量、基于健康风险的临界负荷略高于基于维持现状平衡. 基于现状平衡[图 6(a)]的临界负荷低值区范围要比其他两种情形广, 但基于现状平衡的高值区面积十分小, 不及后两者的明显. 基于水环境效应[图 6(b)]与健康风险[图 6(c)]的临界负荷的低值区主要集中在城市

的南部地区, 表现不明显, 高值区依然分布在城市的东部与南部的部分地区. 3 种情形下的临界负荷中值区都覆盖了大部分地区, 土地利用方式主要是以农田为主.

2.3 农田土壤重金属输入超临界负荷分析

本文研究的 Cd、Cu、Pb 和 Zn 元素不同效应下的临界负荷主要用来表示研究区内土壤所能承受的最大污染物输入量, 但是它不能直接给出哪些地区正在面临重金属污染以及其受污染程度. 临界负荷与输入通量的对比可以得知哪些地区是超

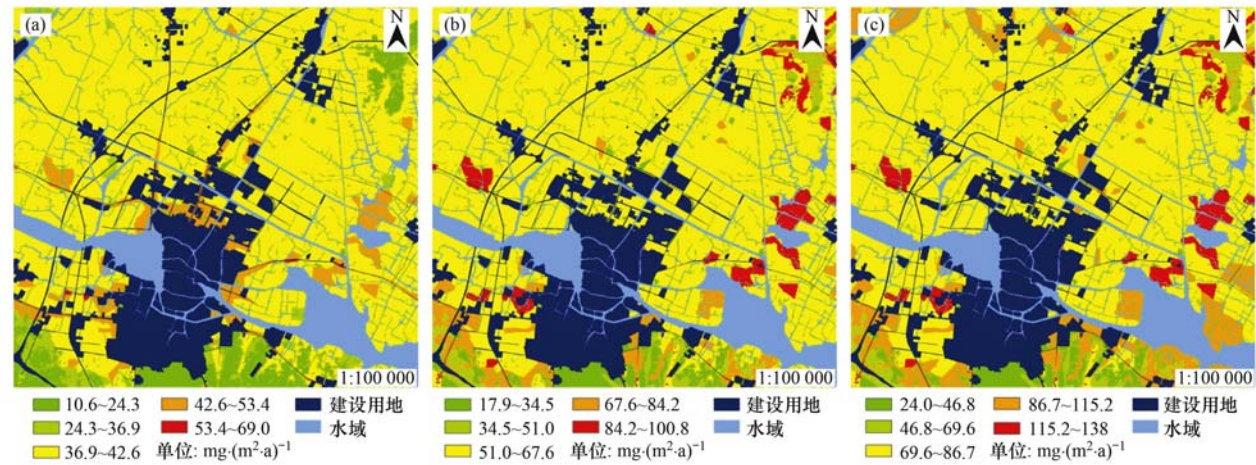


图 6 Zn 的临界负荷制
Fig. 6 Mapping critical loads of Zn

负荷的以及超负荷的程度,那么这些地区就是重金属排放控制和管理以及重金属污染风险防范的重点区域.

本研究将不同效应下的 Cd、Cu、Pb 和 Zn 元素的临界负荷值分别与长江三角洲地区^[24]以及中国^[25]的农田重金属输入通量进行对比,得出不同输入通量下的超临界负荷比例(见表 6). 结果表明,当对比长江三角洲地区农田重金属输入通量 Q_1 时,水环境效应下 Cd 元素超临界负荷比例为 13%,现状平衡与健康风险下 Cu 元素超临界负荷比例分别为 98% 和 0%,水环境效应与健康风险下 Zn 元素的超临界负荷比例分别为 99% 和 93%,其它情形下的

重金属的超临界负荷比例都为 100%. 水环境效应下 Cd 元素与健康风险下 Cu 元素超临界负荷的区域较小,这说明其没有对研究区造成明显的威胁,而其他各情形都对研究区造成比较明显的危害. 当对比中国农田重金属输入通量 Q_2 时,笔者发现水环境效应下的 Cd 元素超临界负荷比例为 14%,健康风险下的 Cd 元素超临界负荷比例为 87%,而其它情形下的重金属的超临界负荷比例都为 100%. 仅在水环境效应下 Cd 元素没有对研究区造成大的威胁,其他各情形下研究区受到重金属污染的威胁十分明显. 随着重金属的危害不断加剧,必须要有效地控制重金属的排放,保护生态系统与人类健康.

表 6 不同输入通量下的超临界负荷分析¹⁾

Table 6 Critical loads exceedances analysis under different input flux

元素	Cd		Cu		Pb		Zn	
	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
输入通量	0.84	1.16	22.06	58.87	18.57	23.82	95.03	153.89
现状平衡/%	100	100	98	100	100	100	100	100
水环境效应/%	13	14	100	100	100	100	99	100
健康风险/%	100	100	0	87	100	100	93	100

1) Q_1 为长江三角洲地区农田重金属输入通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; Q_2 为中国农田重金属输入通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]

3 讨论

临界负荷是有害物质排放控制和管理的重要工具,由于土壤中有有害物质来源的多源性、迁移转化的复杂性,国内外关于土壤污染物质的临界负荷研究相对较少. 传统的研究方法并没有考虑环境的标准值,本研究在传统方法的基础上分别考虑了水环境效应以及健康风险,通过地表水质量标准和日摄入量的限值来反推土壤重金属的临界含量来实现. 本研究还将不同元素的临界负荷进行了数值和空间上的分析,发现不同效应下临界负荷的估算方法结果差异明显,并结合不同的输入通量来判断研究区内是否受到重金属污染的影响以及分析受影响的程度. 本文研究的不同效应水平下重金属临界负荷比传统的临界负荷研究更具有实用价值,可为不同的管理目标下的重金属的输入控制提供了参考. 例如,农用地的主要功能是粮食生产,需要考虑农产品的健康风险,适宜用健康效应方法来确定该类型土地的临界负荷. 重要水源地等区域,可以用水环境效应方法来确定临界负荷. 对于严格控制土壤重金属持续积累的土地,则用平衡效应方法确定临界负荷的管理值. 考虑到本研究区以农田为主,为了防范重金属污染风险发生,建议使用健康风险下的临界负荷估算方法.

本研究在模型的建立与参数的选取上存在一定的不确定性,主要表现在下面几个方面. 首先本研究简化了重金属的迁移过程,土壤 CEC、EC、其它离子含量是土壤重金属元素吸附与迁移的重要影响因素,限于当时实验室数据获取,主要考虑了 pH、SOM、黏粒含量建立方程确定可溶态含量. 其次,作物吸收仅采用富集系数,缺少模型的精确量化. 最后,在确定超临界负荷区域时重金属输入通量采用大范围的数据,缺少空间差异,需要空间监测来确定重金属的输入量,进一步确定超临界负荷的区域. 未来的研究将在此基础之上考虑土壤 CEC、EC、其它离子含量等性质精确的表征土壤重金属元素的重金属溶解与吸附过程,建立重金属在水、植物中的迁移模型,降低土壤重金属临界负荷模型的不确定性. 开展长期重金属输入通量的监测,准确识别超临界负荷区域,为重金属来源的阻控提供依据.

4 结论

(1) 本研究提出的基于环境效应的临界负荷制图方法,可以从现状平衡、水环境效应以及健康风险来量化临界负荷,为不同的管理目标和土地利用方式提供空间差别化管理的参考值. 农用地适宜用健康效应方法,重要水源地等区域适宜用水环境效应方法,对于严格控制土壤重金属持续积累的土地,

则可用平衡效应方法确定临界负荷的管理值。

(2)不同效应下估算的临界负荷在数值和空间上差异明显。数值上,Cd 的临界负荷值最小,Pb 次之,Cu 和 Zn 较大,且基于水环境效应下 Cd、Pb 的临界负荷以及基于健康风险下 Cu、Zn 的临界负荷平均值最大。空间上,重金属临界负荷制图可以表征空间分布的差异,研究区内 Cd、Cu、Pb、Zn 元素的临界负荷低值区主要分布在林地,主要出现在城市南部、西南部以及东北部地区,高值区一般都零散地分布于城市东部与西南部,农田以中值区和中高值区为主。

(3)对比农田重金属输入通量的监测数据,各重金属元素均出现超临界负荷现象。研究区 90% 以上面积的 Pb、Zn 元素均超出不同效应下的临界负荷,Cd 元素主要在现状平衡与健康风险下出现超临界负荷,Cu 元素在现状平衡与水环境效应下出现大面积超临界负荷。

参考文献:

- [1] Han F X, Banin A, Su Y, *et al.* Industrial age anthropogenic inputs of heavy metals into the pedosphere [J]. *Naturwissenschaften*, 2002, **89**(11): 497-504.
- [2] 邓继福,王振中,张友梅,等. 重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究[J]. *环境科学*, 1996, **17**(2): 1-5.
- [3] 张春荣,吴正龙,姚春卉,等. 青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2736-2741.
- [4] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(17): 310-315.
- [5] 钟晓兰,周生路,赵其国,等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[J]. *环境科学*, 2008, **28**(12): 2758-2765.
- [6] 罗吉. 我国重金属污染防治立法现状及改进对策[J]. *环境保护*, 2012, (18): 22-24.
- [7] 赵其国,周炳中,杨浩. 江苏省环境质量与农业安全问题研究[J]. *土壤*, 2002, **34**(1): 1-8.
- [8] 胡宁静,骆永明. 土壤污染物临界负荷研究进展[J]. *土壤*, 2006, **38**(5): 552-558.
- [9] de Vries W, Schütze G, Loftis S, *et al.* Calculation of critical loads for cadmium, lead and mercury; background document to a mapping manual on critical loads of cadmium, lead and mercury [R]. Wageningen: Alterra, 2005. 1-143.
- [10] 叶雪梅,郝吉明,段雷,等. 中国地表水酸沉降临界负荷的区划[J]. *环境科学*, 2002, **23**(3): 18-22.
- [11] 孙成玲,谢绍东. 珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1250-1255.
- [12] Blett T F, Lynch J A, Pardo L H, *et al.* Focus: a pilot study for national-scale critical loads development in the United States[J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, **38**: 225-236.
- [13] Sutton M A, Mason K E, Sheppard L J, *et al.* Nitrogen deposition, critical loads and biodiversity [M]. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2014. 1-535.
- [14] Hettelingh J P, Slootweg J, Posch M, *et al.* Preliminary modelling and mapping of critical loads for cadmium and lead in Europe[M]. Biltoven: WGE, 2002. 1-129.
- [15] Vries W, Rieuwerts J, Pan G, *et al.* The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **125**(2): 213-225.
- [16] Bhavsar S P, Gandhi N, Diamond M L. Extension of coupled multispecies metal transport and speciation (TRANSPEC) model to soil[J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(5): 914-924.
- [17] 宜兴市统计局,国家统计局宜兴调查队. 宜兴统计年鉴[M]. 宜兴: 宜兴市统计局, 2010. 307-315.
- [18] 黄明丽. 苏南典型区土壤-作物系统重金属的空间分布及健康风险评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2007.
- [19] 宜兴土壤普查办公室,无锡市农业局,江苏省土壤普查办公室. 江苏省宜兴土壤志[R]. 无锡: 无锡农业局, 1988. 18-26.
- [20] 王国梁. 城市化背景下不同土地利用方式引起的土壤重金属污染研究[D]. 南京: 南京大学, 2005.
- [21] 万红友. 苏南典型区土壤基本性质与重金属污染时空变化规律研究[D]. 南京: 南京大学, 2005.
- [22] 童晓宁,周厚云,游镇烽,等. 川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 53-59.
- [23] 刘昌岭,任宏波,陈洪涛,等. 黄海及东海海域大气降水中的重金属[J]. *海洋科学*, 2003, **27**(9): 64-68.
- [24] Hou Q Y, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 68-84.
- [25] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [26] de Vries W, Bakker D J. Manual for calculating critical loads of heavy metals for terrestrial ecosystems; guidelines for critical limits, calculation methods and input data [R]. Wageningen: DLO Winand Staring Centre, 1998.
- [27] OEHA. Office of Environmental Health Hazard Assessment [EB/OL]. URL: <http://www.oehha.ca.gov>.
- [28] USEPA. United States Environmental Protection Agency [EB/OL]. URL: <http://www.epa.gov>.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinpo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行