

基于 GIS 的农业土壤镉污染时空演变特征

曾海波, 雷帆, 童潜明, 肖莉, 曹里, 李娜 (湖南省国土资源规划院, 湖南长沙 410007)

摘要 [目的]研究农业土壤中镉(Cd)污染时空演变特征。[方法]以湖南省浏阳市小溪河流域为研究区域,在研究区内采集土壤样本并测定不同土层深度土壤中的Cd含量,利用不同评价标准与评价方法对农业土壤中的Cd污染状况进行评价,同时借助地统计和GIS空间插值方法,以可视化的方式对研究区内土壤中Cd含量的空间分布状况进行综合分析。[结果]土壤中Cd含量不论是以国家二级标准还是以自然背景值为参考评价标准,研究区域浅层耕地层0~10 cm土壤中Cd含量均超过污染指标,说明浅层耕地层受人类活动干扰较大。[结论]该地区农业土壤中主要Cd污染来源为磷肥中的Cd,这对该区域水库水源地的水质产生潜在风险。

关键词 GIS;空间分析;镉污染

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)06-0054-04

The spatial-temporal Evolution Characteristic of Cd Pollution in the Agricultural Soil Based on GIS

ZENG Hai-bo, LEI Fan, TONG Qian-ming et al (Hunan Planning Institute of Land and Resources, Changsha, Hunan 410007)

Abstract [Objective] To study the spatial-temporal evolution characteristic of Cd pollution in the agricultural soil. [Method] Taking Xiaoxi river basin of Liuyang in Hunan Province as the study area, soil samples were collected according to the soil depth for determination of cadmium content in the soil. Using different evaluation standards and methods, cadmium pollution in agricultural soil was evaluated. With the aid of statistical and GIS spatial interpolation method, spatial distribution of soil cadmium content were analyzed within the scope of the study area in the form of visual. [Result] The result showed that reference criteria of the soil cadmium content using the national secondary standard or the natural background value evaluation standard, the heavy metal cadmium content in the shallow layer from 0 to 10 cm depth cultivated soils exceeded the pollution index, which indicated in shallow layer soil interference by human activities was larger. [Conclusion] Major source of cadmium pollution is the cadmium in phosphate fertilizer, it results in enormous potentially risky to water quality.

Key words GIS; Spatial analysis; Cd pollution

目前,我国土壤环境总体状况堪忧,部分地区污染较为严重^[1],而农业土壤镉(Cd)污染对我国食品安全具有潜在威胁,是阻碍我国农业可持续化发展的重要制约因素。对农业土壤Cd污染物综合客观的评价是土壤环境质量优劣的定量描述,是开展农业环境管理和规划工作的基础,可以全面掌握当前农业土壤环境质量,为国家环境部门在农业污染源排放管理及农业土壤镉污染的治理上提供参考。笔者以湖南省浏阳市小溪河流域为研究区域,采用GIS技术分析农业土壤Cd污染时空演变特征。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况 研究区位于浏阳市境内,范围涉及浏阳河源流小溪河流域以及大围山附近的株树桥水库,该区域属于国家级森林公园和国家级地质公园,气候属亚热带季风湿润气候,年平均气温16.7℃,多年平均降雨量1601mm,地势由东北向西南倾斜递降,土壤类型以红壤为主,土壤肥沃,光照充足。具体范围见图1。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 土壤样品采集。根据研究区范围内土壤类型分布情况,在搜集历史土壤样品数据的基础上,利用规则网格采样法^[2]实地采集土壤样本,对于耕作土壤较多的区域进行加密取样,收集和实测的有效样点共计168个。按照不同土层深度采集土壤样品:0~10、15~25、30~40 cm各取1 kg,对所有采样点进行编号并用手持GPS记录样点坐标以及采样时间、深度等,所有样品均由湖南省农业科学院农化检测中心检测,检测结果经中国国家计量认证,样点分布见图2。



图1 研究区示意

Fig. 1 Map of the study area

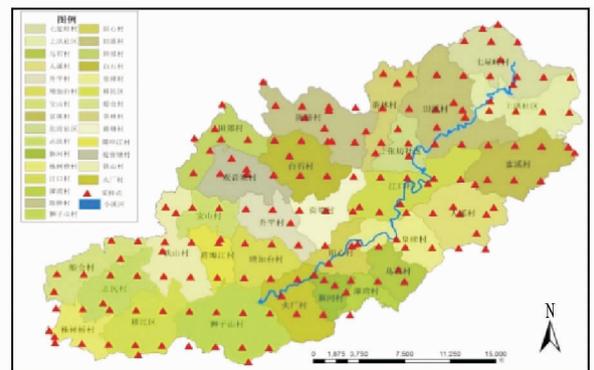


图2 土壤样点分布

Fig. 2 Distribution of soil sample

1.2.2 样品分析。将采集的土壤样品在室内风干、磨碎,过尼龙筛,所有样品经过混合、装袋、粉碎、研磨等处理后,对土壤样品进行消煮,利用石墨炉原子吸收分光光度法对Cd含量进行测定,所用仪器为原子吸收光谱仪。

作者简介 曾海波(1987—),男,湖南益阳人,助理工程师,从事国土资源测绘、3S技术与应用等研究。

收稿日期 2016-12-14

1.3 数据分析 采用 HJ SPSS 9.0 和 Excel 2016 进行数据统计,采用 GS+9.0 地统计分析软件相关模块对土壤中 Cd 含量进行评估,同时基于 GIS 分析方法进行空间插值并输出反映研究区土壤 Cd 含量分布状况插值图。

2 结果与分析

2.1 土壤样品基本统计 小溪河流域耕作土壤不同土层深度 Cd 含量见表 1。由表 1 可知,不同土层深度 0~10、15~25、30~40 cm 土壤中的 Cd 含量均值分别为 0.25、0.18、0.14 mg/kg,与该区域土壤中 Cd 含量的背景值相比,仅 0~10 cm 土层深度 Cd 含量高于背景值(0.20 mg/kg),说明在土壤深度 0~10 cm 存在 Cd 积累。在 0~40 cm 土层,随着土层深度的增加其 Cd 含量呈递减趋势,说明 0~10 cm 土层中 Cd 含量受人为影响较大。

表 1 土壤 Cd 含量的基本统计

Table 1 Basic statistical of soil Cd content mg/kg

土层深度 Soil depth cm	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 Standard deviation
0~10	0.25	0.39	0.19	0.067
15~25	0.18	0.25	0.10	0.045
30~40	0.14	0.10	0.19	0.031

2.2 小溪河流域 Cd 含量污染评价

2.2.1 土壤标准。《中华人民共和国土壤环境质量标准(修订)GB/5618—2008》按照保护目标^[3],将土壤分为 3 级标准值,其中 1 级是环境背景值,即为“基本上保护土壤处于环境背景水平,是保护土壤环境质量的理想目标,主要适用于国家规定的自然保护区、集中式生活饮用水源地、菜场、牧场和其他需要特别保护的土壤”。1 级土壤环境质量的重金属含量执行 1 级标准(表 2),其中集中式生活饮用水源地土壤 Cd < 0.20 mg/kg。

表 2 土壤环境质量标准值

Table 2 Standard of soil environment quality

土壤级别 Soil grade	土壤 pH Soil pH	Cd 含量 Cd content//mg/kg
1 级 One grade	自然背景	0.20
2 级 Two grade	<6.5	0.30
	6.5~7.5	0.30
	>7.5	0.60
3 级 Three grade	>6.5	—

研究区包括株树桥水库及大围山部分风景区,株树桥水库是长沙市百万市民生活饮用水第 2 供应地,其水源地应是《土壤环境质量国家标准》中“集中式生活饮用水源地”,土壤重金属含量按 GB/5618—1995 应达到 1 级标准的要求,即 Cd < 0.20 mg/kg;按 GB/5618—2008 则应是“环境背景水平”。

2.2.2 基于累计污染指数评价。由于地区差异,累积污染指数^[4]更能反映人为活动对土壤中 Cd 含量的影响。采用累积污染指数对小溪河流域耕作土壤 Cd 含量的累积状态进行评价。累积污染指数计算公式:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为污染物 i 的累积污染指数, C_i 为污染物实测值, S_i 为污染物背景值。

为了准确地评价人类活动对该区域耕作土壤带来的环境压力,参照国家土壤环境质量标准,将 $P_i \leq 1$ 的土壤样点定义为清洁无污染, $1 < P_i \leq 2$ 定义为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 定义为中度污染, $P_i > 3$ 定义为严重污染(表 4)。在 0~10 和 15~25 cm 的样点中,分别有部分样点超过国家 1 级标准,处于污染状态,其中土层深度为 0~10 cm 的土壤环境状况较差,有 24.87% 的样点处于污染状态,而土层深度为 15~25 cm 土壤中 Cd 含量超过国家 1 级标准处于污染状态的样点较少,为 12.50%,土层深度为 30~40 cm 土壤中 Cd 不存在超过背景值的情况(表 3)。但土层深度为 0~10 和 15~25 cm 的土壤中 Cd 含量均不存在中度污染和严重污染状态。由此可知,尽管在 0~10 cm 土层深度中 Cd 累积现象较严重,但其含量超过国家 2 级标准的样点却较少。累积污染指数评价方法显示土壤中 Cd 污染不严重,Cd 含量超过国家 2 级标准的样点占总样点数的 3.57%(表 4)。因此,应防止人类活动导致土壤中 Cd 含量继续增加而出现更多污染。

表 3 不同土层深度土壤 Cd 含量累计污染指数

Table 3 The cumulative pollution index of Cd content in different soil depth

土层深度 Soil depth cm	最大值 Maximum mg/kg	最小值 Minimum mg/kg	平均值 Average mg/kg	累计污染指数 > 1 的样点百分比 Percepollution index > 1 ntage of the cumulative sample//%
0~10	1.95	0.85	1.220 0	24.87
15~25	1.65	0.5	0.920 8	12.50
30~40	0.95	0.45	0.675 0	—

表 4 不同土层深度土壤 Cd 污染样点的百分比

Table 4 The percentage of Cd pollution sample in different soil depth %

土层深度 Soil depth cm	清洁无污染 Clean pollu- tion-free	轻度污染 Mild contamination	中度污染 Moderate pollution	严重污染 Serious pollution
0~10	96.43	3.57	—	—
15~25	99.96	0.04	—	—
30~40	100.00	—	—	—

2.2.3 基于内梅罗污染指数评价。内梅罗(Nemerow)污染指数^[5]能评价不同土层深度土壤中 Cd 含量综合污染程度,反映了 Cd 污染对土壤环境的作用,同时突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影响,可用于将区域土壤环境质量作为一个整体与外区域或历史资料进行比较。内梅罗指数计算公式:

$$P = \sqrt{(\bar{P}_i)^2 + \max(P_i)^2}$$

式中, P 为土壤综合污染指数; \bar{P}_i 为土壤中 Cd 污染不同土层深度污染指数平均值; $\max(P_i)$ 为土壤 Cd 污染物的最大污染指数。具体分级标准见表 5。

表5 土壤内梅罗综合污染指数分级标准

Table 5 Classification standard of nemerow comprehensive pollution index

等级 Level	综合污染指数 P Comprehensive pollution index	污染等级 Pollution level
I	$P \leq 0.7$	清洁
II	$0.7 < P \leq 1.0$	尚清洁
III	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染
V	$P > 3.0$	重度污染

对研究区不同土层土壤 Cd 含量进行内梅罗综合指数评价,结果见表6。由表6可知,不同土层深度中 Cd 内梅罗污染指数分别为 1.47、0.86、0.53,其中土层深度 0~10 cm 的 Cd 内梅罗污染指数数值最大,土层深度 30~40 cm 的内梅罗污染指数数值最小。土层深度 0~10 cm 的 Cd 含量处于轻度污染状态,土层深度 15~25 cm 的 Cd 含量处于尚清洁状态,土层深度 30~40 cm 的 Cd 含量处于清洁状态。这说明人类活动对土壤表层 Cd 含量有较大影响,应加强对该地区 Cd 污染的控制。

表6 土壤内梅罗综合污染指数评价结果

Table 6 Evaluation result of nemerow comprehensive pollution index

土层深度 Soil depth//cm	综合指数 Comprehensive index	等级 Level
0~10	1.47	轻度污染
15~25	0.86	尚清洁
30~40	0.53	清洁

2.2.4 基于地积累指数评价。地积累指数(Index of geo-accumulation)又称 Mull 指数法^[6],可以定量评价沉积物中的重金属污染程度,也可用来评价土壤中重金属的污染程度及其分级情况。该方法不仅考虑到人为污染因素、环境地球化学背景值,还考虑到由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素。

地积累指数计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{K B_n} \right)$$

式中, C_n 为一个监测样本的某重金属实际含量; B_n 为该重金属元素的地球化学背景值,该研究取研究区域地球化学背景值(通过采集自然土壤样品测定该区域 Cd 含量背景值为 0.13); K 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。地积累指数分级标准见表7。

由表8可知,土层深度 30~40 cm 的地积累指数平均值均小于 0,处于无污染状态,而土层深度为 0~10 和 15~25 cm 的 Cd 含量均值在 0~1.00,处于轻度—中等污染状态。

2.2.5 不同污染评价方法对比。不同污染评价方法,由于评价等级划分标准、权重系数、背景值等因素影响^[7],导致对土壤中 Cd 评价结果出现差异,但无论采取哪一种评估方法,评估结果均显示,土层深度 0~10 cm 土壤存在轻度污染,且土层深度 30~40 cm 土壤中不存在污染现象;土层深度 15~25 cm 土壤中,内梅罗污染指数评价方法显示处于尚清洁的状态,而累积污染指数与地累积污染指数显示处于轻度污染

状态,说明该土层深度中的土壤存在污染风险(表9)。

表7 地积累指数分级标准

Table 7 Classification standard of Index of geo-accumulation

地累计指数 Index of geo-accumulation	分级 Level	污染程度 Pollution degree
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度—中等污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中等污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中等—强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强—极严重污染
$5 < I_{geo} \leq 6$	6	极严重污染

表8 不同土层深度 Cd 含量地积累指数及其分级

Table 8 Index of geo-accumulation and level of Cd element in different soil depth

土层深度 Soil depth cm	平均值 Average	标准差 Standard deviation	分级 Level	污染程度 Pollution degree
0~10	0.63	0.42	1	轻度—中度污染
15~25	0.31	0.26	1	轻度—中度污染
30~40	-0.34	0.23	0	无污染

表9 不同评价方法的对比

Table 9 Comparison of different evaluation methods

土层深度 Soil depth cm	累积污染指数法 Comprehensive pollution index	内梅罗污染指数法 Nemerow comprehensive pollution index	地累积污染指数法 Index of geo- accumulation
0~10	轻度污染	轻度污染	轻度—中等污染
15~25	轻度污染	尚清洁	轻度—中等污染
30~40	清洁无污染	清洁	无污染

2.3 Cd 含量空间分布可视化表达 土壤是一个不均匀、具有高度空间变异性的混合物^[8],而监测点仅代表监测点本身的土壤 Cd 含量状况,单纯地以各监测点的平均值表示区域土壤污染的程度存在较大误差,为了更加准确直观地表达研究区土壤中 Cd 含量空间分布状况,采用 GIS 空间插值的方法,对不同土层深度的土壤 Cd 含量进行空间插值,并对插值结果进行可视化表达,结果见图3。由图3可知,在土层深度 0~10 和 15~25 cm 的土壤中 Cd 含量在空间分布上存在相对较多的小斑块,而土层深度 30~40 cm 土壤中的 Cd 含量则呈相对均一的连片分布,且随着土层深度的增加,土壤中的 Cd 含量在垂直方向上存在递减趋势。这佐证了上述研究结果,即研究区域土层深度 0~10 和 15~25 cm 的土壤监测样点大部分处于清洁无污染状态,仅有少量处于轻度污染状态,且这些存在污染状态的位置多属于受人类影响较大的耕地^[9],而在土层深度 30~40 cm 的土壤中基本不存在 Cd 污染状况。

3 讨论

株树桥水库水源地无重金属自然污染源和人为工业污染源,出露的地层岩石是冷家溪群板页岩和雪峰期花岗岩,通过区域地质调查和矿产勘查,未发现任何重金属矿产和重金属元素地球化学异常,无自然污染源。这与毗邻的北部大

溪河支流宝山河流域鲜成对照,宝山河上游有中型七宝山铜铅锌多金属矿,从明朝开始采选和冶炼,特别是 1958 年采选

矿最盛,致使宝山河的底泥及沿岸 0~400 m 宽的农田土壤重金属含量很高。

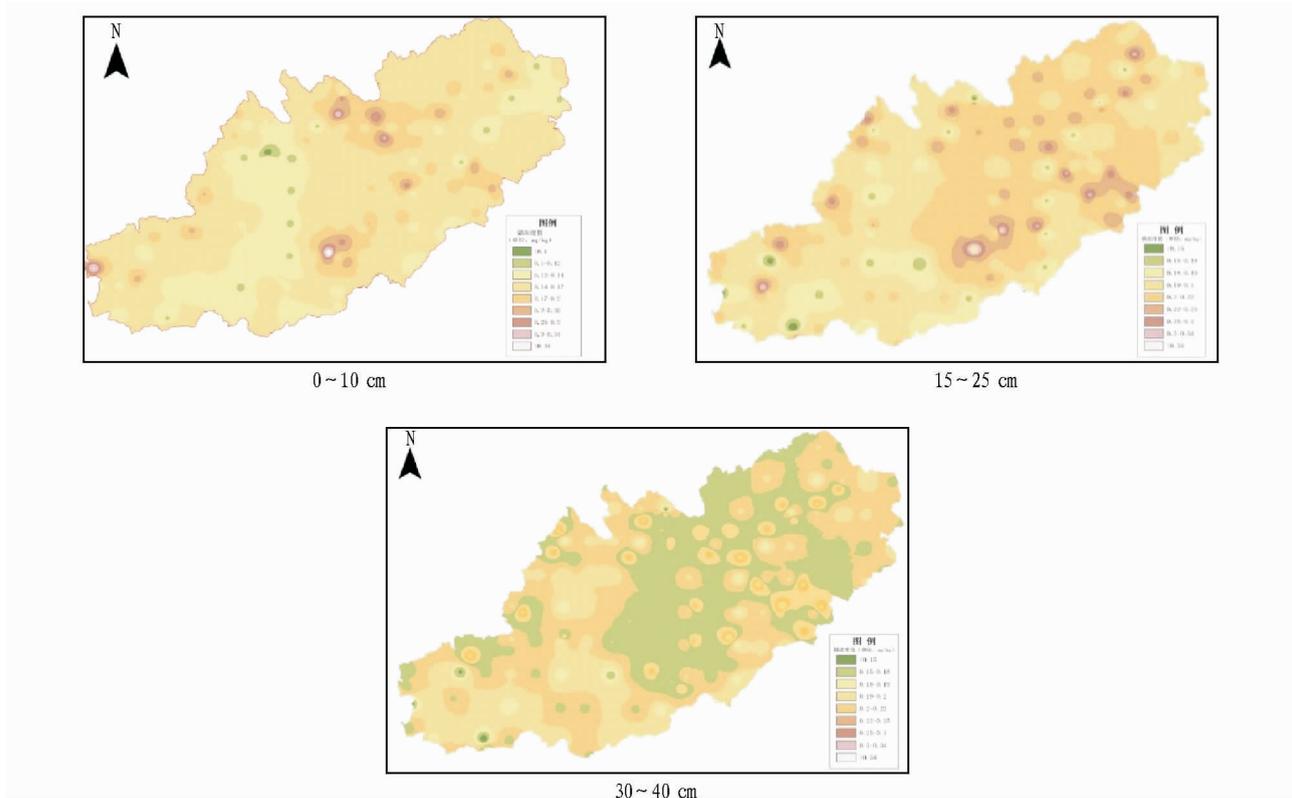


图 3 不同土层深度 Cd 含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of Cd content in different soil depth

株树桥水库水源地的河底泥、稻土和稻米的 Cd 等重金属含量大都低于宝山河流域,表明其没有自然和人为的工矿业重金属污染^[10],但耕作层土壤 Cd 含量升高,以致于超过集中式生活饮用水的国家标准,根据实地调查,超标区域有大面积的农田分布,而农户施用化学磷肥,而磷肥均含 Cd, Cd 随施用进入农田土壤,一部分被农作物摄取进入农产品中,一部分溶解于水中成为水的污染源,大部分则被土壤吸收成为土壤 Cd 的主要来源,导致耕作层中的 Cd 含量累积,因而施用化学磷肥是造成研究区土壤浅层 Cd 含量显著高于深层土壤的主要原因。

截至目前,株树桥水库水除有富营养化倾向、偶尔有大肠杆菌等有机质污染外,尚无重金属污染,在水库水质检测中,水质符合国标 1 级饮用水标准,但由于株树桥水源地表层土壤 Cd 超标,且少部分稻米 Cd 超标的现象,这对桥水库水源地水质是一个潜在危害。为了减少化肥、农药的农业面源污染,目前,国内外都致力于提高化肥的氮、磷利用率和限制使用矿物磷肥,以及严格控制磷肥中的 Cd 含量。而对一些如水源保护的特殊功能区,上述措施不能解决问题时,要调整生产结构,发展不施用化肥、农药的观光农业^[11]。

4 结论

(1) 小溪河流域土层深度 30~40 cm 土壤中 Cd 含量空间变异性相对较小。从土壤监测样点 Cd 的综合评估结果看,研究区域土壤中的 Cd 含量随着土层深度的增加, Cd 含

量逐渐递减,且在土层深度 0~10 和 15~25 cm 土壤中 Cd 含量出现一定的累积,且部分样点超过国家 1 级标准,处于轻度污染状态,说明其受人为活动影响较大。

(2) 研究区范围内无人为工业污染源,通过区域地质调查和矿产勘查,无任何重金属矿产和重金属元素地球化学异常,无自然污染源,在 Cd 超标样点分布区域存在使用化肥、农药的现象,因此可以判断污染的主要因素在于人工施肥及农药,导致部分样点 Cd 存在超标现象,建议在该区域大力提倡绿色农业,提倡施用绿肥,以保护生态环境与水资源。

(3) 针对农业土壤中 Cd 含量的空间分布研究,能更好地了解研究区域土壤中 Cd 含量的分布特征,为适时调整人类经济活动实现土地资源的合理、可持续利用提供科学依据。实践证明,以遥感和 GIS 作为信息获取和处理的技术手段,将景观生态学理论与方法和传统的土地利用变化研究方法相结合,用土地利用指数与景观格局指数来量化表达区域的景观动态变化特征。

参考文献

- [1] 尤冬梅. 农田土壤重金属污染监测及其空间估值方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [2] 朱长青, 史文中. 空间分析建模与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 刘琼峰. 长沙城郊农田土壤铅镉的空间变异、影响因素与评价研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [4] 刘志鹏. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

2.3 样品的加标回收率及相关系数 取猪肉基底,添加2和5 $\mu\text{g}/\text{kg}$,按“1.4”前处理方法对样品进行处理,每个质量浓度平行测定3份,考察方法的回收率以及重现性。在分析前添加至样品中,对分析过程进行质量控制。从表4可以看出,在各加标水平上,猪肉中兽药的加标回收率在75.7%~90.5%,相对标准偏差(RSD)在1.2%~6.3%。由此可见,所建立的方法有较好的重现性,回收率也完全符合要求。

表4 猪肉中兽药回收率和相对标准偏差($n=3$)

Table 4 Recovery rate and relative standard deviation of veterinary drugs in pork %

分析物 Analyte	添加浓度 Concentration// $\mu\text{g}/\text{kg}$		RSD
	2	5	
土霉素 Terramycin	79.6	82.5	3.5
四环素 Tetracycline	75.7	86.6	5.6
金霉素 Chlorotetracycline	84.0	88.7	1.2
氧氟沙星 Ofloxacin	81.0	79.0	3.5
诺氟沙星 Norfloxacin	90.4	90.5	4.0
环丙沙星 Ciprofloxacin	84.7	80.7	6.3
恩诺沙星 Enrofloxacin	80.6	84.2	2.1

3 结论

该研究采用SPE前处理法与LC-MS/MS联用技术同时分析猪肉中的四环素类和喹诺酮类抗生素残留。样品经过HLB固相萃取小柱净化、洗脱,建立了猪肉中四环素类和喹诺酮类抗生素同时分析的高灵敏多反应监测(MRM)离子模式进行定性、定量分析的方法。该方法以猪肉为基质做添加回收,猪肉中兽药的加标回收率在75.7%~90.5%,相对标准偏差(RSD)在1.2%~6.3%。结果显示,该前处理方法

均符合国标要求。该试验所建立的多残留检测方法大大地提高了工作效率,降低了分析成本,对动物性食品的安全卫生工作意义重大。

参考文献

- [1] 李兆君,姚志鹏,张杰,等. 兽用抗生素在土壤环境中的行为及其生态毒理效应研究进展[J]. 生态毒理学报,2008,3(1):15-20.
 - [2] SARMAH A K, MEYER M T, BOXALL A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. Chemosphere, 2006, 65 (5): 725-759.
 - [3] MARTÍNEZ-CARBALLO E, GONZÁLEZ-BARREIRO C, SCHARF S, et al. Environmental monitoring study of selected veterinary antibiotics in animal manure and soils in Austria [J]. Environmental pollution, 2007, 148(2):570-579.
 - [4] MARTINEZ J L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants [J]. Environmental pollution, 2009, 157 (11): 2893-2902.
 - [5] ARIKAN O A, MULBRY W, RICE C P. Management of antibiotic residues from agricultural sources; use of composting to reduce chlortetracycline residues in beef manure from treated animals [J]. Journal of hazardous materials, 2009, 164(2/3):483-489.
 - [6] 朱赛嫦,王静,邵卫伟,等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时检测地表水中18种药物与个人护理品的残留量[J]. 色谱,2013,31(1):15-21.
 - [7] ARIKAN O A, RICE C, CODLING E. Occurrence of antibiotics and hormones in a major agricultural watershed [J]. Desalination, 2008, 226(1/2/3):121-133.
 - [8] FAN G Y, YANG R S, JIANG J Q, et al. Development of a class-specific polyclonal antibody-based indirect competitive ELISA for detecting fluoroquinolone residues in milk [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2012, 13(7):545-554.
 - [9] 李存,江海洋,吴银良,等. 高效液相色谱-荧光-紫外串联法测定动物肌肉组织中多类药物残留[J]. 分析化学,2009,37(8):1102-1106.
 - [10] 唐巍,卢艳芬,丑亚琴,等. 高效液相色谱法同时测定鱼肉中四种喹诺酮类药物残留[J]. 中国兽药杂志,2012,46(12):26-29.
- (上接第57页)
- [5] 林艳. 基于地统计学与GIS的土壤重金属污染评价与预测[D]. 长沙:中南大学,2009.
 - [6] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局-Kriging插值分析[J]. 地理研究,2003,22(3):373-379.
 - [7] 朱会义,刘述林,贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究,2004,23(4):425-432.
 - [8] VAN KUILENBURG J, DE GRUIJTER J J, MARSMAN B A, et al. Accuracy of spatial interpolation between point data on soil moisture supply capacity, compared with estimates from mapping units [J]. Geoderma, 1982, 27(4):311-325.
 - [9] 郑喜坤,鲁安怀,高翔,等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境,2002,11(1):79-84.
 - [10] 戴塔根,刘星辉,童潜明. 湖南浏阳七宝山矿区宝山河不同时期环境污染对比研究[J]. 矿冶工程,2005,25(6):9-13.
 - [11] 曹明德,赵爽. 略论我国农业用地土壤污染防治立法的现状、问题与进路[C]//环境法治与建设和谐社会:2007年全国环境资源法学研讨会论文集. 兰州:[出版者不详],2007:761-767.