

方明星, 黄康伦, 李颖慧, 等. 农产品产地环境质量评价与分区——以泰州市为例[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1476-1483.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.029

农产品产地环境质量评价与分区——以泰州市为例

方明星^{1,2}, 黄康伦³, 李颖慧^{1,2}, 姜小三^{1,2}

(1. 南京农业大学泰州研究院, 江苏 泰州 225311; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 3. 泰州市农业农村局, 江苏 泰州 225300)

摘要: 为了确定泰州市土壤和农产品的重金属污染状况以及产地环境的质量状况, 在研究区内共布设 370 个采样点, 分别对土壤和农产品(水稻和小麦)中 Cr、Pb、Cd、As、Hg 5 种重金属进行检测、分析, 运用内梅罗综合污染指数法对土壤和农产品的重金属污染状况进行评价, 最后选取土壤重金属综合污染指数、水稻重金属污染指数、小麦重金属污染指数以及水稻产量、小麦产量作为分区指标, 采用聚类分析的方法对泰州市产地环境进行分区。结果表明, 土壤样品中有 1.08% 的样点受到重金属污染, 水稻中有 11.46% 的样点受到重金属污染, 小麦中有 21.33% 的样点受到重金属污染。泰州市产地环境共分为优质产区、良好产区、中等产区、一般产区、较差产区 5 种类型, 其中优质产区占区域总面积的 12.16%, 良好产区占 58.38%, 中等产区占 12.16%, 一般产区占 15.14%, 较差产区占 2.16%。总之, 泰州市小部分地区存在土壤和农产品重金属污染, 污染情况较轻, 大部分区域的产地环境处于良好级别以上。

关键词: 产地环境; 重金属; 污染评价; 分区

中图分类号: X822 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)06-1476-08

Environmental quality assessment and zoning of agricultural products origin: a case study of Taizhou

FANG Ming-xing^{1,2}, HUANG Kang-lun³, LI Ying-hui^{1,2}, JIANG Xiao-san^{1,2}

(1. Taizhou Academy of Nanjing Agricultural University, Taizhou 225311, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Taizhou Municipal Bureau of Agricultural and Rural Affairs, Taizhou 225300, China)

Abstract: In order to determine the heavy metal pollution of soil and agricultural products in Taizhou and the quality of producing area environment, a total of 370 sampling sites were set up the research area. Five heavy metals, Cr, Pb, Cd, As and Hg, were detected and analyzed in soil and agricultural products (rice and wheat), and heavy metal pollution in soil and agricultural products was evaluated by the Nemero comprehensive pollution index method. Finally, the comprehensive pollution index of soil heavy metals, rice heavy metal pollution index, wheat heavy metal pollution index, rice yield and wheat yield were selected as the zoning index. Results showed that 1.08% of soil samples, 11.46% of rice samples, 21.33% of wheat samples were contaminated with heavy metals. The producing area Taizhou was divided into five types: high-quality production areas, good production areas, medium production areas, general production areas, and poor production areas. Among them, high-quality production areas accounted for 12.16% of the total area, good production areas accounted for 58.38%, medium production areas accounted for 12.16%, general production areas accounted for 15.14%, and poor production areas accounted for 2.16%.

In conclusion, a small part of Taizhou is polluted by heavy metal in soil and agricultural products, and the pollution situation is light. In addition, the producing area environment in most areas of Taizhou is above a good level.

Key words: producing area environment; heavy metal; pollution assessment; partition

收稿日期: 2019-04-27

基金项目: 2018 年泰州市政府农业科技推广项目(南京农业大学泰州研究院专项资金); 江苏省农产品产地环境安全智慧管控系统项目(JSZC-G2015-039)

作者简介: 方明星(1992-), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤资源与信息技术。(Tel) 18305189098

通讯作者: 姜小三, (E-mail) gis@njau.edu.cn

产地环境主要包括土壤环境、大气环境、水环境等,产地环境的好坏关乎农作物的生长状况及其生态环境的安全,它是农业发展的基础,亦是人类物质来源的保障^[1]。但由于世界各国经济的高速发展、工业化进程的连续加快,产地环境已经受到不同程度的破坏,大量污染物及有毒有害物质的排放,有的直接进入土壤、大气、水体,有的则通过其他途径进入人体,导致产地环境和人体健康都趋于恶化^[2]。

衡量产地环境的质量状况,土壤和农产品的重金属污染程度也可以作为一项重要指标^[3]。但近几十年,由于人类对于土壤环境的开发利用以及长期不合理的种植和大量化学药品的使用,土壤和农产品重金属污染已经越来越严重^[4-5]。据统计,过去50年全世界排放到环境中的镉有 2.00×10^4 t、铜有 9.40×10^5 t、铅有 7.80×10^5 t、锌有 1.35×10^6 t。由此可见,解决土壤和农产品重金属污染问题已迫在眉睫。

泰州地处长江下游北部,是长三角地区连接南北的水陆要道,气候特征为典型的亚热带季风气候。泰州是全国著名的优质商品粮基地,土壤有机质平均含量为 18.30 g/kg,接近全国有机质平均含量(18.63 g/kg)^[6-7]。近年来泰州市农业发展以产业化为主体,注重企业与基地、农户的联接,这与全国农业发展大趋势基本相似^[8]。崔振等^[9]研究了泰州市不同农区土壤养分状况与变化趋势。但对于泰州市土壤重金属以及产地环境分区方面研究的报道还比较少。综上所述,泰州市在气候、地理位置、土壤有机质含量、农业生产管理模式、土壤重金属污染等方面在长三角地区乃至全国都具有一定的代表性。本研究通过分析泰州市土壤和农产品(水稻和小麦)的重金属污染状况,选取5种分区指标,利用K均值(K-means)聚类法,对泰州市产地环境进行分区研究,为农产品产地土壤污染的调查与评价、土地的合理利用、产地环境的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省泰州市(图1)。全市面积共有 $5\,700$ km²,其中 $4\,500$ km²为陆地, $1\,200$ km²为水面,地理坐标为北纬 $32^{\circ}01' \sim 33^{\circ}10'$,东经 $119^{\circ}38' \sim 120^{\circ}32'$ 。泰州市下辖兴化市、泰兴市、靖江市、姜堰区、高港区、海陵区。

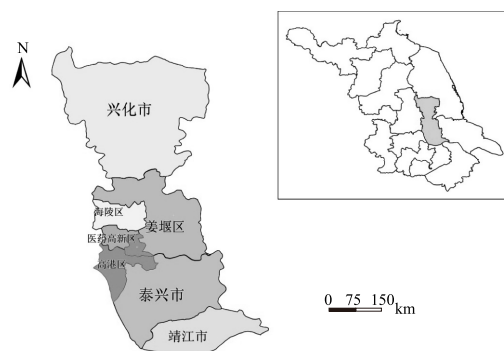


图1 研究区地理位置图及泰州市行政区划图

Fig.1 The geographical location map of the study area and the administrative division map of Taizhou

泰州市为亚热带季风气候,年平均气温在 13.8 °C至 14.5 °C之间,年平均雨水期约 110 d,降水量 $1\,000$ mm以上,平均霜期 135 d。全市土壤主要以潮土和水稻土2大类型为主,又分6个亚类、12个土类。土壤质地由南向北由砂土过渡到黏土,酸碱性为中性或中性偏碱,有机质含量平均 1.9% ,最大变幅 3.8% 。全市以南部砂土有机质含量最低,平均全氮含量 0.12% ,速效磷含量 15.0 mg/kg,速效钾含量 76.6 mg/kg。根据第2次土壤普查结果,泰州市土壤以4、5级居多,且土壤孔隙度大小不一,适合耕作。

1.2 采样点布设

根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)的规定,土壤采样点布点方法一般分为3种:简单随机法、分块随机法、系统随机法,其中系统随机法更具代表性,更加适合污染物含量变化较大的研究区。为了全面了解泰州市土壤及农产品重金属含量,同时确保采样点的科学合理,采样点布设还满足以下要求:采样点布设在研究区的行政区划图上操作,布点在全区范围内统一操作,不留死角,且采样点代表的区域面积统一^[10]。综合考虑以上几种因素,本研究主要采用系统随机布点法。

利用ArcGIS 10.3进行网格化布点。第1步,先将研究区行政区划图添加至图层,然后根据行政区划图创建大小为 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 的网格(Create Fishnet),网格为正方形。第2步,在ArcGIS中,打开ArcToolbox,点击“Feature To Point”给网格内部添加中心点,中心点位置选择正方形对角线的交叉点。第3步,对生成的中心点进行筛选,保证每个网格内

只保留 1 个中心点,而且这个中心点代表的面积要大于该网格总面积的 50%。最后一步,对采样点进行校准,对照泰州市高精度的遥感图,对每一个采样点进行校准,根据实际情况适当删除或者移动采样点位置,最终生成 370 个采样点(图 2)。

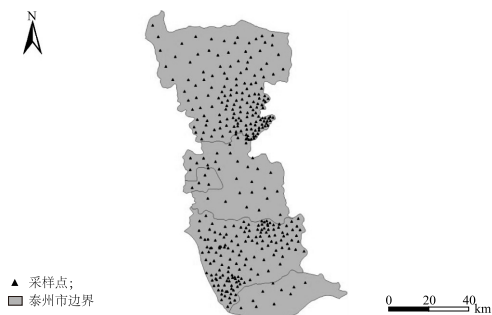


图 2 泰州市土壤及农产品采样点分布图

Fig.2 Distribution map of soils and agro-products sampling points of Taizhou

1.3 样品的采集、分析与检测

1.3.1 样品采集 (1) 土壤样品的采集。样品采集时间从 2018 年 6 月份开始,采用梅花形采样法,采样深度为 0~20 cm,每个采样点共采集 5 个子样品,每个子样品取土壤 0.5 kg,共 2.5 kg,最后把 5 个子样品混合成 1 个混合样品,并且至少保留 1.5 kg 用于后续土壤重金属含量分析。(2) 农产品样品的采集。2018 年 5 月~11 月在采集土壤样品的同一块农用地中采集农产品样品,挑选的农产品采样种类主要是谷物类农作物(水稻和小麦),其中水稻和小麦分两季种植,并且所有农产品都在成熟期采摘其可食用部位^[11]。按后续分析所需样品量的 3 倍取样。

1.3.2 样品处理 (1) 土壤样品分析。样品自然风干后挑出动植物残体、碎石、垃圾等可见侵入体,用白色瓷研钵、木质工具、玻璃棒等研磨并过 20 目尼龙筛,然后用四分法分开,其中一半研磨至能过 100 目尼龙筛,分别装于聚乙烯塑料袋内,贴上标签并置于通风干燥的环境中保存以待检测^[12]。(2) 农产品样品分析。样品采集后,去除杂质,用清水洗净并晾干水分,然后用白色瓷研钵研磨成粉末状,过 200 目尼龙筛,筛选之后的样品粉末装于聚乙烯塑料袋内,贴上标签并置于通风干燥的环境以待后续检测。

1.3.3 样品检测 土壤 pH 在土水比 1.0 : 2.5 (质量体积比)的溶液中测定,溶液振荡 0.5 h 后用 pH 计测定。土壤样品中铅(Pb)、镉(Cd)含量的测定按照《土

壤质量 铅、镉的测定,石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)相关标准执行,采用石墨炉原子法。土壤样品中砷(As)和汞(Hg)含量的测定采用冷原子吸收法。土壤样品中铬(Cr)含量的测定采用二苯碳酰二肼光度法。农产品中重金属含量的测定按照《食品卫生检验方法:理化部分》(GB/T 5009—2003),Hg 和 As 含量的测定采用氢化物发生原子荧光法,Pb、Cr、Cd 含量的测定采用石墨炉原子吸收法。

1.4 重金属污染评价方法和分区方法

1.4.1 评价方法 重金属污染评价采用单因子污染指数法^[13-14]和内梅罗综合污染指数法^[15-16]。单因子污染指数法简单明了,计算简单,可以快速地分析出研究区的大致污染情况。综合污染指数法相较于单因子污染指数法更加完善全面,因为在实际研究中可能存在某一种元素含量超标,而平均含量却不超标的情况,因此采用综合污染指数法可以很好地解决这个问题。

1.4.1.1 单因子污染指数法 根据不同重金属元素,对照各采样点的 pH 值,按照以下公式计算各单因子污染指数: $P_i = C_i / S_i$,式中, P_i 为土壤单因子污染指数, C_i 为每个采样点土壤重金属元素含量实测值, S_i 为土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准值[《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)]。农产品重金属单因子污染指数计算公式: $P_n = C_n / S_n$,式中, P_n 为农产品单因子污染指数(水稻单因子污染指数为 P_{n1} ,小麦单因子污染指数为 P_{n2}), C_n 为每个采样农产品重金属元素含量实测值, S_n 为食品安全国家标准值[《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB2762—2017)]。

1.4.1.2 内梅罗综合污染指数法($P_{s综}$) 土壤重金

属综合污染指数计算公式: $P_{s综} = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + P_{i_{max}}^2}{2}}$,式

中, $P_{s综}$ 为土壤综合污染指数, \bar{P}_i 为采样点所有土壤重金属元素单因子污染指数的平均值, $P_{i_{max}}$ 为采样点所有重金属元素单因子污染指数中的最大值。农产品重金属综合污染指数计算公式: $P_{n综} =$

$\sqrt{\frac{\bar{P}_n^2 + P_{n_{max}}^2}{2}}$,式中, $P_{n综}$ 为农产品综合污染指数(水稻综合污染指数为 $P_{n1综}$,小麦综合污染指数为

$P_{n2\text{综}})$, \bar{P}_n 为采样点所有农产品重金属单因子污染指数的平均值, $P_{n\text{max}}$ 为采样点所有农产品重金属单因子污染指数中的最大值。表 1 为内梅罗综合污染指数评价标准, 标准是根据《农田土壤环境质量监测规范》(NY/T 395—2000) 制定的。

表 1 内梅罗综合污染指数评价标准
Table 1 Evaluation criteria for the Nemero comprehensive pollution index

内梅罗综合指数($P_{\text{综}}$)	污染等级
$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全级
$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警告级
$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻微污染级
$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染级
$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染级

1.4.2 分区方法 产地环境分区采用聚类分析的方法^[17-18]。在目前大多数研究中, 系统聚类法(Hierarchical cluster method)和 K 均值(K -means)聚类法是应用较多的 2 种方法。其中 K 均值聚类法算法简单, 能处理较多的数据。本研究采用 K 均值聚类法, 计算公式为: $J = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \|x_i - u_k\|^2$ 。 K 均值聚类法的聚类中心为与之相对应的种类中各数据点的平均值, 在计算时, 进行数次迭代, 直到最终的聚类中心不变为止^[19]。 K 均值聚类法主要分为 4 个步骤^[20]: (1) 根据实际情况, 在所有待聚类数据中确定 K 个对象作为初始聚类中心; (2) 确定聚类中心后, 除去聚类中心以外的待聚类数据, 根据与初始聚类中心

距离的远近, 把它们归类到与之最近的聚类中心, 划分为这个聚类中心下的一员; (3) 更新聚类中心, 前 2 步已经把所有数据分为 K 类, 这一步把 K 个聚类中心里的数据分别取平均值, 再将平均值作为该类别的新聚类中心, 计算目标函数值; (4) 判断聚类中心和目标函数的值是否一样, 如果两个值相同就输出结果, 如果两个值不相同就继续进行第 2 轮。

1.5 数据处理与制图

利用软件 Excel2013 处理土壤和农产品实测数据。分别计算出土壤和农产品的综合污染指数, 对照内梅罗综合污染指数评价标准, 对土壤和农产品的污染情况进行评价。

K 均值聚类分析使用软件 Spss20.0, 操作步骤为: ① 打开 Spss20.0, 导入包含 5 种聚类指标的 Excel 文件; ② 依次点击“分析”、“分类”、“ K -均值聚类”进入详细设置; ③ 把 5 种聚类指标加入变量窗口, 本研究聚类指标为 $P_{\text{综}}$ 、 $P_{n1\text{综}}$ 、 $P_{n2\text{综}}$ 、 Y_1 、 Y_2 ; ④ 输入最终聚类数, 点击确定生成结果。

产地环境分区示意图借助软件 ArcGIS10.3 完成。

2 结果与分析

2.1 泰州市土壤及农产品重金属含量

由表 2 可以看出泰州市 5 种重金属含量的平均值均没有超出土壤环境质量二级标准值^[21], 但 Cr、Cd、Hg 3 种重金属均有部分样点存在超标情况。5 种重金属按超出土壤二级标准样点数排序, 结果为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{As} = \text{Pb}$ 。

表 2 研究区土壤重金属含量描述性统计分析
Table 2 Descriptive statistical analysis of soil heavy metal content in the study area

项目	Cr 含量 (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	pH 值
最大值	807.00	123.00	1.19	24.70	0.70	8.28
最小值	19.00	10.50	0.06	0.01	0.02	3.40
平均值	66.78	32.88	0.23	8.16	0.16	6.67
土壤质量二级标准	200.00	250.00	0.30	30.00	0.30	—
超标样点百分率 (%)	1.40	0	11.70	0	5.96	—

泰州市农产品重金属含量如表 3 所示。以 2 种农产品重金属含量平均值与食品安全国家标准值作对比发现水稻中 Pb、Cd 2 种重金属含量超过标准值, 小麦中只有重金属 Pb 的含量超过标准值。通

过 2 种农产品之间对比发现, 水稻中 Cr、Pb、Cd、As、Hg 5 种重金属的平均含量均高于小麦, 证明水稻对这 5 种重金属的吸收能力比小麦强。在水稻和小麦中, 5 种重金属按平均含量的高低排序分别为 $\text{Pb} >$

Cr>Cd>As>Hg 和 Cr>Pb>As>Cd>Hg。可以看出 Pb、Cr 2 种重金属在 2 种农作物中均排在前 2 位, Hg 都排在最后一位, 说明 2 种农作物对于 Pb、Cr 的富集能力都比较强, 对于 Hg 的富集能力都比较弱。

另外, 通过与 5 种重金属的食品安全国家标准值

作对比, 可以看出在水稻和小麦中, 除了 Hg 以外, 其他 4 种重金属均存在不同程度的超标。在水稻中, 按超标样点百分率大小排序为 Cd>Pb>Cr>As>Hg; 在小麦中, 按超标样点百分率大小排序为 Pb>Cr>Cd>As>Hg, Pb 的超标率最高。

表 3 研究区农产品重金属含量描述性统计分析

Table 3 Descriptive statistical analysis of heavy metal content of agricultural products in the study area

种类	项目	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
水稻	最大值	1.630	5.400	0.684	0.630	0.017
	最小值	0.180	0.060	0.005	0.023	0.001
	平均值	0.480	0.620	0.150	0.099	0.005
	样点超标百分率 (%)	1.270	3.180	12.740	0.640	0
小麦	最大值	4.500	2.600	0.246	0.960	0.005
	最小值	0.263	0.041	0.020	0.006	0.001
	平均值	0.388	0.386	0.049	0.056	0.002
	样点超标百分率 (%)	7.280	17.220	1.320	0.660	0

2.2 泰州市土壤重金属污染评价

表 4 为基于综合污染指数法计算出的土壤重金属污染等级样点所占比例。由表 4 可以看出, 研究区 370 个采样点土壤重金属处于安全级别的样点占 91.06%, 处于警戒线级别的样点占 7.86%, 处于轻微污染级别的样点占 1.08%, 处于中度污染级别的样点为 0, 处于重度污染级别的样点为 0。总体来看, 共有 1.08% 的样点受到轻微污染, 没有样点受到中度和重度污染, 存在土壤重金属污染的区域面积明显低于目前常被学者和国土资源部门广泛引用的中国有近 1/5 的耕地面积受到重金属污染的结论^[22], 证明研究区农田土壤污染程度较轻, 只有少数地区存在重金属积累的情况。

表 4 基于综合污染指数法的研究区土壤重金属污染程度

Table 4 Degree of heavy metal pollution in the soil of study area based on comprehensive pollution index method

内梅罗综合指数 ($P_{\text{综}}$)	污染等级	污染等级样点所占比例 (%)
$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全级	91.06
$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警告级	7.86
$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻微污染级	1.08
$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染级	0
$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染级	0

2.3 泰州市农产品重金属污染评价

根据水稻综合污染指数 ($P_{\text{n1综}}$) 和小麦综合污染指数 ($P_{\text{n2综}}$), 对照综合污染指数评价分级标准计算出各污染等级样点所占百分比 (表 5)。对于水稻来说, 研究区 370 个采样点 80% 以上都没有超标, 农产品重金属含量处于安全级别的样点占 84.08%, 处于警告级别的样点占 4.46%, 处于轻微污染级别的样点占 6.37%, 处于中度污染级别的样点占 1.91%, 处于重度污染级别的样点占 3.18%。总体来看共有 11.46% 的样点受到重金属污染, 按污染区域大小排序: 轻微污染>重度污染>中度污染。对于小麦来说, 研究区 370 个采样点有 60% 以上没有超标, 农产品重金属含量处于安全级别的样点占 64.67%, 处于警告级别的样点占 14.0%, 处于轻微污染级别的样点占 14.0%, 处于中度污染级别的样点占 3.33%, 处于重度污染级别的样点占 4.0%。总体来看有 21.33% 的样点受到重金属污染, 按污染区域大小排序: 轻微污染>重度污染>中度污染。

通过对比 2 种农产品数据发现, 小麦处于安全级别的样点要明显少于水稻, 且污染样点总百分比也比水稻要高出 1 倍左右。单从 3 种污染级别 (轻微污染、中度污染、重度污染) 来看, 小麦也均高于水稻, 而且处于警告级别的样点也明显比水稻要多。整体来看, 小麦污染程度相对严重, 这可能跟研究区

土壤类型、耕作方式、农作物种类等有一定关系。

表 5 基于综合污染指数法的农产品重金属污染程度占比

Table 5 The proportion of heavy metal pollution degree in agricultural products based on comprehensive pollution index method

种类	内梅罗综合指数	污染等级	污染等级样点所占百分比 (%)
水稻	$P_{n1\text{综}} \leq 0.7$	安全级	84.08
	$0.7 < P_{n1\text{综}} \leq 1.0$	警告级	4.46
	$1.0 < P_{n1\text{综}} \leq 2.0$	轻微污染级	6.37
	$2.0 < P_{n1\text{综}} \leq 3.0$	中度污染级	1.91
	$P_{n1\text{综}} > 3.0$	重度污染级	3.18
小麦	$P_{n2\text{综}} \leq 0.7$	安全级	64.67
	$0.7 < P_{n2\text{综}} \leq 1.0$	警告级	14.00
	$1.0 < P_{n2\text{综}} \leq 2.0$	轻微污染级	14.00
	$2.0 < P_{n2\text{综}} \leq 3.0$	中度污染级	3.33
	$P_{n2\text{综}} > 3.0$	重度污染级	4.00

2.4 泰州市产地环境分区

在对泰州市产地环境进行分区时,选择对分区影响较大的 3 个指标,分别为土壤重金属污染状况、农产品重金属污染状况、农产品产量。之所以选择农产品产量作为分区指标,是因为本研究所选择的农产品为粮食作物(水稻和小麦),因此产量是衡量研究区农作物生长状况的一项重要指标,同时也能判断研究区土壤是否适合粮食类作物的种植。

针对以上 3 个指标,又具体选取了相应的影响因子。对于土壤重金属污染状况,影响因子共有 5 种,分别为 Cd、Cr、As、Hg、Pb 含量。由于从单因子污染指数只能看出每一种重金属元素是否污染,不能看出各重金属元素之间的相互作用,哪一种重金属元素对土壤污染的影响比较大,而内梅罗综合污染指数考虑了所有重金属元素单因子污染指数平均值和最大值,可以综合性地判断土壤的污染情况,因此选取土壤重金属综合污染指数($P_{s\text{综}}$)、水稻重金属综合污染指数($P_{n1\text{综}}$)、小麦重金属污染指数($P_{n2\text{综}}$)以及水稻产量(Y_1)、小麦产量(Y_2)作为聚类分析的具体指标

根据数据的相似性把数据分为 5 类,分别对应数字 1、2、3、4、5(表 6)。由表 6 可以看出,优质产区对应第 5 类,良好产区对应第 1 类,中等产区对应第

3 类,一般产区对应第 4 类,较差产区对应第 2 类。优质产区共有 45 个样点,良好产区共有 216 个样点,中等产区共有 45 个样点,一般产区共有 56 个样点,较差产区共有 8 个样点。其中优质产区的 45 个样点中,有 34 个样点位于兴化市,10 个样点位于泰兴市,1 个样点位于姜堰区;良好产区的 216 个样点中,有 2 个样点位于海陵区,6 个样点位于靖江市,19 个样点位于姜堰区,其余 189 个样点分布在兴化市和泰兴市;中等产区的 45 个样点中,有 1 个样点位于海陵区,14 个样点位于兴化市,29 个样点位于泰兴市,1 个样点位于姜堰区;一般产区的 56 个样点中,有 6 个样点位于兴化市,50 个样点位于泰兴市;较差产区的 8 个样点中,有 7 个样点位于兴化市,1 个样点位于姜堰区。优质产区占总面积的 12.16%,良好产区占总面积的 58.38%,中等产区占总面积的 12.16%,一般产区占总面积的 15.14%,较差产区占总面积的 2.16%。5 个产区按面积大小排序为:良好产区>一般产区>中等产区=优质产区>较差产区,良好产区所占面积最多,较差产区所占面积最少。

表 6 基于聚类分析法的产地环境分区类型

Table 6 Type of producing area environment based on cluster analysis

聚类指标	聚类				
	1	2	3	4	5
$P_{s\text{综}}(0.7 \sim 3.0)$	0.48	0.37	0.47	0.42	0.45
$P_{n1\text{综}}(0.7 \sim 3.0)$	0.46	0.28	0.39	0.42	0.46
$P_{n2\text{综}}(0.7 \sim 3.0)$	0.51	0.52	0.85	0.80	0.44
$Y_1(\text{kg})$	619	353	613	550	666
$Y_2(\text{kg})$	427	400	421	410	436

$P_{s\text{综}}$:土壤重金属综合污染指数; $P_{n1\text{综}}$:水稻重金属综合污染指数;
 $P_{n2\text{综}}$:小麦重金属综合污染指数; Y_1 :水稻产量; Y_2 :小麦产量。

图 3 为泰州市产地环境分区示意图。由图 3 可以看出泰州市中等以上产区主要分布在兴化市东部、北部和南部,姜堰区中部,泰兴市西北部、东部,以及靖江市东部和南部沿江区域;较差产区主要位于兴化市中部、泰兴市中部偏东和姜堰区北部的部分地区。总体来说,产地环境中等及以上的区域占研究区总面积的 82.7%,比较适合农作物种植,符合当地农业产业的发展。

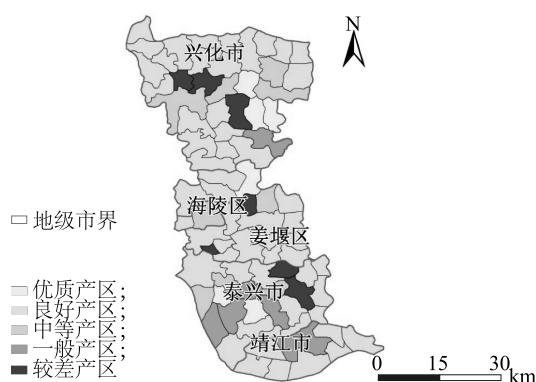


图3 泰州市产地环境分区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of producing area environment in Taizhou

3 讨论

泰州市有 91.06% 的区域农产品产地土壤环境为安全级别,仅有 1.08% 的区域受到轻微污染,有 7.86% 的区域处于警戒线级别,没有区域受到中度污染和重度污染,总体来看土壤污染情况较轻。葛晓颖等^[23]通过对环渤海地区土壤重金属污染状况进行评估发现,有 9.7% 的区域受到轻微污染,2.2% 的区域受到中度污染,88.1% 的区域处于安全级别,受污染区域高于本研究区。岳蛟等^[24]通过对安徽省某地区农田土壤重金属污染程度调查发现,有 5.59% 的区域受到轻度污染,0.62% 的区域受到中度污染,0.57% 的区域受到重度污染,整体质量状况比本研究区要差。宋金茜等^[25]以南京八卦洲为例对农业土壤重金属风险情况进行了研究,结果表明有 2.3% 的区域为高风险区,有 27.5% 的区域为低风险区,70.2% 的区域为无风险区,受污染区域也高于本研究区。以上研究结果说明中国不同地区土壤重金属污染情况具有相似性,均是受污染区域较少,主要以安全级别为主。对于处于警戒线级别的区域,今后要重点监测,农业生产活动要在可控制范围内进行,以确保农作物的安全生产。

泰州市有 11.46% 的水稻种植区域受到重金属污染,84% 以上的区域都处于安全级别,另外还有 4.46% 的区域处于警戒线级别;有 21.33% 的小麦种植区域受到重金属污染,64% 以上的区域处于安全级别,另外还有 14.0% 的区域处于警戒线级别。农产品重金属污染情况在不同地区有很大差异。张风雷等^[26]分析了重庆市南川区东部水稻根系土壤重

金属含量特征,发现土壤重金属污染严重,其中 12% 处于轻污染,36% 处于中污染,52% 处于重污染,污染情况要远远高于本研究。另外调查结果显示水稻污染区域主要在泰州市中部(涵盖姜堰区、海陵区、高港区及医药高新区)、兴化市西北部和东南部以及泰兴市部分地区,其中重度污染区域主要在兴化市东南部。小麦污染区域主要分布在泰州市中部、泰兴市中部和西南部、兴化市中部和东南部以及靖江市大部分地区,其中污染等级较高的区域主要分布在研究区西部边界。通过调查发现,在姜堰、海陵、高港及医药高新区这 4 个区,引江河、南官河、长江大道由南向北穿境而过,且污染严重区域均分布在长江一侧,主要是受道路、河流以及人为影响较大。张永发等^[27]对海南省农产品重金属污染情况进行分析,也认为重金属含量主要受农业生产和人类活动的影响较大。

泰州市农产品产地环境共分 5 种类型:优质产区、良好产区、中等产区、一般产区、较差产区。通过走访调查和查阅资料了解到,泰州市产地环境分区的类型与工业园区的分布存在相似性,在工业区周边的区域分区等级较差,产地环境污染比较严重,这是由于工厂污染物的排放对周边产地环境产生了不同程度的污染。王朝辉等^[28]对柳河大米产地环境的影响因子进行了分析,结果表明产地环境容易受公路、降雨、粉尘等影响,与本研究结果类似。万德慧等^[29]通过对海南省农产品产地环境质量影响因素的调查,发现工业“三废”污染是产地环境污染物的主要来源。以上分析结果可以证明泰州市产地环境以良好为主,适合农作物种植,对于研究区内的较差产区,要注意农产品的安全生产。

另外,重金属 Pb 和 As 在土壤中没有样点超标,但在农产品中均有样点超标,特别在小麦中,重金属 Pb 样点超标率在 5 种重金属中最高。说明对于 Pb 和 As 这 2 种重金属,在土壤中未超标值时,种植的水稻、小麦仍有超标风险,因此要加强对农产品中这 2 种重金属含量的关注。

参考文献:

- [1] 史文娇,王宗,吴溪.三江源生态畜牧业有机产品产地环境质量评价[J].农业工程学报,2018,34(7):209-217.
- [2] WONG S,LI X D,ZHANG G,et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta,South China[J]. Environment Pollution,2002,119(1):33-44.

- [3] 陆泗进,魏复盛,吴国平,等.我国农产品产地生态环境状况与农产品安全研究进展[J].食品科学,2014,35(23):313-319.
- [4] BI X Y, FENG X B, YANG Y G, et al. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China[J]. Environment International, 2006,32(7):883-890.
- [5] YUAN Z M, YAO J, WANG F, et al. Potentially toxic trace element contamination, sources, and pollution assessment in farmlands, Bijie City, southwestern China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017,189(1):25.
- [6] 胡莹洁,孔祥斌,张玉臻.中国耕地土壤肥力提升战略研究[J].中国工程科学,2018,20(5):84-89.
- [7] 王华为,朱金兰,朱莲.泰州市1997-2004年耕地土壤肥力监测结果与分析[J].安徽农业科学,2005(8):1548-1549.
- [8] 尹泽伟.江苏省泰州市农业产业化发展研究[D].武汉:华中师范大学,2016.
- [9] 崔振,吉莉.泰州市不同农区土壤养分状况与变化趋势研究[J].安徽农学通报,2019,25(4):47-51.
- [10] 丁能飞.苍南县主要农产品与产地环境重金属污染调查及评价[D].杭州:浙江大学,2008.
- [11] 谢武双,李贵杰,陈卫平.韶关市翁源县铁龙林场土壤重金属修复[J].环境工程学报,2018,12(9):2690-2698.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:20-22.
- [13] 柳云龙,章立佳,韩晓非,等.上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J].环境科学,2012,33(2):599-605.
- [14] 王飞.单因子指数与综合指数法在炼油厂作业安全评价中的应用[J].绿色科技,2018(2):111-112.
- [15] 喻子恒,黄国培,张华,等.贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估[J].生态学杂志,2017,36(8):2296-2301.
- [16] 王瑜堂,张军,岳波,等.村镇生活垃圾重金属含量及其土地利用中的环境风险分析[J].农业环境科学学报,2017,36(8):1634-1639.
- [17] 苏振海,曲英.采用聚类分析方法进行辽宁省造林分区的研究[J].山东林业科技,2018,48(6):24-28.
- [18] 吴元奇,冯荣扬.聚类分析计算方法的理论及结果比较[J].湛江海洋大学学报,2002,22(1):57-63.
- [19] 谢英欣,周雨佳.K均值法在城市基础设施建设水平分析的应用研究[J].统计与管理,2015(4):46-48.
- [20] 陶莹,杨锋,刘洋,等.K均值聚类算法的研究与优化[J].计算机技术与发展,2018,28(6):90-92.
- [21] 国家环境保护局,国家技术监督局.土壤环境质量标准 GB15618—1995[S].北京:中国环境科学出版社,2006.
- [22] 徐子成,陈思浩,涂闽.我国耕地重金属污染治理与防范刻不容缓[J].上海化工,2013,38(12):1-2.
- [23] 葛晓颖,欧阳竹,杨林生,等.环渤海地区土壤重金属富集状况及来源分析[J].环境科学学报,2019,39(6):1979-1988.
- [24] 岳蛟,叶明亮,杨梦丽,等.安徽省某市农田土壤与农产品重金属污染评价[J].农业资源与环境学报,2019,36(1):53-61.
- [25] 宋金茜,朱权,姜小三,等.基于GIS的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J].土壤学报,2017,54(1):81-91.
- [26] 张风雷,林书平,杨乐超.重庆市南川区东部水稻根系土重金属含量特征与来源[J].农业工程,2019,9(3):63-66.
- [27] 张永发,邝继云,谢茵,等.海南省农产品重金属污染评价与特征分析[J].中国土壤与肥料,2018(5):169-176.
- [28] 王朝辉,郑晖,赵倩,等.柳河大米产地环境及其矿物元素分布特征的典范对应分析[J].食品科学,2019,40(6):318-324.
- [29] 万德慧,孙饶.海南省农产品产地环境质量影响因素及其监管措施[J].热带农业科学,2018,38(11):93-96.

(责任编辑:张震林)