

基于 GIS 的天水市秦州区樱桃园土壤 重金属元素空间分布与污染评价

刘强, 冯娜, 张娅娅, 刘雪媛

(天水师范学院 资源与环境工程学院, 甘肃 天水 741000)

摘要: [目的] 获取土壤重金属污染状况, 为促进秦州区樱桃园产业的可持续发展提供科学依据, 也为其他果树用地的土壤重金属污染防治提供借鉴。[方法] 以天水市秦州区樱桃园主产区的 6 个镇(太京、玉泉、藉口、关子、牡丹、杨家寺)作为研究点, 运用空间分析的方法, 研究表层土壤中的重金属污染的空间分布特征, 又运用尼梅罗综合污染指数法和污染负荷指数法对土壤重金属环境质量及潜在生态风险进行评价。[结果] 通过应用 GIS 得到的空间分布图可知, 秦州区樱桃园土壤重金属污染程度都较轻, 东北部樱桃园土壤重金属污染较西南部污染严重。[结论] 樱桃园土壤重金属污染程度突出元素为 Pb, 而 Zn, Cr, Cu 属轻度污染水平, Cd 污染最轻, 5 种重金属元素之间含量差别较明显。土壤重金属污染主要集中在太京镇、玉泉镇、藉口镇, 这些区域靠近城市中心, 受交通、人为因素影响密切, 污染严重。

关键词: 土壤重金属; GIS; 尼梅罗指数法; 污染负荷指数法; 空间分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0258-06

中图分类号: X825

文献参数: 刘强, 冯娜, 张娅娅, 等. 基于 GIS 的天水市秦州区樱桃园土壤重金属元素空间分布与污染评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 258-263. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.044; Liu Qiang, Feng Na, Zhang Yaya, et al. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metals in cherry orchard soil in Qinzhou District, Tianshui City based on GIS[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 258-263. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.044

Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Cherry Orchard Soil in Qinzhou District, Tianshui City Based on GIS

LIU Qiang, FENG Na, ZHANG Yaya, LIU Xueyuan

(College of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741000, China)

Abstract: [Objective] The status of soil heavy metal pollution was researched to provide scientific basis for promoting the sustainable development of cherry orchard industry in Qinzhou District, and for soil heavy metal pollution prevention and control in other fruit land. [Methods] Six towns of cherry orchard production area in Qinzhou District of Tianshui City (Taijing, Yuquan, Xikou, Guanzi, Mudan and Yangjiasi) were taken as the research sites. Where the spatial distribution characteristics of heavy metal pollution in surface soil was illustrated using method of spatial analysis. And the heavy metal environmental quality and its potential ecological risk were evaluated by Nemerow comprehensive pollution index and pollution load index. [Results] Overall, the soil heavy metal pollution of cherry orchard in Qinzhou District was light, but the soil heavy metal pollution in the northeast region was serious than that in the southwest region of the research sites. [Conclusion] The prominent heavy metal element in the cherry orchard is Pb; and Zn, Cr, Cu pollution also existed but belong to light pollution level; Cd pollution is the most light. It is obvious different among the contents of the five heavy metal elements. The heavy metal polluted towns mainly concentrated in Taijing, Yuquan and Xikou County that are adjacent to downtown, for the reason of traffic and intensive human interference, are seriously polluted.

Keywords: soil heavy metal; GIS; Nemerow index; pollution load index; spatial distribution

收稿日期: 2016-09-27

修回日期: 2016-10-28

资助项目: 天水市科技支撑项目“天水市发展农业循环经济评价研究”阶段性成果(2010476); 天水师范学院中青年教师科研项目“基于 GIS 的樱桃园土壤重金属元素分析与评价”(TAS1615)

第一作者: 刘强(1983—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士, 讲师, 主要从事土壤生态与环境研究。E-mail: guangmingliu1983@163.com。

土壤重金属污染(heavy metal pollution of the soil)是指由于人类活动^[1-2],土壤中的重金属元素在土壤中的含量超过背景值,过量沉积而引起的含量过高的现象^[3-4]。近年来随着工业、农业和交通运输业的迅速发展,通过各种途径进入土壤中的有害重金属(Zn, Cd, Pb, Cr, Cu 等)不断增加,对农产品造成了日益严重的污染和危害^[5-6]。目前,随着全球食品污染问题日益严重和人们环境意识的不断提高^[7],国内外越来越重视对绿色食品和无公害果品土壤环境质量的监测与评价,土壤重金属污染及其危害已成为环境科学领域研究的热点问题^[8-10]。

天水市秦州区是典型的半湿润半干旱温带气候,冬无严寒,夏无酷暑,雨量适中,光照充足,肥水中等,土层深厚。得天独厚的自然资源优势,特别适宜樱桃果品生产,是中国最佳的樱桃生产区域之一。通过多年的观察实践表明,秦州区所产樱桃风味独特、色泽艳丽,其品质要超过其他樱桃主产区,是专家公认的西北黄土高原地区适宜于露地生产优质樱桃为数不多的地区之一。但是近几年由于秦州区樱桃种植业发展过快,不少果农为了追求最大的经济效益,在缺乏科学理论指导的情况下盲目扩大种植面积、过度使用农药化肥和薄膜,导致了秦州区樱桃园土壤的重金属含量超标,使得大部分樱桃的品质下降,致使果农的经济利益受损,并且过量的重金属元素通过食物链进入人体后将健康产生极大的危害。因此,本文拟以天水市秦州区樱桃园主产地的 6 个镇为研究对象,实地采集土壤样本,通过应用地统计学方法,使用半变异函数定量研究樱桃园土壤重金属元素的空间变异特征,然后在此基础上开展污染评价,以期获取土壤重金属污染状况,从而为促进秦州区樱桃产业的可持续发展提供科学依据,也为其他果品用地保护提供借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃省天水市秦州区位于甘肃省东南部,属秦巴山区西秦岭北缘,地处东经 105°13′—106°01′,北纬 34°05′—34°40′,地跨黄河、长江两大流域,地势西高东低,海拔 1 130~2 700 m,土壤主要为冲击、洪积物形成的淤积土、草甸土,经过开垦耕种熟化而形成以黄绵土、黑垆土。秦州区是典型的半湿润半干旱温带气候,雨量适中,光照充足,肥水中等,土层深厚,冬无严寒,夏无酷暑,气候温和,四季如春,素有“陇上小江南”之称,得天独厚的自然资源优势,使得秦州区成为优质的水果和蔬菜生产基地之一。

1.2 土壤样品的采集

选择秦州区樱桃园主产区的 6 个镇(太京、玉泉、藉口、关子、牡丹、杨家寺)作为研究点,2016 年 5 月下旬对研究区进行土壤采样,根据每个镇樱桃园面积大小的不同确定采样数目,在樱桃园主产镇太京镇、玉泉镇采样点为 20 个,其余每个镇采样点为 10 个,共选样本点 80 个。每个样点取 0—20 cm 的土壤表层,同时使用 GPS 仪记录采样点地理坐标,以及各采样田块的基本信息。采集后的样品分别装于采集袋中,带回实验室,分出杂物,风干磨碎,过 100 目的筛,分别装于广口瓶中保存。

1.3 测定方法

樱桃园土壤重金属用盐酸—氢氟酸—高氯酸消解,重金属 Cr 总量按照火焰原子吸收分光光度法测定,Pb 和 Cd 总量按照石墨炉原子吸收分光光度法测定,Cu 和 Zn 总量按照火焰原子吸收分光光度法测定。

1.4 数据处理

土壤中重金属元素的测定数据,通过应用 K-S 检验(柯尔莫哥洛夫—斯米诺夫检验)发现土壤 Pb 和 Cr 元素含量是不符合正态分布的,这种不符合正态分布的情况在实际经常遇到,这种情况下用传统的半变异函数方法计算出的半变异函数值是有偏差的,这是特异值造成数据有偏的主要原因。在绘制土壤重金属的空间分布图及面积统计时,还采用了地统计学 GS⁺ 9.0, Surfer 软件。

1.5 统计方法

采用半方差函数对采集的样品进行分析,地统计学是以区域化变量理论为基础,以半方差函数为基本工具,研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性,或空间相关和依赖性的自然现象,该函数可用下式表示:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中: $r(h)$ ——半方差函数; h ——2 个样本间的分离距离; $z(x_i)$, $z(x_i+h)$ ——随机变量在空间位置 x_i 和 x_i+h 上的取值; $N(h)$ ——在分离距离为 h 时的样本对总数。由 $r(h)$ 对 h 作图可作出半方差函数图,该图由一批散点组成,最后根据离差平方和(RSS)最小原则,对试验半方差函数进行拟合,最终得到半方差函数的理论模型。

2 结果与分析

2.1 数据统计与分析

对土壤样本数据进行 K-S 检验,以算术平均值作为描述总体样本大小特征的统计。表 1 为秦州区樱桃园土壤重金属元素含量统计分析结果^[11]。

表 1 甘肃省天水市秦州区土壤重金属元素的描述性分析

重金属	土壤重金属元素含量							甘肃省背景值
	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	均值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	偏度	峰度	变异系数/%	
Pd	29.79	40.19	34.65	6.43	-0.11	-0.21	19.69	18.80
Cr	59.42	70.19	66.05	7.16	-0.47	-1.53	11.53	60.23
Cd	0.04	0.11	0.070	0.01	0.44	0.11	20.86	0.12
Zn	40.08	103.88	76.86	16.16	-0.54	-0.76	21.02	69.30
Cu	20.37	27.50	24.71	4.37	-0.48	-0.53	7.34	24.10

从表 1 可以看出,5 种重金属 Pb,Cr,Cd,Zn,Cu 的含量的最大值分别是 40.19,70.45,0.11,103.88,27.50 mg/kg ,除 Cd 以外,其他元素均超过甘肃省土壤背景值,表明樱桃园土壤中 Cu,Zn,Pb,Cr 有一定程度的积累。其中 Zn 元素的变异系数最大,离散程度较大。Cu 的变异系数最小,离散程度较低。

2.2 土壤中重金属元素的地统计学分析

将所有的样点数据经过数据检验后,采用普通

Kriging 插值方法,分别用不同类型的模型进行半方差拟和,并选定了恰当的模型后进行 Kriging 插值。从而得到研究区域的重金属元素分布图^[12-14]。

从表 2 可知,5 种土壤重金属元素可分别拟合为高斯模型、高斯模型、指数模型、高斯模型、指数模型。土壤理化性质的块金值均比较大,说明土壤重金属元素的变化主要受结构性随机因素引起的空间异质性的影响。

表 2 甘肃省天水市秦州区重金属分布的半方差函数模型

重金属	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程/km	块金值/基台值 $C/(C_0+C)$	决定系数 r^2	残差
Pb	Gaussian	0.100000	47.500000	0.112 583	0.998	0.572	3 622
Cr	Gaussian	0.100000	53.920000	0.097 0	0.998	0.718	2 068
Cd	Exponential	0.000118	0.000237	0.177 000	0.502	0.402	1.144E-08
Zn	Gaussian	0.100000	305.500000	0.093 5	1.000	0.549	110 614
Cu	Exponential	0.580000	4.312000	0.369 000	0.865	0.664	6.320

在没有人类活动的纯自然条件下,土壤重金属含量一般具有很强的空间相关性,其含量受气候、母质和地形等结构性因素的影响;而人类干扰如工农业生产则增加了随机因素,使得土壤重金属的空间相关性减弱。块金值与基台值之比称为基底效应,是表示样本间的空间变异程度的重要数据。该值越大,样本间的变异受随机因素影响越大。如果基底效应小于 25%,表示变量的空间变异以结构性变异为主,具有较高的空间相关性;介于 25%~75%为中等程度空间相关;大于 75%时以随机因素为主,为空间弱相关^[15-16]。由表 2 可知,Cu,Zn,Cd,Pb,Cr 属于以随机因素为主,为空间弱相关,重金属含量受人类活动影响相对较大。

2.3 土壤中重金属的空间分布格局

利用 ArcGIS 地统计模块进行 Kriging 插值计算后,土壤重金属含量的插值结果如图 1—5 所示。

从图 1 可以看出:Pb 污染程度由东北向西南递减;6 个镇内部污染程度差别较大。东北部的玉泉镇大部分地区 and 太京镇北部地区污染最为严重,Pb 元素含量 38.11~40.19 mg/kg ,而西部杨家寺镇的中

部地区、中部的牡丹镇的部分地区污染最轻,Pb 含量 29.79~32.28 mg/kg 。

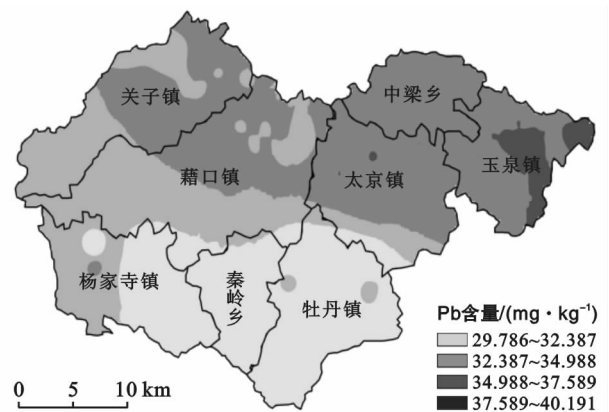


图 1 甘肃省天水市秦州区 Pb 元素空间分布

从图 2 可以看出,Cr 污染程度大致由东向西递减;玉泉镇北部部分地区、太京镇北部部分地区以及藉口镇东部部分地区污染最为严重,Cr 含量 67.49~70.19 mg/kg 。关子镇的部分地区和中部的牡丹镇的一小部分地区污染最轻,Cr 含量 59.42~62.15 mg/kg 。

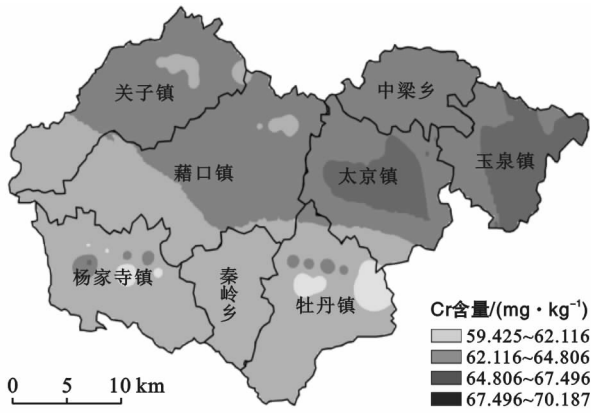


图2 甘肃省秦州区 Cr 元素空间分布

从图3可以看出,各地区Cd总体污染程度相当。玉泉镇北部一小部分地区、太京镇北部的一小部分地区、藉口镇中部的极小部分地区以及牡丹镇的极小部分地区污染最为严重,Cd含量 $0.09\sim 0.11\text{ mg/kg}$ 。玉泉镇北部的极小部分地区污染最轻,Cd含量 $0.04\sim 0.05\text{ mg/kg}$ 。

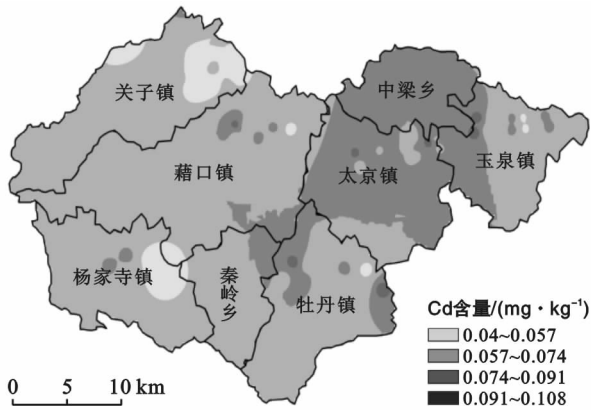


图3 甘肃省秦州区 Cd 元素空间分布

从图4可以看出:Zn污染程度由东北向西南递减;玉泉镇北部的一小部分地区、太京镇北部的一小部分地区、藉口镇的极小部分地区污染最为严重,Zn含量 $96.99\sim 103.88\text{ mg/kg}$ 。中部牡丹镇的一小部分地区污染最轻,Zn含量 $40.08\sim 46.98\text{ mg/kg}$ 。

从图5可以看出:Cu污染程度总体由东北向西南递减,其中玉泉镇北部部分地区、太京镇北部部分地区、藉口镇的极小部分地区污染最为严重,Cu含量 $26.88\sim 27.50\text{ mg/kg}$ 。牡丹镇和关子镇的一小部分地区污染最轻,Cu含量在 $20.37\sim 21.19\text{ mg/kg}$,东北部污染较西南部污染严重。

从重金属元素空间分布格局来看,东北部土壤重金属污染较西南部污染严重,主要是因为东北部樱桃园的种植面积比西南部的种植面积大,农药和化肥的使用率高、使用量大,并且这些地区靠近河流,污染的

水体通过灌溉进入到樱桃园土壤中,造成土壤重金属的大量积累,对土壤产生了污染。

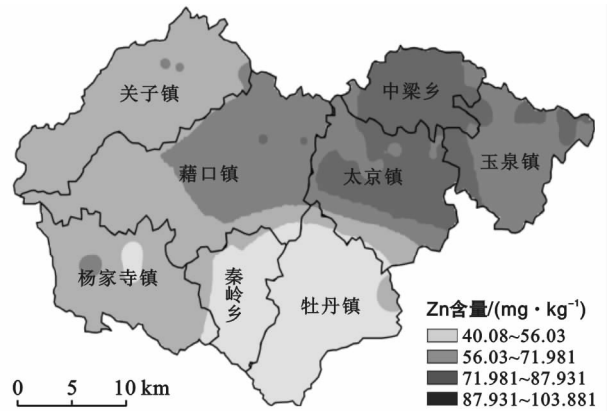


图4 甘肃省秦州区 Zn 元素空间分布

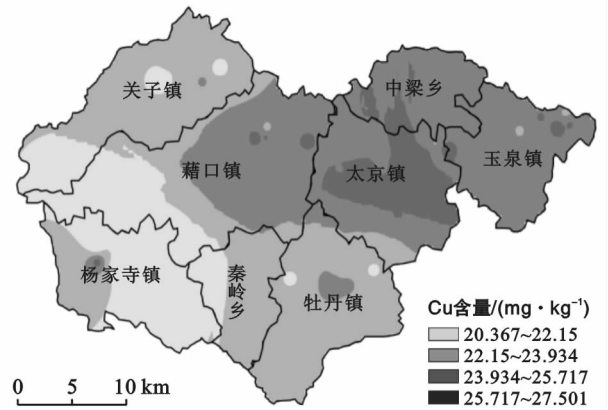


图5 甘肃省秦州区 Cu 元素空间分布

3 樱桃园土壤重金属的尼梅罗指数和污染负荷指数法评价

3.1 尼梅罗指数法

尼梅罗指数法能够较为全面地评价土壤重金属污染水平,可以综合反映重金属对区域的污染程度,不仅反映单个采样点的重金属污染程度,而且可以对某一区域的土壤污染状况进行综合评价^[17]。它是一种通过单因子污染指数得出综合污染指数的方法,能够较全面地评判其重金属的污染程度,是人们在评价土壤重金属污染时运用最为广泛的综合指数法。其计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i ——单向污染指数; C_i ——污染物实测值(mg/kg); S_i ——根据需要选取的评价标准(mg/kg)。

污染土壤的重金属元素往往不只一种,所以还需要考虑不同重金属元素对于土壤的污染程度,可以用尼罗梅污染指数来衡量,其数学表达式为:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{p_i^2 + p_{i\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中： P_i ——单向污染指数的平均值； $P_{i\text{max}}$ ——最大单项污染指数。

计算土壤重金属按照尼梅罗指数评价标准划分污染等级。清洁无污染($P \leq 0.7$)；无污染($P \leq 1$)；尚清洁(警界线)($0.7 < P \leq 1$)；污染($1 < P$)；轻污染($1 < P \leq 2$)；中污染($2 < P \leq 3$)；重污染($P > 3$)。

3.2 污染负荷指数法

污染负荷指数是由 Tomlinson 于 1980 年提出的，由评价区域所包含的多种重金属成分共同构成。该方法不仅可以反映单个采样点的重金属污染程度，而且可以对某一区域的土壤污染状况进行评价。其参照指标由评价区域的多种重金属共同构成，因此能反映各个重金属对区域污染的贡献程度，还可进一步反映各个重金属污染的时空变化特征^[18-19]，其计算公式为：

$$p = \sqrt[m]{C_{f1} C_{f2} C_{f3} \cdots C_{fm}}, C_{fi} = C_i / C_{oi} \quad (3)$$

式中： C_{fi} ——重金属 i 的污染系数； C_i ——重金属 i 的测定值； C_{oi} ——重金属 i 的参比值，采用甘肃省土壤背景值； m ——参与评价的重金属种类数。

某一区域的污染负荷指数计算公式：

$$p_a = \sqrt[n]{p_1 p_2 p_3 \cdots p_n} \quad (4)$$

式中： p_a ——某污染区域的污染负荷指数； n ——该污染区域所含采样点数。

3.3 樱桃园土壤重金属的尼梅罗指数和污染负荷指数法的评价结果

3.3.1 尼梅罗综合污染指数法评价结果 通过应用尼梅罗综合污染指数法计算，秦州区樱桃园土壤重金属得到以下结果(表 3)。

通过表 3 可以发现秦州区樱桃园土壤重金属测量值与甘肃省土壤背景值进行对比后，可以得出以下结论：

表 4 甘肃省天水市秦州区污染负荷指数(P_{Li})评价结果

项目	太京镇	藉口镇	玉泉镇	关子镇	牡丹镇	杨家寺
污染负荷指数(P_{Li})	1.15	1.08	1.11	0.93	0.84	0.84
污染等级	中等污染	中等污染	中等污染	无污染	无污染	无污染

4 结论

(1) 樱桃园土壤重金属污染受到人为因素的影响较大，重金属元素呈现不同程度的富集，且在空间上呈现出一定的分布规律。总体来讲，重金属元素污染程度为： $Pb > Zn > Cr > Cu > Cd$ ；从各乡镇污染程度来看：太京镇 $>$ 玉泉镇 $>$ 藉口镇 $>$ 关子镇 $>$ 牡丹镇 $>$ 杨家寺。

表 3 尼梅罗综合污染指数(P_i)评价结果

地点	Pb	Cr	Cd	Zn	Cu	$P_{\text{综}}$
太京镇	1.93	1.13	0.68	1.31	1.07	1.30
藉口镇	1.85	1.09	0.60	1.20	1.05	1.23
玉泉镇	1.98	1.13	0.61	1.25	1.04	1.30
关子镇	1.87	0.87	0.49	0.97	0.94	1.08
牡丹镇	1.14	0.88	0.62	0.72	0.97	0.93
杨家寺镇	1.15	0.91	0.56	0.87	0.87	0.92

(1) 除 Cr 外，Pb, Cr, Zn 和 Cu 的平均含量均高于背景值，分别达到背景值的 1.74, 1.03, 1.10 和 1.03 倍。

(2) Pb 的单项污染指数 P_i 均为 $1 < P \leq 2$ ，属轻污染水平；Cr, Zn, Cu 元素在太京镇、玉泉镇、藉口镇的单项污染指数 P_i 为 $1 < P \leq 2$ ，为轻污染；而在关子镇、牡丹镇、杨家寺镇 Cr, Zn, Cu 等 3 种元素 P_i 值为 $0.7 < P \leq 1$ ，属尚清洁；Cd 在研究区范围内单项污染指数值均为 $P \leq 0.7$ ，属于清洁无污染水平。

(3) Pb 元素在秦州区樱桃园土壤中污染最为严重，而 Cd 清洁无污染。

(4) 太京镇、藉口镇、玉泉镇、关子镇综合污染指数均为 $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ ，为轻污染水平；牡丹镇、杨家寺综合污染指数是 $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ ，为尚清洁。

3.3.2 污染负荷指数法评价结果 通过应用污染负荷指数法计算，秦州区樱桃园土壤重金属得到以下结果(表 4)。

(1) 各乡镇土壤重金属污染程度由重到轻依次为：太京镇 $>$ 玉泉镇 $>$ 藉口镇 $>$ 关子镇 $>$ 牡丹镇 $>$ 杨家寺。太京镇、藉口镇、玉泉镇土壤重金属的污染负荷指数(P_{Li})值为 $1 \leq P < 2$ ，为中等污染水平；关子镇、牡丹镇、杨家寺污染 P_{Li} 值为 $P < 1$ ，属无污染。

(2) 最小值 $P_{Li\text{min}} = 0.84$ 出现在牡丹镇和杨家寺；最大值 $P_{Li\text{max}} = 1.15$ 出现在太京镇，两者相差 1.37 倍。

(2) 从尼梅罗综合污染评价结果来看：樱桃园土壤重金属污染程度突出元素为 Pb，而 Zn, Cr, Cu 属轻度污染水平，Cd 污染最轻。5 种重金属元素之间含量差别较明显，其中 Pb, Cd 的含量差别最大；单就 Pb 元素而言，其影响范围广泛分布在樱桃园种植的全区，而 Cr, Zn, Cu 重金属元素重点污染在太京镇、玉泉镇，藉口镇。

(3) 从污染负荷指数法评价结果来看：太京镇土

壤重金属污染负荷指数高达 1.15,为中等污染水平;玉泉镇、藉口镇、关子镇次之,同为中等污染水平;牡丹镇、杨家寺未受到污染,且污染主要集中在太京镇、玉泉镇、藉口镇,是因为这些区域靠近城市中心,受交通、人为因素影响密切,污染重,而关子镇、牡丹镇、杨家寺离城市中心较远,受影响小,污染轻。

(4) 尼梅罗指数法和污染负荷指数法得出结论基本一致,但在部分结论上稍有差异,2种评价结果均显示秦州区太京镇、玉泉镇污染严重,这是由于这2个镇种植樱桃园历史悠久,农业基础设施完善,适宜樱桃园生产,果农为提高樱桃园产量大量使用化肥农药,导致土壤中重金属元素不断富集。比较2种评价结果可得,关子镇在尼梅罗指数法评价中属于轻污染水平,而在污染负荷指数评价中属于无污染,这是由于2种评价方法的侧重点不同,评价分级不同,进而反映出评价结果的差异。

(5) 通过应用GIS开发技术得到的空间分布图可知,秦州区樱桃园土壤重金属污染程度都较轻。东北部樱桃园土壤重金属污染较西南部污染严重,主要是因为东北部樱桃园的种植面积比西南部的种植面积大,农药和化肥的使用率高、使用量大,并且这些地区靠近河流,污染的水体通过灌溉进入到樱桃园土壤中,造成土壤重金属的大量积累,对土壤产生了严重的污染。

(6) 基于GIS的樱桃园土壤重金属元素空间的分布,在采样布设合理的前提下,评价结果可信。

[参 考 文 献]

- [1] 李冰茹,王纪华,马智宏,等. GIS土壤重金属污染评价中的应用[J]. 测绘科学,2015,40(2):119-123.
- [2] 王幼奇,白一茹,王建宇. 基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学,2016,37(2):710-716.
- [3] 罗娇赢. 基于GIS与地统计学的哈尔滨市城郊菜地土壤重金属元素空间变异分析[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报,2011(3):35-37.
- [4] 蔡小冬,孙成胜,蔡立群. 基于改进AHP与GIS的白银区耕层土壤重金属污染评价[J]. 中国农学通报,2014,30(32):194-200.
- [5] 郝丽虹,张冬明,吴鹏飞,等. 海南岛农用地土壤重金属含量的空间分布[J]. 中国生态农业学报,2009,17(2):230-234.
- [6] 刘庆,杜志勇,史衍玺,等. 基于GIS的山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(10):258-263.
- [7] 杨东,刘强. 基于GIS和地统计学的张掖市甘州区土壤全氮、有机质的空间变异特征分析[J]. 土壤通报,2011,42(3):593-597.
- [8] 陈峰,尹春芹,蒋新,等. 基于GIS的南京市典型蔬菜基地土壤重金属污染现状与评价[J]. 中国环境监测,2008,24(2):40-44.
- [9] 李健,郑春江. 环境背景数据手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1989.
- [10] 罗永清,陈银萍,陶玲,等. 兰州市农田土壤重金属污染评价与研究[J]. 甘肃农业大学学报,2011,46(1):98-104.
- [11] 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.
- [12] 尤冬梅,王纪华,马智宏,等. 北京郊区小尺度农产品产地土壤重金属污染性评价[J]. 上海农业学报,2011,27(3):89-93.
- [13] 陈学民,朱阳春,董会平,等. 天水苹果园土壤重金属污染调查与评价[J]. 兰州交通大学学报,2011,30(3):132-135.
- [14] 陆安详,王纪华,潘渝春,等. 小尺度农田土壤重金属的统计分析与空间分布研究[J]. 环境科学,2009,28(7):1578-1583.
- [15] 戴宇,杨重法,郑袁明. 土壤—植物系统中的铬的环境行为及其毒性评价[J]. 环境科学,2009,30(11):3432-3440.
- [16] 徐宁,俞燕芳,毛平生,等. 桑树修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 农学学报,2015,5(1):37-40.
- [17] 朱爱萍,陈建耀,江涛,等. 北江流域横石河—翁江沿岸土壤重金属污染特征分析[J]. 中国环境科学,2015,35(2):506-515.
- [18] 刘勇,岳玲玲,李晋昌,等. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报,2011,31(6):1285-1293.
- [19] 钟晓兰,周生路,李江涛,等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征:以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报,2007,44(1):33-40.