

基于污染损失率法的土壤重金属污染评价及经济损失估算

刘 静^{1,2}, 黄 标¹, 孙维侠¹, 王志刚³, 胡文友¹

(1.中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3.长江科学院水土保持研究所, 武汉 430010)

摘 要:半定量或定量估算土壤污染造成的经济损失,对开展土壤环境质量评价工作具有重要意义。以长三角典型区张家港市蔬菜地为例,在分析蔬菜地土壤中 Cd、As、Cr 和 Cu 4 种重金属含量及其变化趋势的基础上,以该地区土壤重金属的基线值为基准,运用污染损失率法,初步估算了重金属污染损失率(重金属污染对土壤的损害程度,%)和土壤进行蔬菜种植利用时的重金属污染经济损失量(万元·a⁻¹),并预测了未来 10 a 和 20 a 重金属污染经济损失量。结果表明,张家港市蔬菜地各单项重金属污染损失率在 1.00%~1.67%之间,综合重金属污染损失率为 5.02%,土壤重金属污染总体较轻,污染等级整体为 II 级,属于尚清洁水平。但如果按照目前重金属积累的趋势发展下去,随着蔬菜种植年限的增加和种植面积的扩大,综合重金属污染损失率将呈不断增加的趋势,导致重金属污染经济损失量不断增加,2009 年重金属污染经济损失量约为 1 998 万元·a⁻¹,2029 年将增加到 5 532 万元·a⁻¹。因此,需要对蔬菜生产系统中重金属的来源进行有效控制,以降低土壤重金属的积累,减少由此带来的经济损失。

关键词:重金属;污染评价;重金属污染损失率;重金属污染经济损失量;预测

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)06-1087-07

Pollution Assessment and Economic Loss Estimation of Soil Heavy Metals Based on Pollution Loss Rate Model

LIU Jing^{1,2}, HUANG Biao¹, SUN Wei-xia¹, WANG Zhi-gang³, HU Wen-you¹

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Soil and Water Conservation Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Semi-quantitatively or quantitatively estimating pollution economic loss has an important significance for assessing soil environmental quality. Taking the vegetable fields in Zhangjiagang City as an example and determining the concentrations and time trends of Cd, As, Cr and Cu in soils, this paper (i) roughly estimated the heavy metal pollution loss rates, the soil damaging degree caused by heavy metal pollution (%), based on the soil geochemical baselines of this city and pollution loss rate model and the heavy metal pollution economic loss (million Yuan·a⁻¹) when soils were utilized to cultivate vegetables, and (ii) predicted heavy metal pollution economic loss in next 10 a and 20 a. The results showed that the individual heavy metal pollution loss rates were ranged from 1.00% to 1.67% with 5.02% of the integrated ones, indicating that the soil heavy metal pollution in the vegetable fields was weak and clean level(II level) as a whole. However, if the present accumulation trends of heavy metals continued, the integrated heavy metal pollution loss rates and pollution economic loss would increase with the expansion of vegetable cultivation and the increase of planting years. The integrated heavy metal pollution economic loss would increase from 19.98 million Yuan·a⁻¹ in 2009 to 55.32 million Yuan·a⁻¹ in 2029. Thus, the effective measures should be taken to control the sources of heavy metals in order to reduce heavy metals accumulation in vegetable production systems, and in order to decrease the heavy metal pollution economic loss in vegetable fields.

Keywords: heavy metals; pollution assessment; heavy metal pollution loss rate; heavy metal pollution economic loss; prediction

收稿日期:2010-12-22

基金项目:国家自然科学基金项目(40773075);环保公益性行业科研专项(201109018)

作者简介:刘 静(1986—),女,河北衡水人,硕士研究生,主要从事环境质量和食品安全方面的研究。E-mail:2006liujing2008@163.com

* 通讯作者:黄 标 E-mail:bhuang@issas.ac.cn

环境污染导致环境质量下降和环境资源价值降低,也必然削弱环境系统本身的生态服务功能^[1]。随着经济的高速发展,我国环境污染特别是土壤重金属污染日趋严重^[2-4],土壤的价值和功能出现不同程度降低。因此,恰当地对土壤环境质量进行评价是土壤环境保护和实施土壤环境综合整治的基础^[5]。目前,土壤环境质量评价的方法很多,如指数法^[6]、富集系数法^[7]、模糊数学法^[8]、神经网络法^[9]等,但这些方法都未能对土壤资源的经济价值作出评价。而污染损失率法利用詹姆斯污染-损害曲线,根据一定的环境载体中污染物基准值,半定量或定量地估算环境污染造成的经济损失,最终根据综合污染损失率划分等级。很多学者应用该方法对水体和大气污染造成的经济损失进行了估算^[10-12]。近几年,有学者以中国土壤环境重金属质量标准(GB15618—1995)中一级标准(代表自然背景值)的一半为基准,对土壤重金属污染经济损失量进行估算^[5,13],但其应用仍存在一定问题,一方面这些基准的选择不一定反映当地的实际情况,“一半”也缺乏理论根据,另一方面估算时未考虑各重金属权重的大小,这些问题均有待改进。本文以江苏省张家港市蔬菜地为例,运用污染损失率法,初步估算了重金属污染损失率(重金属污染对土壤的损害程度,%)和土壤进行蔬菜种植利用时的重金属污染经济损失量(万元·a⁻¹),并预测了未来 10 a 和 20 a 重金属污染经济损失量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏省张家港市地处长江三角洲冲积平原,地势平坦,全市总面积 999 km²,其中陆地面积 799 km²,人口 89 万。气候上,属北亚热带季风气候,年平均气温 15.2℃,年均降雨量 1 039.3 mm。土壤类型主要有潮湿锥形土和水耕人为土两个亚纲^[14]。自 20 世纪 90 年代初以来,张家港市农业产业结构出现了一个新的动向,即大规模设施种植迅速增加,主要是大量外地务工人员在该市承包土地种植蔬菜,这一变化明显加大了肥料和农用化学品的投入量,增加了土地利用强度^[15]。

1.2 土壤样品的采集与分析

考虑到张家港市蔬菜地的面积大小、区域位置、土壤类型等特点,全市共确定 99 个采样点,涉及张家港市的 8 个乡镇和 1 个农场,每个采样点采集 6~8 处耕层土壤(0~20 cm),混合均匀后缩分至 1~2 kg 装袋。带回实验室的土壤样品经风干后,在室内剔除石

块、植物根茎等杂质,用玛瑙研钵研磨至 0.149 mm,供分析之用。As 采用王水消化-原子荧光光谱法测定;Cd、Cr、Cu 等重金属用 HCl-HF-HNO₃-HClO₄ 四酸消解,其中 Cd 用石墨炉-原子吸收法(GF-AAS)测定,Cr 和 Cu 用电感耦合等离子体-原子发射光谱法(ICP-AES)测定^[16]。为了确保分析结果的可靠性和准确性,每批样品(约 40 个样)、每个项目均有两个标准样、两个平行全程空白和 10%~20%的平行样测定。

1.3 环境污染经济损失模型构建

詹姆斯^[17]研究发现,污染物浓度与污染造成的损害及其经济损失呈“S”型关系,即污染物在低剂量时对环境造成的经济损失表现不明显;在污染物达到临界剂量之后,随着污染剂量的继续增加,对环境造成的经济损失急剧增加;但当污染剂量增加到一定程度后,对环境造成的经济损失又呈缓慢增长,达到污染损失的极限,因而构建了环境污染经济损失模型^[18]。

环境资源的经济损失是污染物造成的经济损失的总和,而造成环境资源经济损失的污染物往往有很多种,因此在估算环境资源经济损失时,通常要先计算单一污染物造成的经济损失,然后再计算多个污染物造成的综合损失。本文尝试借助这一污染经济损失模型估算土壤重金属污染造成的土壤资源经济损失量。

1.3.1 土壤重金属污染经济损失模型

设土壤中共有 n 种重金属,第 j 种重金属对土壤造成的重金属污染损失率为 R_j 。为了求该重金属污染损失率 R_j ,需要建立重金属浓度与土壤环境经济损失间的微分方程^[18]:

$$\frac{dS}{dc_j} = \beta_j \frac{S}{K} (K - S) \quad (1)$$

式中: c_j 为土壤中重金属 j 的质量浓度,mg·kg⁻¹; S 为当重金属 j 的质量浓度为 c_j 时,对土壤所造成的重金属污染经济损失量,万元; K 为土壤利用后实现的经济价值,万元; β_j 为土壤中重金属 j 的比例系数。对式(1)求解得:

$$S(c) = \frac{K}{1 + \alpha_j \exp(-\beta_j c_j)} \quad (2)$$

式(2)符合 Logistic 方程,这里将其称为重金属 j 的污染经济损失模型, α_j 为求解过程中所得常数项,为简化模型,令:

$$R_j = \frac{1}{1 + \alpha_j \exp(-\beta_j c_j)} \quad (3)$$

则 $S = KR_j$, R_j 即为重金属 j 对土壤环境的损害

率,称为单项重金属污染损失率。

1.3.2 参数确定

在式(2)和(3)中, α_j, β_j 均为式(1)求解过程中所得常数项($\alpha_j > 0$),它们与重金属的污染特性有关,一般需要通过重金属毒理实验或对受污染环境资源的实际调研确定,重金属对土壤的损害体现到对应的植物和以植物为食的动物的影响上,这种方法较为合理,但牵涉的问题太复杂,目前尚无整套确定的资料。余立斌等^[5]和徐欣等^[13]均以中国土壤环境重金属质量标准(GB 15618—1995)中一级标准(代表自然背景值)的一半作为确定参数 α 和 β 的基准^[19],但每个研究区域内土壤类型、自然条件存在很大差异,使用中国土壤环境重金属质量标准的一级限值作为背景值,很难真实地反映出当地的实际情况,取背景值的“一半”更是缺乏理论根据。因此,本研究采用王志刚^[20]运用稳健回归模型在张家港地区确定的基线值为基准,其中锥形土($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$):Cd=0.220,As=8.45,Cr=52.82,Cu=31.09;人为土($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$):Cd=0.105,As=7.26,Cr=55.91,Cu=27.25,以此来确定参数 α 和 β 。具体做法是^[21]:设环境中第 j 种重金属的本底浓度为 c_{qj} ,相应的单项重金属污染损失率为 R_{qj} ,引起严重污染时的临界浓度为 c_{ij} ,相应的单项重金属污染损失率为 R_{ij} ,代入式(3)得二元一次方程组:

$$\begin{cases} R_{qj} = \frac{1}{1 + \alpha_j \exp(-\beta_j c_{qj})} \\ R_{ij} = \frac{1}{1 + \alpha_j \exp(-\beta_j c_{ij})} \end{cases} \quad (4)$$

为了表示方便引入 f_j 如下:

$$f_j = \ln \frac{R_{ij}(1 - R_{qj})}{R_{qj}(1 - R_{ij})} \quad (5)$$

则根据式(4)和式(5)可求出:

$$\begin{aligned} \alpha_j &= [(1 - R_{qj})/R_{qj}] \exp[f_j c_{qj}/(c_{ij} - c_{qj})] \\ \text{或 } \alpha_j &= [(1 - R_{ij})/R_{ij}] \exp[f_j c_{ij}/(c_{ij} - c_{qj})] \\ \beta_j &= f_j / (c_{ij} - c_{qj}) \end{aligned} \quad (6)$$

1.3.3 土壤重金属污染程度的分级标准

运用污染损失率法对土壤重金属进行评价和重

金属污染经济损失量估算时,需要知道不同污染级别重金属的确切含量。因此,在划分污染等级时,参照了王雅谷的推荐值^[22](表1)。

1.3.4 多种重金属对土壤污染损失函数

当有多种重金属作用于土壤环境资源时,多种重金属的共同作用并不是各重金属单独作用效果的简单相加,土壤重金属污染经济损失模型将多种重金属视为一个有机联系的整体,根据集合论及概率论来推导综合重金属污染损失率。如土壤中有两种重金属A和B,相应的单项重金属污染损失率分别为 R_A 和 R_B ,则A与B和的概率等于这两事件的概率的和减去这两事件概率的积,即: $R_{AB} = R_A + R_B - R_A \cdot R_B = 1 - (1 - R_A) \cdot (1 - R_B)$,以此递推到 n 种重金属的综合重金属污染损失率 R 为:

$$R = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - R_j) \quad (7)$$

但各种重金属所占的权重不同,对综合重金属污染损失率的贡献率也有所差异。因此,我们对式(7)进行了改进,即考虑到了各种重金属所占权重的不同,其中各重金属的权重利用多元统计分析中的主成分分析法确定^[23],具体步骤为:首先求出各重金属因子主成分的特征值和贡献率,前2个主因子的贡献率(70.82%)已满足信息提取的要求;然后计算相应的载荷矩阵,并求出各重金属的公因子方差,方差的大小表示了对综合变异的贡献率,最终由方差值计算各重金属的权重,

$$R = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - R_j \omega_j) \quad (8)$$

式中: ω_j 为第 j 种重金属所占的权重; n 为土壤中重金属的种类。

单一重金属 j 对土壤造成的重金属污染经济损失量为:

$$S = K R_j \quad (9)$$

n 种重金属对土壤造成的重金属污染经济损失量为:

表1 土壤重金属污染等级标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Standards for pollution assessment of soil heavy metals($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

重金属	I级(清洁)	II级(尚清洁)	III级(轻污染)	IV级(中污染)	V级(重污染)
Cd	0.12	0.25	0.6	1.4	2
As	10	17	30	50	70
Cr	74.88	99.54	150	350	500
Cu	28.37	40.63	120	280	400

$$S=KR$$
 (10)

其中 R 用式(8)表示,且 $n>1$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属的统计性描述

对张家港市蔬菜地土壤中 4 种重金属的含量进行了统计分析。从表 2 可以看出,4 种重金属的含量范围分别为: Cd 0.058~0.358 mg·kg⁻¹; As 4.90~14.69 mg·kg⁻¹; Cr 44.20~122.30 mg·kg⁻¹; Cu 14.10~82.90 mg·kg⁻¹。变异系数从大到小的顺序是 Cd>Cu>As>Cr,均超过了 20%,属于中等变异。其中,Cu 的偏度和峰度值较大,说明 Cu 元素在土壤中存在异常值,而其余重金属元素的含量基本接近于正态分布。已有研究表明^[24],张家港市蔬菜地土壤中重金属的来源与蔬菜的种植年限有关,即随着蔬菜种植年限的增加,土壤中重金属含量呈增加的趋势。

2.2 土壤重金属污染经济损失量估算

以张家港地区土壤基线值为本底浓度,假定第 j 种重金属在本底浓度状态和重污染临界状态对土壤的单项重金属污染损失率分别为 1%和 99%,根据式(6)计算参数 α 和 β 的值(表 3),根据表 1 土壤重金属污染程度的分级标准和表3 中参数 α 和 β 的值,分别计算重金属不同污染级别的综合重金属污染损失率范围,作为土壤污染综合评级等级划分的参考依据^[9],详见表 4。

分别根据式(3)和式(8)计算了各单项重金属污染损失率和综合重金属污染损失率。然后,根据张家港市常年蔬菜种植面积(约 0.88 万 hm²)以及蔬菜地的纯收益情况(约 45 000 元·hm⁻²·a⁻¹)^[25],计算出张家港市蔬菜地的总体经济价值(约 39 780 万元·a⁻¹);最后用式(9)、(10)分别计算出张家港市蔬菜地土壤单项和综合重金属污染经济损失量,结果见表 5。

从表 5 可以看出,各单项重金属污染损失率的大小依次为 Cr>Cu>As>Cd,对应的权重分别为 ω (Cd)=0.32、 ω (As)=0.23、 ω (Cr)=0.24、 ω (Cu)=0.21,单项重金属污染损失率范围在 1.00%~1.67%之间,总体差异

表 3 土壤重金属污染经济损失模型中参数 α,β 的值

Table 3 The values of parameter α and β in pollution economic loss model of soil heavy metals

参数	Cd	As	Cr	Cu
α	275	335	298	210
β	5.09	0.15	0.02	0.02

表 4 土壤重金属污染损失率综合评价等级的划分结果

Table 4 Assessment standard of integrated pollution loss rates of soil heavy metals

综合重金属污染损失率/%	等级
<4.489	I 级(清洁)
4.489~8.610	II 级(尚清洁)
8.610~35.868	III 级(轻污染)
35.868~99.770	IV 级(中污染)
99.770~99.999	V 级(重污染)

表 5 张家港市蔬菜地土壤中重金属污染损失率和重金属污染经济损失量

Table 5 Pollution loss rates and pollution economic loss of heavy metals in vegetable fields of Zhangjiagang City

	Cd	As	Cr	Cu	综合
重金属污染损失率/%	1.00	1.23	1.67	1.34	5.02
权重/ ω	0.32	0.23	0.24	0.21	
重金属污染经济损失量/万元·a ⁻¹	397.80	488.10	664.33	533.05	1 997.99

不大。综合重金属污染损失率为 5.02%,在污染等级划分中属于 II 级,尚清洁水平。由于张家港市的蔬菜种植面积较大,并且蔬菜特别是设施蔬菜的收益高,即使存在轻微污染,其重金属污染经济损失量也较大,约为 1 998 万元·a⁻¹。

2.3 土壤重金属污染损失预测

近年来张家港市蔬菜种植特别是设施蔬菜种植发展较快,伴随着肥料和农用化学品投入量的增加、土壤利用强度的加大,在近 5 a 土壤中重金属有明显的累积,由此造成的潜在重金属污染经济损失量如何是大家普遍关注的热点。刘静等^[26]对张家港市蔬菜地土壤中重金属含量的研究表明,随着蔬菜种植年限的

表 2 张家港市蔬菜地土壤中重金属含量的描述性统计特征($n=99$)

Table 2 Descriptive statistics of heavy metal contents in vegetable soils of Zhangjiagang City($n=99$)

项目	平均值/mg·kg ⁻¹	最小值/mg·kg ⁻¹	最大值/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数/%	偏度系数	峰度系数
Cd	0.183	0.058	0.358	0.069	37.70	0.009	-0.625
As	8.73	4.90	14.69	2.39	27.38	0.561	-0.332
Cr	76.32	44.20	122.30	15.59	20.43	0.231	0.315
Cu	39.78	14.10	82.90	13.57	34.11	1.093	1.465

增加,As 含量变化不明显(本文视为不变),Cd、Cr 和 Cu 3 种重金属元素的年增加量分别约为 0.008、3.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 2.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。根据目前蔬菜种植面积扩大的速度(约 0.135 $\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$) 和重金属的年增加量,预测了未来 10 a(2019 年)和 20 a(2029 年)蔬菜地土壤中 Cd、Cr、Cu 3 种重金属元素的含量,并以此为依据,分别计算了 2019 年和 2029 年的单项重金属污染损失率、综合重金属污染损失率及重金属污染经济损失量,结果见表 6。

从表 6 可以看出,随着蔬菜种植年限的增加及土壤中重金属的积累,Cd、Cr 和 Cu 的单项重金属污染损失率均不断增加。对照表 4 土壤重金属污染损失率综合评价等级的划分结果可知,2009 年和 2019 年的综合重金属污染损失率分别为 5.02% 和 8.17%,整体为 II 级,属于尚清洁水平;到 2029 年综合重金属污染损失率增加到 13.91%,整体为 III 级,属于轻污染水平。由此可见,随着蔬菜种植年限的增加,张家港市蔬菜地土壤的综合重金属污染损失率有增加的趋势。为了计算重金属污染经济损失量,必须要知道未来土壤利用后实现的经济价值 K ,然而,影响蔬菜经济价值的因素很多(经济、社会、供求关系等因素),预测起来难度很大,且本文主要是研究蔬菜种植面积和重金属含量增加对土壤经济损失量的影响。所以,本研究依然以该市统计年鉴中 2009 年的蔬菜生产纯收益数据(45 000 $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 为基准计算未来蔬菜生产实现的经济价值,并估算了 2019 年和 2029 年的重金属污染经济损失量,以便了解在其他条件相同的情况下,蔬菜生产过程中土壤重金属污染经济损失量的发展趋势。从结果可以看出,随着蔬菜种植年限的增加和种植面积的扩大,重金属污染经济损失量不断增加,2009 年蔬菜地土壤的重金属污染经济损失量为 1 997.99 万元 $\cdot\text{a}^{-1}$;到 2029 年为 5 531.65 万元 $\cdot\text{a}^{-1}$,增加了将近 2 倍。

3 讨论

污染经济损失模型是一种能反映污染损失变化

的机理性模型,用它进行环境质量评价结果的准确性和可靠性依赖于本底浓度的可靠程度。分别以中国土壤重金属环境质量标准(GB 15618—1995)一级标准的一半和王志刚^[23]在张家港地区确定的基线值为本底浓度计算重金属污染损失率(表 7)。可以看出,当选择不同本底浓度时,评价结果有明显的不同。以全国土壤环境背景值的一半为本底浓度进行评价,单项重金属污染损失率范围在 1.47%~2.33%之间,综合重金属污染损失率达到了 7.64%;而以当地土壤基线值计算,单项重金属污染损失率在 1.00%~1.67%之间,综合重金属污染损失率为 5.02%,可见,前者明显高估了由重金属污染所造成的经济损失。本文采用的张家港地区基线值^[23]是通过土壤底层和表层元素含量间的稳健回归关系确定的,比较充分地反映出张家港地区土壤中重金属元素的自然背景,由此获得的单项和综合重金属污染损失率可以较真实地反映出当地重金属污染的程度。而以背景值的一半为本底浓度确定的综合重金属污染损失率并不能真实地反映当地的情况,且一半的确定也缺乏理论根据。

表 7 不同本底浓度下的重金属污染损失率

Table 7 The pollution loss rates based on different background

本底浓度	concentrations of heavy metals				综合重金属 污染损失率/%
	单项重金属污染损失率/%				
	Cd	As	Cr	Cu	
全国土壤环境背景值/2	1.47	2.06	2.33	2.00	7.64
基线值	1.00	1.23	1.67	1.34	5.02

一系列研究表明^[27-28],蔬菜种植过程中施用大量有机肥(如鸡粪、猪粪等)是蔬菜生产过程中的重要管理措施,但这些有机肥中往往含有一定量的 Cu、Zn 及伴生的 Cd、As 等元素,长期施用可造成土壤中重金属的累积,在本文的个别采样点可能还受工业活动影响导致土壤中 Cu 含量出现异常值。为了减少土壤中重金属的积累,降低由此造成的经济损失,有效地控制蔬菜生产过程中重金属的来源是一个必然措施,在工业废弃物排放和有机肥施用前加强重金属含量

表 6 张家港市蔬菜地未来 10 a 和 20 a 重金属污染损失率和重金属污染经济损失量预测

Table 6 Prediction of soil heavy metal pollution loss rates and economic loss in next 10 a and 20 a of Zhangjiagang City

年份	单项重金属污染损失率/%				综合重金属污染损失率/%	蔬菜常年种植面积/万 hm^2	重金属污染经济损失量/万元 $\cdot\text{a}^{-1}$
	Cd	As	Cr	Cu			
2009	1.00	1.23	1.67	1.34	5.02	0.88	1 997.99
2019	1.50	1.23	3.70	2.20	8.17	0.97	3 248.08
2029	2.24	1.23	7.95	3.60	13.91	1.06	5 531.65

检测,切断重金属进入土壤的途径。但是,从本研究的计算结果看,目前张家港市蔬菜地重金属污染经济损失量为 $2\,250\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,相对蔬菜生产的纯收益 $45\,000\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 来讲所占比例很小,对于种植规模较大的蔬菜生产者,可能会引起重视,但对于规模较小的分散蔬菜生产者在短期内可能难以引起足够的重视。然而,预测结果显示,如果目前的趋势继续发展,重金属污染经济损失量增加还是较快的,20 a 后可达 $5\,205\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,为目前的 2 倍多。所以从长远看,采取措施控制重金属进入土壤,在经济上衡量还是值得的。

由于重金属在土壤中难以降解,亦难以去除^[29],重金属污染造成的经济损失实际上是无法挽回的。为了使土壤资源可持续地发挥经济和环境效益,政府相关部门也应引起足够重视,将经济和环境损失控制在萌芽状态。损失增加后再引起重视,一方面投入将加大,另一方面也会造成环境无法挽回的损失。

4 结论

(1)运用土壤重金属污染经济损失模型,以张家港地区土壤重金属的基线值为基准,对张家港市蔬菜地土壤重金属污染状况进行评价。结果表明,单项重金属污染损失率在 1.00%~1.67%之间,差异不大。综合重金属污染损失率为 5.02%,整体为 II 级,属于尚清洁水平。但随着蔬菜种植年限的增加和种植面积扩大,综合重金属污染损失率呈不断增加的趋势,导致重金属污染经济损失量也不断增加,2009 年约为 $1\,998\text{万元}\cdot\text{a}^{-1}$,2029 年增加到 $5\,532\text{万元}\cdot\text{a}^{-1}$ 。因此,应有效地控制蔬菜生产过程中重金属的来源,减少由此带来的经济损失。

(2)污染经济损失模型是一种反映污染损失变化的机理性模型,用它进行土壤重金属质量评价,计算过程简便,能半定量或定量估算出重金属污染经济损失量,但当选用不同本底浓度时,评价结果有很大的差异,以全国土壤环境背景值的一半为本底浓度明显高估了重金属污染经济损失量,而以该地区基线值为本底浓度,能真实反映出当地的实际情况,评价结果可靠。

参考文献:

- [1] 张江山,孔健健. 环境污染经济损失估算模型的构建及其应用[J]. 环境科学研究, 2006, 19(1):15-17.
ZHANG Jiang-shan, KONG Jian-jian. Construction of estimation model of economic loss from environmental pollution and its application[J].

- Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(1):15-17.
- [2] 龚子同,黄 标. 土壤中“化学定时炸弹”及其触爆因素的探讨[J]. 地球科学进展, 1998, 3(2):184-191.
GONG Zi-tong, HUANG Biao. Studies on potential “chemical time bombs” and their igniting factors in soils [J]. *Advance in Earth Science*, 1998, 3(2):184-191.
- [3] 徐勇贤,王洪杰,黄 标,等. 长三角工业型城乡交错区蔬菜生产系统重金属平衡及健康风险[J]. 土壤, 2009, 41(4):548-555.
XU Yong-xian, WANG Hong-jie, HUANG Biao, et al. Balance of heavy metals and healthy risks in vegetable farming system of an industry-based peri-urban area in Yangtze river delta region [J]. *Soil*, 2009, 41(4):548-555.
- [4] 赵英淑. 拿什么拯救你——重金属污染土壤? [J]. 科技学报, 2009, <http://scitech.people.com.cn/GB/10511580.html>.
ZHAO Ying-shu. How to rescue you: Soil of heavy metal pollution?[J]. *Science and Technology Daily*, 2009, <http://scitech.people.com.cn/GB/10511580.html>.
- [5] 余立斌,张江山,王菲凤. 损失率法在土壤环境质量评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(4):180-183.
YU Li-bin, ZHANG Jiang-shan, WANG Fei-feng. Comparison of association value method and pollution lost rate method on soil quality as assessment[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(4):180-183.
- [6] 邵学新,黄 标,赵永存,等. 长江三角洲典型地区土壤重金属的污染评价[J]. 环境化学, 2008, 27(2):218-221.
SHAO Xue-xin, HUANG Biao, ZHAO Yong-cun, et al. Pollution assessment of soil heavy metals in a representative area of the Yangtze river delta region[J]. *Environmental Science*, 2008, 27(2):218-221.
- [7] 谢正苗,李 静,王碧玲,等. 基于地统计学和 GIS 的土壤和蔬菜重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, 27(10):2110-2116.
XIE Zheng-miao, LI Jing, WANG Bi-ling, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in soils and vegetables based on geo-statistics and GIS[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10):2110-2116.
- [8] 岳子明,李晓秀,高晓晶. 北京通州区土壤环境质量模糊综合评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1402-1405.
YUE Zi-ming, LI Xiao-xiu, GAO Xiao-jing. Fuzzy comprehensive assessment on soil environment of Tongzhou in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1402-1405.
- [9] 胡大伟,卞新民,李思米,等. 基于神经网络的农田土壤重金属空间分布分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):216-223.
HU Da-wei, BIAN Xin-min, LI Si-mi, et al. Analysis of spatial distribution of soil heavy metals in farmland based on artificial neural networks[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):216-223.
- [10] Miural N L. Annual and seasonal occurrences of the zooplankton observed in the north basin of Lake Biw from 1965 to 1969[J]. *Lake Biw a Study Monographs*, 1990, 5:1-35.
- [11] Goyal P, Singh M P, Gulati A. Air quality assessment over a cement industrial complex[J]. *Atoms Envier*, 1996, 30(7):1156-1166.
- [12] 顾 娟,何元庆,张忠林,等. 密切值法和污染损失率法在水环境质量评价中的应用比较[J]. 环境工程, 2005, 23(6):62-64.
GU Juan, HE Yuan-qing, ZHANG Zhong-lin, et al. Comparison and

- application of the osculating method and the rate of pollution loss to water environment quality assessment[J]. *Environment Engineering*, 2005, 26(3):62-64.
- [13] 徐欣, 马建华, 韩晋仙. 基于污染损失率法的土壤重金属污染评价——以开封市化肥污灌区为例[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2009, 39(4):382-386.
- XU Xin, MA Jian-hua, HAN Jin-xian. Pollution assessment of soil heavy metals based on pollution lost rate method: A case study of the Huafei river sewage irrigated region, Kaifeng[J]. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 2009, 39(4):382-386.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Academia Sinica, Cooperative research group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese soil taxonomy [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001.
- [15] Jeremy L D, Huang B, Wang Z G, et al. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 286-292.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agronomic chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [17] James, 常锡厚译. 水资源规划经济学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984:255.
- James, CHANG Xi-hou. Water resources planning economics[M]. Beijing: Water Power Press, 1984:255.
- [18] 宋新山, 阎百兴, 何岩. 污染损失率模型的构建及其在环境质量评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2001, 21(2):229-233.
- SONG Xin-shan, YAN Bai-xing, HE Yan. Construction of pollution loss ratio model and its application to environmental quality assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(2):229-233.
- [19] 刘年丰, 郭继孝, 刘宝珠. 土壤环境质量评价的一种新方法——污损率法[J]. 环境科学与技术, 1997, 4:47-49.
- LIU Nian-feng, GUO Ji-xiao, LIU Bao-zhu. A new evaluation method of environmental quality-pollution lose rate method [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 4:47-49.
- [21] 黄进勇, 王兆寿. 水体污染经济损失估算模型及其应用[J]. 生物数学学报, 2003, 18(1):37-42.
- HUANG Jin-yong, WANG Zhao-qian. The estimating model of economic loss from water pollution and its use[J]. *Journal of Biomathematics*, 2003, 18(1):37-42.
- [22] 汪雅谷. 农业环境标准实用手册[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
- WANG Ya-gu. Date sheet of agriculture environmental criterion[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991.
- [20] 王志刚. 长江三角洲典型地区土壤重金属基线值及污染评价[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2010.
- WANG Zhi-gang. Geochemical baseline determination and pollution assessments of soil heavy metal in typical area of Yangtze river delta region, China[D]. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, 2010.
- [23] 孙波, 张桃林, 赵其国. 南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价[J]. 土壤, 1995(3):119-128.
- SUN Bo, ZHANG Tao-lin, ZHAO Qi-guo. Comprehensive evaluation of nutrient depletion in Southern red soil hilly region[J]. *Soil*, 1995(3), 119-128.
- [24] 王国梁, 周生路, 赵其国, 等. 菜地土壤剖面上重金属元素含量随时间的变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1):79-84.
- WANG Guo-liang, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo, et al. Spatial and temporal changes of soil heavy metal concentrations in vegetable cultivation land[J]. *Transactions of the Case*, 2006, 22(1):79-84.
- [25] 张家港统计局. 张家港统计年鉴[M]. 2009:130-131.
- Statistic Bureau of Zhangjiagang City. Statistics yearbook of Zhangjiagang City[M]. 2009:130-131.
- [26] 刘静, 黄标, 孙维侠, 等. 经济发达区不同土壤利用方式下重金属的空间分布及预测[J]. 土壤, 2011, 43(2):210-215.
- LIU Jing, HUANG Biao, SUN Wei-xia, et al. Spatial-temporal distribution and prediction of heavy metals under different soil use patterns in an economically developed area[J]. *Soil*, 2011, 43(2):210-215.
- [27] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):392-397.
- LIU Rong-le, LI Shu-tian, Wang Xiu-bin. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):392-397.
- [28] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze river delta region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112:391-402.
- [29] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996:1-344.
- CHEN Huai-man. Pollution of heavy metals in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996:1-344.