

经济发达区不同土壤利用方式下重金属的时空分布及预测^①

刘 静^{1,2}, 黄 标^{2*}, 孙维侠², 宗良纲¹

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

2 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)

摘 要: 土壤利用方式的改变可能导致重金属的积累, 并威胁食品安全。本文以长江三角洲经济发达的典型地区张家港市为例, 评价了土壤利用由稻麦轮作转变为蔬菜种植对该市土壤中 Cd、As、Cr、Cu 时空分布的影响; 并预测了目前条件下, 蔬菜种植面积的扩大和种植年限的增加对重金属在土壤中的积累趋势及污染潜力。结果表明, 在蔬菜种植过程中, 土壤中 As 含量变化不明显; Cd、Cr 和 Cu 的含量有不断累积的趋势, 一定面积的土壤超过了土壤环境质量一级限值(背景值); 如果按目前的蔬菜种植扩大和重金属积累的趋势发展, 未来 10 年, 将有 2.4% 面积的土壤 Cu 超过土壤环境质量二级限值, 20 年后, Cd 亦出现超标现象(约 0.7% 面积), 有可能对蔬菜品质产生影响。因此, 对今后蔬菜种植管理过程中引起的土壤重金属积累及潜在污染问题应该得到充分的重视。

关键词: 张家港; 稻麦轮作; 蔬菜地; 土壤重金属

中图分类号: X131.3

土壤是环境的重要组成部分, 是人类赖以生存的自然环境和农业生产的重要资源^[1]。随着人口快速增长、工业生产规模不断扩大、城镇化的快速发展、农业生产大量施用化肥和农药以及污水灌溉等, 使得许多有害物质包括重金属进入土壤系统, 并不断积累, 对农作物生长和品质安全产生了影响, 已成为我国面临的一个环境问题^[2]。近年来, 经济发达区快速的城市化进程和工业经济的影响, 使得农业土壤利用方式也发生了明显的变化^[3], 其中由传统的稻麦轮作转为高强度的蔬菜种植较为普遍。在此背景下, 蔬菜地的土壤环境质量越来越受到人们的关注。

有关蔬菜地土壤重金属的时空分布已有较为深入的研究。王国梁等^[4]采用空间序列代替时间序列的方法, 以宜兴市某蔬菜基地不同种植年限的菜地为研究对象, 探讨了土壤中 Hg、Cu、Zn、Cr、Pb 5 种元素含量随种植年限的增加而积累的趋势。赵彦峰等^[5]在无锡城乡交错区小型蔬菜生产系统不同蔬菜种植年限土壤重金属积累趋势的研究中发现, 就全量重金属而言, 不同种植年限的菜地土壤重金属平均含量都较水田高, 但菜地土壤重金属含量没有随种植年限持续增加的趋势。不同的地区社会经济和自然条件不同, 影

响土壤重金属积累的因素亦有差别, 因此对蔬菜生产过程中土壤重金属的时空变异特征值得深入研究。本文以长江三角洲经济发达的典型地区张家港市为例, 在稻麦轮作地和蔬菜地密集采样的基础上, 评价了该市重金属 Cd、As、Cr、Cu 的时空变化特征; 预测了目前条件下蔬菜种植面积扩大和种植年限增加对土壤重金属积累的影响及潜在危害, 为高强度蔬菜种植过程中重金属积累的控制提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

张家港市地处长江三角洲冲积平原, 地势平坦, 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。全市总面积 999 km², 其中陆地面积 799 km², 人口 89 万。该市土壤类型主要有潮湿雏形土和水耕人为土两个亚纲^[6-7](图 1), 前者主要分布于北部的沿江圩田地区, 为长江冲积物母质发育而成, 土壤呈碱性, 质地为中、轻壤质, 历史上土壤利用曾以棉-麦轮作为主, 目前主要为稻-麦轮作; 后者则主要分布于南部的平田地区, 由泻湖相沉积母质发育而成, 土壤呈中至微酸性, 质地较黏, 土壤利用一直以

①基金项目: 国家自然科学基金项目(40773075)和环保公益性行业科研专项(201109018)资助。

* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 刘静(1986—), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事环境质量与食品安全方面研究。E-mail: jliu@issas.ac.cn

稻-麦轮作为主。

自20世纪90年代初以来,张家港市经历农业产业结构调整的第二阶段,在这一阶段,该市大力发展高效经济作物,扩大蔬菜种植面积,土地利用强度增大。1991年全市蔬菜种植面积为2 029 hm²,2007年增加到3 445 hm²,年均增加约90 hm²。除了种植面积逐渐增加外,近5年来蔬菜种植方式出现了一个新的动向,即大规模的设施种植增加较快,主要是大量外地务工人员在该市承包土地种植蔬菜,其土壤利用强度、施肥和农用化学品的投入量明显增加^[8]。

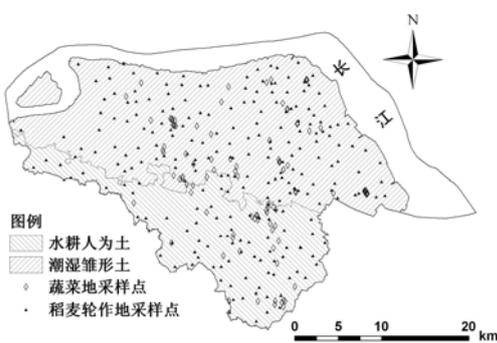


图1 张家港市土壤类型和采样点分布图

Fig. 1 Soil types and sampling sites of Zhangjiagang City

1.2 样品采集

采样工作主要分为两部分(图1):第一部分为蔬菜地土壤采集。采样考虑到张家港蔬菜地的面积大小、区域位置、土壤类型、种植年限、栽培方式等特点。全市共确定99个采样点,涉及到了张家港市的8个镇和1个农场,采样时,详细调查了各蔬菜种植地的种植年限。从种植年限来看,样点大致可以分为种植蔬菜5年之内:以近几年大量出现的设施农业蔬菜基地为主,即使用大棚等设施常年高强度种植;5年以上的蔬菜基地,除了设施农业蔬菜基地外,还有部分露天蔬菜种植基地。这两类蔬菜种植基地在张家港市有较好的代表性。第二部分为稻麦轮作地土壤采样。布点时主要考虑全市土壤类型、土地利用状况、区域之间样点分布的均匀性等因素,全市共确定了235个采样点,并从中筛选出87个作为对照。采样时,一般每个采样点采集6~8处耕层土壤,混合均匀后缩分至1~2 kg装袋。

1.3 样品处理和分析

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,研磨分别过10、60和100目筛,

并进行相关指标测定。pHS-3C精密pH计测土壤pH(土水比为1:2.5);1 mol/L NH₄OAc提取法测定土壤CEC;重铬酸钾氧化-外加热法测定有机质;土壤全N、全P、有效P和有效K的测定方法分别为半微量开氏法、HCl-HF-HNO₃-HClO₄消煮-钼锑抗比色法、NH₄F-HCl浸提-钼锑抗比色法和NH₄OAc浸提-火焰光度法;As的测定采用王水消化-原子荧光光谱法测定;Cu和Cr用HCl-HF-HNO₃-HClO₄消煮,用电感耦合等离子体-原子发射光谱(ICP-AES)法测定,Cd用石墨炉原子吸收(AAS/220FS)法测定^[9]。为了确保分析结果的可靠性和准确性,每批样品、每个项目均有两个标准样、两个平行的全程空白和10%~20%的平行样测定。

1.4 数据统计及空间插值

不同种植年限蔬菜地和对照稻麦轮作地的土壤重金属差异显著性、描述性统计、土壤类型与种植年限的交互检验及主成分分析采用SPSS13.0软件进行分析;采样点位置图和重金属含量的克里格插值图由ArcGIS9.2软件的地统计模块(Geostatistical Analyst)完成;其他数据分析在Excel2003中进行。

2 结果

2.1 土壤基本性质和重金属含量描述统计

不同种植年限蔬菜地土壤基本性质和重金属含量如表1所示。

考虑种植年限和土壤类型两个因素进行方差分析表明(表1),蔬菜地中种植年限和土壤类型均对土壤pH、全P、有效P、有效K产生了明显影响。潮湿锥形土较水耕人为土具有较低的有机质、CEC、全N、速效K,较高的pH、全P和有效P含量。无论在何种土壤类型上,随着蔬菜种植年限的增加,土壤pH均明显降低,全P、有效P、有效K则明显增加,其中有效P和有效K均在水稻土上增加较快;而有机质、CEC和全N无明显变化,这与其他类型地区蔬菜地土壤基本性质随种植年限的变化一致^[5],尤其在1~5年的设施蔬菜种植基地,全P、有效P、有效K变化最为剧烈。

土壤类型和种植年限对不同的重金属元素产生了不同的影响,由于两因素对元素Cd、As、Cr和Cu均不存在交互作用($p > 0.05$),所以仅列出了不同种植年限下4种重金属元素的含量。一般来讲,潮湿锥形土重金属含量较高。随着蔬菜种植年限的增加,As含量变化不明显,Cd、Cr、Cu的平均含量均较对照高,

表 1 不同种植年限蔬菜地土壤基本性质和重金属含量

Table 1 Soil basic properties and heavy metal contents of vegetable fields under different cultivating ages

性质	不同种植年限 (年)			影响因子		
	0 (对照)	1~5	>5	土壤类型 (S)	种植年限 (Y)	S×Y
有机质 (g/kg)	22.4±4.7 a	21.9±5.8 a	22.5±5.4 a	**	NS	NS
pH	7.14±1.03 a	6.93±1.17 a	6.32±1.20 b	***	***	NS
CEC (cmol/kg)	14.31±3.14 a	12.19±2.60 a	13.35±2.38 a	***	NS	NS
有效 P (mg/kg)	10.7±5.2 c	86.6±79.2 b	108.8±59.1 a	*	***	*
有效 K (mg/kg)	66±24 b	167±139 a	177±133 a	***	***	***
全 N (g/kg)	1.47±0.56 a	1.50±0.43 a	1.58±0.31 a	***	NS	NS
全 P (g/kg)	0.73±0.17 c	1.15±0.45b	1.30±0.41 a	*	***	NS
Cd (mg/kg)	0.141±0.083 b	0.185±0.065 a	0.178±0.078 a	***	*	NS
As (mg/kg)	8.5±1.9 a	8.7±2.7 a	8.2±1.5 a	*	NS	NS
Cr (mg/kg)	56.5±9.1 b	76.2±17.3 a	76.5±12.2 a	**	***	NS
Cu (mg/kg)	29.7±8.2 b	39.6±12.9 a	40.1±15.0 a	***	***	NS

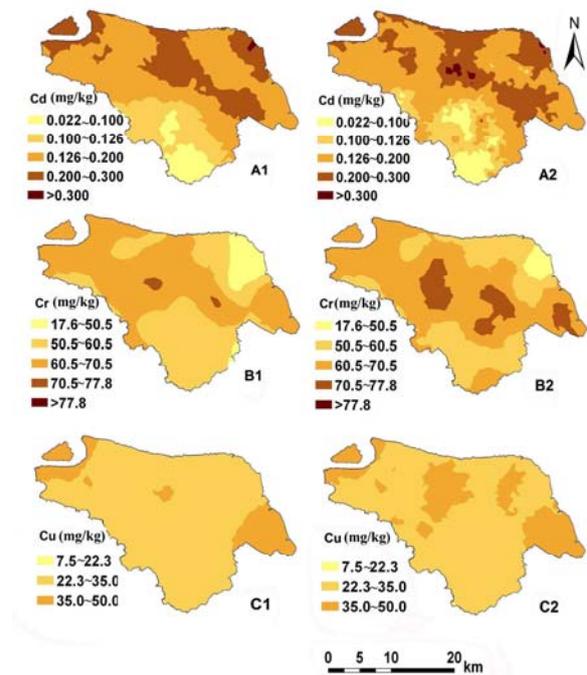
注: 对照土样 87 个, 种植 1~5 年土样 64 个, 种植 5 年以上土样 35 个; 同行不同小写字母表示在 $p<0.05$ 水平上差异显著; *, ** 和 *** 分别表示种植年限和土壤类型及其交互作用的影响在 $p<0.05$, 0.01, 0.001 水平上差异显著; NS 为在 $p<0.05$ 水平上差异不显著。

并且达到了显著性水平, 尤其在 1~5 年的设施蔬菜种植基地, Cd、Cr、Cu 含量变化最为剧烈; 在 1~5 年菜地和 >5 年菜地间 3 种重金属的含量虽未达到显著性水平, 但存在增加的趋势。不同种植年限的菜地土壤中除 As 外, 其他 3 种元素均超出了江苏省土壤元素背景值 (Cd: 0.126 mg/kg; As: 10.0 mg/kg; Cr: 77.8 mg/kg; Cu: 22.3 mg/kg) [10]。对照《土壤环境质量标准》(GB15618-1995), 蔬菜地土壤 Cd、Cr、Cu 3 种元素的平均含量均未超过二级标准限值 (Cd: 0.600 mg/kg; Cr: 250.0 mg/kg; Cu: 100.0 mg/kg)。

2.2 土壤重金属空间分布

由表 1 可知, 随着蔬菜种植年限的增加, As 含量变化不明显, 所以图 2 仅给出了 Cd、Cr 和 Cu 的空间分布图。空间上, 土壤元素含量的分布明显反映出了土壤类型和蔬菜种植的影响。总体看, 潮湿锥形土 Cd、Cr、Cu 等元素含量要明显高于水耕人为土。当在稻麦轮作地样点插值图上增加蔬菜地样点重新制图时, 后者高含量的面积明显增加, 而低值区范围减少。Cd 元素含量高于 0.200 mg/kg 的面积从 20 404 hm^2 (图 2-A1) 增加到 21 163 hm^2 (图 2-A2)。增加蔬菜地土壤样点后, Cr 含量在 70.5 ~ 77.8 mg/kg 范围内的面积由原来的 788 hm^2 (图 2-B1) 增加到 15 640 hm^2 (图 2-B2); 相反低于 60.5 mg/kg 所占的比例由 56.7% 减少到 34.7%。对元素 Cu 而言, 在稻麦轮作地样点基础上, 随着蔬菜样点的加入, 超过土壤环境一级标准限值 (Cu: 35.0 mg/kg) 的面积从 16 845 hm^2 (图 2-C1) 增加到 20 484

hm^2 (图 2-C2), 主要分布在西北部、东北部和中部偏北部分地区。



(A1、B1、C1 图分别为稻麦轮作地土壤重金属 Cd、Cr 和 Cu 插值图; A2、B2、C2 图为稻麦轮作地加蔬菜地土壤元素含量插值图。)

图 2 张家港市土壤中 Cd、Cr 和 Cu 含量分布图

Fig. 2 Distribution patterns of Cd, Cr and Cu contents in soils of Zhangjiagang City

3 讨论

3.1 土壤重金属的来源分析

一般来讲,土壤中的重金属可能来源于工业污染物的排放^[11]、污水灌溉^[12]、农用化学品的施用^[13]等。那么,张家港地区蔬菜种植地土壤中土壤重金属的积累究竟与哪种来源相关呢?为此,将所有样品的土壤肥力性质与重金属元素含量进行了主成分分析(表2),以期了解两者之间的关系,判断其来源。当设定特征值大于1时,提取到3个主成分,累积贡献率达到了75%。前已述及,该地区蔬菜地土壤与其他地区一样,显示了随着蔬菜年限种植的增加土壤全P和有效P含量增加的普遍规律,是由过量的有机肥料施用引起的。由主成分分析结果可知,土壤有效P、全P、有效K在主成分1上有较大的正载荷,而且土壤有机质、CEC、全N也显示出了一定的正载荷,显然是蔬菜种植管理对土壤性质的度量。该主成分中重金属Cu和Cr显示了较高的正载荷,Cd和As也为正载荷,这种相关性可以说明重金属积累来源于蔬菜种植的施肥过程^[14],由此也可以解释在主成分1上,pH与重金属含量为负向关系。

表2 土壤基本性质和重金属含量主成分分析

Table 2 Loadings of soil basic properties and heavy metals on principle components

项目	主成分1	主成分2	主成分3
OM	0.492	-0.718	0.207
pH	-0.317	0.727	0.340
CEC	0.201	-0.826	0.305
有效P	0.898	0.033	-0.328
有效K	0.763	-0.197	-0.403
全N	0.561	-0.615	0.239
全P	0.801	0.380	-0.185
Cd	0.325	0.609	0.021
As	0.492	0.230	0.686
Cr	0.696	0.364	0.106
Cu	0.728	0.474	0.195
特征值	4.089	3.072	1.134
贡献率(%)	37.174	27.925	10.305
累积贡献率(%)	37.174	65.099	75.405

作为我国经济发展较快的地区之一,张家港较发达的养殖业为这一地区蔬菜种植提供了充足的有机肥

料来源,而现代养殖业的饲料来源大部分是工业化生产的专用饲料,饲料添加剂(特别是重金属营养元素添加剂如Zn、Cu等)原料不纯,其中重金属元素杂质含量过高使饲料受到污染^[15]。这些添加剂中还常掺杂有一些另外的重金属元素(如Cr、Cd等),它们并不能被动物吸收而排出体外在废弃物中富集^[16],一旦施用这些有机肥就无疑使重金属进入土壤成为可能。另一方面,由于城市对新鲜蔬菜的需求量大,近年来大量涌入的外来务工人员对高经济效益的追求,必然导致蔬菜地复种指数高,肥料的投入增加,也使得重金属通过蔬菜种植在土壤中积累成为可能。类似的研究也说明了肥料的大量施用成为农业土壤中重金属积累的主要途径(有机肥输入量占总输入量的比例Cu为92%以上,Cd为100%)^[17],特别是畜禽粪便或以畜禽粪便作为原料生产的有机肥使用占土壤重金属输入量的绝大部分^[18]。徐勇贤等^[19]通过对南京城乡交错区小型蔬菜生产系统1年期间蔬菜种植过程中重金属元素的平衡状况的研究表明,施肥特别是有机肥是生产系统重金属输入的主要来源,占重金属输入量的98%以上。至于赵彦峰等^[5]在无锡城乡交错区并未获得蔬菜种植年限与土壤重金属积累之间清晰的相关关系,可能与该地区大量工业企业对土壤重金属积累的影响有关,这种影响掩盖了蔬菜种植年限与土壤重金属积累之间的相关关系。此外,灌溉水作为农业的重要生产资料,也是污染物进入耕地土壤的重要途径,经过对张家港灌溉河流的抽样调查表明,灌溉水虽然施入量大,但因为重金属含量极低(Cd为0.0001 mg/kg、As为0.006 mg/kg、Cr为0.0093 mg/kg、Cu为0.0193 mg/kg)^①,所以其重金属输入量所占的比例很小。

主成分2的变量中,土壤pH具有较高的正载荷,而全N、CEC、OM等具有较高的负载荷,这一特征与土壤类型的性质差异一致,所以该主成分是土壤类型的度量。这一主成分中重金属Cd显示了较高的正向载荷,其余重金属也具有一定的正向载荷,在此主成分中pH与重金属含量是正向关系,表明在蔬菜种植管理影响的基础上,土壤类型是影响土壤重金属含量变化的另一个重要因素。至于主成分3,仅元素As具有较高的正向载荷,目前的信息还无法判断其意义。

3.2 土壤重金属含量预测

①张家港市人民政府. 全国耕地质量调查专题报告:江苏省张家港市耕地地力调查与质量评价,2005

面对目前土壤中重金属的积累状况,其潜在的环境危险性怎样?则是需要关心的问题。由于近 5 年来张家港市设施蔬菜种植发展较快,伴随着土壤利用强度的加大、施肥和农用化学品投入量的增加,在近 5 年造成了明显的重金属积累(表 1),而之前的积累并不明显。所以,关于土壤重金属积累的预测,以这 5 年的增加量为依据。计算用 $(X_v - X_r)/5$ 的公式表示,式中 X_v 为种植 5 年蔬菜地各重金属平均含量; X_r 为稻麦轮作地土壤各重金属的平均含量。获得 Cd、Cr

和 Cu 3 种重金属元素的年增加量分别约为 0.008、3.9 和 2.0 mg/(kg·a)。这一增长量与徐勇贤等^[17,19]在南京和无锡两地重金属元素平衡观测的年积累量较为接近,也接近陈涛等^[20]在杭州某蔬菜基地的观测结果。按照目前蔬菜种植面积扩大的速度(约 90 hm²/a)和重金属的年增加量,预测了未来 10 年(2019 年)和 20 年(2029 年)蔬菜地土壤中 Cd、Cr、Cu 3 种重金属元素的含量及其不同土壤环境质量标准区间的面积,见表 3。

表 3 未来 10 年和 20 年张家港市蔬菜地土壤重金属含量及面积预测
Table 3 Prediction of heavy metal contents and areas with vegetable fields in next 10 years and 20 years

元素	项目	2009 年	2019 年	2029 年
Cd	平均值 (mg/kg)	0.183	0.250	0.313
	<一级标准 (hm ²)	1 496 (43.4)	1 394 (30.9)	584 (10.8)
	一 ~ 二级 (hm ²)	1 948 (56.6)	3 118 (69.1)	4 780 (88.5)
	>二级标准 (hm ²)	0 (0.0)	0 (0.0)	36 (0.7)
Cr	平均值 (mg/kg)	76.3	80.3	138.1
	<一级标准 (hm ²)	2 957 (85.9)	697 (15.5)	620 (11.5)
	一 ~ 二级 (hm ²)	487 (14.1)	3 184 (84.5)	4 780 (88.5)
	>二级标准 (hm ²)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
Cu	平均值 (mg/kg)	39.8	57.0	71.7
	<一级标准 (hm ²)	1 461 (42.4)	183 (4.1)	182 (3.4)
	一 ~ 二级 (hm ²)	1 983 (57.6)	4 218 (93.5)	4 817 (89.2)
	>二级标准 (hm ²)	0 (0.0)	110 (3.4)	401 (7.4)

注:一级和二级标准参见《土壤环境质量标准》(GB15618-1995);括号内数字表示各标准区间面积所占比例(%)。

总的来讲,随着蔬菜种植面积及种植年限的增加,Cd、Cr、Cu 的平均含量在不断增加,3 种重金属小于土壤环境一级标准限值面积所占的比例不断减少。其中就 Cd 而言,2009 年和 2019 年整个研究区均未超过土壤环境二级限值;但到 2029 年已出现超过二级标准限值的土壤,面积约为 36 hm²(占总面积的 0.7%)。重金属 Cu 在 2019 年即已出现超过土壤环境二级限值的土壤,面积达 110 hm²(占总面积的 2.4%),至 2029 年超标面积为 401 hm²,其所占的比例已达 7.4%。由于 Cr 元素的二级限值较高,所以,按目前的情况发展,20 年内基本上不会出现超过国家二级标准的情况。可见,在现有的二级极限不变的前提下,对今后蔬菜种植管理过程中引起的土壤重金属 Cd 和 Cu 积累及潜在污染问题应该得到充分的重视。

4 结论

(1) 与对照稻麦轮作方式的土壤相比,蔬菜地土壤中重金属 As 变化不明显,Cd、Cr 和 Cu 随着种植

年限的增加呈不断积累的趋势,这可能主要与蔬菜生产过程中大量施用“劣质”有机肥料有关。

(2) 从目前土壤环境状况来看,蔬菜地土壤中重金属 Cd、Cr 和 Cu 含量均未超过土壤环境质量的二级标准限值,但按目前趋势发展下去,未来 10 年,将有 2.4% 面积的土壤 Cu 超过土壤环境二级限值,20 年后,Cd 亦出现超标现象(约 0.7% 面积),因此需要采取有效对策以降低土壤重金属的积累,保证蔬菜品质安全。

参考文献:

- [1] 顾继光,周启星,王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(2): 143-151
- [2] 陈丽莉, 俄胜哲. 中国土壤重金属污染现状及生物修复技术研究进展. 现代农业科学, 2009, 16(3): 139-141
- [3] 马涛, 杨凤辉, 李博. 城乡交错带——特殊的生态区. 城市环境与城市生态, 2004, 17(1): 37-39
- [4] 王国梁, 周生路, 赵其国, 叶芳, 廖启林, 华明. 菜地土壤剖面

- 上重金属元素含量随时间的变化规律研究. 农业工程学报, 2006, 22(1): 79-84
- [5] 赵彦峰, 史学正, 于东升, 黄标, 王洪杰, 孙志英, 赵永存, Ingrid Oborn, Karin Blomb. 工业型城乡交错区农业土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的空间分布及影响因素. 土壤学报, 2007, 44(3): 227-234
- [6] 沙洲县土壤普查办公室, 苏州农业局. 江苏省沙洲县土壤志. 南京: 江苏省土壤普查办公室, 1984
- [7] 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. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- [8] Darilek JL, Huang B, Wang ZG. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 286-292
- [9] 鲁如坤, 编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [10] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 171-172
- [11] Nriagu JO. Cadmium in the atmosphere and in precipitation // Nriagu JO. *Cadmium in the Environment (part1)*. New York: Wiley, 1980: 35-114
- [12] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Cadmium connect ration in vegetables grown on urban soil irrigation with untreated municipal sewage. *Environment, Development and Sustainability*, 2000, 2: 11-19
- [13] Wager GJ. Accumulation of cadmium in crop plant and its consequences to human health. *Adv. Agro.*, 1993, 51: 173-212
- [14] 赵彦峰, 郭恒亮, 孙志英, 史学正, 吴克宁. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源. *地理科学*, 2008, 28(1): 45-50
- [15] 于炎湖. 饲料中的重金属污染及其预防. *粮食与饲料工业*, 2001, 6: 12-14
- [16] 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. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 392-397
- [17] 徐勇贤, 王洪杰, 黄标, 史学正, 于东升, 常青, Ingrid Öborn. 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. *土壤*, 2009, 41(4): 548-555
- [18] Moolenaar SW, Lexmond TM. Heavy-metal balances. Part 1. General aspects of cadmium, copper, zinc, and lead balance studies in agro-ecosystems. *Ind. Ecol.*, 1999, 2: 45-60
- [19] 徐勇贤, 黄标, 史学正, 于东升, 王洪杰, 常青, 周立祥. 典型农业型城乡交错区小型蔬菜生产系统重金属平衡的研究. *土壤*, 2008, 40(2): 249-256
- [20] 陈涛, 施加春, 刘杏梅, 吴建军, 徐建明. 杭州市城乡结合带蔬菜地土壤铅铜含量的时空变异研究. *土壤学报*, 2008, 45(4): 608-615

Spatial-temporal Distribution and Prediction of Heavy Metals Under Different Soil Use Patterns in an Economically Developed Area

LIU Jing^{1,2}, HUANG Biao², SUN Wei-xia², ZONG Liang-gang¹

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The changes in soil use patterns with economic development may lead to the accumulation of heavy metal in soil and then threat food security. Situated at Yangtze Rive Delta (YRD), Zhangjiagang City is an economically developed area. Based on intensive soil sampling from rice-wheat fields and vegetable ones, this paper discussed: (i) the effect of the soil use conversion from rice-wheat rotations to vegetable planting on spatial-temporal distribution of soil heavy metals, such as Cd, Cr, As and Cu, and (ii) the accumulation and pollution trend of soil heavy metals in the current condition with the expansion of vegetable cultivation and the increase of planting years. The results indicated that the concentration of Cd, Cr and Cu in soil were accumulated in the process of vegetable planting except for As. A certain area exceeded the first grade of the national standard for soil environmental quality (background value). If the current trend continued, Cu concentration of 2.4% of soil area would be over the second grade of national standard in by next 10 years, and that of 0.7% over the second grade standard of Cd by next 20 years. Therefore the attention should be paid to the accumulation of soil heavy metals in vegetable fields and potential pollution for the future vegetable planting management.

Key words: Zhangjiagang City, Rice-wheat rotation, Vegetable plots, Soil heavy metals