

岷江下游农田生态系统重金属铅镉锌的输入源格局

朱 鹏, 刘 洋, 陈良华, 高 顺, 张 健*, 杨万勤, 李 勇, 刘 凯

(四川农业大学林学院生态林业研究所, 成都 611130)

摘要:岷江下游五通桥区域的土壤存在着中到轻度的铅、镉和锌的污染。为了解该区域农田生态系统这3种重金属的污染源输入格局,对其主要输入源(大气湿沉降、灌溉和施肥)的重金属输入通量开展了定量研究。结果表明,大气湿沉降3种重金属的输入通量在时期间存在着显著差异,雨量充沛的T1和T2期(雨季期)明显地高于T3期(旱季期);施肥仅有铅和锌的输入通量在时期间存在着显著差异,表现为T3期的输入通量显著地高于T1和T2期;而灌溉的重金属输入通量在时期间没有显著差异。从不同输入源的输入贡献来看,大气湿沉降和施肥在3种金属的输入中均表现为主要的输入源,而灌溉对3种金属的输入贡献则存在着明显的差别,在铅输入中灌溉仅占很小的比例(年输入通量仅为8.0%),在镉输入中其比例提高到了21.9%,而在锌输入中其比例已几乎和其他两种污染源一致。综上所述,气候条件和农业生产行为对农田生态系统重金属污染的来源及其贡献有着重要的影响。因此,在农田生态系统重金属污染的管理中应对气候状况和农业生产行为可能引起的重金属污染加以监测,进而促进农产品的清洁安全生产。

关键词:农田系统;重金属污染;大气沉降;施肥;灌溉

中图分类号:X501 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)09-1814-07 doi:10.11654/jaes.2013.09.016

Input Pattern of Sources for Pb, Cd and Zn in the Agricultural Ecological System in the Lower Reaches(Wu-tongqiao Section) of Minjiang River

ZHU Peng, LIU Yang, CHEN Liang-hua, GAO Shun, ZHANG Jian*, YANG Wan-qin, LI Yong, LIU Kai

(Institute of Forestry and Ecology, Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu, 611130)

Abstract: Median to low contamination of lead (Pb), cadmium (Cd) and zinc (Zn) had been found in the agricultural soils of the lower reaches (Wutongqiao section) of Minjiang River. In order to understand the input pattern of these three heavy metals of different sources in this area, we quantitatively researched the input flux of air wet deposition, irrigation and fertilizer, which were supposed to be three main sources in the agricultural ecological system of this area. According to the results, we found that the input fluxes of three metals from air wet deposition all had significant differences among periods, showing that T1 (2009/02—2009/06) and T2 (2009/07—2009/10), due to their abundant precipitation (Wet season), were significantly higher than T3 (2009/11—2010/01) (Dry season). While, the input fluxes from fertilizing among periods were significantly different only for Pb and Zn, being that the input fluxes of T3 were significantly higher than those of T1 and T2. Nonetheless, no significant differences were found in the input fluxes of any metals from irrigation among periods. Regarding the contribution of different sources, air wet deposition and fertilizing exhibited as two main sources for all the three metals, while irrigation contributed differently for three metals, wherein the yearly input flux of Pb from irrigation only had a small proportion (8.0%), which increased up to 21.9% for Cd and were nearly the same as those of the other two sources for Zn. Conclusively, climate and agricultural production behavior could have important influence on the input pattern of heavy metals of different sources. Therefore, it is of benefit to monitor the possible contamination of heavy metals caused by climate and agricultural production behavior in the agricultural ecological system so as to promote the safe, hygienic production of produce.

Keywords: agricultural system; heavy metal pollution; air deposition; fertilizer; irrigation

收稿日期:2013-02-21

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05);四川省科技支撑计划项目(12ZC0017);四川省科技厅应用基础项目(2012JY0047);四川省教育厅科技创新团队资助计划项目(11TD006)

作者简介:朱 鹏(1981—),男,四川宜宾人,助理研究员。E-mail:rocerzhu2008@126.com

*通信作者:张 健 E-mail:sicauzhangjian@163.com

农田系统重金属污染可以通过土壤-作物系统进入人类食物链,从而对食品安全和人类健康造成严重的危害^[1]。目前,我国受重金属污染的耕地面积近 2000 万 hm^2 ,约占总耕地面积的 20%^[2]。尽管农田系统的重金属来源有自然和人为两种途径,但重金属污染主要是通过人为途径造成的^[3]。采矿、矿石提炼、大气沉降、城市污水污泥、农药使用、施肥等人类活动和行为都能不同程度地造成农田系统不同类型的重金属污染^[1,3-8]。但不同区域的农田系统其重金属污染的主要来源会不同,如采矿和矿石冶炼区的农田系统其重金属污染可能主要是由矿区的采矿和矿石提炼行为所造成^[9],而城市周边的农田系统其重金属污染则可能主要是由城市污水污泥所造成^[10]。此外,不同类型的重金属其主要的污染源也存在着不同^[11-12]。Liu 等对山东省农田多种重金属的来源进行分析发现,铅(Pb)污染主要来源于汽车和工厂废气以及污水灌溉,而镉(Cd)和锌(Zn)污染则主要来源于农用化学品的使用^[12]。

岷江下游地区是我国长江上游地区最为重要的农耕区域之一^[13]。乐山五通桥区地处岷江、青衣江和大渡河三江汇合处,是岷江流域典型的人口稠密区,四川省传统的农业和工业生产基地、国家级可持续发展实验区^[14]。前期调查研究发现,该区域的镉、铅、锌等三种重金属都不同程度地高于四川省的土壤背景值,分别为四川省背景值的 11、1.11 倍和 1.32 倍,表现出中到轻度的污染^[15]。作为典型的农业生产区,五通桥区区域内没有采矿、矿石提炼等工业污染源,因此大气污染、农业灌溉和施肥成为该区域农田生态系统重金属污染最可能的三个主要来源,但目前这些污染源具体的重金属输入格局和特征尚缺乏研究。因此,本文在前期土壤和植物调查研究的基础上,对五通桥区农田系统中存在着的主要三种重金属污染(铅、镉和锌)的污染源开展定量研究,定点监测岷江下游丘陵区典型农业种植模式下农田生态系统重金属污染不同污染源的输入通量,探究污染源的输入格局和特征,为该区域的农业安全生产的管

理提供理论依据。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域与样地设置

研究区域位于岷江下游的乐山市五通桥区(103°39'45"~103°56'48"E,29°17'29"~29°31'30"N,海拔 1331~735 m)。该区处于川西南四川盆地平原与丘陵的结合部,地势南高北低,岷江由北向南纵贯全境,东西两侧为丘陵、低山区,以台状丘陵为主,少部分低山,中部沿岷江两岸为平坝区。土壤以泥沙田、紫色土、红紫色土、黄泥土和少量山地黄泥土为主。气候属于中亚热带湿润气候,雨量充沛、四季分明。年平均气温 17.4℃,最低气温-2.2℃,最高气温 37.6℃。年降水量 1 390.6 mm,相对湿度 80%,无霜期 334.5 d,年日照时数 1 119.7 h^[15]。

该区域是四川省生姜(*Zingiber officinale*)、莴笋(*Lactuca sativa*)、小白菜(*Brassica rapa chinensis*)等蔬菜和玉米(*Zea mays*)、红苕(*Ipomoea batatas*)等粮食作物的重要种植基地^[13],2004 年 11 月被国家科技部等部门批准为国家级可持续发展实验区。本研究共设置 3 个样地,分别在五通桥区的冠英镇和蔡金镇,其中冠英镇 1 个样地,蔡金镇 2 个样地,每个样地随机取样,5 个重复。农田系统的种植模式为当地传统的间作加轮作模式,初始种植时间和最后收获时间均为 2009 年 2 月和 2010 年 1 月。样地的基本情况如表 1。

1.2 调查与采样

大气沉降主要调查了因降雨引起的大气湿沉降,每个样地设置三个雨水收集装置(自制)采集雨水。量取采集雨水总体积,并取水样 500 mL,加入两滴硝酸封存带回。

样地施肥和灌溉情况记录包括肥料的种类、数量和施肥时间以及灌溉的数量和时间等,每次施肥和灌溉的同时取肥料样品 10 g 和灌溉水样品 500 mL。样品存放在-4℃冰箱中。

三个样地的样品收(采)集和数据记录汇总在农

表 1 三个样地基本情况
Table 1 The situation of three sample plots

样地	海拔/m	面积/ m^2	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
S1	335.4	120.69	6.43	20.95	0.88	1.11	31.84
S2	379	82.29	7.43	27.48	1.28	0.56	35.48
S3	379	78.17	7.18	22.1	1.35	0.53	36.84

注:表中数据均为多个重复的平均值。

作物收获的茬口一并进行,收获茬口时间为2009年6月、2009年11月和2010年1月。因此,数据的汇总和分析分为三个时期,2009年2月到2009年6月(T1时期)、2009年7月到2009年11月(T2时期)和2009年12月到2010年1月(T3时期)。三个样地各时期的降雨量、灌溉水量、施肥种类及其数量见表2。

1.3 样品处理与分析

雨水和灌溉水样带回实验室后,用定量滤纸过滤,取滤液100 mL用硝酸-高氯酸消解,用M-650700型原子吸收分光光度计(普通火焰吸收法和石墨炉法)测定金属含量^[16]。取肥料样品10 g于去离子水中,用硝酸-高氯酸消解,用M-650700型原子吸收分光光度计(普通火焰吸收法和石墨炉法)测定各金属含量^[17-18]。

质量控制:以每批样品两个全程序的空白、每个样品三次平行重复、加标回收等进行,标准液为国家标准物质GBW08607,加标回收率为100%±10%,平行样最大偏差控制在15%以内。

1.4 数据处理和分析

(1)大气湿沉降输入重金属通量的计算:

$$M_d = \frac{C_r \times L}{T}$$

式中: M_d 为降雨带入的重金属月平均通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_r 为一定时期内雨水样品中重金属的平均含量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; L 为一定时期内单位面积内降雨量, $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$; T 为取样的时期间隔长度,月份数量。

(2)肥料施用输入重金属通量的计算:

$$M_f = \frac{\sum (F_i \times C_i)}{T}$$

式中: M_f 表示施用肥料输入的重金属月平均通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; F_i 为一定时期内某种肥料的施用量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$;

C_i 为一定时期内相应肥料中的重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; T 为取样的时期间隔长度,月份数量。

(3)农田灌溉输入重金属通量的计算:

$$M_w = \frac{C_w \times L}{T}$$

式中: M_w 代表农田灌溉输入的重金属月平均通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_w 为一定时期内的灌溉水重金属平均含量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; L 为一定时期内单位面积内灌溉水量, $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$; T 为取样的时期间隔长度,月份数量。

数据的统计分析利用SPSS16.0开展。

2 结果与分析

2.1 铅污染的输入格局

根据表3可以看到,3种输入源铅总的月平均输入通量最大值和最小值分别出现在T2(2009/07—2009/11)和T1(2009/02—2009/06)时期,时期之间的差异不显著。3种输入源各自的月平均输入通量最大值和最小值出现的时期表现各异,大气湿沉降的最大值和最小值分别出现在T2和T3(2009/11—2010/01)时期,而灌溉则是随时期变化依次减小,施肥为随时期变化依次增大。方差分析显示大气湿沉降和施肥在时期间存在显著差异,灌溉在时期间没有显著差异。多重比较分析显示,大气湿沉降表现出T1和T2期显著高于T3期,T1和T2期之间没有显著差异;而施肥则是T3期显著高于T1和T2期,T1和T2期之间没有显著差异。

根据不同输入源间铅输入通量的方差分析(表3),无论是从各个时期还是全年来看输入源之间都存在着极显著差异,但多重比较分析显示差异的显著性主要来源于大气湿沉降、施肥与灌溉之间的差异,大气湿沉降和施肥之间不存在显著差异(除T3期)。大

表2 三个样地各时期降雨量、灌溉水量、施肥种类及其数量

Table 2 The amounts of precipitation, irrigation, and fertilizers of different types within different periods of three sample plots

样地	时期	降雨量/ mm	灌溉水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	施肥/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$						
				尿素	人畜尿	磷酸二氢钾	油枯	KCl	过磷酸钙	复合肥
S1	T1	392.5	600	450	30 000	150	—	—	—	150
	T2	730.7	450	450	45 000	7.5	—	150	—	—
	T3	137.3	150	225	22 500	120	—	150	450	—
S2	T1	392.5	750	450	30 000	450	525	375	525	450
	T2	730.7	150	600	22 500	—	—	—	—	—
	T3	137.3	120	150	15 000	—	—	—	—	—
S3	T1	392.5	450	450	37 500	375	—	600	300	450
	T2	730.7	300	450	22 500	75	—	—	—	—
	T3	137.3	120	150	22 500	30	—	—	—	—

表 3 农田生态系统各输入源、各时期 Pb 的月平均输入通量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 3 The monthly mean input flux($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) of Pb within different periods and from different sources in agricultural ecological system

输入源	Pb 含量	T1	T2	T3	全年月平均	ANOVA	
						F	P
大气湿沉降	平均	4.309Bb	5.603Bb	2.616Ab	4.523b	12.668	0.007
	SD	0.628	0.986	0.477	0.311		
灌溉	平均	0.897Aa	0.739Aa	0.600Aa	0.793a	1.434	0.310
	SD	0.269	0.244	0.080	0.127		
施肥	平均	3.528Ab	5.185Ab	6.715Bc	4.581b	7.121	0.026
	SD	0.430	0.560	1.648	0.790		
总和	平均	8.734A	11.527A	9.932A	9.897	2.658	0.149
	SD	1.600	2.406	2.832	1.928		
ANOVA	F	44.157	48.600	29.635	57.546		
	P	0.000	0.000	0.001	0.000		

注:大写字母和小写字母分别表示各时期和各输入源间的差异显著性($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$),不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The uppercases and the lowercases indicate the significances of differences($P<0.05$) among periods and among sources, respectively, the same letters for non-significant differences($P>0.05$), different letters for significant differences($P<0.05$).

气湿沉降和施肥的年铅输入通量所占的比例分别达到了 45.7%和 46.3%,而灌溉仅占 8.0%。在 3 种输入源所占比例的时期变化中(图 1),灌溉和施肥与其绝对值的变化趋势一致,大气湿沉降随时期变化递减。输入源和时期双因素的方差分析显示(表 6),铅输入通量在输入源间、时期间以及两者的交互效应间均存在显著差异。

2.2 镉污染的输入格局

3 种输入源各自和总的镉月平均输入通量随时期的变化趋势与铅完全一致(表 4),但方差分析显示只有大气湿沉降在时期间还存在显著差异,仍然为 T1 和 T2 期显著高于 T3 期,T1 和 T2 期之间没有显著差异。

根据不同输入源间镉输入通量的方差分析(表 4),只有 T3 期和全年输入源之间存在显著差异。多重比较分析显示不同于铅输入,在 T3 期镉输入通量表现出施肥显著地高于大气湿沉降和灌溉,后两者之间没有显著差异;而在全年镉输入与铅输入相同,大气湿沉降和施肥显著地高于灌溉,大气湿沉降和施肥之间没有显著性。从不同输入源镉输入通量所占的比例来看,灌溉在镉输入中其所占的比例在各个时期和全年都有了明显提高,其中全年镉输入通量的比例增加到了 21.9%,但大气湿沉降和施肥仍然是最主要的两个来源,分别占了 35.7%和 42.4%。灌溉和施肥镉输入通量所占比例在时期间的变化趋势与铅相同,大气湿沉降所占比例为 T2 期大于 T1 和 T3 期(图 1)。输

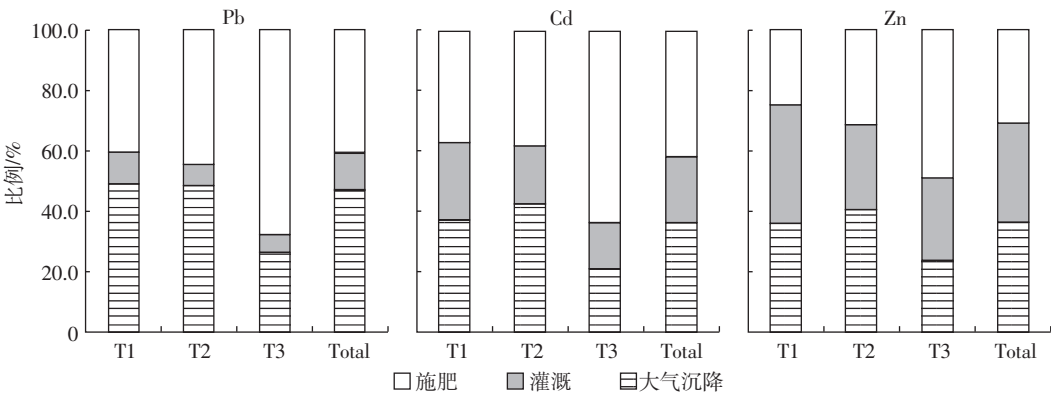


图 1 各时期和全年不同输入源重金属月平均输入通量所占的比例

Figure 1 The proportions of the monthly mean input flux of heavy metals of different sources within different periods and of the whole year

表 4 农田生态系统各输入源、各时期的 Cd 月平均输入通量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)Table 4 The monthly mean input flux($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) of Cadmium within different periods and from different sources in agricultural ecological system

输入源	Cd 含量	T1	T2	T3	全年月平均	ANOVA	
						<i>F</i>	<i>P</i>
大气湿沉降	平均	0.195Ba	0.251Ba	0.117Aa	0.203b	14.037	0.005
	SD	0.035	0.037	0.018	0.012		
灌溉	平均	0.141Aa	0.116Aa	0.094Aa	0.124a	1.406	0.316
	SD	0.042	0.039	0.013	0.020		
施肥	平均	0.199Aa	0.228Aa	0.374Ab	0.241b	2.947	0.128
	SD	0.029	0.139	0.082	0.054		
总和	平均	0.534A	0.596A	0.585A	0.569	0.270	0.772
	SD	0.042	0.097	0.141	0.060		
ANOVA	<i>F</i>	2.474	2.154	30.005	9.164		
	<i>P</i>	0.165	0.197	0.001	0.001		

入源和时期的双因素方差分析显示,镉输入通量在输入源间和两者的交互效应间存在显著差异,但在时期间不存在显著差异(表 6)。

2.3 锌污染的输入格局

3 种输入源各自的锌月平均输入通量随时期的变化趋势与铅和镉相同(表 5),总的月平均输入通量其最大值和最小值分别出现在 T3 和 T2 期。方差分析显示大气湿沉降和施肥在时期间存在显著差异,而灌溉在时期间不存在显著差异。多重比较分析显示,大气湿沉降的 T1 和 T2 期显著高于 T3 期,T1 和 T2 期之间没有显著差异;而施肥则是 T3 期显著高于 T1 和 T2 期,T1 和 T2 期之间没有显著差异。

根据不同输入源间锌输入通量的方差分析(表 5),只有 T3 期不同输入源之间还存在显著差异,表现为施肥显著地高于大气湿沉降和灌溉,大气湿沉降和

灌溉之间没有显著差异。从锌的年输入通量来看,灌溉所占的比例已与大气湿沉降和灌溉十分接近,大气湿沉降、灌溉和施肥的比例分别为 36.5%、33.4% 和 30.1%。3 种输入源锌输入通量所占比例在时期间的变化趋势与镉基本一致(图 1)。输入源和时期的双因素方差分析显示,同镉的输入通量一样,锌在输入源间和两者的交互效应间存在显著差异,在时期间的差异不显著(表 6)。

3 讨论

综合 3 种重金属的输入通量结果,就各种输入源总的月平均输入通量而言,3 种重金属在时期间均没有显著的差异,说明时间因素在岷江下游五通桥区域的农田生态系统中对 3 种金属总的输入通量影响不大。但输入源和时期的双因素方差分析显示,铅在时

表 5 农田生态系统各输入源、各时期的 Zn 月平均输入通量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)Table 5 The monthly mean input flux($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) of zinc within different periods and from different sources in agricultural ecological system

输入源	Cd 含量	T1	T2	T3	全年月平均	ANOVA	
						<i>F</i>	<i>P</i>
大气湿沉降	平均	41.561Ba	453.557Ba	24.998Aa	43.378a	16.430	0.004
	SD	7.451	6.787	3.327	0.739		
灌溉	平均	44.936Aa	37.006Aa	30.068Aa	39.705a	1.432	0.310
	SD	13.494	12.239	4.006	6.369		
施肥	平均	27.557Aa	41.148Aa	52.099Bb	35.897a	7.895	0.021
	SD	3.716	4.439	11.782	6.170		
总和	平均	114.055A	131.711A	107.165A	118.980	1.977	0.219
	SD	11.249	10.465	14.042	5.504		
ANOVA	<i>F</i>	3.040	3.097	11.261	1.591		
	<i>P</i>	0.123	0.119	0.009	0.279		

表 6 农田生态系统重金属 Pb、Cd、Zn 输入通量的输入源和时期双因素方差分析

Table 6 Two-way ANOVA (sources and periods) of the input flux of Pb, Cd and Zn in agricultural ecological system

变量因素	Pb 通量			Cd 通量			Zn 通量		
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
输入源	2	28.423	0.000	2	6.270	0.001	2	4.481	0.004
时期	2	3.573	0.049	2	0.297	0.747	2	2.279	0.131
输入源×时期	2	11.338	0.000	2	5.490	0.005	2	7.652	0.001

期间表现出显著差异,说明相较镉和锌时间因素对该区域农田生态系统铅的输入有着一定的影响。

就具体的输入源而言,大气湿沉降 3 种重金属的输入通量在时期间都存在显著差异,具体表现为 T1 期(2—6 月)和 T2 期(7—11 月)显著地高于 T3 期(12—1 月),同时呈现 T2>T1>T3 的变化趋势。岷江下游地区属于典型的干湿季分明的中亚热带湿润气候,夏季雨量充沛,冬季干旱少雨。6—11 月(尤其是 6—9 月)是该地区降雨量最大的月份,2—5 月则是降雨量相对较少的时期,而 12—1 月则是雨量很少的旱季^[9]。因此,在湿润的 T2 期,充沛的降雨量导致空气中大量的重金属通过降雨被带入农田系统中,而在干旱的 T3 期稀少的降雨量使得空气中的重金属相对较少地进入农田系统。汤奇峰等^[20]2004—2005 年通过在成都、德阳、乐山等市布置 28 个收集样点对成都经济区的重金属大气干湿沉降通量及来源进行了研究,其中第 8 号样地与本研究所在的区域地理位置十分相近,其大气干湿沉降带入的 Pb、Cd、Zn 年输入通量分别为 65.97、1.98、92.54 mg·m⁻²,而在我们的研究中大气湿沉降带入的 Pb、Cd、Zn 年输入通量分别为 54.28、2.44、520.54 mg·m⁻²,Cd 和 Zn 的输入通量都高于汤奇峰等的研究结果,尤其是锌的输入。

施肥仅对 Pb 和 Zn 的输入在时期间存在显著的差异,具体表现为 T3 期(12—1 月)显著地高于 T1 期(2—6 月)和 T2 期(7—11 月),同时呈现 T3>T2>T1 的变化趋势。这可能与种植模式和与之相应的施肥行为有着一定的关系,即在间作+轮作的种植模式中随着上一茬作物的收获,土壤中肥料被作物吸收,在种植下一茬作物时需要为农田系统进行一定追肥。而灌溉过程中 3 种金属的输入通量在时期间没有显著性差异,说明该区域农业生产中灌溉行为在各时期间没有显著的不同。

不同输入源对不同重金属污染的贡献往往存在着一定的差异^[11-12]。研究中发现,在该区域农田生态系统中,大气湿沉降和施肥是铅的主要输入源。无论是各个时期还是全年的月平均输入通量,大气湿沉降和

施肥都显著地高于灌溉,两者输入所占的比例分别达到了 45.7%和 46.3%,而灌溉仅为 8.0%。在 Jose 等和 Liu 等对西班牙和山东省的农田系统污染源分别进行的研究中,大气沉降都是农田系统铅污染的主要来源^[11-12],但在 Liu 等的研究中灌溉也是农田系统铅污染的主要来源^[12]。这可能与地区间灌溉用水的含铅量有关,本研究区域灌溉水中的铅含量可能要小于山东省灌溉水中的铅含量。与铅相同,无论是各个时期还是全年的月平均输入通量,大气湿沉降和施肥仍然是该区域农田生态系统镉的主要输入源,年输入通量两者仍然显著地高于灌溉,但灌溉的年输入通量比例已经提高到了 21.9%。而对于锌,灌溉输入通量所占的比例已经与大气湿沉降和施肥基本没有明显的差异。从灌溉对该区域农田系统 3 种重金属的贡献值来看,呈现铅<镉<锌依次增大的趋势,表明该区域农田系统灌溉水中铅、镉、锌三种金属的含量依次增大。因此,灌溉行为将更明显地影响着该区域农田生态系统中的锌污染。

4 结论

尽管岷江下游农田生态系统的重金属污染各输入源总的输入在时期间不存在显著的差异,但不同输入源对不同金属的表现不尽相同。T1 和 T2 期(雨季期)相对充沛的雨量使得这两个时期大气湿沉降带来的 3 种金属(Pb、Cd、Zn)的输入通量都明显地高于 T3 期(旱季期),而施肥则使 T3 期带入的铅和锌输入通量要显著地高于 T1 和 T2 期。灌溉虽然是农业生产中的重要行为,但在岷江下游的农田生态系统中,由于相对大气污染和肥料两种污染源,该区域灌溉水中的铅含量较低,使得灌溉行为对该区域农田系统铅污染的贡献较小;而镉和锌的含量较高,导致灌溉行为对两者的输入有着更大的贡献,尤其是对锌的输入。综上所述可以看出,气候条件和农业生产的行为对农田系统重金属污染的来源及其贡献都有着重要的影响。本文的研究结果将有利于指导该区域农田生态系统重金属污染的管理,促进农产品的清洁安全生产。

参考文献:

- [1] Wei B, Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94: 99–107.
- [2] 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[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 143–151.
GU Ji-guang, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Reused path of heavy metal pollution in soils and its research advance[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(2): 143–151.
- [3] 邵学新, 吴 明, 蒋科毅. 土壤重金属污染来源及其解析研究进展[J]. *广东微量元素科学*, 2007, 14(4): 1–6.
SHAO Xue-xin, WU Ming, JIANG Ke-yi. Research progress in sources identification of soil heavy metal pollution[J]. *Guangdong Weiliang Yuansu Kexue*, 2007, 14(4): 1–6.
- [4] Kachenko A G, Singh B. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2006, 169: 101–123.
- [5] WHO. Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution[EB]. 2007. <http://www.euro.who.int/pubrequest>.
- [6] Li Y, Gou X, Wang G, et al. Heavy metal contamination and source in arid agricultural soils in central Gansu Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 607–612.
- [7] 刘传德, 王 强, 于 波, 等. 农田土壤重金属污染的特点和治理对策[J]. *农技服务*, 2008, 25(7): 118–119.
LIU Chuan-de, WANG Qiang, YU Bo, et al. Managing strategies and properties of heavy metal contamination of agricultural soils[J]. *Nongji Fuwu*, 2008, 25(7): 118–119.
- [8] Yang P, Mao R, Shao H, et al. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China[J]. *C. R. Biologies*, 2009, 332: 558–566.
- [9] Guo Y, Bao Z Y, Deng Y M. Environmental geochemistry of abandoned flotation tailing reservoir from the tonglvshan Fe–Cu sulfide mine in Daye, Central China[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2011, 87: 91–95.
- [10] 王 静, 王 鑫, 吴宇峰, 等. 农田土壤重金属污染及污染修复技术研究进展[J]. *绿色科技*, 2011, 3: 85–88.
WANG Jing, WANG Xin, WU Yu-feng, et al. Analysis of heavy metal pollution of farmland soil and advances of soil pollution restoration technology[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2011, 3: 85–88.
- [11] Jose A, Angel F, Silvia M M. Identification of heavy metal sources by multivariable analysis in a typical Mediterranean city (SE Spain)[J]. *Environ Monit Assess*, 2010, 169: 519–530.
- [12] Liu P, Zhao H J, WANG L L. Analysis of heavy metal sources for vegetable soils from Shandong Province, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(1): 109–119.
- [13] 刘 凯, 李 勇, 张 健, 等. 岷江下游丘陵区 3 种农业种植模式对铅污染土壤的修复效益[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4): 656–665.
LIU Kai, LI Yong, ZHANG Jian, et al. Remedy efficiency of three cropping systems for lead contaminated agricultural soils in hilly region of Minjiang River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 656–665.
- [14] 简 毅, 杨万勤, 张 健, 等. 岷江下游(五通桥段)土壤污染特征及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 256–262.
JIAN Yi, YANG Wan-qin, ZHANG Jian, et al. Characteristics and ecological risk of soil pollution in the lower reaches (Wutongqiao Section) of Minjiang River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 256–262.
- [15] 杜 波, 杨万勤, 张 健. 山丘平原过渡区土壤重金属污染特征及评价: 以四川省五通桥区为例[J]. *山地学报*, 2006, 24(增): 82–87.
DU Bo, YANG Wan-qin, ZHANG Jian. Investigation and assessment on soil heavy metal contamination in the mountain-hilly transitive zone: A case from Wutongqiao County, Sichuan[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(Suppl): 82–87.
- [16] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. The analytic methods of water and wastewater[M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 2002.
- [17] GB/T 14539. 1—1993 复混肥料中砷、镉、铅的测定试样溶液制备[S].
GB/T 14539. 1—1993 Preparation of sample solution for determining As, Cd, Pb in compound fertilizers[S].
- [18] 章明洪. 对肥料中重金属元素含量测定的研究[J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18(2): 62–64.
ZHANG Ming-hong. Study on the determination of heavy metals content in fertilizers[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(2): 62–64.
- [19] 卓淑华. 峨眉山气候特征初论[J]. *乐山师专学报*, 1986, 1: 94–104.
ZHUO Shu-hua. Preliminary discussion on the climate of Emei Mountain[J]. *Journal of Leshan Normal College*, 1986, 1: 94–104.
- [20] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区 As 等元素大气干湿沉降通量及来源研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(3): 213–222.
TANG Qi-feng, YANG Zhong-fang, ZHANG Ben-ren, et al. A study of elements flux and sources from atmospheric bulk deposition in the Chengdu Economic Region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 213–222.