

# 农田生态系统中重金属的积累和循环

穆从如 夏增祿 李森照  
孟维奇 沈瑞珍 何瑞珍

(中国科学院地理研究所)

## 提 要

本文通过对北京东郊高碑店地区污染农田的调查研究,探讨了重金属在农田生态系统中的积累和循环,计算出重金属在区域环境中的输入输出量,说明本区仍处于重金属积累状态,为防治农田环境污染,提出了停止施用污水处理厂的晾干污泥,减少灌溉污水中的重金属含量等保护性措施。

农田生态系统遭受污染,其生产能力下降。重金属污染农田后,污染元素通常聚积于土壤耕作层,影响农作物生长,并且通过迁移,进入食物链,危害人体健康。因此,探讨重金属在农田中的传输和积累规律,定量地揭示污染物的循环模式,指明环境污染的发展趋势,从而制定相应措施,制止或减少污染物的输入,创造符合现代化农业所需要的生态环境是很必要的。以往农田环境中物质循环与平衡的研究多数集中在营养元素(如氮、磷等)方面,污染物方面的报道尚少。本文通过污水灌溉和污泥施肥的调查,对重金属元素输入输出分别进行计算,探讨重金属在农田生态系统中的积累和循环。

## 一、环境条件和研究方法

研究区位于北京东郊,包括高碑店、半壁店和北花园三个乡的大部分土地,总面积为9.4平方公里。该区属于永定河冲积扇,地势平坦,土层深厚。土壤为褐土化潮土和潮土,PH7.1—8.5,碳酸钙含量5—7%,有机质0.8—3.7%,土壤质地多为轻壤和中壤。该区气候属暖温带半湿润季风区,年降水量646毫米,不能满足农作物生长的需要。该区地表水源缺乏,开发地下水又受多种因素的限制。而全市规模最大的高碑店污水处理厂就近提供了充足的水源,因而污水灌溉已有二十余年,部分地区还施用污泥作肥料。这些措施虽然提高农作物产量,但也使农业环境受到一定程度的污染,农业生态系统因而受到破坏。

污染源方面,按灌溉渠系将该区农田划分为16个污灌小区,在每个小区的毛渠内采集污水样;每季度在污水处理厂的污泥晾晒场采污泥样。在研究区内设50个采样点,土壤采集耕作层(0—20厘米),农作物采集根、茎、叶和籽粒。还在实地设立观测点,按季度收集降尘样品,雨后收集降水样品。为研究污染物随水体的迁移能力,使用人工降雨器,按三种雨

强, 以两种作物为下垫面, 实地进行模拟试验, 采集地表径流样品。

对所采集样品的重金属含量的分析: 镉、铅、铜、锌、镍等用原子吸收分光光度计测定。铬用二苯碳酰二肼显色, 光电比色计测定; 汞用590型冷原子吸收仪测定; 砷用DDC—Ag法三乙胺—氯仿吸收液吸收, 72分光光度计比色。

重金属在农田生态系统中的平衡状况表示为

$$F = (w + s + r + f) - (P + R)$$

式中:  $w$ 为灌溉污水输入;  $s$ 为施用污泥输入;  $r$ 为大气降水输入;  $f$ 为大气降尘输入;  $P$ 为农作物输出;  $R$ 为地表径流输出。 $F$ 表示土壤残留量。

当 $F$ 为正值时, 表明重金属在农田中积累; 反之, 表明重金属在农田中淋失。

根据该区的环境条件以及重金属污染物的迁移特点, 本研究没有考虑诸如蒸发和植物蒸腾等的影响。

## 二、研究结果

高碑店污灌区污染物来源于城区居民的生活废弃物和热电、化工、染料、制药、焦化、造纸、电镀、冶炼等500余家工厂排放的“三废”。废水通过市政管道进入污水处理厂, 经一级处理后灌溉农田; 废气以工厂燃煤排放为主, 研究区处于主导风向的下风, 受其直接影响。其输入输出项目的研究结果如后:

### (一) 施用污泥带入的重金属量

区内污水处理厂近三年来平均年产2.82万立方米污泥, 实测比重为0.88, 水分含量为65%, 折合干污泥为8690.7吨。由于污泥和生活污水的沉淀物有关, 有机质含量高达10.7—11.8%, 全氮含量为0.73—11%, 速效磷含量为30—54PPm, 速效钾含量为204.1—341.5PPm, 因此全被当地农民作为基肥施入农田, 每年用量达2.5—5立方米每亩, 菜地和果园更达到10立方米每亩。根据污泥总产量和污泥所含重金属浓度, 计算出研究区总输入量和单位面积输入量如表1。

表 1 施用污泥输入的重金属量  
Input amount of heavy metals from sludge

项 目 元 素	污泥含重金属的浓度 (毫克每公斤)	总输入量 (公斤每年)	单位面积输入量 (克每亩·年)
Hg	8.63	66.39	35.87
Cd	1.613	175.8	15.4
Pb	31.00	728.54	151.37
Cu	428.1	8355.24	441.65
Zn	961.4	3720.49	325.98
As	9.18	79.78	6.99
Cr	258.24	2766.25	242.38

### (二) 污水灌溉输入的重金属量

研究区是北京市污水灌溉最早的地区之一,有二十余年的历史。对全区16个灌溉小区采集的水样化验结果表明:除个别采样点以外,水质均符合污水灌溉水质标准。按京郊农作物用水量,两年三熟制的小麦—玉米—小麦每年灌水量为420—560立方米每亩;稻麦两熟制年灌水量为1200立方米每亩;园田菜地灌水量为900—1500立方米每亩计算,结合该地区农作物布局计算出灌溉污水输入的重金属量,列入表2。

表 2 由污水灌溉输入的重金属量  
Input amount of heavy metals from irrigation sewage

项 目 元 素	污水含重金属的浓度 (毫克每升)			总 输 入 量 (公斤每年)	单位面积输入量 (克每亩·年)
	平均值	最低值	最高值		
Hg	0.001	0.00	0.002	1.37	0.12
Cd	0.25	0.00	0.63	1.185	0.104
Pb	1.34	0.00	4.2	26.8	2.34
Cu	0.039	0.008	0.071	1384.5	123.3
Zn	0.087	0.038	0.238	1878.9	164.63
As	0.058	0.019	0.153	2221.7	19.5
Cr	0.062	0.012	0.112	538.5	47.2
Ni	8.46	4.4	17.9	57.7	6.62

### (三) 大气降水输入的重金属量

大气降水的水质成份取决于降水来源、大气污染程度、天气形势等。三年来本区共采集雨水样品24次,分别测定其重金属含量。分析结果表明,雨水中除砷外其他重金属含量均小于饮用水标准。根据1980、1981、1982三年朝阳区气象站观测,三年平均降水量为407.8毫米,计算出大气降水重金属输入量,列入表3。

表 3 大气降水的水质和重金属输入量  
Input amount and contents of heavy metals in rain

项 目 元 素	雨水中的重金属含量		总输入量 (公斤每年)	单位面积输入量 (毫克每亩·年)
	平均浓度	含量范围		
Hg*	痕 量	0-0.001	—	—
Cd	0.17	0-1.03	0.257	0.046
Pb	36.96	2.3-15.68	114.6	10.1
Cu	1.44	0.03-4.0	4.45	0.39
Zn*	0.29	0.002-1.78	908.1	79.57
As*	0.036	0.014-0.073	111.6	9.8
Ni	0.39	0.2-0.76	1.21	0.106

浓度单位是微克每公斤, \*浓度单位是毫克每公斤。

#### (四) 大气降尘输入的重金属量

农田暴露于环境系统中, 接纳着各个环境介质中传递来的物质。据北京近年来的监测统计<sup>1)</sup>, 城区降落到地面的大气降尘, 直径大于10微米的有42万吨, 其中地面扬尘、工业和民用物各占1/3。每年降尘量为200公斤每亩。污染区降尘中的重金属含量, 汞是0.97毫克每公斤, 镉是1.59毫克每公斤, 铅是50.86毫克每公斤, 铜是42.64毫克每公斤, 锌是642.15毫克每公斤。每年通过大气降尘带入农田的重金属量, 计算结果列于表4。

表4 大气降尘带入的重金属量  
Input amount of heavy metals from dust

项 目 元 素	总 输 入 量 (公斤每年)	单位面积输入量 (克每亩·年)
Hg	2.1	0.184
Cd	3.63	0.318
Pb	116.07	10.17
Cu	97.35	8.53
Zn	1465.77	128.43

#### (五) 随农作物收获带出农田的重金属量

农田生态系统受到重金属污染, 农作物的各个器官对污染物都有一定的吸收和累积能力, 一般都是根>茎叶>籽粒, 随着农作物的收获, 累积在植物体内的重金属成为农田重金属的主要输出项目。高碑店地区1980—82年小麦平均亩产297.9公斤, 茎秆每亩320公斤, 水稻亩产281.2公斤, 稻草每亩658公斤, 蔬菜亩产759.1公斤, 按照历年作物播种面积, 计算出随农作物收获带出的重金属量, 结果列入表5。

表5 农作物重金属含量和重金属输出量  
Output amount and contents of heavy metals in crops

项目 元素	农作物重金属含量(毫克每公斤)					稻麦输出 量 (公斤)	蔬菜输出 量 (公斤)	全区总输出量 (公斤每年)	单位面积输出量 (克每亩·年)
	小麦籽粒	小麦茎叶	水稻籽粒	水稻茎叶	大白菜叶				
Hg	0.010	0.103	0.016	0.163	0.083	1.29	0.84	2.12	0.19
Cd	0.026	0.130	0.014	0.042	0.379	0.71	3.74	4.44	0.39
Pb	0.011	0.572	0.014	0.588	0.370	5.04	3.73	8.77	0.37
Cu	26.74	80.22	6.53	26.12	15.70	398.3	158.4	556.6	48.77
Zn	30.23	15.12	12.50	50.00	50.84	438.4	512.7	951.1	83.34
As	0.073	19.56	0.193	51.72	0.311	352.1	3.14	385.3	31.13
Cr	0.25	1.50	0.023	14.4	1.13	81.55	11.38	98.93	8.67
Ni	0.229	0.229	0.314	0.314	1.150	3.81	11.60	15.40	1.35

#### (六) 地表径流输出的重金属量

重金属可以以各种形态随地表径流迁移。通过污染农田人工降雨模拟试验, 测定了地表

1) 北京东南郊环境污染调查及防治途径的研究(报告集)(1976—1980年)。

径流系数, 大田为0.08, 园田为0.18, 径流泥沙含量大田为0.185克每升, 园田为0.145克每升。根据1980-82年平均降雨量和地表径流重金属含量, 计算出随地表径流输出的重金属量, 列于表6。

表6 农田径流重金属含量与输出量  
Output amount and contents of heavy metals in surface runoff

项目 元素	小 麦 地			园 田 地			区域总输出 (克每年)	单位面积 输出(毫克 每亩·年)
	径流含量 (微克每升)	泥沙含量 (毫克每公斤)	输出量 (克)	径流含量 (微克每升)	泥沙含量 (毫克每公斤)	输出量 (克)		
Hg	痕量	痕量	痕量	痕量	痕量	痕量	—	—
Cd	0.29	2.09	0.14	0.45	1.89	0.05	0.19	0.017
Pb	痕量	92.7	3.65	痕量	91.9	0.92	4.57	0.04
Cu	8.03	181.5	9.17	7.93	99.7	1.54	10.71	0.94
Zn	59.0	1154.7	58.03	19.8	1285.0	14.19	72.2	6.33
As	8.4	—	1.79	9.8	—	0.68	2.47	0.22
Cr	痕量	痕量	痕量	痕量	痕量	痕量	—	—
Ni	1.5	76.0	3.31	1.15	64.5	0.73	4.04	0.35

根据上述输入和输出各项参数的研究结果, 代入前节选择的模式中, 计算结果列入表7。

表7 农田重金属的输入和输出  
Input and output of heavy metals in the ecosystem of cultivated fields

项目 元素	输入 (公斤)	输出 (公斤)	残 留	
			(公斤)	(%)
Hg	412.77	2.12	+410.65	99.48
Cd	181.15	4.44	+176.71	97.55
Pb	1986.04	8.78	+1977.27	99.56
Cu	5206.79	556.63	+4650.16	89.31
Zn	8607.94	951.18	+7656.76	92.46
As	413.58	355.27	+58.31	14.10
Cr	3305.05	98.93	+3206.12	97.01
Ni	76.91	15.40	+61.51	80.00

高碑店地区农田生态系统中重金属输入和输出的研究结果表明:

1. 该地区农田目前处于重金属积累状态, 其中以汞、铅、镉、铬残留量较高, 锌、铜次之, 砷和镍较低。

2. 农田中的重金属, 汞、镉绝大多数(97—99%)从污泥中来, 92%的砷由污灌水中来, 铜、锌、铬大部分来自污泥, 但污水灌溉提供的量(15—26%)也不应忽视, 锌和铅从大气降水和降尘中输入的量比其他元素高, 占输入总量的5—11%。说明汞和镉多以固态输入, 砷多以可溶态输入, 部分的铅和锌由大气中来。输出部分由农作物带出农田, 地表径流的流失量与输入总量相比是微不足道的。

3. 研究结果表明, 单位面积污泥输入量恰恰接近土壤中每年残留累积量, 尤其是

汞、镉两种污染物,若要改变该地区污染状况,不用污泥施肥是一项决定性的措施,降低灌溉水中重金属含量也是值得重视的。

4. 重金属随农作物的收获是从农田输出的主要形式,占输出总量的95%以上,由籽粒带出农田的部分是很微小的,因此在控制施用污泥后,可以通过增加植物地上部分输出量,促使农田污染物由输入大于输出,逐步改变成为输出大于输入,在这种状态下,利用污水灌溉农田是可行的。

### 参 考 文 献

- (1) A.N.斯特拉勒等: 环境科学导论, 科学出版社, 1981年。
- (2) 小流域暴雨径流研究组著: 小流域暴雨洪峰流量计算, 科学出版社, 1978年。
- (3) P. Duvigneaud, S. Denaeyer-De Smet. Productivity of world Ecosystems, 1975, P 133-153.
- (4) G. W. Cooke. In Transition from Extensive to Intensive Agriculture with Fertilization, Int. potash Inst. proc. V colloq. Berne, Switzerland, 1969.

## ACCUMULATION AND CIRCULATION OF HEAVY METALS IN THE ECOSYSTEM OF CULTIVATED FIELDS

Mu Congru Xia Zenglu Li Senzhao

Meag Weiqi Shen Ruizhen He Ruizhen

(Institute of Geography, Academia Sinica)

### Abstract

Through the investigation of the polluted cultivated field in the eastern suburbs of Beijing Gao Beidian area, accumulation and circulation of heavy metals in cultivated ecosystem have been researched, and the output and input of heavy metals have been counted. The results are as follows:

1. This area is still in the state of heavy metals accumulation.
2. 97%-99% of the total input amount of Hg and Cd comes from sludge. 92% of the total input amount of As comes from the irrigation sewage. Most of the input amount of Cu, Zn, Cr comes from the sludge, but it is also important that the amount (15-26%) comes from the sewage. Input amount of Pb, Zn from the rain and dust is more than that of the other elements. Output factors are plants and surface runoff. The output amount is mainly from leaves and stem. The output amount of surface runoff are much less than the total input amount.
3. Input amount of the sludge is nearly equal to the accumulation of soil every year, especially Hg and Cd. In order to prevent further developing of polluted environment of cultivated fields, it is necessary that sludge is prohibited to be used.
4. When sludge is forbidden to be used, it is available to irrigate the fields with sewage in which the heavy metal content is already decreased.