

砷对农田生态系统污染效应的 的试验研究*

杨居荣 葛家瑞

(北京师范大学环境科学研究所)

摘 要

本文通过盆栽及模拟试验,研究了砷对农田生态系统中农作物、土壤微生物、土壤动物的污染效应。结果表明,砷对农作物生长发育有明显不良影响,浓度过高,产量下降并造成农作物体内砷的残留累积;不同种类农作物对砷的敏感程度不同,以对水稻的危害最严重,其次为春小麦、玉米;不同形态砷化物的污染效应有显著差别,亚砷酸盐的毒性最强,砷酸盐次之,硫化砷的影响最小。

砷对土壤微生物具有明显抑制作用,使土壤细菌总数降低,投加亚砷酸钠 5 ppm, 砷酸氢二钠 10 ppm 时,细菌总数开始减少。对土壤固氮菌、解磷细菌、纤维分解细菌等土壤有益微生物有明显抑制作用,使存活率下降。砷污染土壤活性降低,土壤呼吸强度下降。

砷污染影响土壤中蚯蚓的数量与分布,当砷在 100—300 ppm 时,可使蚯蚓致死,死亡率达 50—80%。砷在蚯蚓体内明显富集,富集系数为 1.32—7.44。

农田生态系统是一个单种栽培的人工生态系统,和自然生态系统相比,其结构较简单,农作物种群生长整齐,生活周期一致,对于光、水、营养物质和空间等各种环境条件要求相同,竞争趋向最大化。同时,由于人为集约经营,高水肥条件,施用农药及除莠剂等经营措施,都影响到农田生态系统的稳定性。所以农田生态系统的稳定性差,自我调节能力低,对环境的变化比较敏感。随着污染问题的日渐突出,各种污染物对农田生态系统污染效应的研究受到普遍关注。

砷是重要的环境污染物之一。关于砷对农田生态系统的污染危害问题,国内外开展了一些研究(小山雄生, 1975、1976; 渡边, 1978; 洪谷政夫, 1972; 山上良明, 1974), 但以侧重于砷对农作物的危害、农作物对砷的吸收与累积规律方面的研究为多。关于砷对系统中其他生物组分, 如对土壤动物、土壤微生物的影响研究较少, 而这些组分在系统中执行着各自的功能, 它们的变化都有可能整个系统的变化。为较全面的阐明砷对农田生态系统的污染效应, 我们通过向系统中投加砷的试验, 研究了不同形态砷化物对农田生态系统的主要生物组分—农作物、土壤微生物、土壤动物的污染危害, 以及砷在系统中的迁移、累积规律。

一、试验方法

1. 砷对农作物的影响

采用盆栽土培方法。试验土壤为草甸褐土, pH 值为 8.15, 有机质含量为 3.31%。将不

* 参加土壤微生物试验工作的有北京市农科院土肥所张美庆、周薇同志。蚯蚓的鉴定工作得到北京教育学院曾中平同志的帮助, 特此致谢。

同形态的砷化物均匀投加于土壤中, 投加形态及浓度分别为: 砷酸氢二钠和亚砷酸钠, 浓度均为10、20、40、60、100、200、300、500 ppm (以As计)、硫化砷浓度为20、60、100、300、500、800 ppm (以As计)。每种处理重复3次, 并设对照组, 在相同的栽培管理条件下, 调查研究了砷对春小麦、玉米、萝卜等农作物生长发育的影响, 以及砷在土壤-农作物系统中的传输。

2. 砷对土壤微生物的影响

以上述盆栽土壤为材料, 调查砷对土壤细菌总数的影响, 采用稀释平板法计算细菌总数。

采用纯培养方法, 调查了砷对几种土壤有益微生物的影响。试验微生物有固氮菌: 花生根瘤菌 (*Rhizobium arachis*)、大豆根瘤菌 (*Rhizobium japonicum*)、紫云英根瘤菌 (*Rhizobium astragali*)、圆褐固氮菌 (*Azotobacter chroococcum*)、含脂刚螺菌 (*Spirillum Lipofeum*); 解磷细菌: 大芽孢杆菌 (*Bacillus megatherium*)、枯草杆菌 (*Bacillus subtilis*); 纤维分解菌: 木霉 (*Trichoderma sp.*)。采用选择性培养基, 其中固氮菌为 Ashby 无氮培养基, 根瘤菌为根瘤菌培养基, 含脂刚螺菌为 Döbereiner 无氮培养基, 大芽孢杆菌和木霉为马铃薯琼脂培养基, 枯草杆菌为肉汁蛋白胨培养基。将砷加到溶化了的培养基中, 使成不同浓度, 平板凝固后, 用等量一定稀释度的菌悬液涂抹平板, 在30℃培养箱内培养3—4日后观察砷对细菌菌落数的影响。

土壤呼吸强度的测定采用气相色谱法, 测定单位土壤、单位时间内CO₂的产量。

3. 砷对土壤动物(蚯蚓)的影响

采用盆钵养殖的方法, 称取相同重量的土壤(草甸褐土混以适量马粪), 投加砷使其成为不同浓度梯度, 取成年具环带的威廉环毛蚓 (*Pheretima guillelmi*)。每盆投入30条, 进行人工养殖, 观察蚯蚓的活动情况及存活率, 并测定蚯蚓体内砷的残留量。

土壤总砷的测定方法为Ag-DDC法。有效态砷的测定方法为碳酸氢钠浸提, Ag-DDC法测定。

二、结果与讨论

1. 砷对农作物的污染效应及砷在土壤-农作物系统的迁移、累积

1) 土壤砷污染对农作物的影响 国内外文献(小山雄生, 1976; 井田明等, 1976; 山上良明等, 1974; 陈忠余等, 1979)报道了无机砷化物对水稻的危害。本文以北京东南郊草甸褐土为背景条件, 分别进行了3种形态砷化物对春小麦、玉米、萝卜等农作物的毒性试验(砷对水稻的危害研究, 北京师范大学1979年已完成)。现将试验结果示于表1—3, 表中各项数据取3次重复试验结果的平均值。

结果表明, 土壤砷污染后对春小麦、玉米、萝卜的生长发育均有不良影响, 浓度较低时(如砷酸氢二钠10ppm)影响不明显或略有刺激作用。随着土壤砷浓度的增高, 危害逐渐显著, 农作物产量明显降低。表1—3的结果看出, 随着土壤中砷浓度的增加, 春小麦的产量、玉米苗重及萝卜产量均明显减少, 二者呈显著负相关关系, 其相关式为:

表1 砷对春小麦生长发育的影响 (收获期调查)

处 理 (ppm)	项 目	株 高 (厘米)	茎、叶重 (克/盆)	生物量 (克/盆)	籽粒重量 (克/盆)	相对产量 (%)	千粒重 (克)
对 照		61.2	14.8	38.2	19.1	100	38.5
砷酸氢二钠	10	68.0	18.6	47.7	22.9	119.9	37.0
	20	67.5	17.3	43.0	19.7	103.1	38.3
	40	65.8	13.9	34.5	15.6	81.7	39.4
	60	67.6	12.5	30.5	13.4	70.2	40.6
	100	61.3	8.8	22.9	11.4	59.7	39.5
	200	44.5	4.0	8.1	2.9	15.2	29.0
	300	34.4	2.6	4.1	1.0	5.2	20.0
	500	39.2	3.9	6.2	1.4	7.3	21.3
亚砷酸钠	10	58.0	13.4	35.6	18.8	98.4	43.8
	20	60.1	14.7	34.4	17.7	92.7	38.1
	40	62.5	14.4	36.5	15.7	82.2	39.2
	60	61.8	12.0	28.1	12.6	66.0	38.6
	100	50.9	6.9	17.5	8.6	45.0	37.0
	200	39.4	3.6	7.7	2.9	15.2	28.0
	300	29.0	1.7	/	/	/	/
硫化砷	20	66.4	16.2	40.3	19.7	103.1	38.7
	60	67.8	16.6	41.1	20.3	106.3	39.2
	100	67.9	16.5	39.5	19.8	103.7	38.5
	300	64.1	13.9	34.9	17.9	93.7	38.0
	500	60.2	11.8	27.4	13.6	71.2	36.0
	800	59.1	11.4	21.4	13.1	68.6	38.0

表2 砷对萝卜产量的影响

处 理 项 目	对 照	砷酸氢二钠 (ppm)							亚砷酸钠 (ppm)							硫化砷 (ppm)						
		10	20	40	60	100	200	300	10	20	40	60	100	200	300	20	40	60	100	300	500	
萝卜鲜重 (克/个)	136.0	136.5	131.0	133.6	126.5	90.3	0	0	125.6	124.0	116.5	99.3	58.0	2.5	1.6	135.1	139.5	84.5	9.0	0	0	
相对产量 (%)	100	100.4	96.3	98.2	93.0	66.4	0	0	92.4	91.2	85.7	73.0	42.6	1.8	1.2	99.3	102.6	62.1	6.6	0	0	

表3 砷对玉米苗期生长发育的影响

处理(ppm)	项 目	株 高 (厘米)	叶 片 数 (个/株)	叶 长 (厘米)	根 长 (厘米)	苗 重 (克/盆)
	对 照	24.98	6.0	18.2	31.9	47.0
砷酸氢二钠	10	24.34	5.8	17.18	35.3	48.6
	20	25.58	5.6	19.14	29.3	46.5
	40	25.54	5.4	18.44	32.8	47.2
	60	23.78	5.2	17.30	34.9	45.8
	100	21.48	4.8	15.76	29.9	27.9
	200	17.06	4.6	12.28	15.8	19.9
	300	17.46	4.4	12.00	10.9	17.6
亚砷酸钠	10	22.50	5.6	17.12	20.3	38.6
	20	24.66	6.0	18.00	22.7	37.4
	40	23.66	5.4	18.68	20.1	37.1
	60	20.34	5.4	14.86	19.4	34.4
	100	19.18	4.8	12.98	18.5	32.1
	200	14.76	5.0	10.62	19.2	22.5
	300	12.14	4.0	8.50	5.3	10.0
硫化砷	20	24.54	6.0	19.30	30.3	53.8
	60	25.36	6.0	19.18	29.5	51.4
	100	20.08	5.8	19.36	26.6	48.2
	300	25.64	5.4	18.62	26.1	38.1
	500	23.42	5.0	16.54	23.1	37.5

砷化物形态	与春小麦产量的关系	与玉米苗鲜重的关系	与萝卜产量的关系
砷酸氢二钠	$r = -0.878$ $y = 17.88X - 0.044$	$r = -0.935$ $y = 48.31X - 0.118$	$r = -0.959$ $y = 143.67X - 0.54$
亚砷酸钠	$r = -0.985$ $y = 18.860X - 0.085$	$r = -0.977$ $y = 41.907X - 0.104$	$r = -0.957$ $y = 128.40X - 0.50$
硫化砷	$r = -0.945$ $y = 20.068X - 0.010$	$r = -0.885$ $y = 50.986X - 0.031$	$r = -0.895$ $y = 140.22X - 0.80$

若以农作物产量减少约10%为显著受害的标志,不同形态砷化物使农作物显著受害的浓度有一定差别,如使春小麦明显受害的浓度:砷酸氢二钠为20—40ppm,亚砷酸钠为20ppm,硫化砷为300ppm。使玉米明显受害的浓度:三种砷化物分别为60—100ppm、20ppm、100ppm。使萝卜明显减产的三种砷化物浓度分别为60ppm、20ppm、60ppm。据北京师范大学1979年工作,使水稻明显受害的浓度:砷酸氢二钠和亚砷酸钠为10ppm,硫化砷为90ppm。

砷污染对水稻、小麦等粮食作物的影响主要是抑制其营养生长,单株分蘖数明显降低,如土壤中砷酸氢二钠为40ppm时,春小麦单株分蘖数仅为对照的56.7%,水稻仅为对照的67.8%,有效穗数明显减少,从而产量降低。随着土壤砷浓度的增高,植株低矮、功能叶片生长受阻、叶片黄化、卷曲,根系发黑,植株生物量明显减少。此外,籽粒的饱满度降

低,空秕粒率增高,千粒重减少。

2) 农作物体内砷的残留 砷是植物累积性元素,农作物可以从土壤中吸收和累积砷,表4所示为在不同浓度砷污染土壤上生长的水稻、春小麦、玉米(苗期)、萝卜体内砷的残留量。

表4 砷在水稻、春小麦、玉米、萝卜中的残留(毫克/公斤)

处 理 (ppm)		项 目	水 稻			春 小 麦			玉 米		萝 卜
			根	茎 叶	籽 粒	根	茎 叶	籽 粒	根	茎 叶	可食部分
对照			29.80	0.70	0.07	3.13	1.83	0.05	2.95	1.25	0.99
砷酸氢二钠	10	100.00	6.10	0.14	8.17	3.63	0.09	21.85	3.90	2.17	
	15	124.00	8.30	0.17	—	—	—	—	—	—	
	20	—	—	—	9.32	5.73	0.14	39.00	5.11	3.54	
	40	480.00	11.40	0.21	14.36	7.36	0.23	44.60	6.14	6.88	
	60	668.00	16.40	0.28	19.47	10.10	0.23	87.80	12.5	13.27	
	100	872.00	19.40	0.55	23.30	14.47	0.32	112.71	14.5	19.47	
	200	—	—	—	25.20	25.55	0.50	178.18	27.5	—	
	300	—	—	—	45.30	27.30	1.60	199.15	—	—	
亚砷酸钠	10	101.60	5.60	0.16	8.30	2.86	0.26	29.60	2.80	2.27	
	20	—	—	—	12.81	4.46	—	42.80	5.50	3.46	
	40	420.00	9.40	0.21	17.04	7.50	0.28	64.60	6.90	5.05	
	60	—	—	—	25.18	10.86	0.53	90.50	15.60	19.36	
	100	803.00	11.30	0.31	33.85	15.46	0.73	190.87	17.60	23.63	
	200	—	—	—	66.10	23.36	0.95	241.60	—	—	
	300	—	—	—	60.20	25.56	—	344.10	—	—	
硫化砷	10	25.00	2.20	0.17	—	—	—	—	—	—	
	20	—	—	—	6.94	1.05	0.07	6.50	1.50	1.39	
	40	60.80	7.60	0.17	—	—	—	—	—	8.34	
	60	—	—	—	11.69	2.05	0.18	16.70	1.10	15.22	
	100	60.80	6.80	0.16	18.70	3.23	0.26	19.60	2.75	17.18	
	300	—	—	—	43.55	3.85	0.39	55.30	4.75	—	
	500	374.00	16.00	0.25	68.30	1.25	—	118.6	25.5	—	

结果表明,土壤受砷污染后,在其上生长的水稻、春小麦、玉米、萝卜中均有不同程度的砷累积,土壤中砷的含量越高,残留累积量也相应增多(表4)。

结果还表明,不同种类农作物对砷的吸收累积能力有较大差别。从4种作物根部中含砷量比较结果看,当砷酸氢二钠为40ppm时,水稻根部累积砷量为480ppm,小麦为14.36ppm,玉米为44.6ppm,萝卜(可食部分)为6.88ppm。不同作物之间可相差数十倍。

施加于土壤中砷的形态不同,农作物的吸收累积量也有明显差异。以亚砷酸钠的形态在植物体内累积量最高,其次为砷酸氢二钠,硫化砷的吸收累积量最低,这与前述砷对农作物生长发育的影响呈现相同的影响趋势。

进入到农作物体内的砷以根部为最高,茎叶次之,籽粒中最少。砷在不同作物体内的迁移能力也有差别,在水稻体内,砷从根部向地上部及籽粒中的迁移能力明显低于小麦,水稻根部含砷量可为籽粒的数百至数千倍,而小麦根部仅为籽粒的数十倍。这与不同农作物的生

理特性有关，其机制尚待研究。

当土壤中砷污染已明显对粮食作物生长发育产生不良影响时，农作物可食部分的含砷量并未超过食品卫生标准（0.75ppm），可见砷对农作物的主要影响在于危害生长发育，使产量降低，给人类造成经济上的损失。对蔬菜类作物，如对萝卜的影响，除使产量降低外，萝卜中的含砷量也较高，当土壤砷浓度为 10ppm 时，萝卜含砷量已超过食品卫生标准，特别是人类对蔬菜的食用量较大，对此应引起重视。

3) 土壤有效态砷的含量及对农作物的危害 表 1—4 的结果表明，不同形态砷化物对农作物的影响有很大差别，若以农作物减产百分数作为受害程度指标，当农作物受害程度大体相等的情况下，土壤中各种形态砷的浓度有一定差别，以春小麦为例，使春小麦减产约 10% 时，土壤中亚砷酸钠的浓度约为 20ppm，而硫化砷则高达 300ppm，可为前者的 15 倍。可见从土壤中总砷含量的高低难以评价对农作物的危害，关键是有效态砷含量的多寡。近年来，许多研究者开始研究土壤可给态砷与作物吸收的关系。小山雄生等（1975）采用 8 种酸、盐类溶液对土壤可溶性砷进行浸提，并认为 1 NHCl 法、TRUOG 法、BRAY P-1 法、

表5 春小麦收获土中有效态砷的含量 (ppm)

砷化物		有效态砷	有效态砷占总砷的百分数 (%)
对 照		0.27	2.95
砷酸氢二钠	10	0.82	5.27
	20	1.48	6.52
	40	3.35	9.72
	60	4.65	9.71
	100	12.30	21.43
	200	26.80	25.99
	300	36.00	27.85
亚砷酸钠	10	0.90	5.39
	20	1.62	8.51
	40	3.95	17.03
	60	5.95	12.54
	100	18.89	37.46
	200	23.00	23.75
	300	39.50	24.79
硫化砷	20	0.42	1.87
	40	—	—
	60	0.67	1.46
	100	0.84	1.15
	300	1.28	0.59
	500	1.76	0.45
	800	2.93	0.89

2.5% 醋酸法均有较好的浸提效果，1 NHCl 法浸提砷与水稻生育危害相关性较好。我们根据砷与磷性质相似的特点，采用 0.5M NaHCO₃ 浸提作为可给态砷，由于 NaHCO₃ 溶液与土

壤作用时,除水溶性砷进入提取液外,被土壤胶体以阴离子形式吸附的砷酸根和亚砷酸根离子也可为 HCO_3^- 代换进入提取液中,这些形态对农作物来说都是有效的。现将春小麦盆栽收获土的有效态砷测定结果示于表 5。

结果看出,投加不同形态砷化物,土壤中有效态砷的含量差别较大。其中,硫化砷处理者,土壤有效态砷的含量最低,占总砷的比例最小,若以有效态砷的含量为指标评价对农作物的危害,当其含量在 1.5—4.0ppm 时,春小麦产量约减少 10%,这对 3 种砷化物均较适宜。对土壤有效态砷含量与春小麦产量和籽粒残留量的关系作相关性检验,得到如下关系式: $r = -0.926$, $y = 18.18X - 0.546$, ($n = 20$); $r = 0.708$, $y = 0.162X + 0.014$ ($n = 12$)。有效态砷浓度与春小麦产量呈负相关关系,与籽粒残留量呈正相关关系,由此认为在北方偏碱性土壤中,以碳酸氢钠浸提砷量评价土壤砷污染状况更适宜。

2. 砷对土壤微生物的影响

1) 砷对土壤细菌总数的影响 土壤微生物是农田生态系统的分解者,它们个体小、数量大,和其他因素一起决定着土壤的性质。它们对土壤肥力的形成、营养元素的转化等方面起着重要作用。土壤微生物的变化可直接影响土壤的质量,是土壤质量优劣的重要标志之一。

我们对春小麦盆栽试验土壤中的细菌总数进行了测定,结果如表 6。表明土壤受砷污染

表6 砷污染土壤中的细菌数 ($\times 10^4$ /克土)

亚砷酸钠 (ppm)	细 菌 数	砷酸氢二钠 (ppm)	细 菌 数	硫化砷 (ppm)	细 菌 数
0	309	0	309	0	309
10	205	10	202.5	10	—
20	—	20	—	20	213
40	183.5	40	187	40	—
60	172	60	182	60	196
100	163	100	169	100	187
300	155	300	158	300	167

后,土壤细菌总数降低,并随土壤砷浓度的增加而加剧。若以细菌数降低20%为明显受抑界限,砷酸氢二钠和亚砷酸钠10ppm时已明显抑制细菌的生存,硫化砷20ppm时也使细菌总数明显降低。由此表明在农田生态系统中微生物对砷的敏感性比农作物更明显,在不足以使农作物明显受害的浓度下,土壤微生物的数量已显著降低。因此,在评价土壤砷污染状况时,不仅要看到对农作物的影响,土壤微生物的变化也是重要的生态指标。

2) 砷对几种有益土壤微生物的影响 土壤微生物的种类很多,它们形态不同,功能各异,而且要求不同的生活条件,对环境因子的适应与敏感程度不同。为探讨砷污染对土壤供肥能力的影响,我们选择了对土壤肥力因素影响较大的具有固氮功能、解磷功能和纤维分解功能的土壤微生物作试验材料,通过纯培养方法研究了砷的危害。

表 7 所示为砷污染条件下,几种土壤微生物的存活率。结果表明,不同形态砷化物对上

表7 不同浓度砷污染条件下几种土壤微生物的存活率 (%)

砷化物	浓度 (ppm)	花生根 瘤 菌	大豆根 瘤 菌	紫云英 根瘤菌	圆褐固 氮 菌	含脂刚 螺 菌	大芽孢 杆 菌	枯草 杆菌	木霉*
对照	0	100	100	100	100	100	100	100	100
砷酸氢二钠	10	—	91.7	105	81	98	4.5	62.3	50—70
	20	57	—	—	—	—	—	—	—
	50	—	91.9	73.7	63.7	90.8	0	63.7	0
	60	56.5	—	—	—	—	—	—	—
	100	51.6	71.9	61.4	80.8	58.4	0	2.9	0
	300	—	74.1	19.4	64.7	59.2	0	0	0
亚砷酸钠	5	—	82.3	37	53.8	65.6	95.6	67.0	70—80
	10	—	66.2	14.3	53.7	72.6	79.0	18.3	60—70
	20	0.08	—	—	—	62.6	51.6	12.1	50—60
	50	0	0.63	0	8.8	51.9	48.4	0	50
	100	0	4.9	0	12.1	45.9	0	0	0

* 木霉为孢子萌发数

述几种固氮菌、解磷细菌和纤维分解菌均有抑制作用,随着砷浓度的递增而减少。本试验条件下,砷酸氢二钠为10ppm,亚砷酸钠为5ppm时各种细菌数已开始减少。花生根瘤菌、紫云英根瘤菌、枯草杆菌在亚砷酸钠50ppm,大芽孢杆菌在砷酸氢二钠50ppm,枯草杆菌在砷酸氢二钠300ppm时已不能存活,菌落数为0。

不同形态砷化物对几种有益土壤微生物的影响不同,在所选用的微生物中,除砷酸氢二钠对大芽孢杆菌及木霉的抑制作用较强外,均以亚砷酸钠的抑制作用明显。

不同细菌种类对砷化物的敏感程度也有差别,木霉和大芽孢杆菌对砷酸氢二钠最敏感,而大豆根瘤菌和含脂刚螺菌的耐性较高;对亚砷酸钠来说,花生根瘤菌、紫云英根瘤菌最敏感,而含脂刚螺菌的耐性较强。

3) 砷对土壤呼吸作用的影响 土壤呼吸作用是衡量土壤微生物活性的常用指标之一。

表8为小麦盆栽土壤的呼吸强度测定结果,可以看出,土壤受高浓度砷污染后呼吸强度

表8 砷污染土壤的呼吸强度 (CO₂ 微升/克/40小时)

砷 浓 度 (ppm)		0	10	20	40	60	100	200	300	500
CO ₂ 产量	A	0.11	0.08	0.09	0.09	0.10	0.08	0.09	0.08	0.07
	B	0.11	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	—
	C	0.11	—	0.08	—	0.08	0.09	—	0.08	—

注: A: 砷化物为砷酸氢二钠; B: 砷化物为亚砷酸钠; C: 砷化物为硫化砷

降低。砷化物形态不同,对土壤呼吸强度的影响有一定差别,以亚砷酸钠的影响较明显,硫化砷的影响较小,这与前述对土壤细菌总数的影响结果一致。将污染土壤中细菌总数的变化与CO₂产量的关系作相关性检验,二者呈显著正相关关系,相关系数分别为 $r = 0.893$ (0.01%显著), $r = 0.778$ (0.01%显著), $r = 0.770$ (0.05%显著)。由此推断,土壤呼吸强度可在一定程度上反映土壤砷污染状况,但需指出,田间土壤的呼吸强度不仅包括微生物的作

用,而且包括土壤动物及植物地下部分所产生的 CO_2 ,因此,土壤呼吸强度通常是土壤生物群的综合标志,可以间接地反映土壤的污染与活性。

3. 砷对土壤动物(蚯蚓)的影响

土壤动物的活动对维持农田土壤的正常功能起重要作用。以终年生活在土壤中的蚯蚓为例,它们对土壤空气的流动、水分的渗透以及土壤肥力的形成起着重要作用。蚯蚓又是自然界食物链的一环,是各种小哺乳动物和鸟类的食物来源,因此,砷污染对蚯蚓的影响,不仅限于蚯蚓本身,还影响到土壤的结构与功能。由于污染物在蚯蚓体内的累积,蚯蚓成为传播污染物的媒介,通过食物链进行传递,从而使污染影响范围扩大。

在不同浓度砷污染土壤中养殖蚯蚓的试验结果表明,当土壤砷浓度为60ppm时,蚯蚓开始逃逸,当浓度为100ppm时已引起死亡,与此同时,蚯蚓体内的砷明显富集。表9所示为

表9 砷污染对蚯蚓的影响及其在体内的富集

项 目 \ 处 理	对照	砷酸氢二钠 (ppm)				亚砷酸钠 (ppm)			
		20	60	100	300	20	60	100	300
对蚯蚓的影响	正常	正常	正常	逃逸	死亡60—70%	正常	逃逸 生长阻滞	死亡50%	死亡70—80%
蚯蚓体内残留量(ppm)	19.85	224.5	264.0	391.5*	410.0*	127.7	338.8	353.8	300.0*
富集系数	1.89	7.36	7.44	3.54	1.32	4.18	4.80	3.20	0.99
蚯蚓粪中残留量(ppm)	10.6	19.1	94.78	—	—	18.55	33.75	—	—
富集系数	1.1	0.64	1.36	—	—	0.63	0.48	—	—

* 本处理使蚯蚓致死,养殖时间较其他处理短。

在砷污染土壤养殖的蚯蚓体内及粪便中砷的富集量,看出蚯蚓体内的砷明显富集,富集系数为1.3—7.4,而蚓粪中砷的富集不明显。本试验仅为养殖一个月的结果,若养殖时间加长或整个生育期均生长在砷污染土壤里,富集系数将更大。由此可见,蚯蚓的存活数量及体内砷的富集量可在一定程度上反映农田土壤砷污染的状况,是指示农田生态系统受砷污染的生物指标之一。

4. 农田生态系统的砷容量问题¹⁾

上述试验结果表明,砷对构成农田生态系统的主要生物组分——农作物、土壤微生物、土壤动物均有明显不良影响,其影响程度不同,出现危害的临界浓度有一定差异。由于各组分在系统中执行着不同功能,相互依存和制约,这样,砷污染所引起的系统内任何局部因素的变化都可能导致整个系统的改变。因此在研究砷对农田生态系统的污染效应时,仅以其中某个组分的变化为指标是不全面的,应较全面的研究砷对系统中主要组分的影响及其相互间的关系,尽可能将各因素之间的因果关系加以归纳和数量化,并对系统的砷容量进行估测。为此,我们尝试采用图论工具,建立农田生态系统的结构模型,对系统的砷容量问题进行探讨。

选择系统中的几个主要组分,将其相互关系加以简化如图1。图中顶点①为土壤中砷的含量;②为农作物的产量;③为土壤微生物的数量(如以细菌总数代表);④为土壤中蚯蚓

1) 农田生态系统容量模型的建立、理论推导及数学运算得到牟宇翔同志的大力帮助,谨致谢意。

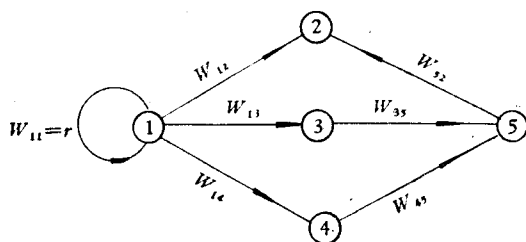


图1 农田生态系统结构模型D

的数量；⑤为土壤肥力水平（如以全 N 量表示）。因素间的影响关系用顶点间的有向线（称为弧）来表示，这就构成一个赋权有向图。各因素间的影响关系意义是：如果因素 V_i 的一个变化将直接导致 V_j 在一个单位时间间隔（以年为单位）后增加 W_{ij} 个单位（ W_{ij} 可为正值或负值）。图中权数即可取上述试验结果的回归系数或有关资料。

当土壤每年不断接受污染物输入，同时又有输出（如植物携带、渗透、地面径流、生物净化等），这样，土壤污染物含量每年都有变化，由于因素间存在相互影响关系，一个因素的变化将不断引起其他因素的改变，如砷污染物进入土壤后，可直接引起农作物减产，同时会引起土壤微生物和土壤动物存活量的改变，它们的变化又会导致土壤结构及肥力水平的改变，从而间接影响农作物的生长发育。这一过程在结构模型理论中称为“脉冲过程”，由外部原因使系统中各因素产生的变化称为“外脉冲”，在初始时刻系统因素接受的外脉冲称为“初始脉冲”，只有初始脉冲，以后不再接受外脉冲的过程称为“自主脉冲过程”。可以证明，土壤每年接受定量的外部污染的输入过程可以看作图 1 所示的结构模型 D 接受一个初始脉冲的自主脉冲过程。这样，就可以利用脉冲过程理论，求出土壤每年接受定量砷输入情况下，系统各因素的极限状态。当我们对某些因素的极限值赋予一个阈限（如以农作物减产 10% 作为阈限）时，就可以反过来计算这些因素不超过阈限时的每年向系统中定量输入污染物的最大允许量以及系统的容量（详细的理论推导及数学运算将另文发表）。利用这样的模型估算农田环境容量，考虑了污染物对系统中各组分的影响及组分间的相互关系，并将已有的（夏增禄等，1981；吴燕玉等，1981）关于土壤环境容量的等比级数模型作为一个特例包括在内。随着工作的深入，可以将所研究的组分扩大，并得到因素间更为精确的关系表达式，则能更全面的反映农田生态系统对污染物的容纳量，结构模型也可随之而发展为函数图模型。本文在这方面是初步尝试，尚待进一步研究。

三、结 语

1. 砷对农作物的生长发育有明显不良影响，严重时使产量降低。不同农作物种类对砷的敏感程度不同，以对水稻的危害最重，其次为春小麦、玉米和萝卜。不同形态砷化物的毒性不等，以亚砷酸钠的毒性最强，其次为砷酸氢二钠，硫化砷最轻。综合对各种农作物影响试验的结果，亚砷酸钠使农作物减产（约 10%）的浓度范围为 10ppm，砷酸氢二钠约 20—40 ppm。

在砷污染土壤上生长的农作物体内，砷明显累积，特别是根菜类作物（如萝卜）在生长发育未受到明显影响时，可食部分含砷量已超过食品卫生标准，应引起注意。

以 0.5MNaHCO_3 提取砷作为北方偏碱性土壤可给态砷，当土壤可给态砷含量在 1.5—4.0ppm 时，对春小麦的生长发育产生明显危害，这对 3 种砷化物均适用。

2. 砷对土壤微生物有明显抑制作用,浓度为10ppm时,小麦根际土壤细菌总数明显降低。纯培养试验结果表明,砷化物对土壤固氮菌、解磷细菌、纤维分解菌均有明显抑制作用。土壤受砷污染后,土壤呼吸作用下降,CO₂产量降低。

3. 砷污染对蚯蚓有不良影响,浓度为40—60ppm时,不利于蚯蚓的生活,有逃逸现象,100ppm时可使蚯蚓致死。蚯蚓体内的砷明显富集,富集系数为1.32—7.44。

4. 综合砷对农田生态系统各组分的影响及组分之间的相互关系,以图论为工具,建立系统的结构模型,将污染物输入引起的各因素变化视为结构模型理论中的“脉冲过程”,从而计算系统对污染物的容量,这是农田环境容量研究的新尝试。

参 考 文 献

- 陈忠余等 1979 砷对水稻生态影响的试验研究,环境科学(4):46—50。
吴燕玉等 1981 论张士灌区的重金属环境容量。生态学报1(3):275—282。
夏增禄等 1981 土壤重金属容量。中国环境科学(2):45—51。
小山雄生等 1976 土壤中的Asと水稻生育との関連に関する研究(第1报) As化合形態と水稻の生育阻害について。日本土壤肥科学雑誌 47:85—92。
1976 土壤中のAsと水稻生育との関連に関する研究(第2报)。日本土壤肥科学雑誌47:93—98。
小山雄生 1975 土壤・作物のヒ素(As)の挙動(総説)。日本土壤肥科学雑誌46:491—502。
山上良明等 1974 Asの土壤固定に関する研究。日本土壤肥料讲演要旨集,第20集126页。
井田明等 1976 水稻に対する重金属の影響(第5报)——土壤中にする砒素の存在様式と水稻ねど"の砒素吸收。日本土壤肥料讲演要旨集,第22集164页。
达山等 1974 金属化合物による土壤汚染と微生物相。日本细菌学会报15:246—270。
渡辺等 1978 重金属測定法。223—232,博友社。
浅谷政夫 1979 土壤汚染の机构と解析。38—70,产业图书株式会社。

STUDIES ON THE EFFECTS OF ARSENIC ON FARMLAND ECOSYSTEM

Yang Jurong Ge Jiaman

(Institute of Environmental Science, Beijing Normal University)

The effects of arsenic on crops, soil organisms, soil animals and soil microbes in the farmland ecosystem are described in this paper. Pot experiments show that arsenic may affect the growth of crops obviously. The production of crops decreases as the concentration of arsenic increases. The sensitivity of different crops to arsenic are different. Paddy rice is the most sensitive to it, spring wheats and maizes more sensitive. The effects of different states of arsenic are not alike either. Ortho arsenite is the most poisonous, arsenate more and arsenic sulfide less.

The activities of bacteriostasia in soil layers are obviously checked by arsenic so that the total number of soil microbes decreases. The total number of soil microbes descends when we add 5ppm of sodium arsenite and 10ppm of sodium biarsenite, which restrain the behaviour of peripheral soil bacteria, such as azotobacter, sulphate-decomposing bacteria and cellulose-decomposing bacteria (*Cellvibrio*). Their survival rate declines, the activity and respiratory rate of arsenic-polluted soil decline, too.

The number and distribution of earthworms are varied in different layers of arsenic-polluted soil. 50—80% of earthworms died off in soil with 100ppm of arsenic. Arsenic concentration within earthworm's bodies increases and its concentrated coefficient may be 1.32—7.44 .