

复合污染对水稻生长的影响

郑春荣 陈怀满

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

试验了Pb、Cd、Cu、Zn、Ni等多元素复合污染对水稻幼苗生长的影响。结果表明，Cu对株高和干物重的影响最为明显，Zn次之，Ni最小。植株中某一元素含量主要取决于该元素在土壤中的添加量及其共存元素所产生的影响。研究了离子冲量在污染总量控制中的应用。稻苗干物重与相对离子冲量的关系表明，要减少重金属对植物生长的危害，就必须尽量减少其根部毒害元素的总量。

在自然界中，单个重金属污染虽有发生，但多为伴生性或综合性，即多种金属元素同时污染的复合污染。在研究环境标准和环境容量时，单个元素的研究虽有一定的参考意义，但是它不能作为制定标准和容量的依据，否则会造成不良的环境后果。因此，研究重金属污染对植物生长的综合影响是十分必要的。关于复合污染的研究，目前国内外并不多见，因为目前还缺少表征这种综合影响存在的指标。锌当量^[1]的应用反映了以锌为基准的锌、铜、镍的毒性；最近提出的离子冲量(Ionic Impulsion)^[2,3]是一个与植物体和土壤中金属浓度有关的参数。本文报道了Pb、Cd、Cu、Zn、Ni对稻苗生长综合影响的结果。

一、材料和方法

试验采用幼苗法。容器为能装200克土的塑料盆；供试土壤为黄棕壤，采自南京下蜀，其基本性状列于表1；供试作物为水稻，品种为南京3714，生长时间四周。选用L₁₆(4⁵)正交

表1 供试土壤基本性质

pH	全氮 %	全磷 (P ₂ O ₅) %	全钾 (K ₂ O) %	有机质 %	阳离子 代换量 me/100g土	重金属元素含量(mg/kg)				
						Pb	Cd	Cu	Zn	Ni
6.6	0.035	0.10	2.26	0.49	18.0	23	0.16	28	75	40

表，每个处理设4次重复。试验因素和水平见表2。选用这些水平是基于单元素试验中它们无明显的毒害。按正交设计中各水平组合要求将土壤(200克)，肥料(0.17克尿素，0.35克KH₂PO₄)、金属化合物等充分拌匀，然后移入塑料盆中。所用重金属化合物除Pb为醋酸盐外，其余均为氯化物。土壤淹水一周后播种(用去离子水浇灌)，每盆播15粒(预先浸种催芽)，置于温室内生长(30℃左右)，4周后收获，取整株样。取样时用水洗去泥土，将根部浸入放有洗涤剂的超声洗涤槽内超声清洗5分钟，再用水冲洗，最后用去离子水淋洗，将根与地上部分分开，在70℃烘干备用。在许多情况下，由于样品制备过程中很难将附于根表面的细土粒洗净，因而根中元素含量的分析结果往往不够满意，但经上述处理后的根其测定结果良好。

表2

水稻幼苗试验的水平与因素表(mg/kg)

水平	因素				
	Pb(A)	Cd(B)	Cu(C)	Zn(D)	Ni(E)
1	0	0	0	0	0
2	125	1	10	25	5
3	250	3	25	50	10
4	500	5	50	100	20

表3

稻苗生长状况与金属元素含量(mg/kg)

处理号	因素					试验指标						
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	株高 (cm)	干物重 (mg/株)	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni
1	1	1	1	1	1	30.0	68.1	0.86	0.24	23.8	39.3	7.23
2	1	2	2	2	2	22.9	37.8	1.02	12.1	43.5	239	23.9
3	1	3	3	3	3	14.3	15.2	1.01	39.7	48.3	411	69.0
4	1	4	4	4	4	8.1	4.4	1.23	54.0	58.0	528	56.2
5	2	1	2	3	4	18.9	27.4	3.12	0.22	39.9	335	100
6	2	2	1	4	3	15.0	15.6	2.85	13.8	19.9	577	54.5
7	2	3	4	1	2	11.9	10.2	1.70	19.0	57.9	58.4	42.5
8	2	4	3	2	1	11.7	9.1	5.94	54.2	43.9	199	8.11
9	3	1	3	4	2	12.9	10.5	4.13	0.23	54.6	526	31.6
10	3	2	4	3	1	11.3	7.4	9.83	9.33	68.3	297	8.12
11	3	3	1	2	4	30.5	59.2	3.76	39.5	20.7	140	71.2
12	3	4	2	1	3	18.8	24.0	4.39	35.1	30.7	47.3	59.3
13	4	1	4	2	3	14.3	12.9	8.53	0.25	53.6	194	47.9
14	4	2	3	1	4	15.7	17.1	6.89	9.99	40.8	49.4	101
15	4	3	2	4	1	13.4	11.9	11.18	24.9	35.7	505	4.48
16	4	4	1	3	2	23.5	43.5	5.71	47.2	21.3	168	18.9

分析样品用HNO₃消化,以日立180—80原子吸收分光光度计进行重金属元素含量测定。

二、结果和讨论

(一)几种金属元素的毒性比较 在试验条件下水稻植株产量和植株中金属元素含量列于表3。表中结果为四个重复的平均值,因素与各指标的关系见图1和2。通过极差R的分析,可以区分出添加的金属元素对植物生长及植株中元素含量的影响,其大小顺序为:

- (1) 对株高而言: $Cu > Zn > Pb > Cd > Ni$;
- (2) 对干物重而言: $Cu \gg Zn > Pb > Cd \geq Ni$;
- (3) 对Pb含量而言: $Pb > Ni > Cu > Zn > Cd$;
- (4) 对Cd含量而言: $Cd \gg Zn \geq Cu > Ni \geq Pb$;
- (5) 对Cu含量而言: $Cu \gg Ni \geq Zn > Pb > Cd$;
- (6) 对Zn含量而言: $Zn \gg Pb > Cu > Ni > Cd$;
- (7) 对Ni含量而言: $Ni \gg Zn \geq Cu > Pb \geq Cd$ 。

上列顺序和图1, 2的直观分析表明, Cu对株高和干物重的影响最为明显。Cu是植物的必需元素,但过量可能引起作物的失绿现象和生长受阻,这是因为过量的Cu可抑制根毛的生长和根系的发展,从而导致大量营养元素的匮乏和诱导缺铁症。过量的Cu亦可能影响一些酶系

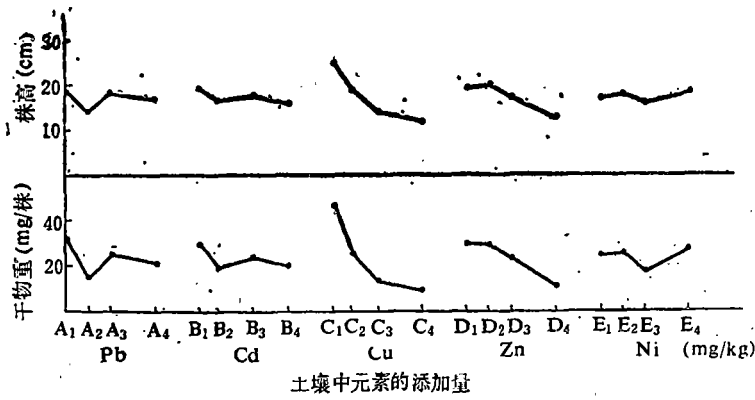


图1 水稻干物重、株高与诸金属元素的关系

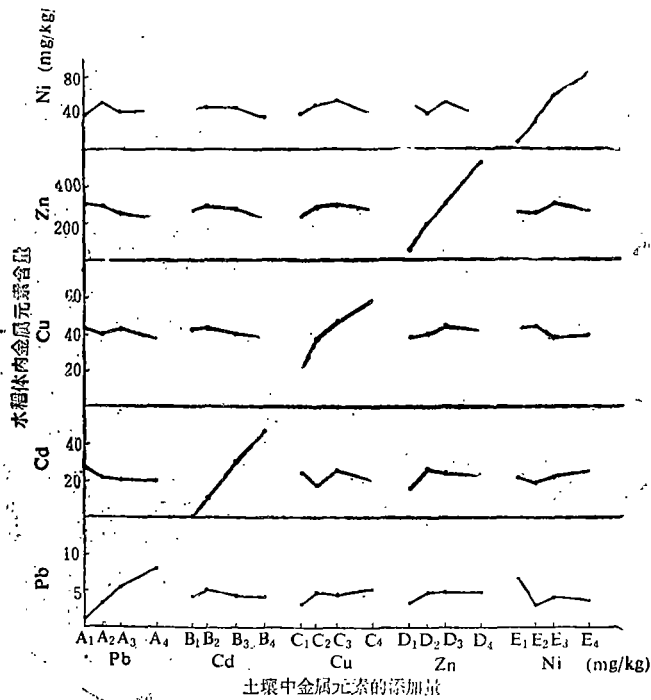


图2 水稻中诸金属元素含量与土壤中金属元素添加量的关系

统、例如 α -糖化酶等的活性，从而导致代谢失常。Zn对植物的毒害症状与Cu相似，它亦能导致P的缺乏，但Zn与Cu相比，其对水稻的毒性较低，这显然不是用量的差异，因为试验中所用的最高浓度Zn较Cu为高(Cu为0.79mM，Zn为1.53mM)，这种差异可能是由于有机络合物稳定性的不同所致，因为Cu的络合倾向极强，过量的Cu进入植物体后形成了稳定的络合物，从而破坏了植物的正常功能使其不能正常生长。Pb的用量在所有元素中最高(最大浓度为2.41mM)，但由于其移动性较差，进入根部后很快在根部淀积而失去活性，因而在试验条件下所显示的影响较Cu和Zn为小。Cd的用量极低(最大浓度仅为0.045mM)，而且在绝大多数情况下对植物并无直接的危害，甚至在高达5.7mM时水稻亦能正常生长^[4]，所以在制定标

准时主要考虑其卫生标准而较少涉及产量指标。Cd对水稻生长的影响居于Ni之前。过量的N可诱导Fe的缺乏而使叶片枯死，亦可使植物生长受阻，而在本实验条件下，Ni对水稻生长的影响略小于Cd。从图1可见，Pb，Cd，Ni对水稻的影响趋势与Cu和Zn不同，前三者有升有降，后二者主要是下降，为了检验这种影响的规律性，在干物重(y, mg/株)和诸因素(添加量, mg/kg)之间求出了多元回归方程：

$$y = 51.3383 - 0.0112(\text{Pb}) - 1.1827(\text{Cd}) - 0.6873(\text{Cu}) - 0.2051(\text{Zn}) + 0.0844(\text{Ni}) \quad (1)$$

$R^2 = 0.828 (0.05 > p > 0.01)$ 。方程(1)表明，在试验条件下，添加的所有重金属元素中除Ni外，其余都使干物重减少，而逐步回归分析表明，Cu与Zn的影响显著。

在评估污染元素对植物生长的影响时，除了考虑其产量因素外，还需要考察植株中金属元素的含量，使它们的含量控制在食品卫生标准范围内。多元回归分析表明，本实验中植株体内各重金属元素含量(mg/kg)与土壤中添加的重金属元素(mg/kg)的关系如下：

$$[\text{Pb}] = 1.4098 + 0.0138(\text{Pb}) - 0.0415(\text{Cd}) + 0.0313(\text{Cu}) + 0.0112(\text{Zn}) - 0.1152(\text{Ni}) \quad (2)$$

$$R^2 = 0.887 (p < 0.01)$$

$$[\text{Cd}] = 0.0374 - 0.0103(\text{Pb}) + 9.4501(\text{Cd}) - 0.0335(\text{Cu}) + 0.0469(\text{Zn}) + 0.2370(\text{Ni}) \quad (3)$$

$$R^2 = 0.962 (p < 0.01)$$

$$[\text{Cu}] = 30.5799 - 0.0094(\text{Pb}) - 0.9700(\text{Cd}) + 0.7108(\text{Cu}) + 0.0383(\text{Zn}) - 0.2096(\text{Ni}) \quad (4)$$

$$R^2 = 0.945 (p < 0.01)$$

$$[\text{Zn}] = 96.1682 - 0.1584(\text{Pb}) - 8.2721(\text{Cd}) + 0.5477(\text{Cu}) + 4.788(\text{Zn}) + 0.6351(\text{Ni}) \quad (5)$$

$$R^2 = 0.981 (p < 0.01)$$

$$[\text{Ni}] = 20.9871 + 0.0006(\text{Pb}) - 2.0722(\text{Cd}) - 0.0182(\text{Cu}) - 0.1162(\text{Zn}) + 3.7714(\text{Ni}) \quad (6)$$

$$R^2 = 0.933 (p < 0.01)$$

方程式(2)一(6)及逐步回归分析(本文略)表明，某一元素的含量除了受该元素在土壤中的添加量所制约外，还受共存元素的影响，虽然这种影响有大有小，但在制定标准过程中确是重要的不容忽视的因素。

(二)污染元素对植株生长的综合影响 重金属的环境污染对土壤—植物体系的影响是十分复杂的，在研究这些影响时其中最困难的部分是如何反映诸多影响因素的综合效应。吸附势和解吸势^[5]曾用来表征土壤重金属污染的综合影响及其与植物生长的关系；最近提出的离子冲量^[3]亦可作为植物和土壤污染指标，它是一个与金属浓度有关的参数，可表示为 $I = \sum C_i^{1/n}$ ，其中 C_i 为金属浓度， n 为有关金属的氧化数。在正常情况下，大量元素(Na, K, Ca, Mg等)和微量元素(Cu, Zn等)似乎是一个常数，但在污染条件下，随毒害金属含量的增加而增加，这就有可能使用这一指标来检验污染后果。

土壤中的添加元素(I_1)，植物地上部(I_2)和根(I_3)的离子冲量(mM)分别示于表3。它们与干物质产量的简单回归方程分别为：

(1) 干物质重(y_1 , %)与土壤中添加元素离子冲量(I_1)的关系 ($n = 16$):

$$y_1 = 86.1186 - 21.0790I_1 \quad r = -0.640(p < 0.01)$$

(2) 干物质重(y_2 , mg/株)与地上部离子冲量(I_2)对数值的关系($\log I_2$) ($n = 16$):

$$y_2 = 86.05 - 106.52 \log I_2 \quad r = -0.624(p < 0.01)$$

(3) 干物重(y_3 , mg/株)与根离子冲量(I_3)的关系 ($n = 14$):

$$y_3 = 73.1237 - 5.5734I_3 \quad r = -0.766(p < 0.01)$$

(4) 干物重(y_4 , mg/株)与相对离子冲量(I_3/I_2)的关系 ($n = 14$):

$$y_4 = 122.55 - 44.71(I_3/I_2) \quad r = -0.837(p < 0.01)$$

表 4 土壤中的添加元素(I_1)水稻地上部(I_2)和根(I_3)的离子冲量(mM)

处 理	I_1	I_2	I_3	处 理	I_1	I_2	I_3
1	0	1.8489	2.9692	9	3.2542	4.6834	11.5529
2	1.4013	3.7756	6.3028	10	2.9542	4.0459	10.5627
3	2.0778	5.1274	13.7481	11	2.4639	3.8628	6.8978
4	2.9183	5.5457	-	12	2.1187	3.2521	7.8957
5	2.6316	4.5281	8.7164	13	3.4715	3.7944	9.0642
6	2.5204	4.9616	10.2385	14	2.8586	3.4627	7.0907
7	2.1190	3.1616	7.7961	15	3.3502	4.5080	9.9271
8	2.4930	3.6418	-	16	2.9307	3.5633	6.3825

上述各个简单的回归方程表明,在试验条件下,干物质均随离子冲量的增加而减少,且有极显著相关。而离子冲量可以用来控制污染金属的总量。例如,在试验条件下,当以减产15%为污染控制限量时,用产量百分数与土壤中添加金属离子冲量的关系式便可求得离子冲量应小于3.4。

(三)本文扩展了离子冲量在污染总量控制中的应用 干物重与相对离子冲量关系表明,若要减少重金属对植物生长的危害,就必须尽量减少根中毒害元素的含量,而根中毒害元素的含量除与植物种类有关外,还与土壤理化性质有着十分密切的关系。离子冲量的研究应以元素“有效态”为基础,这是需要进一步研究的问题。已有研究表明,控制食物链污染的最根本途径乃是加强土壤环境保护。因而在土壤污染、环境容量、污泥污水标准等研究中,应以目前以单一元素研究转向多种元素的复合污染研究。

参 考 文 献

- [1] 张学询等,土壤中锌当量的研究。土壤环境容量研究(夏增禄主编),气象出版社,36-42页,1986。
- [2] Azpiazu, M. N. and F. Romero, Water, Air, and Soil Pollution. 28: 1-26, 1986.
- [3] Romero, F. C. Elejalde, and M. N. Azpiazu Water, Air and Soil Pollution. 34: 347-352. 1987.
- [4] Bingham, F. T. et al, J. Environ. Qual. 4: 207-211, 1975.
- [5] 陈怀满,土壤或胶体对铅的吸附势和解吸势及其应用。科学通报, 31:698-701, 1986。