

土壤中 Cd、P、Zn 含量对水稻产量和植株中矿物浓度的影响*

陈 怀 满

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

在温室中进行了剖析添加的 Cd、P、Zn 对稻谷产量、植株和稻草中的矿物含量以及糙米中 Cd 的浓度的研究。P 增加了稻谷和植株产量,而 Cd、Zn 和 P-Zn 的交互作用使其降低。稻谷和植株产量有类似的线性回归方程式,其稻谷的线性回归方程为:

$$Y = 17.24 + 0.0466(P) - 0.1850(Cd) - 0.1115(Zn) - 0.0005(P-Zn)$$

其 $R^2 = 0.97^{**}$, 式中 Y 为稻谷产量(克/株); P 为添加的 P 浓度(毫克/公斤); (Cd) 为添加的 Cd 浓度(毫克/公斤); (Zn) 为添加的 Zn 浓度(毫克/公斤); (P-Zn) 为 P 和 Zn 的交互作用。所有处理均明显地影响着稻草中矿物元素的含量。糙米中的 Cd 浓度随着添加的 Cd、P、Zn 浓度的增加而增加;但多元回归分析表明只有 Cd 的影响是显著的。糙米中 Cd 的浓度与收获时用 0.05M HCl 所提取的风干土中的 Cd 浓度有极显著相关性 ($Y = 0.75^{**}$)。对糙米中 Cd 浓度的评价进行了简要的讨论。

土壤肥力受着多种因素的影响,污染物质是其中之一。Cd、P、Zn 的添加使水稻产量和植株营养元素的含量在不同处理间有着明显的差异,稻谷中 Cd 的含量亦有不同。由于 Cd 在环境中的重要性,本文在讨论水稻产量和营养元素的同时将着重对 Cd 的问题进行一些讨论。

镉(Cd)是一种危险的环境污染物质,它能引起人和动物的一些疾病。动物试验表明,即使食用相当低浓度的 Cd 亦能抑制生长、引起高血压等疾病以及对酶系统、生育力和某些必需元素的不良影响^[7]。Cd 对人的主要危害途径是污染的食品链。日本的骨痛病就是因为消费者食用了被矿山和冶炼厂的 Cd 所污染了的稻米和大豆所引起的^[14,19]。Cd 能通过叶片的直接吸收或从污染土壤中摄取而进入植物体^[16]。

重金属对土壤的污染以及重复施用 Zn 肥(Cd 作为杂质含于锌中)可能导致 Cd 在稻米中的累积。P 和 Zn 一样也可能影响 Cd 的吸收。本文报道了在温室中盆栽水稻添加 Cd、P、Zn 等化合物对其产量、植株中营养元素的含量和糙米中 Cd 浓度的影响。

* 本文系作者在国际水稻研究所、菲律宾大学进修时完成的硕士论文之一部分。该工作是在国际水稻研究所 Principal Soil Chemist Dr. F. N. Ponnampereuma (土壤化学系主任)指导下完成的;工作进行中得到了土壤化学系其他同事的热情支持与帮助。特此致谢。

此次发表时,承熊毅教授的鼓励与指导,作者表示深切的谢意。

一、材料和方法

详见文献[1]。盆栽试验：每盆栽有四穴，以随机区组排列，三组重复。盆栽始终保持渍水条件，直到水稻成熟和收获。在水稻生长的第八周从每盆中收割相对的植株两穴，在 70℃ 烘干，供产量和营养元素的分析。

糙米中 Cd 含量的测定：(1) 标准曲线的制备：取 125 毫升的分液漏斗七只，分别添加 10 毫升 1N HCl，添加适量的去离子水（最后体积约为 50 毫升），依次添加 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 和 2.0 微克 Cd（标准溶液为 1 微克 Cd/毫升），然后添加 0.4 克固体抗坏血酸，振荡使其溶解；再分别添加 7M KI 溶液 5 毫升，混和；随后加入 10 毫升 MIBK（甲基异丁基甲酮），剧烈振摇一分钟，静置，分离。有机相用于原子吸收测定（波长 2288 Å）。(2) 糙米样品分析：称取已经磨碎并在 70℃ 下干燥的样品 2 克，用硝酸-过氯酸溶液消化（HNO₃:HClO₄ = 4:1），残留物用 1N HCl 10 毫升溶解，并转移至 125 毫升的分液漏斗中，添加适量去离子水使最后体积约为 50 毫升，然后添加固体抗坏血酸 0.4 克，其后步骤与标准曲线的制作相同。

土壤中 Cd 的测定：收获时，将土壤风干，研磨并通过 80 孔筛，用 0.05N HCl 提取土壤中可溶性 Cd²⁺，其步骤为：称 20 克土置于 100 毫升离心管中，添加 0.05N HCl 40 毫升，在往复振荡机上振荡 5 分钟，过滤，取适量滤液用与测定糙米中 Cd 含量相同的方法进行测定。

二、结果和讨论

(一) 水稻产量

1. 植株的干物质重（第八周） 植株的相对产量（以对照为 100%）示于图 1。由图

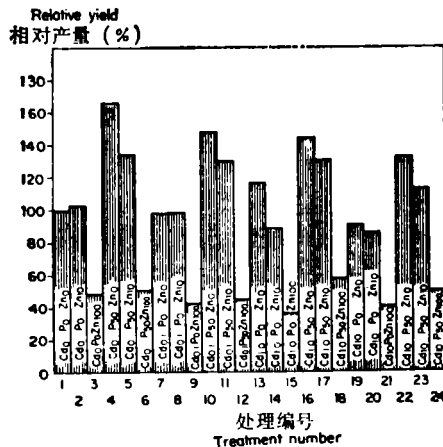


图 1 Cd、P、Zn 化合物对植株干重的影响(移栽后八周)

Fig. 1 Relative yield of plants (dry matter, 8 weeks after transplantation) as affected by addition of cadmium, phosphorus and zinc compounds

可见，它们明显地受着不同处理的影响。处理 4(Cd₀P₅₀Zn₀) 产量最高，约为对照的 165%，处理 15(Cd_{1.0}P₀Zn₁₀₀) 产量最低，约为对照的 32%。干物质的减少是由于分蘖少和生长受阻所致。磷的施用使干物质重量增加，而随着 Cd 和 Zn 浓度的增加产量下降。在 Zn₀ 的

处理中, P 的增产效果较为明显, 而在 Zn_{10} 的处理中增产效果就差一些, 说明了 Zn-P 交互反应的有害作用。多元线性回归分析表明, 植株干物质重明显地受着添加的 P、Cd、Zn 以及 P-Zn 交互反应的影响:

$$Y_1 = 10.21 + 0.0821(P) - 0.1158(Cd) - 0.0574(Zn) - 0.0007(P-Zn) \quad (1)$$

其 $R^2 = 0.97^{**}$, 所有回归系数均在 1% 的显著水平。式中 Y_1 为植株干物质重量 (克/株), (P)、(Cd)、(Zn) 分别为添加到土壤中的 P、Cd、Zn 的浓度 (毫克/公斤)。

2. 稻谷产量 稻谷及其相对产量 ($Cd_0P_0Zn_0$ 的产量作为 100%) 列于表 1。高浓度

表 1 添加的镉、磷和锌化合物对稻谷产量和糙米中镉浓度的影响

Table 1 Rice yield and Cd concentration in brown rice as affected by addition of cadmium, phosphorus and zinc compounds

处 理 Treatment			稻谷产量 (g/plant) Grain yield	相对产量 (%) Relative yield	糙米 Cd 浓度 (mg/kg) Cd concn. in brown rice
Cd	P (mg/kg)	Zn			
0	0	0	15.8 cde	100	0.08 k
0.1	0	0	19.9 ab	126	0.16 ghi
1.0	0	0	18.2 a-d	115	0.19 d-g
10	0	0	15.9 cde	101	0.24 bc
0	50	0	19.3 abc	122	0.15 ij
0.1	50	0	19.1 abc	121	0.18 e-j
1.0	50	0	20.6 a	130	0.21 cd
10	50	0	17.2 a-b	109	0.26 b
0	0	10	14.7 d-e	93	0.08 k
0.1	0	10	16.1 b-e	102	0.16 ghi
1.0	0	10	16.0 b-e	101	0.21 dc
10	0	10	12.5 e	79	0.24 bc
0	50	10	17.0 a-d	108	0.17 j-i
0.1	50	10	18.3 a-d	116	0.20 def
1.0	50	10	17.4 a-d	110	0.21 cd
10	50	10	18.1 a-d	115	0.31 a
0	0	100	7.9 f	50	0.12 j
0.1	0	100	5.2 fg	33	0.19 d-g
1.0	0	100	5.6 fg	35	0.17 d-g
10	0	100	4.0 g	25	0.24 b
0	50	100	5.2 fg	33	0.15 hi
0.1	50	100	6.3 fg	40	0.17 fi
1.0	50	100	6.5 fg	41	0.18 d-h
10	50	100	4.0 g	25	0.24 b

注: 在同一列内带有相同字母的平均值之间没有显著差异 ($P = 0.05$, 新变全距测定法)。

的 Cd 和 Zn (Cd: 10 毫克/公斤; Zn: 100 毫克/公斤) 使稻谷产量大约减少了 75%。另一方面, 在 Cd 和 Zn 的浓度较低时, 磷肥的应用增加了稻谷产量。在 Zn 浓度较高时磷肥显得无效, 意味着土壤或者植物中 P-Zn 的交互反应而降低了 P 的有效性。Bingham 等^[2]

曾经报道过相似的结果(但 Zn 的浓度比本实验中要高得多); Haghiri^[9] 在进行大豆的试验中也有类似的报道。

人们十分有兴趣的注意到,虽然 Cd 不是植物的必需元素,但在土壤中添加低浓度的镉能增加水稻产量^[8]。由表 1 可见,在本试验条件下,仅添加 0.1 毫克/公斤的 Cd,其相对产量为对照的 126%,而仅添加 1 毫克/公斤的 Cd,其相对产量为对照的 115%。由这样的观察所得的逻辑推理是,添加低浓度的 Cd 到土壤中可能促进了水稻的生长,从而增加了它的产量,这也是 Cd 污染具有潜在危险性的一个方面,即在一定条件下 Cd 对作物产量不但不会降低,反而有一定增产效果。但就总体来看(表 1),在本试验中由于多因子综合因素的影响,经过统计处理, Cd 的添加仍然是产量降低的一个重要因素。多元回归分析表明,稻谷产量和添加的 Cd、P、Zn 之间的关系可用下式表示:

$$Y_2 = 17.24 + 0.0466(P) - 0.1850(Cd) - 0.1115(Zn) - 0.0005(P-Zn) \quad (2)$$

其 $R^2 = 0.97^{**}$, 式中 Y_2 是稻谷产量(克/株), (P)、(Cd)、(Zn) 分别是添加到土壤中的 P、Cd、Zn 的浓度(毫克/公斤)。T 试验表明 (P-Zn) 的回归系数显著 ($P = 0.05$), 而其它回归系数则为极显著 ($P = 0.01$)。

方程(2)清楚地表明了稻谷产量随着 P 肥的施用而增加,这是由于供试土壤缺 P 的缘故。高浓度的 Cd 降低了稻谷产量,可能是由于其浓度高时阻止了根毛的生长^[10]以及伤害了根系^[11]。高浓度的 Zn 以及 Zn-P 和 Zn-N-P 的交互反应有可能降低了 N、P 对植物的有效性,从而导致了产量的降低。

稻谷产量的回归方程(方程式 2)和第八周时干物质产量的回归方程(方程式 1)十分相似,表明干物质重和稻谷产量受着相同因子的影响,因而可以推断在实验条件下,早期的干物质重将有可能反映稻谷相对产量的高低。

(二) 稻草中营养元素的含量

Cd、P、Zn 处理显著地影响着稻草中一些营养元素的含量,稻草中的全氮、磷、钾、钙、镁、铁、锰、铜和锌的方差分析(F 值)列于表 2。研究结果表明添加 Cd 降低了稻草中 Mg、Fe、Zn 和 Si 的浓度,而全 N 的浓度却增加(具体数值略)。不同 P、Zn 浓度在四个 Cd 水平下对稻草中一些营养元素含量的影响(平均值)列于表 3。由表可知,施用 P 增加了稻草中 P、Fe、Mn 的浓度,而降低了 Ca、Zn 和全 N 的浓度; Zn₁₀₀ 的处理增加了 P、Cu、Zn 和全 N 的浓度而降低了 K、Ca、Mg、Fe、Mn 和 Si 的浓度。方差分析表明, Si、P 和全 N 的浓度亦受 Zn-P 和 Cd-P-Zn 交互反应的影响。稻草中一些元素浓度的减少,可能是由于交互反应或沉淀化合物的形成而减少了有效性,或者是由于植物的健壮生长所形成的稀释效应。一些元素浓度的增加可能是由于植物生长受阻而形成的浓缩效应所致。

(三) 糙米中 Cd 的含量

糙米中 Cd 的浓度随着土壤中添加 Cd 浓度的增加而增加, Cd 浓度的范围由对照 (Cd₀P₀Zn₀) 的 0.08 毫克/公斤到 Cd₁₀P₃₀Zn₁₀ 的 0.31 毫克/公斤(表 1)。Cd-P、Cd-Zn 以及 P-Zn 的交互反应同样显著地影响着糙米中 Cd 的浓度。一般说来,糙米中 Cd 浓度

表 2 稻草中的全氮、磷、钾、钙、镁、铁、锰、铜、锌和硅的方差分析 (F 值)

Table 2 Analysis of variance for the concentration of total N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn and Si in rice straw (F-value)

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Si
处理 (Treatments)	16.16**	6.20**	10.28**	2.37**	3.07**	5.61**	6.23**	4.08**	5.89**	13.79**
Cd	3.76*	1.86NS	2.23NS	1.92NS	5.33**	4.92**	2.56NS	2.03NS	4.48**	14.57**
P	4.31*	13.20**	<1	5.95*	2.78NS	4.59*	6.40*	<1	6.01**	<1
Zn	158.72**	45.87**	108.72**	10.09**	19.40**	44.44**	55.48**	36.57**	49.80**	120.78**
Cd-P	1.72NS	<1	<1	<1	2.14NS	2.66NS	1.30NS	<1	<1	<1
Cd-Zn	<1	<1	<1	1.09NS	<1	1.21NS	<1	<1	1.73NS	1.32NS
P-Zn	6.38**	1.73NS	<1	2.36NS	<1	<1	1.16NS	1.08NS	<1	6.02**
Cd-P-Zn	2.55*	2.77*	<1	1.74NS	<1	<1	1.67NS	1.06NS	<1	1.58NS

*,** 分别为 5% 和 1% 的显著水平; NS, 不显著。

表 3 稻草中一些营养元素的含量 (四个 Cd 水平, 三个重复的平均值)

Table 3 Contents of some nutrients in rice straw (mean value, 4 Cd levels and 3 replications)

处 理 Treatments		Cd (0, 0.1, 1.0, 10) (mg/kg)									
P	Zn	N	P	K	Ca	Mg	SiO ₂	Fe	Mn	Cu	Zn
(mg/kg)		(%)						(mg/kg)			
0	0	0.85	0.10	3.04	0.13	0.30	12.8	115	711	3.6	45.8
50	0	0.71	0.13	3.00	0.13	0.30	13.0	119	755	3.4	40.2
0	10	0.92	0.13	2.85	0.12	0.29	12.6	107	663	3.6	46.3
50	10	0.77	0.15	2.89	0.11	0.30	12.9	112	718	3.4	44.2
0	100	1.37	0.19	2.17	0.12	0.27	11.0	87	555	4.9	62.4
50	100	1.47	0.19	2.14	0.10	0.28	10.3	93	563	5.3	58.7

在给定的 P 和 Zn 的情况下随着土壤中 Cd 浓度的增加而增加, 例如由表 1 所列数据经过计算后可以看到 Cd 的浓度从 Cd₀P₀ 的 0.09 毫克/公斤到 Cd₁₀P₀ 的 0.24 毫克/公斤, 从 Cd₀P₅₀ 的 0.16 毫克/公斤到 Cd₁₀P₅₀ 的 0.27 毫克/公斤, 统计分析表明了它们之间的显著差异。但在 Cd_{0,1} 和 Cd_{1,0} 时, P₀ 和 P₅₀ 之间没有显著差异, 这表明了 P 影响的复杂性。Zn 对糙米中 Cd 的浓度也具有相当复杂的影响, 同样由表 1 数据经过计算后可以看到糙米中 Cd 的浓度从 Cd₀Zn₀ 的 0.11 毫克/公斤到 Cd₀Zn₁₀₀ 的 0.14 毫克/公斤, 但在 Cd_{0,1} 的处理中, Cd_{0,1}Zn₀ 与 Cd_{0,1}Zn₁₀₀ 均为 0.18 毫克/公斤, Zn 的添加对 Cd 的浓度未显示影响。糙米中 Cd 的浓度从 Cd_{1,0}Zn₀ 的 0.20 毫克/公斤到 Cd_{1,0}Zn₁₀ 的 0.21 毫克/公斤, 然后减少到 Cd_{1,0}Zn₁₀₀ 的 0.19 毫克/公斤, 统计分析表明后两者有着显著差异。在 Cd₁₀ 的处理中, 糙米中 Cd 的浓度由 Cd₁₀Zn₀ 的 0.25 毫克/公斤增加到 Cd₁₀Zn₁₀ 的 0.28 毫克/公斤, 然后减少到 Cd₁₀Zn₁₀₀ 的 0.24 毫克/公斤, Cd₁₀Zn₁₀ 与 Cd₁₀Zn₀ 和 Cd₁₀Zn₁₀₀ 两者之间有着显著差异。磷和锌的交互反应对糙米中 Cd 浓度亦有影响, Cd 的浓度由 P₀Zn₀ 的 0.17 毫克/公斤增加到 P₀Zn₁₀₀ 的 0.19 毫克/公斤, 统计分析表明两者有着显著的差异。Cd 的浓度由 P₅₀Zn₀ 的 0.20 毫克/公斤增加到 P₅₀Zn₁₀ 的 0.22 毫克/公斤, 然后降低到 P₅₀Zn₁₀₀ 的 0.19 毫克/公斤, P₅₀Zn₁₀ 与 P₅₀Zn₀ 和 P₅₀Zn₁₀₀ 两者之间有着显著差异。Bingham 等人^[2]亦曾报道过锌的处理增加了稻谷中 Cd 的含量。这种增加可能是由于一些锌

取代了土壤复合体中的 Cd 从而导致了土壤溶液中 Cd 的增加^[9]。

多元线性回归分析揭示了糙米中 Cd 的浓度与处理间的下列关系:

$$Y_3 = 0.135 + 0.0103(Cd) + 0.0009(P) \\ + 0.0003(Zn) - 5 \times 10^{-5}(Cd-P) \\ - 3 \times 10^{-4}(Cd-Zn) - 8 \times 10^{-5}(P-Zn) \quad (3)$$

其 R^2 为 0.70**, 式中 Y_3 是糙米中 Cd 的浓度(毫克/公斤), (Cd)、(P)、(Zn) 分别是添加到土壤中 Cd、P、Zn 的浓度(毫克/公斤)。方程式(3)清楚地表明了糙米中 Cd 的浓度随着 Cd、P、Zn 浓度的增加而增加, 但 T 检验表明仅仅只含 Cd 的回归系数极显著 ($P = 0.01$)。如果我们使用日本科学家所推荐的糙米中最大容许的 Cd 浓度为 1.0 毫克/公斤, 应用方程式(3), 则添加到土壤中的 Cd 在本试验条件下不应超过 84 毫克/公斤, 这一数值大大高于 Bingham 等人^[2]所报道的 7.8 毫克/公斤, 这一差异可能是由于不同的实验条件所致。

(四) 糙米中 Cd 的浓度和土壤中可提取性 Cd 的关系

人们利用植物和土壤分析来预测土壤中微量元素是否缺乏或者过量, 这种缺乏或过量将会导致产量的减少或者危害人类或动物的健康^[3]。Katyal 和 Ponnampereuma^[13] 发展了 0.05N HCl 的方法用来测定有效性 Zn; 其后, Ponnampereuma 等^[15] 又用该法测定有效性铜和硼。因为铜和锌在化学上有相似之处, 所以在本试验中 0.05N HCl 法亦用来评价糙米中 Cd 的浓度和土壤中可提取性 Cd 的关系。简单回归分析表明糙米中 Cd 的浓度和收获时风干土中的 0.05N HCl 可提取性 Cd 有着显著的相关性:

$$Y_4 = 0.16 + 0.032x \quad (4)$$

其 $r = 0.75$ **, 式中 Y_4 是糙米中 Cd 的浓度(毫克/公斤), x 是土壤中 0.05N HCl 可提取性 Cd (毫克/公斤)。T 检验表明方程式(4)的截距和斜率在 0.01 水平显著。如果用方程式(4)来估算糙米中 Cd 的浓度与土壤中 0.05N HCl 可提取性 Cd 的关系, 同时以 1.0 毫克/公斤作为人类消费所允许的最大浓度, 那么当土壤中 0.05N HCl 的可提取性 Cd 为 26.3 毫克/公斤时, 糙米中就会含有 1.0 毫克/公斤的 Cd。Bingham 等人^[3]曾经报道如用 DTPA-TEA 提取的 Cd 浓度为 39.8 毫克/公斤时, 那么糙米中 Cd 含量即有 1 毫克/公斤; 而 Takijima^[17] 则曾报道用过 0.1N HCl 从土壤中提取的 Cd 为 15.5 毫克/公斤时可致使糙米中产生过量的 Cd。

通常, 作物中 Cd 的浓度和土壤全 Cd 浓度之间相关性不好^[17], 其原因是作物对金属的吸收受控于多种因子^[6, 12]; 但如果另外的条件恒定, 富 Cd 土壤将产生富 Cd 稻^[3, 4]。由于本实验的结果仅基于添加了不同量 Cd 的一种土壤和一个品种的水稻, 因而 0.05N HCl 用于预测糙米中 Cd 浓度的适用性需要进行进一步的研究。

(五) 糙米中 Cd 毒性浓度的评价

目前所推荐的 Cd 的食品标准是值得讨论的一个问题, 日本的研究者提出糙米中最大允许量为 1 毫克/公斤^[5, 11], Bingham 及其同事^[4]引证了他人的工作提出, 如果 300 微克 Cd 为每人每天最大可接受的数量, 那么在稻谷中的最大允许量为 0.4 毫克/公斤; FAO/

WHO¹⁾ 专业委员会^[6]报道了每人每周摄取 0.4—0.5 毫克 Cd, 即每人每天摄取 57—71 微克 Cd 尚可忍受。由此可见上述报道之间差异极大。假定每人每天吃 250—300 微克糙米, 在本实验的 Cd₁₀ 处理糙米中 Cd 的含量为 0.26 毫克/公斤 (表 1), 那么消费者每天将摄取 65—78 微克 Cd, 其上限已超过 FAO/WHO 的安全水平而低于其他报道^[4,5,11], 所以有关 Cd 的食品标准需要进行进一步的探讨。

参 考 文 献

- [1] 陈怀满, 1984, 土壤溶液动态变化和 CdCO₃, CaS 的平衡研究。土壤学报, 第 21 卷 3 期, 258—266 页。
- [2] Bingham, F. T. and J. E. Strong. 1980. Yield and cadmium content of rice grain in relation to addition rates of cadmium, copper, nickel and zinc with sewage sludge and liming. *Soil Sci.* 130: 32—38.
- [3] Bingham, F. T., A. L. Page, R. J. Mahler, and T. J. Ganje. 1976. Cadmium availability to rice in sludge-amended soil under "flood", and "non-flood" culture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 715—719.
- [4] Bingham, F. T., A. L. Page, R. J. Mahler, and T. J. Ganje. 1975. Growth and cadmium accumulation of plants growth on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 4: 207—211.
- [5] Chino, M. and A. Baba, 1981. The effects of some environmental factors on the partitioning of zinc and cadmium between roots and tops of rice plants. *J. Plant Nutr.* 3: 203—214.
- [6] Cutler, J. M. and D. W. Rains. 1974. Characterization of cadmium uptake by plant tissue. *Plant Physiol.* 54: 67—71.
- [7] Doyle, J. J. 1977. Effects of low levels of dietary cadmium in animals—a review. *J. Environ. Qual.* 6: 111—116.
- [8] FAO/WHO Expert Committee, 1972. Evaluation of certain food additives and the contaminants, mercury, lead, and cadmium. WHO Tech. Rept. Series No. 505, Geneva: WHO.
- [9] Haghiri, F. 1974. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc and temperature. *J. Environ. Qual.* 3: 180—183.
- [10] Ito, H. and K. Iimura. 1976. Absorption of zinc and cadmium by rice plants and their influence on plant growth. 2. Effect of cadmium. *Soil Sci. Pl. Nutr.* 22: 219.
- [11] Ito, H. and K. Iimura, 1976. The absorption and translation of cadmium in rice plant and its influence on their growth, in comparison with zinc-studies on heavy metal pollution of soils (Part I). *Bull. Hukurika Nut'l. Agric. Exp. Stn.* 19: 71—139.
- [12] John, M. K., H. H. Chuah, and C. J. Van Laerhoven. 1972. Cadmium concentration of soil and its uptake by oats. *Environ. Sci. Technol.* 6: 555—557.
- [13] Katyl, J. C. and F. N. Ponnampuruma. 1974. Zinc deficiency: a widespread nutritional disorder of rice in Agusan del Norte. *Philippine Agriculturist* 58: 79—89.
- [14] Kobayashi, J. 1970. Relation between the "itai-itai" disease and the pollution of river by cadmium from a mine. *In International Association on Water Pollution Research*, 1-25/1—25/8.
- [15] Ponnampuruma, F. N., M. T. Cayton and R. S. Lantin. 1981. Dilute Hydrochloric acid as an extractant for available zinc, copper and boron in rice soils. *Plant and Soil.* 61: 297—310.
- [16] Symeonides, C. and S. G. Merae. 1977. The assessment of plant available cadmium in soils. *J. Environ. Qual.* 6: 120—123.

1) FAO/WHO: 即联合国粮农组织和世界卫生组织。

- [17] Takijima, Y. and F. Katsumi. 1973. Cadmium contamination of soils and rice plants caused by zinc mining influence heavy metal contents in rice. *Soil Sci. Pl. Nutr.* 19: 173—182.
- [18] Turner, M. A. 1973. Effect of cadmium treatment on cadmium and zinc uptake of selected vegetable species. *J. Environ. Qual.* 2: 118—119.
- [19] Yamagata, N. and I. Shigematsu. 1970. Cadmium pollution in perspective. *Bull. Inst. Public Health* 19: 1—27.

YIELD AND MINERAL CONCENTRATION OF RICE AS AFFECTED BY THE CONTENT OF Cd, P AND Zn IN SOIL

Chen Huaiman

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing*)

Summary

The effect of the addition of Cd, P and Zn compounds on the yields of rice grains, plant shoots and the content of mineral nutrients in straw and Cd concentration in brown rice were studied in the greenhouse. P increased the yields of rice grains and plant shoots, while Cd, Zn and interaction of P and Zn decreased them. There are similar linear regression equations for the yields of rice grain and plant shoots. The linear regression equation for rice grain is:

$$Y = 17.24 + 0.0466(P) - 0.1850(Cd) - 0.1115(Zn) - 0.0005(P-Zn)$$

with $R^2=0.97^{**}$, where Y is grain yield (g/plant); (P) is concentration of added P (mg/kg); (Cd) is concentration of added Cd (mg/kg); (Zn) is concentration of added Zn (mg/kg); $(P-Zn)$ is interaction of P and Zn. The mineral nutrients in rice straw were markedly affected by all treatments. The Cd concentration in brown rice increased with the increase of concentration of Cd, Zn and P added. However multiple linear regression analysis shows that only the Cd effect is the most significant. The Cd concentration in brown rice shows a highly significant correlation ($r=0.75^{**}$) with Cd in air-dried soil at harvest extracted by 0.05 M HCl. The toxicological evaluation of Cd concentration in brown rice are discussed.