

# 影响铅的土壤环境容量的因素

陈怀满 郑春荣 孙小华

(中国科学院南京土壤研究所)

## 摘 要

以黄棕壤为对象,研究了影响铅的土壤环境容量的因素。结果表明,它受土壤性质、指示物、污染历程、环境因素、化合物类型、复合污染等因素的影响。文章还详细地叙述了各因素对土壤环境容量影响的程度,为环境容量的建模提供了理论和实验依据。

目前,有关土壤环境容量的容量值是以特定的参比手段取得的,它随条件而改变;确切地说,土壤环境容量不是一个确定的值,而是一个范围值。土壤性质、环境因素以及多元素交互作用等均对土壤环境容量有显著影响。这些影响的机理目前尚不完全清楚。我们对影响铅土壤环境容量的因素进行了初步分析,实验采取温室盆栽与室内试验相结合的方法。结果表明,影响铅土壤环境容量的因素有物理的、化学的、生物的、遗传学的等多种因素,表明土壤环境容量研究是一项系统工程。

## 一、土壤性质的影响

土壤是一个不均匀的体系,不同类型的土壤对环境容量的影响是不同的,即使是采自同一母质发育的不同地区的同一类型的土壤,其Pb的化学行为和生物效应也有显著差异。对江苏下蜀、盱眙和湖北孝感3地由下蜀黄土发育的黄棕壤及江西红壤(表1)所进行的土壤化学行为的研究表明,土壤性质对水稻产量、土壤中Pb的形态和水稻吸收等均有显著的影响。

(一)对水稻产量的影响 在一定浓度范围内,土壤中Pb的添加量与水稻幼苗干物重呈负相关,但全生育期水稻产量与Pb处理之间并无规律性的变化,而土壤性质的不同导致植株

表 1 供试土壤的基本性质

项 目	红 壤	黄 棕 壤		
		下 蜀	盱 眙	孝 感
pH	4.7	6.6	7.0	7.5
CEC(cmolk <sup>-1</sup> )	11.7	18.0	21.7	17.5
有机质(gkg <sup>-1</sup> )	11.0	4.9	11.8	6.8
全氮(gkg <sup>-1</sup> )	0.59	0.35	0.77	0.43
全磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ,gkg <sup>-1</sup> )	1.3	1.0	0.7	0.7
全钾(K <sub>2</sub> O,gkg <sup>-1</sup> )	12	23	16	17
SiO <sub>2</sub> (gkg <sup>-1</sup> )	697	686	705	702
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (gkg <sup>-1</sup> )	53.0	56.3	52.7	57.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (gkg <sup>-1</sup> )	138	143	133	142
Pb (mgkg <sup>-1</sup> )	43	23	30	29

表 2 Pb的添加量对水稻幼苗干重的影响  
(盆栽试验)

添加Pb浓度 (mg/kg)	黄 棕 壤		红 壤	
	mg/株	相对重量 %	mg/株	相对重量 %
0	139	100	124	100
125	129	93	100	81
250	119	86	86	69
500	118	85	64	52
1000	104	75	37	30
2000	99	71	11	9

干物重及产量上的显著差异。从表 2 可以看出, 土壤类型不同在添加同一浓度的 Pb 时, 其干物重的影响也明显不同, 同期生长的水稻, 添加在红壤中的 Pb 的毒性大于黄棕壤, 在添加相同浓度 (125—2000mg/kg) 的情况下, 黄棕壤和红壤对植株干物重的减产幅度分别为 7—29 和 19—91%。从表 3 可以看出, 即使是同一母质发育的不同地区的黄棕壤, 由于性质的某些差异, Pb 对水稻产量的影响亦不相同, 下蜀土的水稻产量低于盱眙土和

表 3 Pb的添加量对水稻和小麦产量(克/盆)的影响\*  
(盆栽试经)

添加Pb浓度 (mg/kg)	水 稻			小 麦		
	下 蜀	盱 眙	孝 感	下 蜀	盱 眙	孝 感
0	67.9	75.1	73.3	9.5	8.7	5.7
1000	54.1	70.7	72.0	7.8	5.9	4.8
2000	53.5	69.5	70.1	8.7	7.2	4.1
3000	62.0	77.9	71.8	7.7	4.7	3.6
4000	63.1	82.3	76.7	7.8	4.6	2.8

\* 试验土壤均为黄棕壤。

孝感土, 而小麦产量则较后两者为高。土壤性质对作物产量的影响势必引起土壤临界含量的变化。

(二)对 Pb 形态的影响 土壤性质对 Pb 的形态产生较大影响。从同期栽种水稻(苗期)后的黄棕壤和红壤用 1mol/L NH<sub>4</sub>OAc 可提取的 Pb 量来看, 红壤的可提取 Pb 量为黄棕壤

表 4 黄棕壤和红壤中Pb的可提取态比较

添加Pb浓度 (mg/kg)	黄 棕 壤		红 壤	
	mg/kg	%	mg/kg	%
125	1.65	1.32	13.4	10.7
250	5.79	2.32	33.5	13.4
500	17.4	3.48	123	24.6
1000	50.6	5.06	255	25.5
2000	153	7.65	666	33.3

的 4—8 倍(表 4)。3 种黄棕壤在添加 Pb 浓度相同的情况下, 其交换态(以 0.05 mol/L Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 提取)、碳酸盐结合态(以 pH 5 的 NaOAc + HOAc 提取)、铁锰氧化物结合态(以 0.175 mol/L H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> + 0.1 mol/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 提取)、有机络合态(以 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.02 mol/L HNO<sub>3</sub> + 1.6 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 提取)和残余态均有明显的差异

(表 5), 下蜀黄棕壤的交换态和碳酸盐结合态比盱眙和孝感黄棕壤要小。Pb 的形态差异必定会影响糙米对 Pb 的吸收, 继而影响到临界含量和土壤环境容量。

(三)对水稻吸收 Pb 的影响 从同期生长在黄棕壤和红壤上的水稻幼苗吸收 Pb 的情况来看(表 6), 由于土壤性质的差异引起了水稻对 Pb 吸收的差异, 红壤上水稻吸收的 Pb 浓度, 其地下和地上部分分别为黄棕壤的 4.6—10.3 倍和 22.6—44.7 倍。同一母质发育的不同地区黄棕壤上生长的水稻和小麦吸收 Pb 的差异, 虽然没有红壤与黄棕壤之间来得明显, 但仍有一定程度的变化(表 7), 例如添加 2000 mg Pb/kg 时, 下蜀黄棕壤上水稻吸收的 Pb 低于盱眙

表 5

Pb的添加量对水稻土(黄棕壤)中Pb结合形态及分配比例的影响

(盆栽试验)

土壤来源	添加Pb浓度 (mg/kg)	可交换态		碳酸盐结合态		铁锰氧化物结合态		有机络合态		残余态	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
下蜀 盱眙 孝感	1000	1.38	0.14	161	16.1	668	66.8	22.9	2.29	147	14.7
		2.55	0.26	243	24.3	649	64.9	17.1	1.71	88.3	8.83
		1.98	0.20	220	22.0	516	51.6	31.8	3.18	230	23.0
下蜀 盱眙 孝感	2000	2.34	0.12	290	14.5	552	27.6	105	5.22	1051	52.5
		4.11	0.21	450	22.5	648	32.4	48.7	2.44	849	42.5
		4.06	0.20	510	23.5	480	24.0	147	7.35	859	42.9
下蜀 盱眙 孝感	3000	4.35	0.15	508	16.9	488	16.3	408	13.6	1592	53.1
		10.2	0.34	721	24.0	607	20.2	293	9.77	1369	45.6
		7.13	0.24	790	26.3	554	18.5	480	16.0	1169	39.0
下蜀 盱眙 孝感	4000	9.13	0.23	714	17.9	464	11.6	893	22.3	1920	48.0
		12.6	0.33	947	23.7	588	14.7	466	11.6	1986	49.7
		11.2	0.28	1033	25.8	525	13.1	661	16.5	1770	44.2

表 6

Pb的添加量对水稻幼苗吸收Pb(mg/kg)的影响

(盆栽试验)

添加Pb浓度 (mg/kg)	黄棕壤(Y)		红壤(R)		R/Y	
	根	地上部分	根	地上部分	根	地上部分
125	289	8.46	1436	378	5.0	44.7
250	739	14.3	6681	466	9.0	32.6
500	1235	17.4	12757	488	10.3	28.0
1000	2416	21.4	11087	508	4.6	23.7
2000	3354	58.0	21615	1308	6.4	22.6

表 7

Pb的添加量对水稻和小麦吸收Pb(mg/kg)的影响

(盆栽试验)

添加Pb浓度 (mg/kg)	下蜀黄棕壤		盱眙黄棕壤		孝感黄棕壤	
	糙米	麦粒	糙米	麦粒	糙米	麦粒
1000	0.35	1.07	0.36	0.60	0.34	1.46
2000	0.70	1.71	1.20	1.30	0.79	2.16
3000	1.43	1.86	2.07	2.57	1.42	2.24
4000	2.05	2.24	2.49	2.92	1.55	2.79

和孝感黄棕壤上水稻的吸收量,小麦吸收的Pb量以孝感黄棕壤为最高。植物吸收的铅量直接影响到临界含量的确定,从而影响到环境容量。因此,在环境容量的研究中,既要注意土壤的典型性,又要注意其代表性。

## 二、指示物的影响

人们在制定环境容量指标时总是从某一特定的目的出发,选用特定的参照物作为指示物,由于指示物之间的差异,则所得的环境容量可能产生较大的变化。

(一) 稻麦之间的差异 在土壤添加相同浓度的Pb时,通常是麦粒中Pb含量高于糙米

表7)。可见,若以水稻和小麦的籽实含Pb量来求Pb的临界值,继而借以确定Pb容量,显然会产生差异。

(二)微生物类型之间的差异 土壤微生物是土壤生态结构的组成部分,是研究土壤生态环境质量时必须考察的项目。Pb对不同类型微生物影响的浓度范围有着明显差异(表8)。在一定浓度范围内,Pb对红壤中细菌群体有显著刺激作用,对真菌、放线菌和硝化菌无刺激

表8 红壤添加Pb对微生物的影响\*[1]

微生物类型	显著刺激浓度 (mg/kg)	显著抑制浓度 (mg/kg)
真菌	无	无
放线菌	无	1000—4000
细菌	3000—5000	无
硝化菌	无	1000—4000

\* P<0.05

表9 种植与不种植作物的相对负载容量的比较

添加铅浓度 (mg/kg)	PbCl <sub>2</sub>		Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Pb(OAc) <sub>2</sub>	
	种	不种	种	不种	种	不种
500	100	97.6	100	97.9	100	—
1000	100	92.7	100	92.8	100	93.8
2000	100	88.7	100	82.0	100	85.5
4000	100	75.7	100	76.0	100	83.3

表10 不同试验规模下Pb临界含量 (mg/kg)的差异

大田调查		小区试验		盆栽试验	
早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
1361	1154	187	226	—	206

作用,Pb对放线菌和硝化菌有显著的抑制作用,对真菌和细菌无抑制作用。因此以不同类型的微生物作指示物时,其临界值的范围将不一样。

(三)种植土壤与不种植土壤之间的差异 用1mol/L NH<sub>4</sub>OAc溶液对栽种水稻后的土壤和不种稻的土壤进行提取量的比较(以黄棕壤为例),结果表明(表9),种植时土壤Pb的相对负载容量比不种作物土壤大,而且后者有随Pb添加浓度增加其相对负载容量进一步减少的趋势。种植与不种作物之间相对负载容量的差异可能与作物根系作用有关。

(四)试验规模引起的差异 对同一成土母质的土壤所做的大田调查,小区试验和盆栽试验都表明,糙米中的Pb浓度和土壤含铅量之间有着良好的相关性[2,3]。我们以0.5mg/kg Pb为食品卫生标准,用这些关系式计算出的Pb临界含量列于表10。结果表明,同一成土母质的土壤在大田调查、小区试验和盆栽试验所得的临界含量各不相同,因此在确定容量值时,试验规模也是一个不可忽略的因素。

### 三、污染历程的影响

从化学角度看,Pb和土壤中其它任何元素一样,可以溶解在土壤溶液中,吸附于胶体表面,闭蓄于土壤矿物之中以及与土壤中其它化合物产生沉淀,所有这些过程均与污染历程有关,它包括以下3个方面。

(一)平衡时间与浓度 从田间试验的小区排水中Pb含量的变化可以看出,随着时间的推移,排水中Pb的浓度逐渐降低。在Pb的添加量为240mg/kg的小区中,从1987年7月4日至8月15日的追踪测试表明,田间排水中Pb浓度从17.5降至1.6μg/L。

从下蜀黄棕壤连续2年栽种水稻对Pb的吸收看,第二年水稻所吸收的Pb量远低于第一年的吸收量(表11),其降低的幅度与Pb的添加量有关,这说明确定容量值需要长期的试验结果。

(二)形态的变化 污染历程的影响也表现在土壤中Pb的形态变化上。对添加Pb的黄

表 11

种植年限对水稻吸收 Pb 的影响

添加Pb浓度 (mg/kg)	稻 根			稻 草			糖 米		
	第1年	第2年	第2年/第1年(%)	第1年	第2年	第2年/第1年(%)	第1年	第2年	第2年/第1年(%)
500	619	140	22.6	11.3	—	—	0.31	0.14	45.2
1000	1136	344	30.3	13.3	1.79	13.5	0.37	—	—
2000	3565	1301	36.5	24.5	6.68	27.3	0.61	0.26	42.6
4000	14320	4465	31.2	72.5	20.7	28.6	1.63	0.37	22.7

表 12

不同培育时间对土壤可提取Pb的提取率(%)影响

添加Pb浓度 (mg/kg)	黄 棕 壤				红 壤			
	2 周	4 周	8 周	16周	2 周	4 周	8 周	16周
500	100	76.2	52.0	34.1	100	84.7	62.3	57.9
1000	100	91.3	68.9	52.2	100	73.7	71.8	63.0
2000	100	74.4	69.2	62.4	100	88.4	63.3	67.7
4000	100	81.5	53.0	50.6	100	92.2	69.2	65.4

棕壤、红壤进行的培育提取表明,土壤中能被 1mol/L  $\text{NH}_4\text{OAC}$  可提取的 Pb 随培育时间的推移而降低(表12)。对黄棕壤而言,培育第2周到第16周,其提取率下降37.6—65.9%,而红壤下降 32.3—42.1%。研究表明,稻—麦轮作后的土壤,其可提取态 Pb 较种一季水稻的土壤下降 10—30%。这种趋势与植物吸收 Pb 量随时间推移而下降的变化是一致的。可以认为,植物吸收 Pb 量随时间推移而减少,可能是由于土壤中可提取态的减少所致。

(三)污染发生过程 植物对Pb的吸收在一定浓度范围内有随Pb浓度增加而上升的趋势,超过一定的浓度时,由于根系受害而降低元素吸收的能力,从而使得吸收量下降,因此,仅从作物籽实中的Pb含量来判断土壤 Pb 的污染状况时,有可能会得出错误的结论。例如对影响大豆植株中 Pb 含量因素的研究表明<sup>[4]</sup>,在 Pb 浓度为 500 和 1000mg/kg 处理中(pH 4.5;CEC6.8),其地上部分 Pb 含量分别为 127.8 和 83.9 mg/kg,表明添加 1000 mg Pb/kg 时,反而比 500 mg/kg 的植株含量要少,因而污染发生过程的影响使得植株 Pb 含量与土壤 Pb 含量之间并不总是有良好的对应关系,如对污染历程缺乏了解,就有可能造成误判。

#### 四、环境因素的影响

环境条件直接影响土壤中的水、热状况,同时对植物生长以及对 Pb 的吸收也产生较大的影响。

(一)温度 对植物吸收重金属机理的研究表明,植物对一些重金属的吸收是被动吸收,因而,当温度变化时,势必影响水分蒸腾作用,从而影响了植物对重金属的吸收,例如1987年盆栽(小麦)试验中,由于试验前中期一直是在温室中进行的,作物生长较快,使得孕穗期提前,但待至成熟期时,由于温室已停止供热,但气温仍较低(4月中旬收割),因而它吸收的 Pb 量也低;而 1988 年小麦处于自然环境条件下(5月下旬收割),其成熟期的气温较高,因而对 Pb 的吸收量也大。

(二)pH 一般说来,随 pH 升高,土壤对 Pb 的“固定”能力增强。对红壤和黄棕壤进行的 Pb 吸附试验表明,随 pH 上升,土壤对 Pb 的吸持能力明显增强(图 1),由于黄棕壤的 pH 比红壤高,因此对自然土来说,黄棕壤吸持 Pb 的能力比红壤要强,即使添加同样浓度的

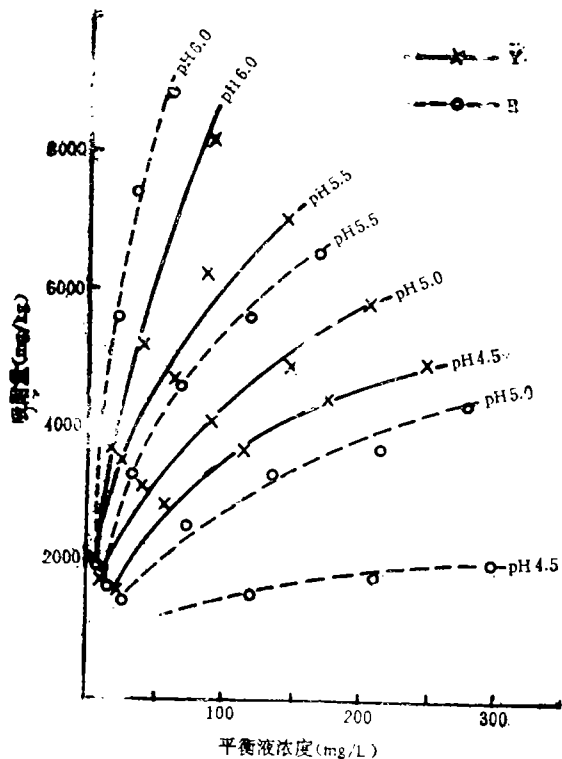


图1 黄棕壤(Y)和红壤(R)对Pb的吸附与平衡液浓度的关系

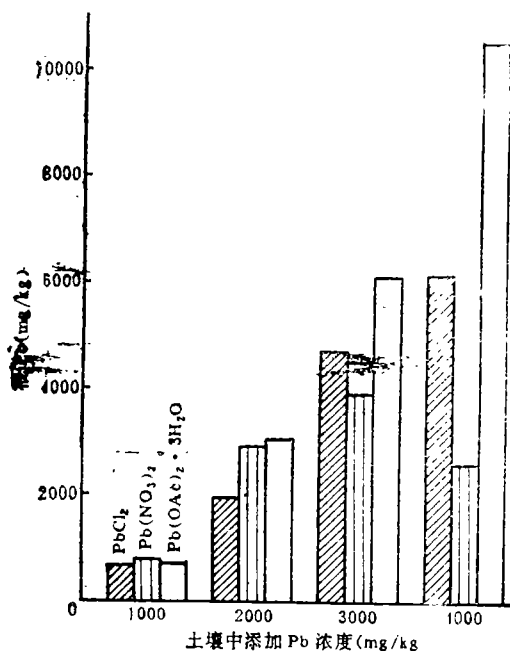


图2 土壤中添加不同的含Pb化合物对稻根中Pb含量的影响

Pb时，黄棕壤上水稻植株吸收的Pb比红壤要少，土壤中可提取性Pb也较少，但超过一定pH范围后，两者对Pb的相对固定能力则又有所变化。

(三)气象条件的影响 在本试验中，供试作物产量与Pb处理之间无规律性变化。但在通常情况下，Pb添加量浓度高时仍会引起减产，但在特殊气象条件下，Pb添加量高的水稻，其产量反而较Pb添加量低者高(表3)，这是因为当年在水稻杨花期适逢台风，导致水稻落花严重，而Pb添加量高的处理者因其成熟期后延，避开了台风的干扰，反而出现了3000—4000mg Pb/kg处理的水稻产量高于Pb添加量低者，甚至超过无Pb处理的对照区。

### 五、化合物类型的影响

化合物类型对Pb吸收有明显的影响，这显然是由于阴离子的作用所致。不同的Pb化合物对水稻根、茎叶和糙米中Pb含量的影响见图2—4。在Pb的添加量为4000mg/kg时，以 $Pb(OAc)_2$ 作为Pb源的处理，其根的Pb含量为以 $PbCl_2$ 作Pb源处理者的1.7倍，以 $Pb(NO_3)_2$ 为Pb源处理的1.2倍。水稻茎叶中含Pb量亦有如此趋势。显然，对同一种土壤来说，它对Pb的承载能力随Pb化合物类型而异。

### 六、复合污染的影响

自然界中Pb矿多与Zn共生，并含有Cu、Cd等元素；Cu、Zn矿等亦往往与其它元素共生，因此重金属的污染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。为了帮助理解某个元素在植物体中的生理、生化过程或土壤中的行为，对单元素植物效应进行研究是十分必要的；然而土壤—植物系统中重金属的循环受着多种因素的制约，除了环境因子和土

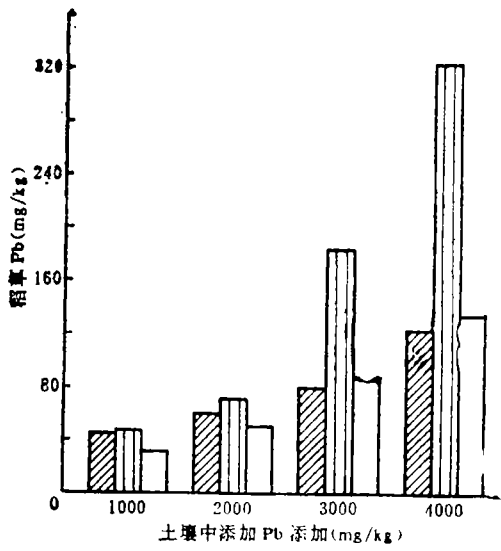


图 3 土壤中添加不同的含Pb化合物对稻草中Pb含量的影响

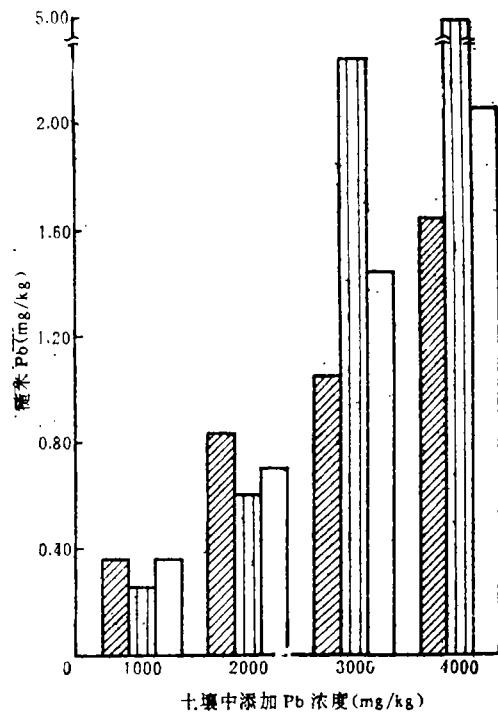


图 4 土壤中添加不同的含Pb化合物对糙米中Pb含量的影响

壤理化性质外，对于同一土壤来说，重金属复合污染中单个元素的植物效应亦受控于其它共存元素，所以在环境标准和环境容量的研究中，应考虑元素之间的相互作用对容量的影响。

多元素复合污染的研究目前并不多见。由于元素之间交互作用的复杂性，要寻找一个合适指标来表征这种综合影响是不易的。最近有人用离子冲量来表征复合污染中元素的综合效应与植株干物重以及稻谷产量的关系。均获得了满意结果<sup>[5,6]</sup>，它表明在重金属复合污染条件下，稻谷产量和元素吸收量均受共存元素的影响。对Pb和Cd的研究表明(表13)，由于

表 13 元素间的交互作用对水稻苗吸收Pb Cd的影响(mg/kg)

添加Pb浓度 (mg/kg)	添加Cd浓度 (mg/kg)	Pb		添加Cd浓度 (mg/kg)	添加Pb浓度 (mg/kg)	Cd	
		黄棕壤	红壤			黄棕壤	红壤
500	0	34.6	445	5	0	22.3	64.3
500	1	41.1	408	5	500	40.5	56.9
500	5	18.3	540	5	1000	51.4	206
500	10	7.26	634	5	2000	69.4	469

Pb、Cd的交互作用使植株吸收Pb和Cd的量与它们单独存在时相比发生了变化，在Pb添加量相同时，由于Cd的影响使得生长在黄棕壤上的水稻植株含Pb量呈下降趋势；与此相反，红壤的水稻植株含Pb量却有所上升。在Pb存在时，水稻对Cd的吸收量，无论在黄棕壤还是红壤上，均呈上升趋势。但在共存元素种类、浓度及比例改变后，水稻对Pb、Cd吸收量将有所变化，因此以单元素获得的临界含量的代表性是有限的，对同一土壤来说，单个元素的土壤临界含量亦受共存元素所制约。(下转第188页)

为主。但另一方面由于各剖面的具体成土条件不同,使灌淤土粘土矿物的组成也有一定的差异,主要表现在其次要矿物上。最明显的是IW<sub>2</sub>剖面,绿泥石成为其主要矿物之一,此外还含有少量闪石,说明其形成物质的风化程度较弱;IW<sub>1</sub>剖面中高岭石的含量较多,而绿泥石的含量又比其他剖面少,可能和其物质来源于第三纪风化程度较高的沉积物有关;此外,IW<sub>5</sub>剖面中蒙皂石的含量明显高于其他剖面,是因为该剖面种植水稻和受地下水作用的缘故,说明农业利用方式和地下水的作用也会对灌淤土性质产生影响,因为受水的浸渍作用有利于蒙皂石的形成<sup>[4]</sup>。

此外,5个供试土壤的耕层、灌淤层和母质层(下垫土壤层)之间的粘粒的X射线衍射图谱具有很好的相似性(图1),说明它们的粘粒矿物组成也相当一致。相对来说有所差异的是IW<sub>1</sub>剖面,耕层与灌淤层及下垫土壤层相比,在1.80纳米处峰值较小,说明下面两层含有较多的蒙皂石,和这两层受地下水的作用有关。王吉智在研究宁夏灌淤土的粘土矿物中也有同样的发现<sup>[5]</sup>,说明地下水的浸渍作用使蒙皂石的含量有所增高。

### 参 考 文 献

- [1]中国科学院南京土壤研究所,土壤理化分析。上海科学技术出版社,1978。
- [2]史成华、龚子同,灌淤土的发生及其分类,中国土壤系统分类探讨,科学出版社,1992。
- [3]熊毅等,土壤胶体(等一册),科学出版社,1983。
- [4]布雷迪(南京农学院土化系译),土壤的本质与性状,科学出版社,1982。
- [5]王吉智、马玉兰、王全祥,灌淤土的分类研究,中国土壤系统分类探讨,科学出版社,1992。

(上接第195页)

### 七、结 语

上述研究表明,影响土壤环境容量的因素十分复杂,但在制定环境容量时如何综合地将这些因素的作用都考虑进去则是一个尚未解决的课题。因此,研究环境容量应立足于从分析影响因素中寻找规律,逐步完善其指标体系,以期获得更为可靠的容量值,以确保土壤生态环境的良性循环。

### 参 考 文 献

- [1]顾宗濂等,土壤环境容量研究,气象出版社,第13—139页,1986。
- [2]旭军等,土壤环境容量研究,气象出版社,第84—93页,1986。
- [3]顾淑华、罗忠艳,土壤环境容量研究,气象出版社,第94—108页,1986。
- [4] Miller, J. E. et al., Commun. Soil. Sci. plant Anal., 6: 339—347, 1975.
- [5]郑春荣、陈怀满,土壤21(1):10—14, 1989。
- [6]郑春荣、陈怀满,环境科学学报, 10(2):145—162页, 1990。