

中国主要类型土壤若干重金属临界含量和环境容量区域分异的影响*

夏增禄¹⁾

(中国科学院地理研究所)

摘 要

本文通过八年研究结果,分析了土壤区域、地带性土壤类型分布、土壤 pH、碳酸盐、有机质等因素对 Cd、Cu、Pb、As 四种元素土壤临界含量和环境容量区域分异的影响。其中以土壤 pH 和土壤类型分布是主要影响因素。Cd 和 Cu 的土壤临界含量、环境容量和土壤 pH 间呈负相关性,并随土壤类型由北到南的分布而减小。土壤 As 的临界含量和环境容量随土壤 pH 增大和土壤类型由南到北的分布而增大。但它们之间无相关性。

关键词 土壤临界含量,土壤环境容量,重金属,区域分异

土壤元素的临界含量是藉以制定土壤环境质量的依据。土壤环境容量是进行区域污染物总量控制,制定农田灌溉水质标准和污泥农田施用标准的依据。这两者都是目前国内外土壤环境保护中极为重视的问题,纷纷进行了较多的研究^[1-6,10]。但土壤因区域而异,它们的临界含量和环境容量也将因土壤类型的不同而异。而这种分异则是防治土壤污染、管理土壤质量中因地制宜以收最佳社会和经济效益所必须的依据。但是,土壤临界含量和环境容量以及它们的区域性分异规律主要是受什么因素所控制?这不仅是一个未知的重大理论问题,而且也是藉以调控土壤重金属及其容量的生产性问题。本文主要以八年协作研究结果就这一问题作一概述。

一、材料与方 法

供试土壤及其主要理化性质列于表 1。

作物效应主要通过盆栽进行。土壤添加金属为 CdCl₂、CuCl₂、PbAc、Na₂HAsO₄, 浓度级别设置 7—8 级。每处理重复 3—6 次,对照重复 4 次。栽培作物为水稻、小麦、大豆、玉米等,各选其中地区性主要作物 1—2 种。小区试验仅作一季,每处理重复 3 次。田间研究一般选在污染区进行,在收获期同时间、同样点采集土壤和作物样品。

径流试验分别在田间自然降雨或人工降雨下测定;小区试验区实地观测和盆栽水层观测。

径流试验分别在田间自然降雨或人工降雨下测定;小区试验实地观测;盆栽水层观测。

* 国家“七五”科技攻关项目,研究组由中国科学院地理研究所、中国环境科学院、北京师范大学环境科学研究所、中国科学院沈阳应用生态所、中国科学院南京土壤所等 17 个单位组成。

1) 本文执笔者。

Cd、Pb、Cu、As 的土壤渗漏分别采用 20cm 和 100cm 模拟土柱试验测定；田间小区试验地土壤剖面分层采样测定后进行分析和区域实地调查地下水含量后进行分析。

土壤样品以王水-高氯酸消化，作物样品以硝酸-高氯酸消化，用原子吸收分光光度法测定 Cd、Pb、Cu 含量。土壤中的 As 以王水消化，作物中的 As 以硝酸-高氯酸消化，用氢化-原子荧光法或比色法测定。

土壤金属的临界含量和环境容量按“土壤环境容量及其应用”一书中的方法确定^[1]。

表 1 土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of soil

土壤 Soil	地点 Location	pH	交换性阳离子 Exchangeable cmol(+)/kg	CaCO ₃ (g/kg)	土壤质地 Soil texture	有机质 M.O (g/kg)	<0.001mm 粒径 <0.001mm soil particles (g/kg)
灰钙土	甘肃白银	8.7	7.9	117	中壤	17	427
草甸褐土	北京	7.8	20.0	60	轻壤	23	—
黑土	吉林榆林	6.9	29.8	—	重壤	27	587
草甸棕壤	辽宁沈阳	6.5	16.0	—	—	20	—
黄棕壤	江苏下蜀	6.6	18.0	—	重壤	5	481
酸性紫色土	四川宜宾	5.7	11.3	—	轻壤	10	361
石灰性紫色土	四川巴县	8.2	22.0	63	中壤	13	439
红壤	江西大吉山	5.7	10.7	—	—	29	619
红壤	广东韶关	5.2	—	—	—	11	—
赤红壤	广东广州	4.8	—	—	—	11	—
砖红壤	广东湛江	5.4	14.9	—	—	11	—

二、结果与讨论

(一) 不同土壤区域的影响

我国土壤区域中以生物气候条件的重大差异和土壤系列组合的成分，将全国分为四个土壤区域，即硅铝质土区域；富铝质土区域；石膏-钙质干旱土区域；高山土区域。在这四个区域中，根据需要与可能布点，在高山区未布点，干旱区域也仅在灰钙土上布点，据所获结果按此划分的区域进行归纳，可获表 2 数值。从表 2 可见，土壤区域的差异对几种元素的土壤临界含量和环境容量差异的影响，一般是较明显而有规律的。Cd、Cu、Pb 大多是

表 2 不同土壤区域 Cd、Cu、Pb、As 的临界含量和环境容量

Table 2 The critical levels and environmental capacities of Cd, Cu, Pb and As in various soil region

土壤区域 Soil region	临界含量 Critical content (mg/kg)				环境容量 Environmental capacities (g/ha/year)			
	Cd	Cu	Pb	As	Cd	Cu	Pb	As
富铝质土区	0.5—1.0	48—80	250—350	40—50	15—30	900—1950	6750—7500	900—1050
硅铝质土区	1.0—2.0	100	350—500	20—40	30—45	1950—4500	7500—12000	675—900
石膏-钙质干旱土区	2.0—2.5	110	300	25	49.5	2130	6340	420

以富铝质土区最低,石膏钙质干旱土区最高,而硅铝质土区居中。As 则与 Cd、Cu、Pb 相反,以石膏-钙质干旱土区最低,富铝质土区最高,而硅铝质干旱土区居中,其中以 Cd 最为明显。Pb 在石膏-钙质干旱土区的数值较低,这可能与该区生态抗性脆弱,因而抗毒性较低有关。

(二) 我国土壤带分布的影响

表 3 是我国东部(大半部分)由南到北,由东到西各主要类型土壤的临界含量和环境容量。从表 3 可见,土壤类型的分布序列与临界含量和环境容量数值大小的序列基本上是一致的。即随土壤类型由南到北,由东到西,Cd、Cu、Pb 的临界含量和环境容量是由小逐渐增大,而 As 则与之相反,由大变小。这种次序表现出了土壤地带性分异对几种金属的土壤临界含量和环境容量分异在总体上的影响,由于这种影响的结果,可以认为这几

表 3 若干类型土壤 Cd、Cu、Pb、As 的临界含量和环境容量

Table 3 The critical levels and environmental capacities of Cd, Pb, Cu and As in some types of soils

土壤 Soil	临界含量 Critical content (mg/kg)				环境容量 Environmental capacities (g/ha/year)			
	Cd	Cu	Pb	As	Cd	Cu	Pb	As
砖红壤	0.63	80	342	45	28.50	1911.0	7677.0	1012.5
赤红壤	0.46	45	287	38	26.25	843.0	6526.5	1002.0
红壤	0.56	53	230	45	25.50	988.5	7717.5	996.0
黄棕壤	0.30	99	586	51	13.35	2047.5	12828.0	958.5
棕壤	1.31	—	—	30	36.75	—	9451.5	799.5
褐色土	1.57	125	360	21	42.30	—	6595.5	—
黑土	1.3	230	500	42	36.00	4750.5	10890.0	697.5
灰钙土	2.3	110	300	25	49.65	2131.5	6351.0	417.0

种元素的土壤临界含量和环境容量的区域分异也具有地带性分异的特征,它主要决定于土壤地带性的分异。但是,在总体的基础上,由于试验选用土壤的典型性和特异性,以及各类土壤设点的有限性,在地带性分异的某一段上或局部上也出现了一些特异的数值。如砖红壤的数值与赤红壤、红壤的数值与理想的颠倒了,这是因为所试验的砖红壤是一个 pH 相对较高 (pH = 5.6)、熟化度较高的土壤之故。但尽管如此,它的数值仍接近于赤红壤和红壤。某些石灰性土壤的 Pb 的数值也显偏低。这可能与前述该区生态脆弱,抗性较差有关。这些局部的特异,应对具体选用土壤及其环境条件作进一步的具体分析。同时这也是今后继续深入研究需要探讨的问题。

(三) 土壤 pH 的影响

我国的土壤 pH 具有由南到北,由东到西逐渐增大的趋势,其序列与土壤类型的分布相一致。土壤酸碱性是土壤很多化学性质的综合反映,它影响到元素在土壤中的诸种行为及其有效性。因此,土壤 pH 可能是影响土壤重金属生态效应、环境效应,从而影响其临界含量和环境容量的最为重要的因素之一。由图 1 可见,我国东半部各主要类型土壤 Cd 的临界含量与土壤 pH 呈线性关系。相关系数 $r = 0.89$, 达 0.01 显著水平。

图 2 是不同类型土壤的 pH 与 Cd 容量的关系,其线性关系亦很好。相关性达 0.01

显著水平。

土壤 Cu 的研究在“六五”中未列入计划。但从图 3 中可见土壤 pH 与 Cu 临界含量间的关系,一般来说是良好的,似呈一直线关系。但其中有一点的位置过高,出现特异。这是黑土所引起的,因黑土富含的有机质与 Cu 结合,异常地提高了土壤 Cu 的临界含量,突出了有机质的作用。若将黑土数值不参加统计, $n = 9$ 时,

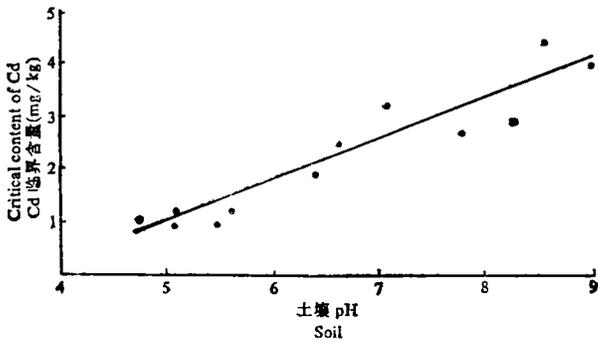


图 1 不同类型土壤 pH 对 Cd 临界含量的影响

Fig. 1 Influence of pH on the critical level of Cd various types of soils

$r = 0.93$, 达 0.01 显著水平。当酸、中、石灰性三种紫色土不参加统计, $n = 6$ 时, $r = 0.93$, 仍达 0.01 显著水平。但当黑土数值参加统计时, $n = 10$, $r = 0.59$, 而无显著性关系。这一统计结果说明, 土壤 pH 和 Cu 临界含量间通常是具良好相关性的。

图 4 是土壤 pH 与 Cu 容量的关系。从图形看, 两者似有一定关系。但若南、北 9 种土壤进行统计, 则无显著相关性。若如前所述, 黑土数值不参加统计, $n = 8$, $r = 0.77$,

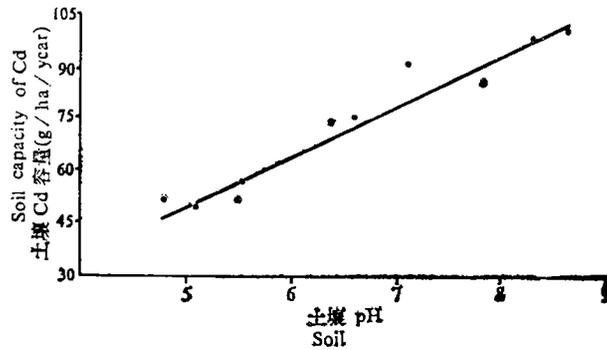


图 2 不同类型土壤 pH 对 Cd 容量的影响

Fig. 2 Influence of pH on the environmental capacity of Cd in various types of soils

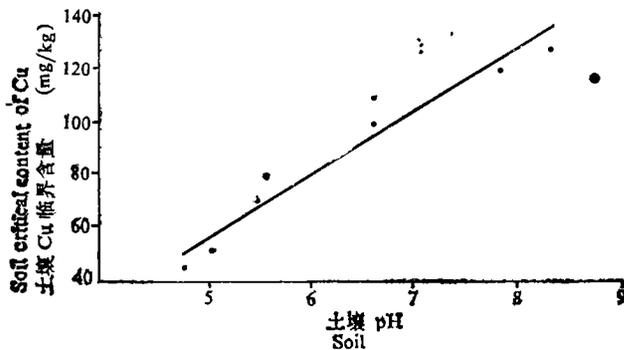


图 3 不同类型土壤的 pH 对 Cu 临界含量的影响

Fig. 3 Influence of pH on the critical level of Cu in various types of soils

达 0.05 显著水平。若将黑土除外,用黄棕壤和其它 6 种土壤进行统计, $n = 7, r = 0.89$, 达 0.01 显著水平。由此可见, 在一般情况下, 土壤 pH 与 Cu 容量也具显著性相关, 只是它受其它因素的干扰比 Cd 的大。

图 5 中各类土壤 Pb 的临界含量与土壤 pH 间无线性关系。相关性统计也证明了这一点。但当将土壤 pH 小于 7.0 的土壤 Pb 临界含量与相应的土壤 pH 进行统计时, $n = 8, r = 0.867$ 。两者呈现 0.01 的显著性关系。这似乎说明土壤 Pb 临界含量发生正影响与土壤 pH 的限值有关。这个限值可能在 pH 7.0 左右。当土壤 pH 大于这一限值时, 土壤

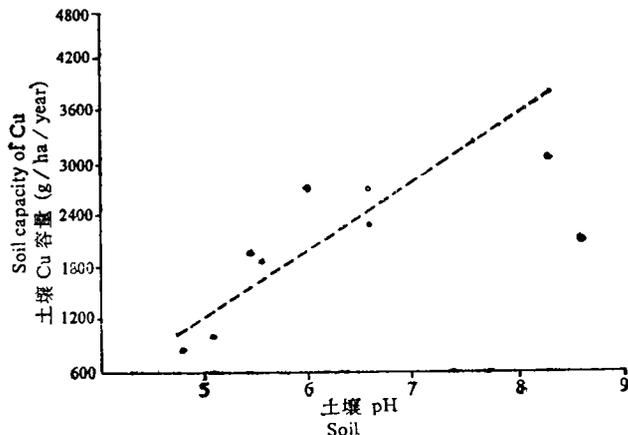


图 4 不同类型土壤的 pH 对 Cu 容量的影响
Fig. 4 Influence of pH on the environmental capacity of Cu in various types of soils

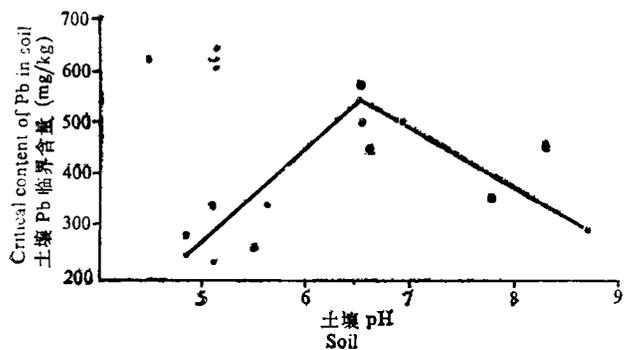


图 5 不同类型土壤的 pH 对 Pb 临界含量的影响
Fig. 5 Influence of pH on the critical level of Pb in various types of soils

上述土壤 pH 与土壤 Pb 临界含量的关系相似。从全部数值统计而言无显著性关系。当以 $pH < 7$ 的土壤数值进行统计时, $n = 8, r = 0.83$, 两者达到 0.05 显著水平。

土壤 As 的临界含量与土壤 pH 值从图 7 形状看, 土壤 As 的临界含量有随土壤 pH 升高而降低的趋势。但经统计, $n = 8, r = -0.69$, 未达显著水平。通常在石灰性土壤中, As 的临界含量都是较低的, 而在南方酸性土壤中相对较高。

土壤 As 的容量与土壤 pH 之间的关系与土壤临界含量的相似, 随土壤 pH 升高而降低(图 8)。经统计, $n = 8$ 时, 无显著性关系。但当剔除褐土的异常值, $n = 7, r = -0.9363$, 达 0.01 水平显著。

总之, As 的临界含量与环境容量虽然不像 Cd 那样与土壤 pH 具有极好的显著相关性, 但土壤 pH 的影响仍然是非常明显的。

pH 似乎发生了负影响, 其中灰钙土的表现尤为明显。这种现象产生的原因需要进一步探讨。北部土壤随 pH 升高到 7 以上, 碳酸盐也逐渐增大, 这种增大是否促进了 Pb 的危害? 北部土壤(如灰钙土)条件下, 生态较脆弱, 作物抗性较差, 是否也会促进 Pb 的危害? 这些都是需要探讨的问题。

图 6 是土壤 Pb 容量与土壤 pH 的关系。其特征与上

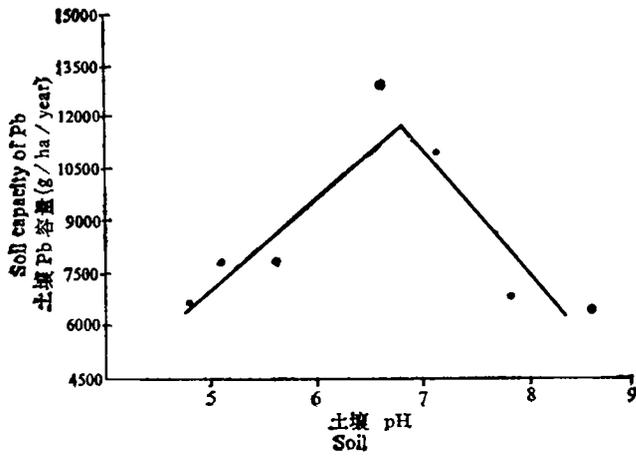


图 6 不同类型土壤的 pH 对 Pb 容量的影响

Fig. 6 Influence of pH on the environmental capacity of Pb in various types of soils

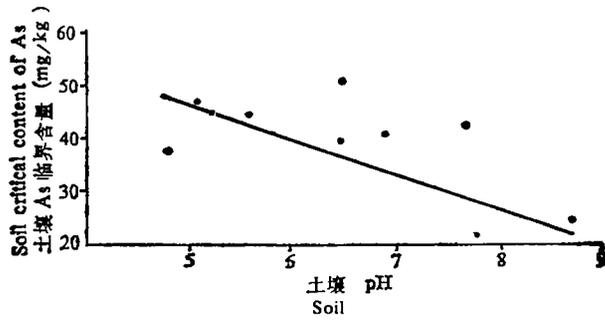


图 7 不同类型土壤的 pH 对 As 临界含量的影响

Fig. 7 Influence of pH on the critical levels of As in various types of soils

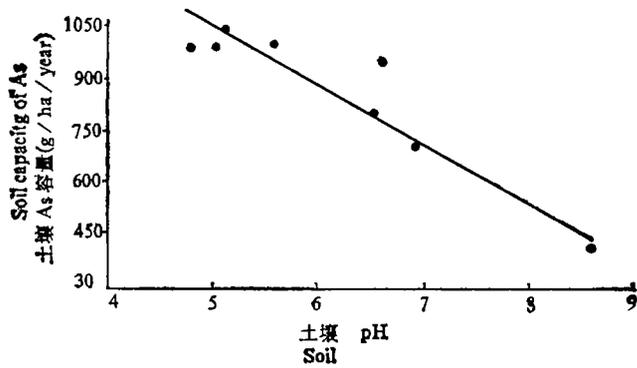


图 8 不同类型土壤的 pH 对 As 容量的影响

Fig. 8 Influence of pH on the environmental capacity of As in various types of soils

关于土壤 pH 对土壤重金属临界含量和环境容量的影响虽然报道很少,但土壤 pH 对重金属在土壤中的行为和对生态的影响却有不少报道。Street 等^[11]曾报道增高土壤

pH,增大了土壤组分(如粘土,金属氧化物、有机质)的吸附或矿物沉淀。当土壤 pH 增大时,土壤水溶性 Cd 可降低 50% 之多。 Santillzn-Medrano 等^[12]注意到当土壤 pH 增大时,Cd 的溶解度降低了。我们的试验证明,紫色土对 Cd 的吸附随起始 pH 增大而增大。这一点在红壤的吸附试验中,也获得同样的结果^[7]。在 Pb 和 Cu 的吸附试验中,也获得与 Cd 类似的结果,pH 增大,相应增大了土壤对 Pb 和 Cu 的吸附^[8]。关于 As 的吸附与 pH 的关系,曾获得与 Cd、Cu、Pb 反向的结果,即 pH6—10 范围内,土壤对 As 的吸附是随 pH 升高而降低^[9]。土壤 pH 不仅影响金属在土壤中的行为,而且对环境发生不同影响,而且它亦影响到金属在土壤中的活性或有效性而对作物发生不同的影响。Street 等^[13]的试验表明,当土壤 pH 由 5.7 增大到 7.8 时,作物中的 Cd 浓度随之降低了 70% 多。John 等^[14-16]都曾报道过某些种类植物的 Cd 浓度随土壤 Cd 增高而减低。Legerwerff^[17]曾报道过 Cd 污染土壤中,当 pH 增大时,减低了植物中的 Cd 含量。Linnmznt 等人^[18]在不同等级的土壤 pH 中,获得小麦的 Cd 含量随土壤 pH 的降低而增大。如上所述,土壤 pH 既然如此巨大地影响着重金属元素在土壤中的行为和有效性,从而影响到重金属在土壤中的迁移及生物效应和环境效应。由此可见,作为这些影响的综合性指标结果的临界含量和环境容量受到土壤 pH 的明显影响,甚至与之在统计上具有显著性相关性就易于理解了。

(四) 土壤碳酸盐的影响

我国碳酸盐含量较多的土壤,大多分布在北方,但在南方的黄、红壤地区,有些土壤是由成土年龄较轻的石灰性母质发育的,因此,也有少部分呈石灰性。如石灰性紫色土以及一些石灰岩发育的土壤。土壤碳酸盐的存在常与土壤 pH 相关联,如灰钙土、褐色土等对几种重金属临界含量和环境容量的影响就是如此。在干旱土区域,由于碳酸盐等与 pH 的共同作用,而表征出对重金属有较大的影响。在四川紫色土地区,碳酸盐的作用表现尤为明显。如表 4 所示,在石灰性紫色土中的 Cd、Pb、Cu 对水稻的三种临界含量都比酸性紫色土大,这充分说明了碳酸盐对重金属的临界含量和环境容量的影响是很明显的。

表 4 酸性和石灰性紫色土 Cd、Cu、Pb 的临界含量

Table 4 The critical levels of Cd, Cu, and Pb in acid and calcareous purple soils (mg/kg)

土壤 Soil	危害临界含量 Damage critical content			累积临界含量 Accumulation critical content			临界含量 Critical content		
	Cd	Pb	Cu	Cd	Pb	Cu	Cd	Pb	Cu
酸性紫色土	8	494	70	0.56	255	275	0.56	255	70
石灰性紫色土	13	534	128	1.20	429	335	1.20	430	128

(五) 土壤有机质的影响

土壤有机质对土壤重金属的行为及其效应是众所周知的。但与上述诸因素相比,通常它在不同类型土壤中含量的差异所起的作用还未达到明显的程度。这可能与有机质含量及其变化程度不够大有关。在黑土中,有机质的作用表现得甚为明显。由于它富含有机质,其 Cd、Pb、Cu 的各种临界含量都比褐土的大(表 5)。而在黑土中,由于厚层黑土的有机质比薄层黑土的还要高,因而厚层黑土中各种临界含量又比薄层黑土中各种临

表 5 土壤中 Cd、Pb、Cu 的临界量 (mg/kg)

Table 5 The critical levels of Cd, Pb and Cu in soil (mg/kg)

土 壤 Soil	危害临界含量 Damage critical content			累积临界含量 Accumulation critical content			临界含量 Critical content		
	Cd	Cu	Pb	Cd	Pb	Cu	Cd	Pb	Cu
褐 土	15	346	100	1.5	608	125	1.5	346	100
薄层黑土	41.9	2046	230	1.3	505	591	1.3	500	230
厚层黑土	56.9	2603	289	1.9	2221	6448	2.0	622	289

界含量要大,明显表现出有机质的影响。

参 考 文 献

1. 夏增禄主编,1988: 土壤环境容量及其应用。气象出版社,175—188 页。
2. 土壤环境容量研究组(夏增禄主编),1986: 土壤环境容量研究。202—217 页,气象出版社。
3. 熊先哲等(夏增禄主编),1986: 土壤环境容量研究。6—21 页,气象出版社。
4. 孙汉中等(夏增禄主编),1986: 土壤环境容量研究。47—58 页,气象出版社。
5. 杨展荣等,1984: 北京地区土壤重金属容量的研究。环境科学学报,第 2 期,142—150 页。
6. 夏增禄,1981: 污灌区土壤重金属的容量研究。中国环境科学,第 2 期,46—51 页。
7. 陈怀满(夏增禄主编),1986: 土壤环境容量研究。165—169 页,气象出版社。
8. 姜曙千等(夏增禄主编),1989: 土壤容量化学。66—69 页,气象出版社。
9. 罗金发等(夏增禄主编),1989: 土壤容量化学。30—36 页,气象出版社。
10. Davos, R. D. et al., 1978: Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. Plant soil. (49):395.
11. Street, J. J. et al., 1977: Solubility and plant uptake of cadmium in soil amended with cadmium and sewage sludge. J. Environ. Qual. (6):72—77.
12. Santillan-medrano, J. et al., 1975: The chemistry of lead and cadmium in soil. Soil Sci. Soc. Amer. proc., (39):851—866.
13. Street, J. J. et al., 1978: Influence of pH, phosphorus, cadmium, sewage sludge, and incubation time on the solubility and uptake of cadmium. J. Environ. Qual. (2):286—290
14. John, M. K. et al., 1972a: Cadmium contamination of soil and its uptake by cats. Environ. Sci. Tech. (6):555—557.
15. John, M. K. et al., 1972b: Factors affecting plant uptake and phytotoxicity of cadmium added to soils. Environ. Sci. Tech. (6):1005—1009.
16. Anderson, A. K., 1974: Influence of lime and soil pH on cadmium availability to plant. Ambio. (3):198—200.
17. Lagerwerff, J. V., 1971: Uptake of cadmium lead and zinc by radish from soil and air. Soil Sci. (3):129—132.
18. Linnman, L. A. et al., 1973: Cadmium uptake by wheat from sewage sludge used as plant nutrient. Arch. Environ. Health. (27):45—47.

FACTORS AFFECTING REGIONAL DIFFERENTIATION OF CRITICAL LEVELS AND ENVIRONMENTAL CAPACITIES OF SOME HEAVY METALS IN MAIN SOIL TYPES OF CHINA

Xia Zenglu

(*Institute of Geography, Academia Sinica, Beijing 100101*)

Summary

According to the results of an eight-year study, the effects of soil region, the distribution of zonal soil type and pH, carbonate and organic matter on regional differentiation of critical concentrations and environmental capacities of Cd, Pb, Cu and As in soils are analysed, and the pH value of soil and the distribution of soil type are considered as the main influencing factors. There was a negative correlation between the critical levels and environmental capacities of Cd and Cu in soils and the pH of soils. The critical levels and environmental capacities of Cd and Cu in soils decreased with the distribution of soil types from south to north. The critical levels and environmental capacities of As in soils increased with the soil pH and the distribution of soil types from south to north, but there was no correlation between them.

Key words Soil critical level, Soil environmental capacity, Heavy metal