

重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株 中的富集和分布¹⁾

莫 争 王春霞²⁾ 陈 琴 王 海 薛传金 王子健

(中国科学院生态环境研究中心, 环境水化学国家重点实验室, 北京, 100085)

摘 要

研究了外源可溶性重金属进入水稻土环境后, 在水稻植株中的迁移、在水稻植株不同部位的分布及其分布随时间的变化. 在水稻生长季节, 重金属在水稻植株中迁移能力的大小依次为: Cd, Cr> Zn, Cu> Pb. 重金属在水稻植株不同部位的积累分布是: 根部> 根基茎> 主茎> 穗> 籽实> 叶部. 水稻分蘖期重金属在根部、茎干部和叶片的积累量达到最大, 随着时间的延长, 在根部积累的重金属愈来愈少; 在茎干部积累的重金属在拔节期降至最小, 随后含量又稍微上升; 叶片上的重金属含量在拔节期迅速下降, 随后趋于稳定.

关键词: 重金属, 迁移, 分布, 水稻.

关于重金属在作物不同器官的分布和总量传输已进行了较多的研究^[1, 2], 但重金属的迁移、分布和总量传输都是一个动态的过程, 而目前对于分布和传输方面的研究多集中于成熟期作物不同器官的重金属含量和形态比较, 忽略了在不同时期作物在重金属胁迫条件下迁移、传输和分布的动态过程. 研究重金属在土壤-作物体系向作物的迁移、传输和分布及其随时间变化的动态过程, 将会提供作物在重金属胁迫条件下对重金属吸收代谢的信息, 对了解重金属的生物效应具有重要意义.

本文以生态站试验田为实验体系, 研究重金属复合污染物在水稻不同器官的分布及随时间的动态变化, 为重金属在植物-土壤系统中的迁移输出、重金属的生物效应和水稻作物对重金属代谢提供信息.

1 试验部分

1.1 受试土壤理化特性和试验设计

受试土壤是中国科学院常熟生态站试验田土壤, 土壤为该地区的主要类型——竖头乌栅土 (Degleyed Paddy Soils), 其理化基本性质见表 1. 实验土壤的重金属背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分别为: Cd 0.9, Pb 28.9, Cu 19.7, Cr 11.4, Zn 82.9. 供试污染物的浓度设计见表 2.

1) 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999011806) 和国际铜业协会项目 (TPT0605) 资助. 2) 联系人.

1.2 实验步骤

实验小区面积为 $2\text{m} \times 2\text{m} = 4\text{m}^2$, 小区间采用防水人造地板革隔开, 地上高度 20cm, 地下深度 60cm, 以防侧渗相互干扰. 实验采用 4 个浓度处理, 每个处理 3 个平行小区, 进行田间试验.

将分析纯的 CdCl_2 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, ZnCl_2 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, CrCl_3 5 种化合物的混合物投放至 0—20cm 表层耕作层土壤中, 灌水后, 充分混匀, 移栽秧苗, 分别采集不同生长时期的水稻植株, 用自来水冲洗净, 再用去离子水冲洗, 将植株的不同器官分离后杀青, 烘干, 称取干重为 1g 植株样品, 加入 3ml HNO_3 , 1ml HClO_4 于 CEM MDS-2000 微波消解仪上消解, 定容, 溶液用 PERHIN-ELMER3100 石墨炉原子吸收仪测定重金属的浓度.

表 1 供试土壤的基本性质¹⁾

Table 1 The physical and chemical characteristics of test soil

土壤层次/cm	砂 粒	粉 粒	黏 粒	有机质	容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙度/%	结构系数/%
	$(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$						
0—20	229.6	427.1	343.3	35.5	1.22	53.8	89.23

1) 引自陈效民等, 水土保持通报, 2000, 20 (5): 11—12.

表 2 污染物浓度设计 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 The designed concentrations of heavy metals in test soil

处理	Cd	Pb	Cu	Cr	Zn
对照	0	0	0	0	0
低剂量	0.75	150	50	50	100
中剂量	2.5	450	150	150	300
高剂量	7.5	1350	450	450	900

2 结果和讨论

2.1 重金属在水稻植株不同部位的分布

表 3 为重金属在成熟期水稻不同部位的分布, 由表 3 可以看出: 重金属被水稻吸收以后, 大部分停留在根部, 少量向地上部分迁移. 重金属在水稻植株不同器官的含量为: 根部> 根基茎> 主茎> 穗> 籽实> 叶部, 此结果与茅野充男^[3]报道的结果一致, 即: 重金属在植物体内的分布规律是在新陈代谢旺盛的器官蓄积量较大, 而营养储存器官, 如果实、籽粒、茎叶中的蓄积量则较少.

空白对照组与低剂量处理的水稻植株对重金属富集量有时相差不大, 甚至还出现空白对照较之低剂量植株富集量高的现象 (Cu 和 Cr 的此种现象较明显, 其他几种重金属在某些器官也会出现这种情况). 这种现象通常被认为是耕作土壤随重金属含量的增高, 植物的吸收机能、某些器官对重金属的富集机制受到一定程度的阻碍^[2], 低于空白处理下水稻植株此类生理作用的强度. 此外, 影响植物对重金属吸收及重金属在植物体内分

布的因素，除与耕作土壤中重金属的含量有关外，还与作物种类、土壤有效态含量、土壤氧化还原状态、阳离子代换量、土壤的机械组成等等有关^[2, 4]。

表 3 重金属在成熟期水稻植株不同部位的分布 (mg•kg⁻¹)

Table 3 The heavy metals concentration in different parts of paddy plants

	处理	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd
籽实	空白	4.5	0.22	15.2	17.76	0.1
	低剂量	5.7	2.1	15.6	17.2	0.2
	中剂量	13.8	4.6	17.8	21.1	0.2
	高剂量	14.6	5.3	21.3	22.67	0.3
叶	空白	8.8	2.7	20.8	5.3	0.3
	低剂量	7.2	2.6	26.4	5.1	0.4
	中剂量	5.8	4.9	22.5	7.2	0.4
	高剂量	7.5	3.6	24.3	6.2	0.5
茎	空白	32.6	10.8	12.6	36.0	0.4
	低剂量	43.5	18.4	24.8	42.8	1.1
	中剂量	46.8	31.1	42.9	47.8	1.2
	高剂量	56.8	36.8	53.4	53.4	1.6
根基茎	空白	27.6	65.7	75.6	18.4	0.5
	低剂量	22.1	68.4	80.1	21.8	1.2
	中剂量	28.8	96.8	83.6	42.6	1.6
	高剂量	34.9	78.5	85.4	47.8	2.2
根	空白	65.8	110.2	96.5	8.4	0.7
	低剂量	85.4	248.3	148.6	22.8	1.7
	中剂量	100.6	560.4	184.3	23.8	2.0
	高剂量	232.8	900.4	198.3	36.9	3.4

为明确观察水稻植株对所投放 5 种重金属的迁移特性，计算重金属在水稻植株地上部分如籽实、叶、茎的吸收富集系数，即重金属元素在水稻植株地上各个部分的浓度与土壤中对应元素浓度之比，见表 4。

吸收富集系数可用来表征土壤-水稻体系中重金属元素迁移的难易程度，单一元素污染时，吸收系数一般为 Cd> Zn> Cu> Pb^[5, 6]。由水稻植株对五种重金属吸收富集系数值，可以认为重金属在水稻植株内的迁移能力为：Cd, Cr> Zn, Cu> Pb。据文献报道土壤受重金属复合污染时，Cd, Zn, Cu, Cr 共存能够提高作物对几种重金属元素的吸收系数^[2, 5]，促进这些重金属元素在作物体内的迁移。

表 4 水稻植株地上不同部位对五种重金属的吸收富集系数

Table 4 The enrichment coefficients of heavy metals in up ground parts of paddy plants

	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd
籽实	0.03—0.08	0.00—0.01	0.02—0.09	0.04—0.28	0.04—0.14
叶	0.02—0.10	0.00—0.01	0.02—0.14	0.01—0.08	0.05—0.21
茎	0.12—0.62	0.03—0.10	0.05—0.14	0.12—0.70	0.20—0.69
根基茎	0.07—0.32	0.06—0.38	0.09—0.44	0.10—0.36	0.27—0.673

2.2 重金属在水稻植株的积累分布随时间的动态变化

重金属进入水稻根部后首先与蛋白质、多糖类和核酸等结合, 然后会向植株地上部分迁移^[2]。目前的研究认为: 作物在重金属胁迫下会通过回避机制减少对重金属的吸收, 抗性机制可以加强作物对重金属的耐受性, 代谢机制减少对重金属积累和其毒性的消除^[7, 8]。

图 1 为不同浓度重金属处理下, 水稻根部积累的重金属含量在不同生长期的变化情况。可以看出, 水稻根部重金属含量在秧苗期都很低, 而在分蘖期根部积累的重金属迅速上升, 达到最大, 在随后的时间里, 根部积累的重金属含量逐渐减少。

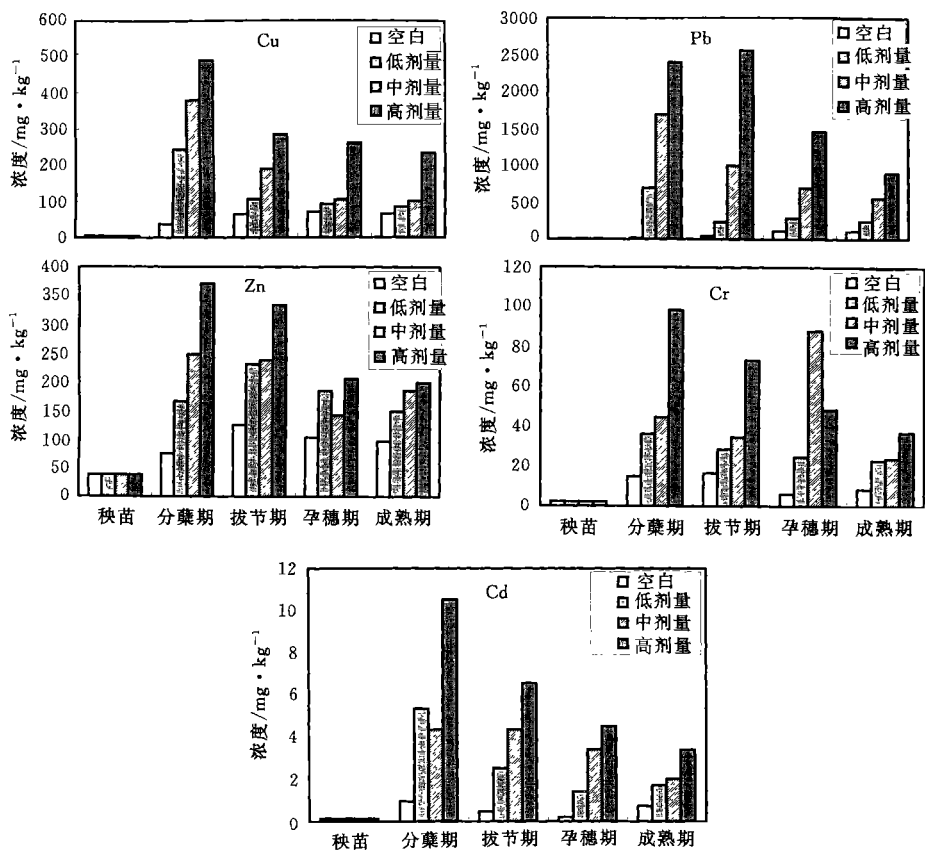


图 1 不同浓度重金属处理下不同生长期水稻根部的重金属含量

Fig. 1 The heavy metals concentration in paddy roots at different growth periods after supplementation of heavy metals with different dosages to soil

水稻根部在分蘖期的生长代谢旺盛, 本研究在实验之初一次性投放 5 种重金属于耕作层土壤, 有效态重金属含量大, 故水稻根部在分蘖期对重金属的吸收量大, 此结果与通过放射性方法所得到的结果一致^[2]。

随后, 由于根部积累重金属, 根部的代谢和吸收机能受到抑制^[5, 7, 8], 首先进入根部的重金属会不断向根上部分迁移, 土壤中有效态重金属含量随时间而有所降低^[2, 4],

根部从土壤中吸收的重金属量减少，同时根部的生物量随时间不断增加，因此，随着时间的延续，在根部积累的重金属含量也就愈来愈少。

图2和图3为水稻茎部、叶片积累的重金属量在不同生长季节的变化。水稻茎部积累的重金属在秧苗期含量很低，在分蘖期达到最大，到了拔节期时，茎部积累的重金属量迅速下降，随后茎部积累的重金属量又缓慢上升。

茎部所积累的重金属的变化可以认为水稻茎部分蘖期代谢旺盛，从根部积累的重金属向上传输，在5种重金属的胁迫下，拔节期时，水稻茎部对重金属的耐受和代谢机制加强，此时茎部的生物量又增加；随后的生长季节里，茎部对重金属的代谢机制可能弱化，从土壤和根部传输上来的重金属在茎部会逐渐积累。

水稻叶片对5种重金属积累的变化与茎部的变化大体相似，只是在拔节期以后叶片对重金属的积累没有象茎部那样有所增加，而是趋于稳定，认为5种重金属在水稻植株向叶片部分的传输作用较小，叶片对重金属的积累和耐受机制可能与茎部的相似。

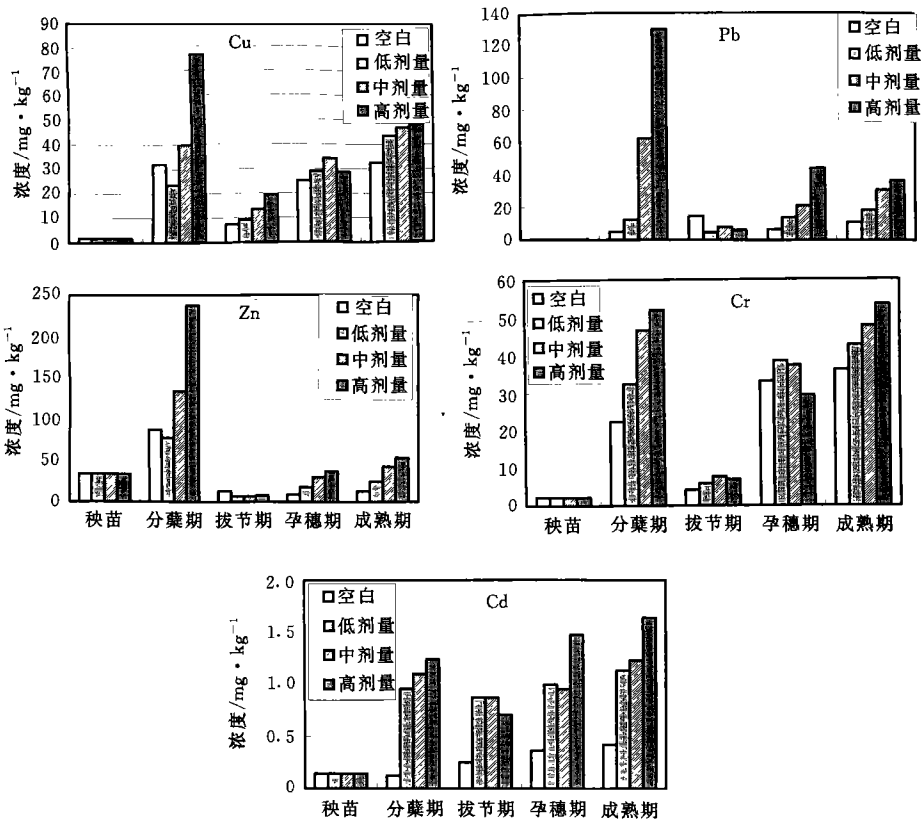


图2 不同浓度重金属处理下不同生长期水稻茎部的重金属含量

Fig. 2 The heavy metals concentration in paddy stems at different growth periods after supplementation of heavy metals with different dosages to soil

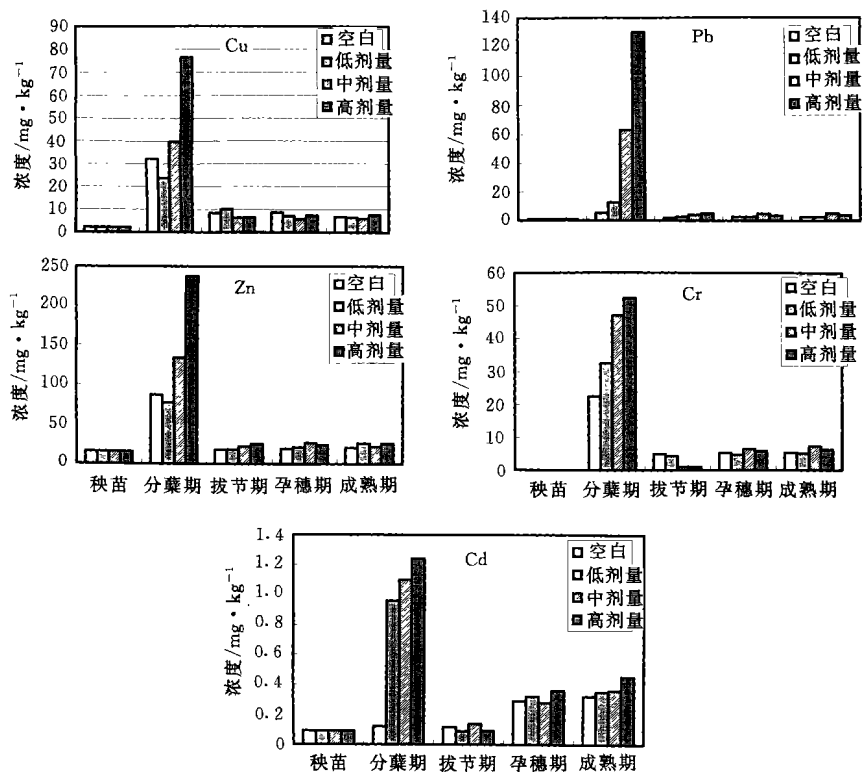


图 3 不同浓度重金属处理下不同生长期水稻叶片的重金属含量

Fig. 3 The heavy metals concentration in paddy leaves at different growth periods after supplementation of heavy metals with different dosages to soil

3 结论

5 种复合污染的重金属被水稻吸收后, 水稻的不同部位对重金属的吸收和积累有所不同. 大部分重金属滞留在根部, 少量向地上部分迁移. 重金属在水稻植株不同部位的含量分布为: 根部> 根茎茎> 主茎> 穗> 籽实> 叶片.

不同重金属在作物体内的迁移能力有所不同, 在本研究中, 复合污染的 5 种重金属在水稻植株迁移能力的大小依次为: Cd, Cr> Zn, Cu> Pb.

5 种重金属在水稻植株不同部位的积累随时间的变化是: 根部重金属积累量在水稻分蘖期最大, 随时间的延续, 根部积累的重金属含量越来越少; 茎干部重金属积累量也是在水稻分蘖期最大, 在拔节期降至最小, 随后积累又稍微上升; 叶片中的重金属含量同样在水稻分蘖期最大, 在拔节期含量迅速下降, 随后叶片中的重金属含量趋于稳定.

致谢: 本研究得到中国科学院常熟生态站王德建, 江苏安镇农业技术指导站平培良, 中国科学院南京土壤所曹志洪、朱建国和张焕朝, 以及孙景芳、田宝珍、赵丽辉老师的鼎力协助, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] 康立娟, 刘迎春, 镍对水稻生长发育影响和残留规律的研究. 农业环境保护, 1997, **16** (3): 135—137
- [2] 王新, 吴燕玉, 不同作物对重金属复合污染物吸收特性的研究. 农业环境保护, 1998, **17** (5): 193—196
- [3] 茅野充男, 齐藤宽, 重金属と植物, 博友社, 1988, 81—141
- [4] 许嘉琳, 杨居荣, 陆地生态系统中的重金属. 北京: 中国环境科学出版社, 1995
- [5] 吴燕玉, 余国营, 王新等, Cd, Pb, Cu, Zn, As 复合污染对水稻的影响. 农业环境保护, 1998, **17** (2): 49—54
- [6] 孟昭福, 薛澄泽, 张增强等, 土壤中复合污染的表征. 农业环境保护, 1999, **18** (2): 87—91
- [7] 赵志强, 牛学峰, 全燮, 环境中有害金属植物修复的生理机制及进展. 环境科学研究, 2000, **13** (5): 54—57
- [8] 张玉秀, 柴团耀, Gérard BURKARD, 植物耐重金属机理研究进展. 植物学报, 1999, **41** (5): 453—457
- [9] Shuman L M, Wang J, Effect of VAM and Zinc, Cadmium Iron and Manganese Content in Rhizosphere and Non Rhizosphere Soil Fractions. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 1997, **28** 23—36

2001 年 3 月 28 日收到.

DISTRIBUTION AND ENRICHMENT OF HEAVY METALS OF Cu, Pb, Zn, Cr and Cd IN PADDY PLANT

MO Zheng WANG Chun-xia CHEN Qin
WANG Hai XUE Chuan-jin WANG Zi-jian

(State Key Laboratory of Aquatic Environmental Chemistry, Research Center for
Ear Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085)

ABSTRACT

After discharge of water soluble heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd to soil, the transportation, distribution and the variation of distributing concentration along with time in paddy were studied. The transportation sequence of five heavy metals was Cd, Cr> Zn, Cu> Pb. The concentration order of heavy metals in different parts of paddy was root> groundwork> stem> stem> fringe> grain> leaf. The concentration of heavy metals in root, stem and leaf reached the highest levels at time of paddy tillering. As time went on, the concentration of heavy metals decreased in root; the concentration of heavy metals in stem reached the lowest at the jointing growth period, and then increased slowly, the concentration of heavy metals in leaf was similar to that of stems, while after the time of upgraded growth, the concentration in leaf was stable.

Keywords: heavy metals, enrichment, distribution, paddy.