

用幼苗法指示污泥和土壤中重金属的植物有效性

孟昭福 张增强 薛澄泽 唐新保

(西北农林科技大学西农校区生命科学学院, 陕西杨凌, 712100)

摘 要

利用小麦幼苗与黑麦幼苗研究了污泥和土壤中重金属的植物有效性, 并对二者进行了比较. 结果表明, 在两种污灌区土壤、四种污泥以及一种污泥施用于两种清洁土壤中, 黑麦和小麦测定的 Cd, Pb, Cu, Zn, Ni 五种重金属有效性的顺序, 以及有效性大小的数量级上是一致的; 除了在污泥中, 二者的茎 Pb, Ni 及根 Zn 相关不显著, 以及在矮土中施用污泥后, 两种植物各部位相关不好外, 在污泥及污泥施于赤红壤各处理中黑麦与小麦相关均为极显著. 上述结果表明, 应用小麦幼苗可以替代黑麦幼苗指示土壤中重金属的植物有效性, 但同时也应考虑不同植物间的差异.

关键词: 重金属植物有效性, 植物幼苗法, 小麦幼苗, 黑麦幼苗.

重金属植物有效性 (Heavy Metals Phytoavailability) 可以用植物所吸收的重金属的总量占土壤中重金属总量的百分率来表示, 这种表示方法也被称作重金属的生物有效性 (Bioavailability). 黑麦幼苗法由于在测定重金属生物有效性上具有简便、快速的特点而具有较大的应用价值^[1,2], 但由于黑麦在我国并未广泛种植, 种子较难得到, 因此, 采用易于得到的植物代替黑麦进行重金属有效性的指示具有较大的实际意义. 作者曾通过对 8 种植物幼苗的综合筛选确定了小麦是替代黑麦的较佳植物^[3], 并通过实验确定了小麦的生长时间为 14d. 本文应用小麦和黑麦对污泥、土壤中重金属植物有效性的测定进行了比较, 目的在于系统地研究小麦和黑麦在指示重金属植物有效性方面的差异, 验证小麦替代黑麦指示重金属植物有效性的可行性.

1 材料与方法

1.1 试验材料

土壤与污泥: 清洁矮土采自杨凌西北农业大学农一站农田, 污灌矮土采自西安红旗机械厂北污灌区农田, 发育母质均为黄土母质; 清洁赤红壤采自广州市郊农田, 污灌赤红壤采自广州市东涌镇菜地, 发育母质均为花岗岩母质; 土壤采样深度均为 0—20cm. 污泥采自西安污水厂 (消化污泥)、西安白石桥污水厂 (生污泥)、深圳滨河污水厂 (消化污泥)、天津纪庄子污水厂 (消化污泥, 好氧发酵堆肥). 以上土壤与污泥均风干, 过 1mm 尼龙筛, 其理化性质见表 1.

表 1 土壤和污泥的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils and sewage sludges

编号	土壤或污泥	pH	OM (%)	速效 N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效 P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效 K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CaCO_3 (%)	CEC ($\text{mmol}\cdot$ $100\text{g}^{-1}\text{土}$)	EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2}$)
I	清洁矮土	8.66	1.12	40.0	15.6	126.0	7.55	21.9	93.5
II	清洁赤红壤	4.44	0.46	14.5	1.2	10.4	—	6.5	55.5
III	污灌矮土	8.73	2.10	64.5	20.3	92.7	6.86	17.9	210.0
IV	污灌赤红壤	4.80	2.79	152.0	267.0	101.0	—	12.1	520.0
V	西安污水厂污泥	6.60	28.24	706.0	152.0	1978	—	116.0	4400
VI	西安白石桥污水厂污泥	6.84	24.08	1357.0	860.0	851.0	—	118.0	2640
VII	深圳滨河污水厂污泥	5.68	36.71	1702.0	1438	1976	—	74.9	2225
VIII	天津纪庄子污水厂污泥堆肥	6.53	36.93	2537.0	440.0	1031	—	108.0	4825

编号	土壤或污泥	Cd ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cu ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Zn ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ni ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
I	清洁矮土	96.0	27.7	28.6	57.0	22.3
II	清洁赤红壤	27.6	2.2	7.5	10.9	3.0
III	污灌矮土	858.0	54.8	61.9	75.0	42.6
IV	污灌赤红壤	131.0	128.0	42.7	76.3	10.0
V	西安市污水厂污泥	695.0	201.0	434.0	3040	374.0
VI	西安白石桥污水厂污泥	426.0	97.6	210.0	363.0	32.0
VII	深圳滨河污水厂污泥	292.0	4.4	266.0	223.0	61.5
VIII	天津纪庄子污水厂污泥堆肥	782.0	607.0	629.0	148.0	96.2

注：1. 土壤与污泥的理化性质均采用常规分析法；2. 重金属 Cd, Cu, Pb, Zn, Ni 分析采用王水- HClO_4 消解，火焰或石墨炉原子吸收法，分析过程采取了质量控制措施。

植物：黑麦 (*Secale cereale* L.)，品种为法国黑麦；小麦 (*Triticum aestivum* L.)，品种为小偃 22 号。以上种子来自于西北农业大学农学系标本区。

1.2 试验方法^[3]

以下试验均设 4 个重复，土壤及污泥用量均以烘干重计。

植物幼苗吸收的重金属的总量计算均为：

植物中重金属的浓度 $\times$ 生物量 (干重) - 空白对照处理植物中重金属的总量

(1) 污灌区土壤中重金属植物有效性的测定 设污灌矮土 (III) 和污灌赤红壤 (VI) 各 100g 两个处理。

(2) 污泥中重金属植物有效性的测定 先设西安污水厂污泥 (V) 25, 50, 75, 100g 四个处理，各处理分别用石英砂补至总重为 100g，以小麦幼苗的生长情况确定污泥的测定用量。然后，按此污泥用量，设四种污泥或污泥堆肥 (V—VIII) 处理，均用石英砂补至 100g。

(3) 污泥施用于土壤中重金属植物有效性的测定 设清洁矮土 (I) 100g，清洁赤红壤 (II) 100g 两个处理，各施入西安污水厂污泥 (V) 0, 2, 5, 8g。每个处理土壤中重金属总量为清洁土壤中重金属总量与所施污泥中重金属总量之和。

1.3 试验步骤

称取土壤或污泥与 50g 石英砂充分混合均匀，平铺于试验器皿中，中间插入玻璃管

作加水用，将表面弄平，再称取 50g 石英砂均匀铺在其上。用滴定管通过中间玻璃管加入 50.0ml 去离子水。用镊子选取大小均匀一致且均出芽（露白）的种子 100 粒，均匀点在盆中砂面上，然后在其上均匀铺入 200g 石英砂，弄平，再用滴定管补入 30.0ml 去离子水，称重并记录。然后用洁净玻璃板（12×12cm）盖在盆上，盆缘用火柴棒垫起以利通气。没有土壤的对照盆装法同上，仅在盆底倒入 200g 石英砂。

将盆置于培养小室内，调节温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，用日光灯 + 白炽灯（照度为 4000 lx）照射，每日照射 12h，小室应封闭以防外界光照入。每天通过称重用滴定管经玻璃管加入去离子水以补充损失的水份。在试验后期每天加水两次。盆的位置每天倒换，使其受光均匀。

植物幼苗经培养 14d 后，将器皿内幼苗带着泥沙一起移至 1mm 孔径尼龙筛上，手持幼苗，用自来水冲去根部的泥沙，将全苗用去离子水洗净，然后用剪刀在种子附近直接剪断。幼苗及根系在 60°C 分别烘干，称重。

植物样品采取干灰化法消解，Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 测定采用日立 - 180 型原子吸收分光光度计测定，其中 Cd、Pb 采用石墨炉法，Cu、Zn、Ni 采用火焰法，Zeeman 效应校正背景吸收。分析过程中采取插入标准样品的方法进行了分析质量控制。

2 结果与讨论

2.1 两种污灌区土壤中重金属植物有效性的测定

表 2 为污灌矮土、污灌赤红壤中重金属有效性的测定结果。

在污灌矮土中，两种植物茎部在 Zn 有效性上略有差异，根部和全苗则在 Cu 有效性上略有差异，在 Zn 差异极显著，Cu 和 Zn 有效性总是黑麦高于小麦。Cd、Pb、Ni 则两种植物无差异。在矮土中重金属的总有效性（全苗） $\text{Zn} < 2\%$ ，Cd、Cu、Ni $< 1\%$ ，Pb $< 0.1\%$ ，各金属在黑麦、小麦中测得有效性大小的顺序均为 $\text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb}$ 。

在污灌赤红壤中，黑麦与小麦，茎部差异主要在 Cd 上，而根部和全苗则在 Cd 和 Pb 上差异显著，而且均表现为小麦大于黑麦。总有效性大小（全苗）为 $\text{Cd} < 6\%$ ， $\text{Zn} < 3\%$ ，Ni $< 1.1\%$ ，Cu $< 1\%$ ，Pb $< 0.01\%$ 。各金属在两种植物中有效性的均值为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb}$ 。除 Pb 外其它重金属均高于矮土中同种金属的有效性。

从以上分析可以看出，两种植物测得的有效性显然随土壤、作物及其它条件的不同而不同，但二者均表现为 Cd、Cu、Zn、Ni 的有效性相对较高，Pb 为最低，这一点和前人的结果相同^[4-9]，而且二者测得的有效性数据在数量级上以及不同重金属在不同土壤中有有效性的变化趋势是一致的。

2.2 污泥中重金属植物有效性的测定

当污泥用量在 25—50g 范围内时，小麦幼苗生长正常，株高随污泥用量的升高而升高，根干重下降而地上部分干重上升。当污泥用量在 75—100g 时，小麦幼苗生长受到抑制，正常生长株数减少，至 100g 污泥处理时，小麦幼苗已不能正常生长。考虑到污泥中重金属元素浓度较高的缘故，故采用 25g 作为幼苗法测定污泥中重金属有效性的处理用量。表 3 为黑麦、小麦测得的四种污泥中重金属有效性的结果。

表 2 污灌土壤中重金属的有效性(%)

Table 2 Heavy metals phytoavailability in sewage irrigated soils

土壤	植物	茎					根					全苗				
		Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
矮土	黑麦	0.519 ^a	0.006 ^a	0.224 ^a	0.623 ^a	0.040 ^a	0.468 ^a	0.014 ^a	0.605 ^a	1.150 ^a	0.249 ^a	0.987 ^a	0.020 ^a	0.830 ^a	1.770 ^a	0.288 ^a
	小麦	0.499 ^a	0.010 ^a	0.286 ^a	0.517 ^b	0.042 ^a	0.443 ^a	0.013 ^a	0.371 ^b	0.740 ^b	0.147 ^a	0.941 ^a	0.024 ^a	0.657 ^b	1.250 ^b	0.189 ^a
赤红壤	黑麦	1.760 ^b	0.003 ^a	0.435 ^a	0.921 ^a	0.492 ^a	3.010 ^b	0.003 ^b	0.501 ^a	2.02 ^a	0.610 ^a	4.770 ^b	0.006 ^b	0.936 ^a	2.940 ^a	1.100 ^a
	小麦	2.220 ^a	0.006 ^a	0.400 ^a	1.000 ^a	0.413 ^a	3.490 ^a	0.007 ^a	0.506 ^a	1.90 ^a	0.497 ^a	5.690 ^a	0.013 ^a	0.907 ^a	2.910 ^a	0.910 ^a

注:各处理后编号(写和大写字母不同分别表示在5%和1%水平上存在着显著性差异,以下各表同。

表 3 污泥中重金属的有效性(%)

Table 3 Heavy metals phytoavailability determined by rye and wheat in sewage sludges

植物	污泥	茎					根					全苗				
		Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
黑麦	V	2.15 ^a	0.0010 ^a	0.213 ^b	0.33 ^c	0.071 ^a	2.29 ^a	0.0105 ^a	0.336 ^b	3.22 ^b	1.180 ^a	4.45 ^a	0.0116 ^b	0.550 ^b	3.55 ^b	1.250 ^a
	VI	0.88 ^b	0.0044 ^a	0.520 ^a	1.20 ^b	0.000 ^b	1.39 ^b	0.0255 ^a	1.170 ^a	1.31 ^c	0.489 ^b	2.27 ^b	0.0299 ^b	1.690 ^a	2.51 ^c	0.489 ^b
	VII	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.94 ^d	0.8780 ^a	0.325 ^c	1.48 ^d	0.314 ^{bc}
	VIII	0.39 ^c	0.0004 ^b	0.160 ^b	2.64 ^a	0.044 ^{ab}	1.13 ^b	0.0178 ^b	0.255 ^b	3.95 ^a	0.195 ^b	1.52 ^c	0.0181 ^b	0.415 ^{bc}	6.59 ^a	0.239 ^b
小麦	V	2.07 ^a	0.0010 ^b	0.220 ^b	0.34 ^c	0.049 ^a	2.19 ^a	0.0128 ^c	0.275 ^b	0.26 ^c	0.596 ^a	4.26 ^a	0.0139 ^b	0.495 ^b	0.60 ^d	0.645 ^a
	VI	1.06 ^b	0.0180 ^a	0.597 ^a	1.42 ^b	0.042 ^a	1.28 ^b	0.0413 ^a	0.610 ^a	1.41 ^b	0.471 ^{ab}	2.35 ^b	0.0592 ^b	1.200 ^a	2.83 ^b	0.513 ^a
	VII	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.45 ^b	0.5170 ^a	0.312 ^c	1.51 ^c	0.193 ^b
	VIII	0.72 ^b	0.0021 ^b	0.279 ^b	3.34 ^a	0.021 ^a	0.96 ^b	0.0269 ^b	0.272 ^b	3.97 ^a	0.084 ^b	1.67 ^{bc}	0.0289 ^b	0.552 ^b	7.32 ^a	0.105 ^b

注: V. 西安污水厂污泥, VI. 西安石桥污水厂污泥, VII. 深圳滨河污泥厂污泥, VIII. 天津纪庄子污水厂污泥堆肥。

双因素多元方差分析的结果表明，黑麦茎、根、全苗测得五种重金属有效性总体上均与小麦具有极显著差异。这说明不同品种植物测得的重金属有效性数据是不同的。

单因素和双因素多元方差分析结果表明，不同污泥处理之间的测定结果的差异二者均为极显著。一元方差分析（表 3）表明，黑麦测得结果除 Pb 和 Ni 在茎部的差异不显著和根部 Pb 的差异为显著外，其余均为极显著；小麦除了茎、根中 Pb 的差异均为极显著外，其余方差分析结果均为黑麦一致，表现了两种植物的一致性。从黑麦、小麦测得的顺序上看，也基本上显示了同样的趋势。

两种植物相应部位相关分析见表 4。结果表明黑麦与小麦除了在茎部 Pb 和 Ni 及根部 Zn 有效性上不相关外，其余均显著或极显著相关，而且采用全苗相关比根部好，根部比茎部好。因此，用小麦和黑麦同样可以用来进行污泥中重金属有效性的测定。

表 4 黑麦与小麦测定污泥中重金属有效性的相关系数

Table 4 The correlation coefficient of phytoavailability determined by rye and wheat

	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
茎	0.9891**	0.3462	0.9113**	0.9926**	0.0795
根	0.9385**	0.6406*	0.9430**	0.4447	0.7882**
全苗	0.9320**	0.8182**	0.9613**	0.8173**	0.7874**

* 表示在 5% 水平上显著相关；** 表示在 1% 水平上显著相关，以下各表同。

2.3 污泥施用于不同土壤重金属有效性测定

表 5 为污泥施于清洁垆土和赤红壤后的测定结果。

2.3.1 垆土中施用污泥

黑麦 多元方差分析及一元方差分析结果表明，虽然后者显示在茎部 Cu 和 Pb 具有显著性差异，但作为一个整体，前者显示黑麦茎部无显著性差异，因此，可以认为加入不同污泥的量对茎部影响不大。在根部，Zn 在各污泥用量处理之间总体上呈极显著差异，当污泥施入量为 $2\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土时，有效性显著上升，随后随污泥的施入量增大而缓慢下降。其它几种金属在各污泥施用量处理间差异均不显著。在全苗，Cu 有效性在各污泥用量处理间差异极显著，而 Zn 则为显著，Cu 的有效性随污泥的施用量增大而逐渐下降，Zn 则与根趋势相同。

小麦 多元方差分析及一元方差分析结果表明，在茎部差异主要在 Cd、Cu 和 Zn，它们在不同污泥处理之间的差异均为显著。Cd 在施用 $2\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土和 $5\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土的污泥时有效性一直在显著上升，由未施用污泥的 1.1% 上升到施用 $5\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土的污泥的 2.2% 左右，随后略有下降，而 Cu 和 Zn 则均呈下降趋势。在根部和全苗，总体上各污泥施用量之间仅 Cd 差异极显著，在施用 $2\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土的污泥后有效性显著上升，随后随污泥施用量增大而变化不大。

垆土中施用不同用量的污泥，随污泥施用量的增大，各元素有效性的变化趋势小麦与黑麦一致性较差，但黑麦、小麦的有效性大小顺序均为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb}$ ，这一点二者是相同的，另外，从测定有效性大小的数量级上来说，二者也是一致的。

表 5 污泥施用于土壤中重金属的有效性(%)

Table 5 Heavy metals phytoavailability determined by rye and wheat in soils applied with sewage sludge

土壤 植物	污泥施用量 (g·100g ⁻¹ 土)	茎				根				全苗						
		Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
黑 麦	0	0.82 ^a _A	0.0050 ^a _A	0.540 ^a _A	0.720 ^a	0.127 ^a	1.79 ^a	0.0223 ^a	0.502 ^a	0.825 ^a _B	0.198 ^a _A	2.62 ^a	0.0273 ^a	1.04 ^a _A	1.540 ^a _B	0.325 ^a
	2	0.84 ^b _A	0.0028 ^{ab} _{AB}	0.509 ^a _A	0.699 ^a	0.070 ^a	2.17 ^a	0.0144 ^a	0.475 ^a	1.350 ^a _A	0.221 ^b _A	3.01 ^a	0.0172 ^a	0.984 ^{ab} _A	2.050 ^a _A	0.291 ^a
	5	0.86 ^a _A	0.0006 ^b _B	0.427 ^a _{AB}	0.653 ^a	0.051 ^a	1.89 ^a	0.0147 ^a	0.365 ^a	1.170 ^{ab} _{AB}	0.268 ^{ab} _A	2.75 ^a	0.0153 ^a	0.793 ^{bc} _{AB}	1.830 ^{ab} _A	0.319 ^a
	8	1.39 ^a _A	0.0027 ^{ab} _{AB}	0.266 ^b _B	0.652 ^a	0.037 ^a	1.83 ^a	0.0105 ^a	0.363 ^a	0.956 ^b _B	0.386 ^a _A	3.23 ^a	0.0132 ^a	0.629 ^b _B	1.600 ^a _A	0.423 ^a
土 小 麦	0	1.12 ^b _B	0.0030 ^a	0.618 ^a _A	0.712 ^a _A	0.038 ^a	1.62 ^b _B	0.0071 ^b _A	0.457 ^a	0.863 ^{ab} _A	0.090 ^a	2.74 ^b _B	0.0101 ^b _A	1.070 ^a _A	1.570 ^a _A	0.128 ^a
	2	1.48 ^b _{AB}	0.0025 ^a	0.548 ^{ab} _{AB}	0.707 ^a _A	0.007 ^a	2.86 ^{ab} _A	0.0082 ^{ab} _A	0.428 ^a	0.945 ^a _A	0.196 ^a	4.34 ^b _A	0.0107 ^b _A	0.976 ^{ab} _A	1.650 ^a _A	0.202 ^a
	5	2.23 ^a _A	0.0030 ^a	0.500 ^b _{AB}	0.610 ^{ab} _{AB}	0.033 ^a	2.88 ^a _A	0.0142 ^{ab} _A	0.451 ^a	0.915 ^a _A	0.150 ^a	5.12 ^a _A	0.0172 ^{ab} _A	0.950 ^{ab} _A	1.520 ^{ab} _A	0.183 ^a
	8	2.03 ^{ab} _{AB}	0.0048 ^a	0.470 ^b _B	0.488 ^b _B	0.026 ^a	2.54 ^b _A	0.0158 ^a	0.398 ^a	0.772 ^b _A	0.174 ^a	4.58 ^{ab} _A	0.0206 ^a _A	0.868 ^a _A	1.260 ^a _A	0.199 ^a
黑 麦	0	3.29 ^b _B	0.3870 ^a _A	1.540 ^a _A	5.060 ^a _A	1.210 ^a _A	2.88 ^d	0.9690 ^a _A	1.370 ^b _B	12.60 ^a _A	0.658 ^b _B	6.18 ^d _B	1.3500 ^a _A	2.920 ^a _A	17.60 ^a _A	1.870 ^b _B
	2	6.64 ^a _A	0.0000 ^b _B	0.964 ^b _B	2.380 ^b _B	0.263 ^b _A	8.58 ^a _A	0.0915 ^b _B	1.790 ^a _A	2.750 ^b _B	3.810 ^a _A	15.20 ^a _A	0.0910 ^b _B	2.750 ^a _A	5.140 ^b _B	4.070 ^a _A
	5	3.93 ^b _B	0.0000 ^b _B	0.595 ^c _C	1.060 ^c _C	0.198 ^b _A	6.38 ^b _B	0.0411 ^b _B	1.090 ^{bc} _{BC}	1.790 ^c _C	1.530 ^b _B	10.30 ^b _B	0.0410 ^b _B	1.690 ^b _B	2.860 ^c _C	1.730 ^b _B
	8	3.49 ^b _B	0.0049 ^b _B	0.496 ^c _C	0.801 ^c _C	0.081 ^b _A	4.36 ^c _C	0.0297 ^b _B	0.840 ^d _D	1.270 ^c _C	0.960 ^b _B	7.86 ^c _C	0.0300 ^b _B	1.330 ^b _B	2.070 ^d _D	1.040 ^b _B
赤 红 壤	0	3.52 ^b _B	0.2090 ^a _A	1.810 ^a _A	4.400 ^a _A	1.260 ^a _A	4.89 ^c _C	1.1800 ^a _A	1.530 ^a _A	9.870 ^a _A	0.628 ^{ab} _{AB}	8.42 ^{bc} _B	1.3900 ^a _A	3.340 ^a _A	14.20 ^a _A	1.890 ^{ab} _{AB}
	2	7.89 ^a _A	0.0152 ^b _B	0.999 ^b _B	1.270 ^b _B	0.464 ^{ab} _{AB}	8.99 ^a _A	0.1190 ^b _B	1.190 ^b _B	4.230 ^b _B	1.600 ^a _A	16.80 ^a _A	0.1340 ^b _B	2.190 ^b _B	5.500 ^b _B	2.070 ^a _A
	5	5.31 ^{ab} _{AB}	0.0034 ^b _B	0.694 ^{bc} _{BC}	0.698 ^c _C	0.113 ^b _B	6.19 ^b _B	0.0494 ^b _B	0.744 ^c _C	1.800 ^c _C	0.581 ^{ab} _{AB}	11.50 ^b _B	0.0528 ^{bc} _B	1.430 ^c _C	2.500 ^c _C	0.694 ^a _A
	8	4.26 ^b _B	0.0045 ^b _B	0.557 ^c _C	0.554 ^c _C	0.149 ^b _B	4.73 ^c _C	0.0384 ^b _B	0.513 ^d _D	1.250 ^c _C	0.435 ^b _B	9.00 ^{bc} _B	0.0429 ^b _B	1.070 ^d _D	1.810 ^d _D	0.584 ^b _B

2.3.2 赤红壤中施用污泥

多元方差分析及一元方差分析结果表明，黑麦茎部的五种元素中除 Ni 在各污泥施入量处理之间为显著外，余皆为极显著，Pb 和 Ni 在加入 $2\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土的污泥时有效性均显著下降，以后随污泥施用量增大变化不大。Cu 和 Zn 总趋势也是随污泥施入量增大，有效性下降，最后趋于稳定。而 Cd 则为施入 $2\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土的污泥后，有效性显著上升，随后随污泥的施用量增大而逐渐下降；在根部，Pb 和 Zn 有效性随污泥施入量变化的趋势与茎部相同，Ni 总体表现为各施用量处理之间极显著，变化趋势与茎部 Cd 相类似。Cd 和 Cu 在根部各处理间差异均极显著，均呈现 $2\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土时显著上升，随之显著下降的趋势；在全苗中，各重金属变化趋势基本上与根部的接近，仅 Cu 由于茎部有效性下降的抵消，使得全苗中 Cu 的有效性在施入 $2\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 土的污泥时与未施用污泥差异不大，总趋势依然是显著下降。小麦的茎、根、全苗中各重金属有效性变化基本上与黑麦变化一致。

上述分析表明，赤红壤中施用污泥黑麦与小麦的测定结果表现了高度一致性，而且在同一处理下不同重金属的有效性顺序二者也是一致的。以全苗为例均为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb}$ 。

从以上污泥施于瘠土及赤红壤中的结果可以看出，黑麦与小麦测得的不同重金属有效性之间大小顺序、在同一土壤中同一金属有效性数据的数量级上均为一致，而且有效性均为污泥施于赤红壤大于施于瘠土，说明两种土中施用污泥均可以用小麦、黑麦来进行重金属有效性的测定。但在瘠土中，小麦与黑麦在测定随污泥施用量变化重金属有效性变化的趋势上，一致性不高。

黑麦与小麦各部位测得的有效性相关分析结果（表 6）显示：瘠土中除茎部 Cu 相关显著外，其余均不相关；而赤红壤中，均呈极显著相关。

表 6 瘠土和赤红壤中施用污泥后黑麦与小麦测定的重金属有效性的相关系数

Table 6 The correlation coefficient of phytoavailability determined by rye and wheat in soils applied with sewage sludge

		Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
瘠土 + 污泥	茎	0.1875	0.3754	0.5043 *	0.2524	0.3896
	根	0.1443	-0.2974	-0.3335	0.1953	0.09971
	全苗	0.2492	-0.3884	0.1325	0.1841	0.3726
赤红壤 + 污泥	茎	0.7786 **	0.9444 **	0.8745 **	0.9795 **	0.8613 **
	根	0.8879 **	0.9754 **	0.6585 **	0.9711 **	0.7917 **
	全苗	0.9081 **	0.9911 **	0.8309 **	0.9919 **	0.7037 **

在瘠土中施用污泥，黑麦与小麦测得的有效性差异较大，相关极差，两种植物的差异在瘠土上表现的非常明显，其原因可能是由于植物品种的差异以及瘠土的性质和组成的影响，这一点有待于进一步研究。

3 结论

通过黑麦和小麦对两种污灌区土壤、四种污泥以及一种污泥施用于瘠土和赤红壤的重金属有效性的测定,黑麦与小麦在不同重金属有效性顺序上,不同土壤、不同污泥中、污泥施于不同土壤的重金属有效性的变化趋势上,以及在同一金属有效性数据的数量级上都基本符合,表明小麦可以用来代替黑麦指示不同体系中重金属的植物有效性。但以黑麦、小麦幼苗法测得的重金属有效性数据间具有差异,因此,有效性的测定应考虑不同植物的差异。

参 考 文 献

- [1] Neubauer H, Schneider W, Die Nährstoffaufnahme der Keimpflanzen ihre Anwendung auf die Bestimmung des Nährstoffgehaltes des Bodens. *Z. Pflanzenern., Düng u. Bodenk.*, 1923, **AZ**, 329—362
- [2] 薛澄泽, 刘俊华, 李宗利等, 用黑麦幼苗法测定土壤中污染元素生物有效性. *环境化学*, 1995, **14** (1): 32—37
- [3] 孟昭福, 用幼苗法测定土壤中重金属生物有效性的研究. 西北农林科技大学硕士论文 (1999)
- [4] 林舜华, 黄银晓, 姚依群等, 铅在植物土壤系统中分配规律及其生态效应. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1985, **9** (2): 85—91
- [5] 汪雅各, 王玮, 土壤不同重金属浓度对青菜生长及其残留的影响. *上海农业学报*, 1990, **6** (4): 67—72
- [6] Mitchell G A, Bingham F T, Page A L, Yield and Metal Composition of Lettuce and Wheat Grown on Soils Amended with Sewage Sludge Enriched with Cadmium, Copper, Nickel, and Zinc. *J. Environ. Qual.*, 1978, **7**: 165
- [7] Murty K S N, Tjell J C, Gopalachari N C, Lead and Cadmium Content of Indian Flue-Cured Tobacco. *Plant and Soil*, 1986, **95**: 281—284
- [8] Petruzzelli G, Lubrano L, Cervelli S, Heavy Metal Uptake by Wheat Seedlings Grown in Fly Ash Amended Soils. *Water, Air and Soil Pollution*, 1987, **32**: 389—395
- [9] Wilson D O, Clin J F, Removal of Plutonium-239, Tungsten-185, and Lead-210 from Soils. *Nature*, 1966, **209** (5026): 941—942

2000年5月5日收到.

THE INDICATION OF HEAVY METALS PHYTOAVAILABILITY IN SEWAGE SLUDGES AND SOILS USING PLANT SEEDLING METHOD

Meng Zhaofu Zhang Zengqiang Xue Chengze Tang Xingbao

(Northwest Science – Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shanxi, 712100)

ABSTRACT

The studies on the determination of heavy metals phytoavailability in sewage sludges and soils using wheat as well as rye seedling were carried out, and the comparison between two plant seedlings were conducted at the same times. The results in determining phytoavailability in 2 kinds of sewage irrigated soils, in 4 kinds of sewage sludges and in 2 kinds of clean soils applied with one kind of sewage sludge showed that both plant seedlings had same conclusion in phytoavailability sequence of 5 kinds of heavy metals in each soil and the value size of phytoavailability determined by rye and wheat is at approximately same order; and that there were more significantly correlation between phytoavailability determined by rye and by wheat except for Pb, Ni in stem and Zn in root in sewage sludge and every parts of plant in clean loessal soil applied with sludge.

The studies above expressed that wheat seedling could be used to indicate the phytoavailability in sewage sludges and soils as well as rye, but the difference in variety of plants must be considering at the same time.

Keywords: heavy metals phytoavailability, plant seedling method, wheat seedling, rye seedling.