

稀土元素在小麦体内分配行为的研究

胡霭堂¹, 周权锁¹, 郑绍健¹, 翟海¹, 王玉琦², 孙景信², 章申³, 王立军³

(1. 南京农业大学, 资源与环境科学学院, 南京 210095 2. 中国科学院高能物理所, 北京 100039 3. 中国科学院地理研究所, 北京 100101)

摘要 采用水培、土培试验及中子活化分析技术, 在作物生长效应曲线研究的基础上, 系统地研究了稀土元素在作物体内的含量、吸收、分布和转移等行为。所获结果表明, 各稀土元素在作物体内的分配行为受生物的内、外因素与稀土来源、自身特征和元素间关系的影响, 是作物稀土元素分配行为已有研究成果的重要补充与深化, 并为土壤施用稀土元素提供进一步的科学依据。

关键词 稀土元素, 作物, 分配行为

The distributive behavior of rare earth elements in wheat

HU Ai-Tang¹, ZHOU Quan-Suo¹, ZHENG Shao-Jian¹, ZHAI Hai¹, WANG Yu-Qi², SUN Jing-Xin², ZHANG Shen³, WANG Li-Jun³ (1. College of Natural Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China 2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China 3. Institute of Geography, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract On the basis of plant growth curve study, which was conducted under soil and water culture, the distributive behavior, such as content, uptake, distribution, translocation of rare earth elements (REEs) in wheat plants was studied. REEs were determined by INAA. With the results gained, our previous knowledge about REEs distributive behavior is significantly replenished and intensified.

Key words rare earth elements; crop plant; distributive behavior

文章编号: 1000-093X(2000)04-0000-00 中图分类号: S512.1062 文献标识码: A

稀土元素在植物体内的含量和分布已有相当数量的报道, 但报道的内容主要是收集资料为主, 没有结合植物生长状况作系统研究, 故有的相似, 有的较不一致^[1~8]。本研究主要根据稀土元素作物生长曲线^[9, 10], 选用在控制条件下表观生长正常范围与中毒的植物样本, 了解稀土元素在作物吸收和体内分配行为, 为土壤施用稀土元素提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料 ①作物为冬小麦(扬麦 87-158); ②培养液为 Hoagland + Arnon 营养液; ③土壤为下蜀黄土母质(江苏南京)发育的黄棕壤, pH6.81, 有机质 1.14%, 稀土元素 8 个, 含量为 168.95 $\mu\text{g/g}$; ④稀土元素为混合稀土(MIX), 富铈氯化稀土。其所含 8 元素的 % 比例为: La-30.83, Ce-48.35, Nd-20.04, Sm-0.605, Eu-0.141, Tb-0.012, Yb-0.024, Lu-0.0024。

1.2 生物试验方法

1.2.1 小麦水培试验 在温室内进行, 采用稀土元素加入 Hoagland + Arnon 营养液。稀土元素加入量($\mu\text{g/g}$)为 0, 0.42, 0.83, 1.25, 1.67, 4.18, 8.34, 16.67。定期更换培养液。每箱 8 行, 每行 8 株。

1.2.2 小麦土培试验 在温室网室内进行, 每盆装风干黄棕壤 2.5kg。稀土元素与氮、磷、钾基肥混均后施入

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目号 19392100, 49771070)

收稿日期: 1998-04-26, 修订日期: 1999-04-15

作者简介: 胡霭堂(1932~), 女, 广东中山人, 教授, 博士生导师。主要从事土壤农化及生态环境方面的教学与科研工作。

土壤。稀土用量($\mu\text{g/g}$)为 0,333,667,1000,1334,1667,2000,2500。每盆定苗 12 株。5 次重复。土壤试验进行了 2a。

1.2.3 作物样品收集按苗期、拔节-孕穗期、收获期 3 次取样,前两期分地上、地下部位;收获期分根、茎、叶、颖壳、籽粒。供稀土元素分析测定,则选取有代表性的 1a 的植株样品进行。

1.3 稀土元素的分析测定方法

用中子活化分析技术测定 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Yb、 $\text{Lu}^{[2]}$ 的含量。

2 结果与讨论

2.1 稀土在植株中分配行为概况

栽培基质中,外加混合稀土显著提高了作物体内的稀土浓度,根部的积累更加突出,这样结果已有报道^[2-4]。营养液栽培条件下尤为明显。将作物可耐受范围内植株体内稀土元素的浓度与含量分配百分比列于表 1。

表 1 基质外加混合稀土条件下小麦植株中 8 个元素总和的浓度与含量的分配
Table 1 Concentration and distribution of 8 rare earth element(RERs)
in wheat plants supplied with additional mixed RERs

外加稀土($\mu\text{g/g}$) Additional REEs	水培 Solution culture				土培 Soil culture			
	0	0.42	0.82	1.25	0	333	667	1000
拔节-孕穗期 Jointing-booting								
地上 Shoot	1.22	2.16	2.85	3.31	8.36	15.80	14.01	29.16
地下 Root	17.08	529.93	786.61	1428.0	13.83	160.09	337.97	638.19
整株 Whole plant	5.49	189.56	237.56	193.05	9.47	52.95	83.74	156.48
与 CK 比 Ratio to CK	1	34.5	43.3	89.8	1	5.59	8.84	16.4
成熟期 Maturity								
地上 Shoot	0.66	5.71	2.27	2.74	2.93	4.77	5.26	13.17
地下 Root	7.79	1355.76	1899.50	3233.18	17.96	102.73	372.59	902.15
整株 Whole plant	1.55	214.72	234.90	389.84	4.56	14.93	45.24	102.56
与 CK 比 Ratio to CK	1	138.5	151.5	251.5	1	3.27	9.92	22.5
拔节-孕穗期 Jointing-booting								
地上 Shoo(%)	16.25	0.73	0.87	0.44	70.40	22.15	13.13	14.74
地下 Root(%)	83.75	99.27	99.13	99.56	29.60	77.85	86.67	85.26
成熟期 Maturity								
地上 Shoo(%)	37.34	2.25	0.85	0.62	57.21	29.33	10.36	11.55
地下 Root(%)	62.66	97.75	99.15	99.38	42.79	70.67	89.64	88.45

2.1.1 外加混合稀土,即使在可耐受范围内,亦强烈地促进了作物对稀土元素的吸收富集,且绝大部分被吸收的稀土滞留在根部。作物对稀土元素表现出强烈的“被动吸收”,水培条件下更为突出。

2.1.2 不同的栽培条件明显影响作物对稀土元素的吸收和分配。同一作物,在可耐受范围内,土培作物对稀土的吸收量低于水培,而被吸收的稀土由地下向地上部转移则是土培作物高于水培。

2.1.3 在无外加稀土的背景(稀土来自供试作物种子,配制培养液和器皿)中,水培条件下作物吸收的稀土由地下向地上部转移,随生育期延伸而加大,从 2:8 转为 4:6,土培条件下则相反,从 7:3 转为 6:4。当外加稀土量在作物可耐受范围内,土培作物的整株稀土浓度都比水培的低,但地上部稀土浓度却不低,甚至要高。土培作物体内稀土元素转移高的机制有待研究,这关系到农用稀土在土施条件下的生态效应。

2.2 外加稀土浓度的极限范围 供试冬小麦生长的土壤(黄棕壤)上,外加稀土浓度极限范围,在本试验条件下为 $500\mu\text{g/g}$ 以内。这是按作物生长后期,从生长状况考虑的较为慎重的数值。

经统计分析,了解到作物体内,尤其根部的稀土浓度 $Y_{\text{地下}}$ 与基质中稀土浓度 $X_{\text{土}}$ 呈极显著的正相关,与加入稀土量也呈正相关。

2.2.1 水培条件-拔节-孕穗期 $Y_{\text{地下}} = 626.07 X_{\text{加入}} + 337.28 \quad r = 0.9978 (n = 7)$

成熟期 $Y_{\text{地下}} = 1411.21 X_{\text{加入}} + 2175.27 \quad r = 0.9689 (n = 7)$

2.2.2 土培条件 拔节-孕穗期 $Y_{\text{地下}} = 0.8474 X_{\text{加入}} - 194.22 \quad r = 0.9759 (n = 8)$

成熟期 $Y_{\text{地下}} = 1.643 X_{\text{加入}} - 629.28 \quad r = 0.9812 (n = 8)$

若将土培试验中的加入量加上土壤的背景含量(黄棕壤为 $168.95\mu\text{g/g}$)后再求直线回归方程则求得:

$$Y_{\text{地下}} = 1.529 X_{\pm} - 694.11 \quad r = 0.9722 (n = 8)$$

设 $Y_{\text{地下}}$ 为 $350\mu\text{g/g}$,即 2a 的生物试验中,作物生长量处于最佳状态的范围,这时的加入量为 $513.92\mu\text{g/g}$ 。按此推断,在黄棕壤型土壤上种植冬小麦,稀土外加量的极限范围在 $500\mu\text{g/g}$ 以内,该数值随土壤类型与作物种类而异,且应今后采用多次田间试验加以验证和修正。

2.3 外加稀土对作物籽粒中稀土积累的影响及生态意义

供试冬小麦籽实中 8 个稀土元素总和的含量与分配载于表 2。本试验所测得的作物籽实中稀土元素含量见文献^[2]。与营养体不同,外加稀土并没有使籽实中的稀土含量剧增或所占比例明显增大,籽实中的稀土平均含量只占到地上部含量的 1.5% 以内。相反,在背景条件下土培冬小麦籽实中稀土含量反而高,占到地上部总量的 10%。若将此背景下的籽实中稀土浓度($1.165\mu\text{g/g}$)折成 RE_xO_y 浓度则为 $1.355\mu\text{g/g}$,按我国制定的“植物性食品中稀土限量卫生标准”^[8]中对小麦(以原粮计)的指标为 $\text{REO} \leq 2\mu\text{g/g}$ 。本试验所得数值还低于此标准。应该提醒的是,虽然外加稀土未明显促进稀土元素在作物籽粒中积累,然而,农作物籽实中稀土含量并不是判断稀土农用的生态效应的唯一指标。从建设生态农业,推进农业持续发展的要求来看,农作物的秸秆必需作饲料用或肥料还田,尽量做到物尽其用,加强农业生产中的物质循环。且外加稀土在作物营养体的累积与作物根“被动”超量富集的后果不能只从某一茬作物来考虑,而必须从长期对作物-土壤体系的影响来衡量,土施稀土导致作物整体稀土含量的显著增高,暗示了稀土元素在生态环境系统中的累积,应引起足够的重视。

表 2 供试冬小麦籽实中 8 个稀土元素总和含量及占地上部分配百分比
Table 2 Grain concentration of 8 mixed REEs and percentage in shoots

水培 Solution culture									
加入稀土($\mu\text{g/g}$) ^①	CK	0.42	0.83	1.25	1.67	4.17	8.34	16.67	$\bar{X} \pm S (n = 7)$
籽实含稀土量($\mu\text{g/g}$) ^②	0.54	0.31	0.86	0.81	1.15	0.51	0.87	0.96	
占地上部(%) ^③	6.66	0.58	2.75	2.04	2.13	0.63	0.80	0.30	1.32 ± 0.96
土培 Soil culture									
加入稀土($\mu\text{g/g}$) ^①	CK	333	667	1000	1334	1667	2000	2501	$\bar{X} \pm S (n = 7)$
籽实含稀土量($\mu\text{g/g}$) ^②	2.90	2.04	3.00	1.08	1.20	0.80	0.56	1.01	
占地上部(%) ^③	10.18	3.74	4.86	0.72	0.37	0.22	0.10	0.13	1.45 ± 1.99

① Additional REEs ② Grain content of REEs ③ Percentage in shoots

2.4 稀土元素在作物体内具体分配行为

2.4.1 轻、重稀土组在作物体内分配行为上存在着不同的特征 本文前面所述都按稀土元素组作为整体的结果加以讨论的。进一步分析后发现,各个稀土元素的作物吸收和体内迁移都有选择性,存在一定的差异,表现出对重稀土组,尤其是 Tb 元素的倾斜(表 3)。表中数据为将中子分析技术测得的 8 个稀土元素分为轻(La、Ce、Nd、Sm、Eu)和重(Tb、Yb、Lu)稀土组作计算统计的。水培、土培作物的结果趋势相似,现以土培试验结果为例。

在表 3 底部载有供试土壤中轻、重稀土组的比例。将其与供试作物体内的比例相比较,同时又将作物地上与地下部的比例相比。清楚地显示出,不论是作物从土壤中吸收,还是由地下部向上迁移,在作物表现上生长属正常时,特别是,在背景条件下,都是重稀土组高于轻稀土组,尤其是 Tb 元素。结果表明了在稀土组中重稀土元素,尤其是 Tb,从土壤向作物与在作物体内的迁移较强,元素的分配行为上出现分异。

表 3 轻重稀土元素在供试作物中的分配百分比

Table 3 Distributive percentage of light and heavy REEs in wheat plants

外加稀土 (μg/g)		稀土总和 (μg/plant)	轻稀土组占 (%)	重稀土组占 (%)	Tb 元素占重组 (%)
Additional REEs		Whole REEs content	% of light REEs	% of heavy REEs	% of Tb in heavy
拔节-孕穗期 Jointing-booting					
α 背景)	地上 Shoot	3.88	89.64	10.37	87.75
	地下 Root	1.63	98.07	1.93	48.19
667	地上 Shoot	9.1	99.10	0.898	37.86
	地下 Root	60.16	99.76	0.245	44.90
2000	地上 Shoot	17.29	99.79	0.209	47.92
	地下 Root	212.92	99.90	0.1	32.03
成熟期 Maturity					
α 背景)	地上 Shoot	2.86	94.55	5.45	77.25
	地下 Root	2.14	97.49	2.51	36.25
667	地上 Shoot	6.16	98.17	1.83	63.39
	地下 Root	53.28	99.77	0.21	54.17
2000	地上 Shoot	58.33	99.76	0.244	45.08
	地下 Root	259.04	99.90	0.105	19.05
黄棕壤 Soil					
α 背景)		168.93 *	97.89	2.119	24.07
667		835.76 *	99.54	0.456	24.12
2000		2169.42 *	99.806	0.20	25.5

* 土壤中稀土元素总量(μg/g)Concentration of REEs in soil

2.4.2 单个稀土元素在地下和地上部的分配行为上存在差异 稀土元素植株体内分配的总趋势是:根>叶片>茎秆>颖壳>籽实。不论是水培还是土培条件下都类似。这种趋势在不少的报道中也如此^[2~4]。对单个稀土元素在植株中的分布有一定选择性也有一些报道^[5,6]。但文献中所报道的供分析用的植株样品,在获取上随意性较大,生长的背景条件不甚清楚,或者只用单一稀土元素进行研究。本文所发表的结果是在控制条件下生长作物和使用混合稀土的结果,应该是已有报道的补充和深化。

从单个稀土元素占 8 个元素总的比值(%)来分析各个稀土元素在作物吸收和体内转移过程中的行为,按供试作物生长状态的计算结果载于表 4。

表 4 不同生长状态下供试作物体内单个稀土元素的分配百分数*

Table 4 Distributive percentage of single REE in wheat plants under the different status

稀土量 REEs addition	土壤	地上/地下	单个稀土元素占 8 个稀土元素总和的比值(%)							
	Soil	Shoot/Root	Percentage of single REE in the whole 8 REEs							
	(μg/g)	(μg/10 plants)	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
α (CK)	169	28.58	31.37	47.28	13.16	2.20	0.54	4.21	1.08	0.16
		21.37	30.95	43.20	18.76	3.76	0.82	0.91	1.37	0.23
667	836	60.79	33.65	45.17	17.61	1.38	0.34	1.18	0.60	0.076
		532.80	33.55	42.41	23.03	0.66	0.12	0.14	0.093	0.011
2000	2169	582.25	33.53	45.46	20.13	0.54	0.095	0.108	0.12	0.014
		2590.41	30.13	44.50	24.70	0.50	0.083	0.022	0.064	0.0024
供试混合稀土 Mixed REEs			30.83	48.35	20.14	0.61	0.141	0.12	0.024	0.0024
供试黄棕壤 Soil			24.06	49.48	19.88	3.76	0.71	0.51	1.38	0.23

* 667μg/g 代表作物生长正常范围,2000μg/g 代表作物中毒状态,上述资料为成熟期结果。667 and 2000μg/g were the normal and toxic concentrations for plants respectively. Results came from the values of maturity

1. 从植物地下部状况看作物根部吸收过程中稀土元素的行为 将 CK 与供试土壤相比较发现,地下部

中稀土元素的比值与土壤中的有密切联系,但也存在元素之间的差异。如比值明显上升的元素 La 、 Tb , 还有 Eu , 明显下降的有 Ce 和 Nd , 其它元素几乎相似。表现出土壤原有的 Tb 和 La 更易进入作物, 而 Ce 、 Nd 则差些。

外源稀土进入土壤后, 必然会改变作物对稀土的吸收特点。若按作物表现生长看, a. 在作物生长仍处于可耐受范围, 土壤中稀土量增高近 4 倍, 但根部稀土量已增高近 24 倍, 这时各稀土元素的分配比值已受到外源稀土比值的影响, 表现在稀土元素比值向外源稀土比值靠近, 重稀土组元素比值下降。 La 的比值略高, 但 Ce 的比值仍然低, 而是 Nd 的比值明显上升, 表示出外源稀土的 Nd 更易进入作物, Ce 则不然。b. 在土壤中稀土量已增高 12 倍, 作物生长出现中毒时, 植物根部稀土量猛增到近 120 倍。从这种被动的超量累积现象可以推测, 根系的正常吸收受到伤害。在强烈的被动吸收时, 除 Lu 的比值外, 其它稀土元素的比值也并没有与外源稀土即混合稀土中的比值一样, 尤其是 Nd 比值仍大, Ce 比值仍小。

综上所述, 作物吸收稀土并不是以整体形式进入, 同时也表明, 一方面外源稀土进入土壤后, 在土壤的理化, 甚至生物学性质的作用下, 单个稀土元素的活性各异, 另一方面可能是由于作物自身对单个稀土元素存在着选择性吸收, 第三方面看来, 同一种稀土元素由于来源不同, 即来自土壤还是外源化合物, 对作物的生物效应是不完全相同的, 最后还可以推测不同稀土元素之间存在着相互影响, 有待研究。

(2) 从植物地上部与地下部状况看, 在作物体内的转移过程中稀土元素的行为, 总的看来, 在土壤背景条件下, 土壤中原有的稀土元素在作物体内的转移率比外加稀土元素条件下要大, 且向地上部的转移量都比根部从土壤中吸收要有节制得多。从地上与地下部单个稀土元素的比值变化看, 在土壤背景条件下, 在 8 个稀土元素中转移率高的有 Tb , 其次是 Ce 和 La , 其它元素转移率差不多。

外源稀土加入量在作物生长耐受范围时, 3 个重稀土元素的转移率都明显增大; 其次是, 在轻稀土组中含量低的 Eu 和 Sm , 其转移率亦相对高些。

作物中毒时, 地上部稀土元素量随之增高。根部 3 个重稀土所占比值虽然明显下降, 但相比之下, 它们的转移率还是居前。随着外源稀土量增大, 作物地上部中 Nd 和 La 在 8 个元素总和中的比值也加大了。

简言之, 在作物根部吸收和体内转移过程中, 单个稀土元素的行为表现出差别。究其原因, 有土壤性质影响、作物的选择性, 也有元素存在状态以及元素之间的影响。即使在作物中毒条件下, 外源稀土在作物根中异常积聚时, 单个稀土元素在总和中的比值也发生变化。若用 Nd 的比值归一化后发现, La/Nd 由外源稀土中的 1.54 改变为植物地上部分中的 1.67, Ce/Nd 由 2.41 变为 2.26, Sm/Nd 由 0.03 变为 0.27, Eu/Nd 由 0.00704 变为 0.00472, Tb/Nd 由 5.99×10^{-4} 变为 5.37×10^{-3} , Yb/Nd 由 1.20×10^{-3} 变为 6.11×10^{-2} , Lu/Nd 由 1.198×10^{-4} 变为 6.955×10^{-4} 。作物对重稀土元素 Tb 、 Yb 、 Lu 的吸收转移率高, 对轻稀土中除 La 略高外, Ce 、 Sm 、 Eu 都低。

2.4.3 单个稀土元素在地上部各器官中的分配行为 按中子活化法测定得 8 个单一稀土元素在供试作物地上部各器官中分配行为的结果分别从不同角度加以剖析比较。

(1) 以单个稀土元素在各器官中含量占地上部总含量的 % 来反映各元素的分配行为, 计算结果见表 5。

首先对器官中分布的概貌进行比较, 按作物对外加稀土浓度的反应分别求平均值 $\bar{X} \pm S$ 所得结果如表 6。可见, a. 在作物可耐受范围内, 籽实与颖壳稀土元素各仅占约 6% 左右, 叶片中占 83% ~ 85%。茎秆中约占 4% 左右。当作物中毒时, 稀土明显在叶、茎中积累, 占 96%。茎秆中稀土元素的滞留明显增大而不向籽实中转移。b. 从稀土元素分布 % 的变异系数来看, 籽实中最大, 表明, 稀土元素向籽粒中转移量虽然不大, 但元素之间差异很大, 尤其在作物中毒时差异更明显。叶片中最小, 变异小于 10%。表明, 对所测得的 8 个元素来说, 不论作物所吸收稀土量的多少, 叶片是地上部吸收与蓄存稀土最强的器官, 对各元素几乎都差不多。c. 就各单个稀土元素而言, 在土壤背景条件下, 作物所吸收的土壤稀土元素中, 轻稀土组元素, 以 Nd 、 Tb 和 Ce 向籽实的转移率高于重稀土组元素, 相应的转移强的在叶片存留就少些。

在作物可耐受范围内, 外源稀土(轻稀土为主)量的增大反而促进了重稀土组元素, 尤其是 Tb , 向籽实转移。叶片中存留比例相对有所下降, 即使当作物中毒受害, 外源稀土对重稀土组元素向籽实转移的促进作用仍有表现, 机理和原因待查。

表 5 单个稀土元素在地上部不同器官中的分布比例

Table 5 Distributive percentage of single REE in different organs of the wheat shoots									
外加稀土($\mu\text{g/g}$) REEs addition	器官 Organs	稀土元素 REEs							
		La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
α (CK)	籽实 Grain	8.61	11.50	14.22	2.39	0.654	0.499	4.53	2.13
	颖壳 Shell	5.14	4.98	3.96	5.89	7.84	3.99	13.92	6.38
	叶片 Leaf	83.18	81.12	75.14	89.81	88.89	91.77	78.64	87.23
	茎秆 Stem	3.97	2.39	6.67	1.91	2.61	3.74	2.91	4.26
667	籽实 Grain	4.07	4.72	6.45	2.51	3.83	13.99	12.81	4.35
	颖壳 Shell	0.15	3.41	4.09	6.45	8.13	4.34	14.17	8.70
	叶片 Leaf	90.37	88.50	83.92	87.69	82.30	74.55	70.03	82.61
	茎秆 Stem	5.41	3.37	5.54	2.75	5.74	7.13	3.0	4.35
2000	籽实 Grain	0.096	0.081	0.11	0.159	0.721	0.79	1.39	2.50
	颖壳 Shell	1.46	0.734	0.68	1.49	2.34	4.43	0.12	5.00
	叶片 Leaf	87.28	89.03	88.82	88.25	96.04	85.26	80.81	81.25
	茎秆 Stem	11.16	10.16	10.39	10.12	0.901	9.49	11.68	11.25

(2)从各器官中单个稀土元素占总稀土整体中比值(%)的变化来反映在地上部分转移分配过程中稀土元素之间出现的分异现象,计算结果载于表7。将表7的数据与表5对照,两者所表现的趋势基本上是一致的。表7的表示方法似乎更能明白地展示出各单个稀土元素在供试作物地上部各器官中的分配行为。归结起来说,a.进入地上部的8个稀土元素基本上都是按各自的比例,较明显地转移到叶片中。不论在土壤背景条件下,还是外加稀土时都是如此。b.随着外源稀土量的加大,在茎秆中各稀土元素也基本上按比例地滞留。c.作物穗部是元素转移最远之处,但颖壳与籽实中各稀土元素的分配行为并不相似,且依土壤稀土状况而异。在土壤背景条件下,Nd和Ce向籽实转移多,而其它稀土元素更多地向颖壳中转移。在外加混合稀土的条件下,与叶、茎的变化相比较,除La以外,其它稀土元素更多地向穗部转移。当稀土浓度在作物可耐受范围时,除Tb以外,这些元素都更多向颖壳转移,但当作物中毒时,更大比例的Eu、Yb、Yt则向籽实转移。d.还注意到,虽然外源稀土是采用的富铈混合稀土,但在地上部的器官中,尤其是籽实内,铈所占的比例并没有背景条件下的高,表明外源Ce在作物体内的转移性不强。

表 6 供试作物地上部各器官中稀土元素含量占整个地上部的百分数

Table 6 Organ percentage of REEs in the total amount of REEs in shoots						
器官 Organs	外加稀土浓度 Additional REE concentration($\mu\text{g/g}$)					
	α (CK)		667		2000	
	$X \pm S\%$	CV%	$X \pm S\%$	CV%	$X \pm S\%$	CV%
籽实	5.57 $\pm$ 5.24	94.08	6.59 $\pm$ 4.35	66.03	0.73 $\pm$ 0.85	116.85
颖壳	6.51 $\pm$ 3.25	49.92	6.18 $\pm$ 4.24	68.61	2.78 $\pm$ 2.10	75.65
叶片	84.47 $\pm$ 5.89	6.97	82.5 $\pm$ 7.03	8.52	87.09 $\pm$ 4.86	5.58
茎秆	3.56 $\pm$ 1.50	42.20	4.66 $\pm$ 1.55	33.20	9.39 $\pm$ 3.51	37.32

总之,在作物体内的分配行为单个稀土元素存在一定的差异。这里有各稀土元素自身的特性也受到植物体内外因素的影响,还可能存在着稀土元素之间的相互影响。

表 7 地上部不同器官中单个稀土元素占总稀土组中比值的百分数
Table 7 Organ percentage of REEs in the total amount of REEs in plants

外加稀土($\mu\text{g/g}$) REEs addition	器官 Organs	稀土元素 REEs							
		La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
α (CK)	籽实 Grain	26.64	53.62	18.46	0.518	0.035	0.207	0.487	0.035
	颖壳 Shell	32.33	47.19	10.45	2.59	0.842	3.37	3.02	0.210
	叶片 Leaf	31.96	46.97	12.11	2.42	0.583	4.73	1.04	0.176
	茎秆 Stem	29.86	35.07	27.25	1.30	0.434	4.89	4.977	0.217
	地上部 Top	31.37	47.28	13.16	2.20	0.54	4.21	1.08	0.16
667	籽实 Grain	27.77	43.26	23.03	0.701	0.267	3.34	1.57	0.067
	颖壳 Shell	1.98	59.86	28.04	3.460	1.088	1.985	3.33	0.128
	叶片 Leaf	34.55	45.42	16.79	1.372	0.321	0.996	0.480	0.071
	茎秆 Stem	40.53	33.93	21.73	1.026	0.440	1.869	0.403	0.073
	地上部 Top	33.65	45.17	17.61	1.38	0.34	1.18	0.60	0.076
2000	籽实 Grain	33.51	38.15	23.71	0.891	0.713	0.891	1.783	0.357
	颖壳 Shell	49.86	33.95	29.03	0.803	0.227	0.488	0.768	0.0698
	叶片 Leaf	33.11	45.79	20.23	0.538	0.103	0.105	0.113	0.0126
	茎秆 Stem	35.53	43.83	19.86	0.469	0.0081	0.0977	0.137	0.0147
	地上部 Top	33.53	45.46	20.13	0.54	0.095	0.108	0.12	0.014

3 小结

3.1 水培和土培试验中,作物对稀土元素的吸收与基质中稀土浓度呈显著的正相关。从体内转移率看,土培作物高于水培。按回归方程求得,在本试验条件下,在小麦作物生长量最佳范围,土壤施用稀土的“极限值”在 $500\mu\text{g/g}$ 以内。外加稀土并没有促进供试作物籽实中的累积,但作物植株,尤其是根部的超常聚集应是在评价稀土农用生态效应时不可忽视的因素。

3.2 在作物吸收和体内转移过程中,单个稀土元素表现出各自特征,彼此间存在差异,但没有出现强烈的规律性。从试验结果的分析,发现各稀土元素的分配行为受作物内外因素、稀土来源与自身特征等的影响,也可能存在元素之间的影响。

参考文献

[1] 徐本生,等.稀土农用的理论与技术.郑州:河南科技出版社,1995.45~235.

[2] 孙景信,等.小麦水稻植株中稀土元素的含量及其分布的研究.科学通报,1992,24(1):2273~2276.

[3] 倪嘉瓚主编.稀土生物无机化学.北京:科学出版社,1995.13~96.

[4] 吴兆明,等.稀土元素在植物体内分布规律的研究.植物学通报,1988,5(3):161~162.

[5] 雷少琼,等.用 ^{141}Ce 、 ^{147}Nd 研究稀土元素在小麦体内的分布及其存在形态.安徽农学院学报,1986年增刊,8:6~10.

[6] 朗炎华,等.应用 ^{141}Ce 示踪研究水稻对铈的吸收和分配规律.环境科学,1981,2(1):40~44.

[7] 刘铮主编.中国土壤微量元素.江苏:江苏科技出版社,1995.293~327.

[8] 郭伯生,等.稀土在农牧业中的应用概况和研究工作的最新进展.稀土,1993,15(6):37~43.

[9] 胡霏堂,等.稀土元素的生态效应.核分析技术与环境科学.北京:原子能出版社,1997.182~194.

[10] 胡霏堂,等.稀土元素作物生长效应曲线的研究.中国稀土学报,1999,17:551~555.