

稀土元素在甘蔗体内的分配、残留累积及其对甘蔗抗逆性能的影响

邝炎华 刘琼英 徐声杰 邓兆活

(农业生物系)

摘要 本文报道应用放射性核素铈(¹⁴¹Ce)标记硝酸铈[¹⁴¹Ce(NO₃)₃]，利用ICP-AES法及植物生理生化分析技术，研究测定了稀土元素(REE)在甘蔗体内各器官的吸收、分配、残留累积和REE处理对甘蔗叶片细胞膜透性、伤流量、叶片自由水和束缚水含量以及游离脯氨酸含量等抗性生理指标的影响。甘蔗叶面喷施REE铈后的第1~7天，根、茎、叶器官吸收累积铈量是随着时间的增加而增加，第7天达吸收最大值，随后开始缓慢下降。甘蔗植株对REE铈的吸收率仅为0.836%~2.165%，REE铈在甘蔗叶片有较多的分配，其次为茎，最小为根部；REE在甘蔗叶片有较多的残留累积量，茎(甘蔗渣，下同)次之，根部又次之，蔗糖汁中最小；100~900 ppm浓度范围的REE处理，甘蔗叶、茎、根及蔗糖汁中的REE残留累积量是随着REE处理浓度的增加而增加。当处理浓度在900 ppm以上时(900~1 500 ppm)，REE在蔗糖汁中的残留量趋于平衡饱和状态。一定浓度的REE处理甘蔗可显著地提高甘蔗伤流量，降低甘蔗叶片细胞膜透性，减少叶片中自由水含量，提高束缚水和叶片游离脯氨酸含量，从而提高甘蔗的抗逆性能和单位面积产量。

关键词 稀土元素；甘蔗；分配；累积及残留；抗逆性能

稀土元素(REE)处理能促进甘蔗的生长发育、氮素的同化作用和对磷、钾素等的吸收利用^[7]，对甘蔗有较明显的增产增糖效果^[4,15]。目前在增产增糖作用机理研究中，REE在甘蔗体内各器官及蔗糖汁中的分配、残留累积等研究国内尚未见有报道。REE处理对甘蔗抗逆性能的影响国内报道也甚少^[14]。本文着重研究REE在甘蔗体内各器官及蔗糖汁中的分配、残留累积和对甘蔗叶片细胞膜透性、甘蔗伤流量、自由水和束缚水含量以及游离脯氨酸含量等抗性生理指标的影响，以期为制定REE在甘蔗上的残留限值、安全卫生评价和甘蔗的抗性生理作用，为提高、改进甘蔗栽培和施用REE技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用4个月龄的甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)幼苗，品种为57/423。¹⁴¹Ce(NO₃)₃为中国原子能科学院所提供的¹⁴¹CeO₂经硝酸转化而成。农用混合硝酸稀土元素(用REE表示)为河南省商丘冶炼化工厂生产，含氧化稀土(REE₂O₃)量为38.70%。

1.2 试验方法

1.2.1 REE铈(¹⁴¹Ce)在甘蔗体内各器官的分配试验 选取盆栽于玻璃网室内生长正常的甘蔗植株，在分蘖盛期涂布300 ppm的硝酸铈[¹⁴¹Ce(NO₃)₃]溶液(放射性比活度为1.25 mci/

ml) 21.50 μ ci 于甘蔗的第3叶位(自上而下)叶片, 试验重复4次。经1, 2, 4, 7, 9, 14天后取样, 经用 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 载体溶液及自来水冲洗干净后, 剪取其根、茎、叶器官, 经烘干, 磨碎及称量, 用美国 BAIRD 公司生产的 α , β , γ 低本底自动计数器 (α , β , γ Low Background Automatic Counter) 进行相对放射性活度测量。所有数据均经衰变校正及数理统计。

1.2.2 REE 在甘蔗体内各器官及蔗糖汁的残留累积试验 选取盆栽于玻璃网室内生长正常的甘蔗植株, 在分蘖盛期用小型喷雾器根外喷施浓度分别为0, 100, 300, 600, 900, 1 200及1 500 ppm 的 REE 溶液10.0 ml, 对照喷施去离子水, 每处理重复4次。甘蔗成熟时取样, 用自来水冲洗干净, 分为根、茎(榨取蔗糖汁后成甘蔗渣)、叶及蔗糖汁。样本经4N HCl 煮沸提取。提取液采用日本岛津厂 Q1012型电感耦合等离子体——原子发射光谱仪 (ICP—AES 法)^[12,13]定量测定其 REE 总含量(包括 Ce , La , Pr , Nd , Sm , Y 等), 用 $\mu\text{g/g}$ 干样 (ppm) 表示。

1.2.3 甘蔗伤流量测定 采用重量法测定伤流量^[1], 以 g/h 表法。

1.2.4 甘蔗叶片细胞膜透性测定 采有 DDS—11型电导仪测定甘蔗叶片电导度^[1]。

1.2.5 甘蔗叶片自由水和束缚水含量测定 采用马林契克法^[1]。

1.2.6 甘蔗植株游离脯氨酸含量测定 参考朱广廉法^[4], 应用酸性茚三酮显色及日本岛津 120型分光光度计测定植株游离脯氨酸含量。

2 结果与分析

2.1 REE 镭 (^{141}Ce) 在甘蔗各器官中的分配

REE 处理后的第1~7天, 根、茎、叶器官吸收累积镭 (^{141}Ce) 量是随着时间的增加而增加, 处理后的第7天达吸收累积高峰, 随后开始下降。叶子中 REE 镭含量占全株的 54.29%, 呈现 REE 镭 (^{141}Ce) 在叶子中有较多的分配, 其次为茎部, 占全株的 35.48%; 最小为根部, 占全株的 10.21% (表1)。因而 REE 镭 (^{141}Ce) 在甘蔗植株中的分配大小次序表现为叶>茎>根。这种分配规律与我们1981年的水稻研究工作^[6]以及小麦等^[8]的报道是相一致的。甘蔗植株对 REE 镭的吸收利用率仅为 0.836%~2.165%。

表1 REE 镭 (^{141}Ce) 在甘蔗各器官中的分配(涂布叶片处理)

器官及测定项目(天数)		1	2	4	7	9	14
根	吸收量 (cpm)	980±11	1 214±9	1 981±27	2 180±17	1 977±19	1 410±8
	占全株%	11.94	13.38	12.42	10.22	12.85	12.50
茎	吸收量 (cpm)	3 347±15	3 848±17	5 472±10	7 571±16	5 221±14	4 008±14
	占全株%	40.76	42.41	34.30	35.49	33.93	35.53
叶	吸收量 (cpm)	3 884±18	4 012±6	8 499±10	11 584±11	8 189±4	5 862±11
	占全株%	47.30	44.21	53.28	54.29	53.22	51.97
全植株	吸收量 (cpm)	8 211±21	9 074±18	15 952±15	21 335±13	15 387±12	11 280±9
	吸收利用率 (%)	0.836	0.921	1.619	2.165	1.560	1.145

* 1. 表中数据为4株甘蔗的平均值; 2. 每株甘蔗施入 ^{141}Ce 量为 $985 \times 10^3 \pm 4.04$ cpm;

3. 吸收利用率% = [甘蔗植株吸收 ^{141}Ce 量 (cpm) / 施入营养液中 ^{141}Ce 量 (cpm)] × 100

2.2 REE 在甘蔗各器官及蔗糖汁中的残留累积与 REE 处理浓度的关系

2.2.1 REE 在甘蔗各器官及蔗糖汁中的残留累积 不同浓度的 REE 处理后, 甘蔗均能从其叶片表面吸收微量的 REE 而进入植株体内。不同浓度的处理, 甘蔗各器官及甘蔗糖汁具有不同的残留量。处理浓度从 100~900 ppm 范围内, 在根、茎(甘蔗渣, 下同)、叶片各器官及蔗糖汁中的残留累积量是随着处理浓度的增加而增加。在根、茎及叶片中, 以叶片残留累积量最多, 茎次之, 根部又次之, 蔗糖汁中最小。

表2 不同浓度 REE 处理在甘蔗各器官中的残留量 (ppm)

处理浓度 (ppm)	根			茎(甘蔗渣)			叶		
	测定值 平均值	相对值	显著性	测定值 平均值	相对值	显著性	测定值 平均值	相对值	显著性
对照 (0)	1.910±0.004	100.00	G	2.484±0.009	100.00	G	3.324±0.005	100.00	G
100	2.150±0.020	112.57	F	3.014±0.008	121.34	F	4.415±0.007	132.82	F
300	2.940±0.018	153.93	E	4.419±0.012	177.90	E	6.776±0.035	203.85	E
600	3.890±0.046	203.66	D	6.730±0.013	270.93	D	9.514±0.010	286.22	D
900	4.632±0.015	242.51	C	8.688±0.045	349.76	C	11.374±0.054	342.18	C
1200	5.526±0.016	289.32	B	11.089±0.039	446.42	B	13.051±0.025	392.63	B
1500	6.606±0.016	345.86	A	12.897±0.053	519.20	A	15.147±0.029	455.69	A

* 表中数据为3次重复的平均数; 表中英文字母为经新复极差检验(SSR法)。小写英文字母表示95%差异水平; 大写英文字母表示99%差异水平(以下各表同)。

表3 不同浓度 REE 处理在甘蔗糖汁中的残留量 (ppm)

处理浓度 (ppm)	测定项目						
	0 (对照)	100	300	600	900	1200	1500
残留量	0.219±0.011	0.289±0.010	0.391±0.048	0.499±0.034	0.597±0.031	0.596±0.026	0.617±0.011
相对值	100.00	131.96	178.54	227.85	272.6	272.15	281.74
显著性	dD	dcD	cBC	bAB	zA	zA	zA

* 和表2注相同。

以甘蔗生产栽培中最适宜的 REE 喷施浓度 300 ppm 为例, 在甘蔗叶、茎、根及蔗糖汁中的残留累积量分别为 6.776±0.035 ppm, 4.419±0.012 ppm, 2.940±0.018 ppm 及 0.391±0.048 ppm。其残留累积大小次序表现为: 叶>茎>根>蔗糖汁(表2和表3), 与 REE 在植株各器官中的分配规律基本上也是一致的(见表1)。

2.2.2 REE 在甘蔗各器官及蔗糖汁中的残留累积与其处理浓度的关系 REE 处理后, 微量的 REE 在甘蔗叶片表面的气孔和角质层渗透和扩散至植株体内而微量转移至甘蔗糖汁中, 其残留累积量随处理浓度的增加而增加, 两者呈极显著的正相关关系(见表3及图1)。

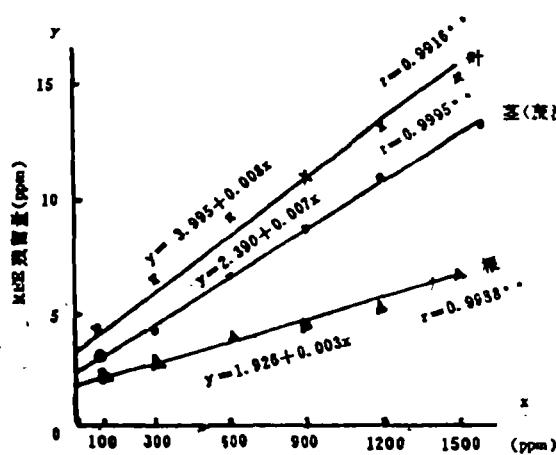


图1 甘蔗根、茎(蔗渣)及叶的REE残留量与REE处理浓度的相关性

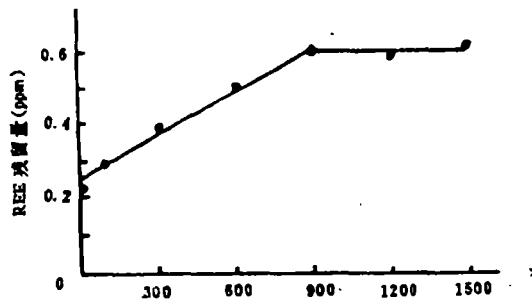


图2 甘蔗糖汁中REE残存量与REE处理浓度的关系

从图1可知：

1. 根的REE残存量(y)与处理浓度(x)的相关性: $y = 1.926 + 0.003x$, $r = 0.9988$ **, $r_{0.05(5)} = 0.7545$, $r_{0.01(5)} = 0.8745$

2. 茎(甘蔗渣)的REE残存量(y)与处理浓度(x)的相关性: $y = 2.390 + 0.007x$, $r = 0.9995$ **, $r_{0.05(5)} = 0.7545$, $r_{0.01(5)} = 0.8745$ 。

3. 叶的REE残存量(y)与处理浓度(x)的相关性: $y = 3.995 + 0.008x$, $r = 0.9916$ **, $r_{0.05(5)} = 0.7545$, $r_{0.01(5)} = 0.8745$ 。

从图2可以看出：当REE处理浓度在900 ppm以下时，蔗糖汁中残存量与其处理浓度两者呈极显著正相关关系 ($y = 0.2431 + 0.0004x$, $r = 0.9917$ **, $r_{0.05(5)} = 0.8783$, $r_{0.01(5)} = 0.95873$)；但当REE处理浓度高于900 ppm (900~1500 ppm)时，在蔗糖汁中的残存量变化不大，趋向于饱和平衡状态。当处理浓度为1500 ppm时，蔗糖汁中的残存量仅比浓度为900 ppm时增加0.020 ppm (见表3及图2)。

2.3 REE处理对甘蔗伤流量的影响

REE处理可显著提高甘蔗伤流量，其中以300 ppm处理的为最显著，约为对照的0.5~6.5倍 (表4)。

表4 不同浓度REE处理对甘蔗伤流量(g/h)的影响

处理浓度 (ppm) 测定项目	0 (对照)	300	600
伤流量平均值	1.47 ± 0.14	9.59 ± 0.87	2.21 ± 0.16
相对值	1.00	6.52	1.50
显著性	B	A	B

* 表中数据为10次重复测定的平均值。

2.4 REE处理对甘蔗叶片细胞膜透性的影响

300~600 ppm REE处理可降低甘蔗叶片细胞膜的透性，其电导度比对照减少26.74%~37.21%，其中以浓度为300 ppm处理的最为显著 (表5)。

表5 REE 处理对甘蔗叶片电导度 ($\mu\Omega^{-1}/cm^2$) 的影响*

测定项目	处理浓度 (ppm)	0 (对照)	300	600
处理前	平均值	1.40±0.01	1.37±0.05	1.39±0.02
处理前	相对值	100.00	97.86	99.29
处理后	显著性	a	a	b
处理后	平均值	1.72±0.02	1.08±0.05	1.26±0.03
处理后	相对值	100.00	62.79	73.26
处理后	显著性	A	C	B

* 表中数据为5次重复测定的平均值

2.5 REE 处理对甘蔗叶片自由水和束缚水含量的影响

300~600 ppm REE 处理可减少甘蔗叶片中自由水含量(比对照减少0.94%~2.84%), 增加叶片中束缚水含量(比对照增加1.33%~9.36%)及降低自由水/束缚水的比值, 其中以300 ppm 处理的为最显著。高浓度处理的则呈抑制效应(表6)。

表6 REE 处理对甘蔗叶片自由水和束缚水百分含量的影响*

处理浓度 (ppm)	自由水			束缚水			自由水/束缚水		
	平均值	相对值	显著性	平均值	相对值	显著性	平均值	相对值	显著性
0 (对照)	49.591±0.027	100.00	B	21.652±0.020	100.00	C	2.290±0.002	100.00	B
300	48.579±0.086	97.16	D	23.678±0.025	109.36	A	2.051±0.018	89.56	C
600	49.124±0.015	99.06	C	21.941±0.016	101.33	B	2.237±0.023	97.69	B
900	50.870±0.023	102.58	A	20.193±0.030	93.26	D	2.520±0.018	109.77	A

* 表中数据为3次重复测定的平均值。

2.6 REE 处理对甘蔗叶片游离脯氨酸含量的影响

300~600 ppm REE 处理, 均可提高甘蔗叶片游离脯氨酸含量(比对照提高7.56%~22.69%), 其中以300 ppm 处理的为最显著(表7)。

表7 REE 处理对甘蔗叶片游离脯氨酸含量(鲜重%) 的影响*

测定项目	处理浓度 (ppm)	0 (对照)	300	600
处理前	平均值	1.00±0.06	0.97±0.08	1.10±0.07
处理前	相对值	100.00	97.00	110.00
处理后	显著性	a	a	a
处理后	平均值	1.19±0.05	1.46±0.06	1.28±0.03
处理后	相对值	100.00	122.69	107.56
处理后	显著性	bB	aA	bAB

* 表中数据为3次重复测定的平均值。

3 讨论

3.1 稀土元素铈可通过甘蔗叶面的气孔和角质层而进入甘蔗植株体内，并按一定的比例分配到甘蔗各器官中去。REE 在甘蔗各器官的分配大小次序主要决定于 REE 的处理方法。叶面喷施处理时，REE 在甘蔗各器官中的分配大小次序表现为：叶>茎>根；根部施用处理时则呈：根>茎>叶^[7]。这些分配规律与水稻、小麦等农作物是相一致的^[8,9]。

3.2 REE 处理在甘蔗各器官及蔗糖汁中的残留累积研究，国内尚未见有报道。根据本研究结果，REE 处理浓度在 100~1 500 ppm 时，甘蔗糖汁中残留累积的 REE 总量为 1.0 ppm 以下 (0.219 ± 0.11 ppm~ 0.617 ± 0.011 ppm)；若以目前甘蔗栽培生产上普遍使用的 300 ppm 处理浓度，REE 在甘蔗糖汁中的残留量仅为 0.391 ± 0.048 ppm，为人正常摄入量及植物性食品中稀土含量的变动范围。混合稀土硝酸盐在食品中的允许残留量尚未有正式标准，根据植物性食品中稀土元素含量分析和调查，推算出我国北方人（以小麦为主食）每人每天从日常食物中摄入的稀土量约为 2.25 mg，南方人（以稻米为主食）每人每日摄入的稀土量约为 1.75 mg，总平均约为 2.0 mg/天/人^[8,10]。因此前者所建议的限量是远远超过人从日常食物中可能的摄入量，因而是比较安全的^[8,10]。毫无疑问，由甘蔗压榨成的蔗糖汁所造成各种食糖制品人食用是安全的。

3.3 植物伤流量是植物根系活力的重要指标。植物伤流量的增多，反映出根系活力增强，衡量主动吸收水分能力的强弱。因此植物伤流液的数量可代表根系生理活动的强弱^[11]。伤流量的多少除受土壤水分、温度、通气状况等外部因素外，还与根系的发达程度和生命活动强弱等内部因素有密切关系。因此，伤流量不仅是植物水分状况的良好指标，而且对于了解根系活力都有重要的作用^[11]，因而可作为评价栽培技术和品种特性的参考。REE 处理能提高甘蔗伤流量，促进植物根系的生长发育^[11]和对磷、钾等元素的吸收利用^[2,12]，以及提高作物根系活力^[7,10]，这在理论上和生产实践上都具有重要意义。

3.4 电导度可以用来表示细胞内电解质的外渗程度，说明细胞膜透性能力的大小。植物组织受干旱、高低温、盐渍等不良条件（逆境）的影响时，常能伤害原生质膜的结构而引起透性增大，导致细胞内含物、细胞电解质不同程度的外渗^[8,14,17]。REE 处理能降低甘蔗的电导度，即能减少甘蔗细胞电解质外渗，增强甘蔗细胞膜对电解质外渗的控制能力以及对外界逆境的影响，从而提高了甘蔗对逆境的抗御能力^[2,11]。

3.5 一定浓度的 REE 处理甘蔗可减少其叶片中自由水含量、提高叶片束缚水含量以及降低叶片自由水/束缚水比值。这说明 REE 处理的甘蔗具有较强的抗干旱、抗高低温等抗逆性能，这是与其具有较高的束缚水含量、较低的自由水含量及较低的自由水/束缚水比值密切相关^[10]。因为凡是束缚水含量高，自由水含量少，原生质的粘性就较大，粘性大的其保水能力也较强，遇干旱时失水少，能保持一定的水分，原生质不致凝聚变性，能忍受高温。同样，遇到低温时，也可以靠提高作物的束缚水含量而抵抗低温为害^[10]。因而 REE 处理甘蔗能提高其束缚水含量，降低自由水含量及自由水/束缚水比值，这同样在理论上和生产实践上都具有重要意义。

3.6 脯氨酸是植物蛋白质的组分之一，并以游离状态广泛地存在于植物体中。当植物遇到外界逆境时如低温、干旱、盐渍等条件时，植物体中都发生游离脯氨酸的累积。它具有较强的水合能力，在植物受干旱时脯氨酸积累的增加有助于细胞或组织的持水，防止脱水。在植物抗低温伤害研究中，有人把脯氨酸看作为一种防冻剂（Cryoprotectant）或膜稳定剂

(Membrane stabilizer)^[16,19]。由于脯氨酸具有偶极性, 它的疏水端与蛋白质联结, 而亲水端与水分子结合, 从而使蛋白质通过脯氨酸束缚更多的水, 防止在渗透胁迫条件下蛋白质脱水, 并可防止或减轻酶蛋白由于渗透胁迫引起的变性。因而在稳定蛋白质特性方面也起到较重要的作用^[20,22]。REE 处理能提高甘蔗体内脯氨酸含量, 这在甘蔗抗性生理理论上及生产栽培上都具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 山东农学院等编. 植物生理学实验指导. 济南: 山东科学技术出版社, 1980, 162~168, 308~310, 159~161.
- 2 王常华. 稀土对小麦吸收矿物质和氮素代谢的影响. 中国稀土学报, 1988, 6 (1): 71~74.
- 3 王洪春. 植物抗性生理. 植物生理学通讯, 1981, (6): 72~81.
- 4 庄学调等. 稀土对甘蔗有明显增产增糖效果. 甘蔗糖业(甘蔗分刊), 1987, (1): 37~40.
- 5 纪云晶. 稀土农用安全性毒理学评价研究概述. 中国稀土学报(稀土卫生毒理学专辑), 1985, 1~124.
- 6 邝炎华等. 应用¹⁴⁴Ce 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 邝炎华等. 稀土元素在甘蔗体内的吸收、分配、运转规律及其对磷、钾素吸收的影响. 核农学报, 1991, 5 (3): 146~152.
- 8 朱广廉等. 植物体内的游离脯氨酸的测定. 植物生理学通讯, 1983, (1): 35~37.
- 9 朱永懿等. 小麦对稀土元素吸收、分布及积累规律的研究. 中国稀土学报, 1987, 5 (2): 61~66.
- 10 北京农业大学等编. 植物生理学(农学类专业用). 北京: 农业出版社, 1980, 159~183, 389~394.
- 11 吴兆明等. 稀土元素对作物某些生理过程的影响. 中国稀土学报, 1984, 2 (2): 75~80.
- 12 郭雷等. 植物组织灰分中常量、微量元素的电感耦合等离子发射光谱分析、光谱学与光谱分析, 1984, 4 (6): 56~61.
- 13 郭伯生. 稀土农用研究的现状与前景. 中国稀土学报, 1985, 3 (3): 89~94.
- 14 杨家朴等. 稀土元素对提高小麦抗逆性的初步研究. 中国稀土学报, 1986, 4 (4): 67~72.
- 15 汤章城. 逆境条件下植物脯氨酸的累积及其可能的意义. 植物生理学通讯, 1984, (1): 15~21.
- 16 汤锡珂等. 稀土元素对大白菜、黄瓜根的生长及其活力的影响. 园艺学报, 1988, 15 (3): 185~188.
- 17 Blume A et al, Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. Crop Sci, 1981, 21 (1): 43~47.
- 18 Chao Yong et al, Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. Comm Soil Sci Plant Anal, 1985, 16 (9): 934~958.
- 19 Leigh R A et al, Assessment of glycinebetaine and proline compartmentation by analysis of isolated beet vacuoles. Planta, 1981, 153: 34~41.
- 20 Paleg L G et al, The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants. Academic Press, Sydney, 1981, 93~130, 205~241.
- 21 Sullivan C Y et al, Stress physiology crop plant, Edited by Marry Mussell and Richard C Staples, John Wiley and Son, N. Y. 1977, 263~281.

STUDIES ON THE DISTRIBUTION, ACCUMULATION AND RESIDUE OF RARE EARTH ELEMENTS AND ITS EFFECT ON IMPROVING THE STRESS RESISTANCE IN SUGARCANE (*Saccharum officinarum* L.)

Kuang Yanhua Liu Qiongying Xu Shengjie Deng Zhouhuo

(Department of Agricultural Biology)

Abstract This paper reports the distribution, accumulation and residue of rare earth elements (REE) in sugarcane and its effect on cell membrane permeability, content of bleeding sap, free water, bound water and free proline in sugarcane by using isotope tracer technique, instrument analysis (ICP-AES method) and plant physiologycal-biochemical analysis. The results showed that the REE can be absorbed into the sugarcane plants through leaves. Within 1~7 days after treatment, the absorption rate of cerium (^{141}Ce) in organs of the plant gradually increased with the increase of days and reached maxium values which was about 2~3 times as large as that of 1st day, and after that it gradually decreased.

The utilization efficiency of cerium (^{141}Ce) by sugarcane plant was 0.836%~3.24%. The distribution of cerium (^{141}Ce) in sugarcane plant was in the order of leaf>stem>root. The accumulation and residue of REE in sugarcane was in the order of leaf>stem (bagasse) >root>sucrose juice of cane. It was showed that a large amount of REE were accumulated and remained in the leaves and few amount in sucrose juice of cane. For instance, in the treatment with 300 ppm REE, the residue in leaves, stem (bagasse), root and sucrose juice of cane were 6.776 ± 0.035 ppm, 4.419 ± 0.012 ppm, 2.940 ± 0.018 ppm and 0.391 ± 0.048 ppm, respectively. Within the 100~900 ppm REE treatment, the REE residue in the organs of sugarcane were increased with the increase of REE concentration. Both of them presented a significantly positive correlation relationship. The above results indicated that, in general, the content of bleeding sap, bound water and free proline in leaves could be increased and the permeability of leaf cell membrane, content of free water could be reduced by treatments with certain REE concentration. Therefore, it can be said that the stress resistance and the yield of sugarcane could be improved by the REE treatment.

Key words Rare earth elements; Sugarcane; Distribution; Accumulation and residue; Stress resistance