

文章编号: 1000-5692(2004)01-0015-07

燃煤烟气脱硫副产物用于桉树的效果及机理

徐胜光^{1,2}, 李淑仪^{1,2}, 蓝佩玲^{1,2}, 廖新荣^{1,2}, 陈昌和³, 徐旭常³

(1. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650; 2. 广东省农业环境综合治理
重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘要: 通过盆栽和大田试验, 探讨脱硫副产物对桉树 *Eucalyptus* 营养作用及其机理。结果表明: ①供试物施用量 $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 玄武岩砖红壤上桉树氮、磷、钾、钙、镁、硫和硼养分吸收量分别比对照高 61%, 44%, 39%, 90%, 81%, 21% 和 146%, 浅海沉积砖红壤上桉树养分吸收量也较对照大幅增长, 供试物施用有显著促进桉树养分吸收的效应, 但施用量高于 $8.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或低于 $2.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对桉树养分吸收的促进作用不明显。②盆栽及大田试验均表明, 适量施用供试物可显著促进桉树生长, 提高其生物量。其中, 供试物施用量 $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 玄武岩砖红壤上桉树单株根质量、干质量、叶质量分别比对照高 118.75%, 116.24% 和 63.92%, 浅海沉积砖红壤上桉树单株根质量、茎质量和叶质量也较对照显著增加, 但施用量高于 $8.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或低于 $2.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时会导致肥效下降。③适量施用供试物可有效防治因微量元素供应不足导致的桉树缺素垂梢病。图 2 表 6 参 11

关键词: 森林培育学; 桉树; 脱硫副产物; 营养; 生长; 效果

中图分类号: S725.5 **文献标识码:** A

我国是以煤为主要能源的大国, 故粉煤灰和燃煤废气的排放已成为日益严重的生态污染, 引起国内外学者的普遍关注。近年来引入了燃煤排烟循环流化床脱硫 (FGD-CFB) 技术, 对缓减燃煤废气二氧化硫污染有好的效果, 但引用该技术又产生新型燃煤固体废弃物——燃煤烟气脱硫副产物。与传统意义上的粉煤灰比较, 由于采用了烟气脱硫工艺, 燃煤废气中的二氧化硫以硫酸钙形式固定, 故脱硫副产物富含作物需求量大的钙、硫元素, 有潜在较大的农业利用价值。问题是脱硫副产物对土壤及作物营养的作用及其机理尚不清楚。目前, 对粉煤灰的农业利用已有许多报道^[1~3], 但有关燃煤烟气脱硫副产物的农业利用还罕见报道^[6~8], 更缺乏在林业利用上的研究报道。本研究在盆栽和大田试验基础上, 探讨了脱硫副产物对桉树 *Eucalyptus* 营养作用及其机理。

1 材料与方 法

1.1 材 料

盆栽试验供试树种为尾叶桉 *U₆ Eucalyptus urophylla* S. T. Blake *U₆*。试验用的脱硫副产物取自辽

收稿日期: 2003-08-04; 修回日期: 2003-09-22

基金项目: 清华大学重点基础研究项目(985校-06-基础6); 广东省科学技术计划项目(2003C32107); 广东省环境保护局科学技术研究项目(2001-09)

作者简介: 徐胜光(1973-), 男, 白族, 云南怒江人, 助理研究员, 硕士。主要从事植物营养研究及新肥料研制。E-mail: sgxu@soil.gd.cn

宁沈阳, 土壤为雷州林业局北坡林场的浅海沉积砖红壤和唐家林场的玄武岩砖红壤。其中, 玄武岩砖红壤的速效氮、速效磷、速效钾、速效钙、速效镁、速效硫和速效硼分别为 94.39, 1.65, 36.00, 50.20, 19.16, 78.02 和 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浅海沉积砖红壤的速效氮、速效磷、速效钾、速效钙、速效镁、速效硫和速效硼分别为 60.78, 7.40, 38.00, 35.20, 25.92, 16.78 和 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。大田试验用的脱硫副产物采自广东连州, 供试树种为刚果 12 号桉 W_5 (*Eucalyptus* ABL 12 W_5)、尾叶桉 U_6 、尾叶桉 \times 细叶桉 DH_{201-2} (*E. urophylla* \times *E. tereticomis* smith DH_{201-2})。供试土壤与盆栽一样。肥料种类包括尿素 (含氮 46%, 湖南金信化工有限公司)、磷铵 (含氮 11%, P_2O_5 44%, 云南磷肥厂) 和氯化钾 (K_2O 60%, 加拿大 Canpotex 公司的 PotashCrop 子公司)。供试物主要养分指标见表 1。

1.2 试验设计

为防疏漏掉桉树最佳的脱硫副产物施用量范围, 盆栽试验采用不等间距多水平试验设计。一共设 6 个处理, 重复 3 次。每千克土施脱硫副产物分别为: 0 (对照), 2.67, 4.15, 5.53, 8.30, 16.60 g。每盆装土 20 kg, 施尿素 1.91 g, 磷铵 3.40 g, 氯化钾 1.56 g。其中, 全部供试物、磷铵和氯化钾以及 0.5 g 尿素于栽种当天 (4 月 20 日) 与盆栽土拌匀施用, 到 5 月 21 日再淋水施 0.5 g 尿素, 7 月 22 日再追施 0.91 g 尿素。大田小区试验设 5 个处理, 重复 3 次, 供试物量分别为 0, 120, 240, 480, 960 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单株施肥量: 氮 15 g, P_2O_5 30 g, K_2O 30 g。所有大田小区试验用的脱硫副产物和肥料均在 3 月中旬于栽种桉树前一次性施入, 覆土, 雨后种上桉树。

1.3 盆栽及大田实验

盆栽试验: 在广东省生态环境与土壤研究所露天试验场地进行, 2001 年 4 月 20 日种植, 11 月 9 日采伐。栽种前, 先淋水, 然后栽上苗木, 每盆植 1 株。试验期间, 视土壤墒情淋水, 每次 1 000 ~ 2 000 mL。大田小区试验: 2000 年 3 月中旬种植, 11 月下旬调查。按行距 3.0 m 挖种植沟, 按株距 1.5 m 进行种植, 每小区 5 行, 每行 8 株, 每小区一共栽 40 株。

表 1 燃煤烟气脱硫副产物 (石膏和粉煤灰) 中对作物有益的元素含量

Table 1 Available element concentration in desulphurisation by products

取样地点	速效养分/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			速效养分/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)								
	钙	镁	硫	钾	磷	硼	钼	硅	铜	锌	铁	锰
辽宁沈阳	177.70	0.11	5.50	64.00	0.47	5.86	4.62	119.70	1.00	1.39	127.70	0.84
广东连州	70.50	0.16	46.0	65.00	42.12	20.92	2.85	635.20	1.42	0.89	1.02	5.07

1.3 调查方法

盆栽试验: 用卡尺测地径, 测树钢围尺测胸径 (d), 标尺测株高 (h)。田间试验: 每小区调查中间 3 行, 每行调查中间 6 株, 调查胸径和株高。材积按公式^[9] $V=0.25\pi d^2 (h+3)$ 计算。

1.4 分析方法

供试物及土壤: 有效硫用 BaCl 比浊法测定; 有效硅用等离子发射光谱仪 (ICP) 测定; 硼用沸水浸提, 姜黄素比色法; 钼用极谱法; 钙、镁用原子吸收法; 氮、磷、钾指标用常规方法分析。植株: 样品经干灰化、酸溶后, 原子吸收法测钙、镁, 姜黄素比色法测硼; 经硫酸-双氧水一次性消化后, 扩散法测氮, 钼锑抗比色法测磷, 火焰光度法测钾; 硫用硝酸消化, BaCl 比浊法测定。

1.5 数据处理方法

原始数据先用 Excel 进行初步整理并作图, 再用 SPSS 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 燃煤烟气脱硫副产物对桉树生长的影响

2.1.1 盆栽试验 ①施脱硫副产物对桉树生长的影响。试验结果显示 (表 2), 在浅海沉积砖红壤上, 供试物量 2.67 ~ 5.53 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围, 3 月龄及 5 月龄桉树株高均明显高于对照。其中, 3 月龄桉树平均

比对照高 14.38%，地径比对照高 16.85%；供试物量 2.67, 4.15, 5.53 g·kg⁻¹处理的 5 月龄桉树分别比对照高 4.07%，38.94%和 25.67%。但在供试物量超过 4.15 g·kg⁻¹时，桉树株高和地径随施用量增加而减小；当供试物量达到 8.30 g·kg⁻¹或 16.60 g·kg⁻¹时，株高明显比对照低，显示对桉树生长已有抑制作用。在玄武岩砖红壤上，供试物量 2.67 g·kg⁻¹处理未明显促进桉树生长，但在供试物量达到 4.15 g·kg⁻¹情况下 3 月龄桉树株高显著高于对照，表现一定的桉树生长效应；而在供试物量超过 4.15 g·kg⁻¹条件下，供试物对桉树的生长效应也有下降趋势。②燃煤烟气脱硫副产物对桉树生物量的影响（表 3）。在玄武岩砖红壤及浅海沉积砖红壤上，供试物量 4.15 g·kg⁻¹处理对桉树生物量的增长有显著效果。其中，玄武岩砖红壤上，该施用量水平单株桉树生物量指标较对照增加 141.29%，根质量、干质量和叶质量分别比对照高 118.75%，116.24%和 63.92%；相同的施用量水平，在浅海沉积砖红壤上，桉树生物量指标也较对照显著增加，生物量、根质量、干质量和叶质量分别较对照增加 106.59%，136.47%，130.32%和 71.47%。但供试物量少，施用效果不明显，供试物量超过 4.15 g·kg⁻¹，随着施用量的增加，供试物对桉树生物量的增长效应逐步衰减。综合表 3 结果可知，供试物量 4.15 g·kg⁻¹对桉树有显著的生物效应，可显著促进桉树生长，提高生物量。

表 2 脱硫副产物对桉树生长的影响

Table 2 Effect of desulphurization byproduct on *Eucalyptus* growth

脱硫副产物 施用量/ (g·kg ⁻¹)	玄武岩砖红壤				浅海沉积砖红壤			
	3 月龄		5 月龄		3 月龄		5 月龄	
	株高/cm	地径/mm	株高/cm	地径/mm	株高/cm	地径/mm	株高/cm	地径/mm
0	109.67bc	9.64	187.00	12.41	104.33a	8.11	188.33b	11.84b
2.67	100.33c	7.96	183.33	11.85	115.33ab	9.26	196.00b	13.30b
4.15	129.33a	10.17	246.00	16.96	124.33a	9.67	261.67a	18.30a
5.53	129.33a	9.33	241.67	16.36	118.67ab	9.50	236.67a	15.88ab
8.30	125.00ab	9.89	214.33	13.60	100.00b	8.24	169.33b	11.07b
16.60	116.67abc	8.37	211.67	13.41	99.00b	8.60	168.33b	11.25b
F 值	4.091*	1.580	1.668	0.842	2.187	1.386	11.133**	3.805*
P 值	0.021	0.239	0.217	0.545	0.124	0.297	0.000	0.027

说明：处理间不同字母表示差异显著（ $\alpha = 0.05$ ）

表 3 脱硫副产物对桉树生物量的影响

Table 3 The effect of desulphurization byproduct on *Eucalyptus* biomass

脱硫副产物 施用量/ (g·kg ⁻¹)	浅海沉积砖红壤				玄武岩砖红壤			
	根质量/ (g·株 ⁻¹)	干质量/ (g·株 ⁻¹)	叶质量/ (g·株 ⁻¹)	生物量/ (g·株 ⁻¹)	根质量/ (g·株 ⁻¹)	干质量/ (g·株 ⁻¹)	叶质量/ (g·株 ⁻¹)	生物量/ (g·株 ⁻¹)
0	16.56b	51.03b	48.37b	115.96b	18.99b	57.21	54.08ab	130.28ab
2.67	20.42ab	58.16b	51.50b	130.08b	15.90b	43.62	43.58b	103.10b
4.15	40.14a	158.64a	101.24a	300.03a	41.54a	123.71	88.65a	253.90a
5.53	26.17ab	108.55ab	72.09ab	206.81ab	26.98ab	103.66	71.30ab	201.94ab
8.30	11.96b	40.53b	39.19b	91.68b	17.31b	90.10	54.72ab	162.13ab
16.60	12.35b	45.81b	38.00b	96.16b	20.01b	67.37	52.78ab	140.16ab
F 值	2.770	3.792*	2.721	3.292*	3.116*	1.465	1.684	1.756
P 值	0.069	0.027	0.072	0.042	0.050	0.272	0.213	0.197

说明：处理间不同字母表示差异显著（ $\alpha = 0.05$ ）

2.1.2 大田试验 在浅海沉积砖红壤上，适当施燃煤烟气脱硫副产物对刚果 12 号桉 W₅ 有较好效果，可显著促进生长，提高材积（表 4）。其中，供试物施用量 120~960 kg·hm⁻² 范围，桉树胸径比对照高 3~5 mm，株高比对照高 0.36~0.66 m，单株材积较对照增加 (0.2~0.5) × 10⁻³ m³，处理间差异达到极显著水平，而在玄武岩砖红壤上，2 个树种的试验结果均表明，供试物量 120 kg·hm⁻² 水平对提

高桉树株高、胸径、材积等生物指标也有效果,但供试物量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上时,各项指标均表现为下降,究其原因可能与土壤特性有关。因为,玄武岩砖红壤粘性大,胶体对离子吸附性强,在大田试验肥土未充分混匀的条件下,如施用不当,则由于脱硫副产物含大量有效钙,大量的钙离子易被土壤吸附,造成钙的局部过量累积而产生毒害作用,可能导致肥效下降。

在大田试验调查过程中还观察到,燃烧烟气脱硫副产物的施用还可消除刚果 12W5 在该地区种植易出现的垂梢病,其中,供试物量 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $960 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理小区的桉树叶色浓绿,枝梢挺直,效果最好。

表 4 桉树施脱硫副产物的大田试验结果

Table 4 Results of field experimentation about the effect of desulfurization byproduct on *Eucalyptus*

脱硫副产物/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	浅海沉积砖红壤/刚果 12W5			玄武岩砖红壤/尾叶桉 U6			玄武岩砖红壤/微×细 DH2012		
	株高/m	胸径/cm	材积 $\times 10^{-3}/\text{m}^3$	株高/m	胸径/cm	材积 $\times 10^{-3}/\text{m}^3$	株高/m	胸径/cm	材积 $\times 10^{-3}/\text{m}^3$
0	2.00c	1.82c	0.562c	2.78ab	1.77ab	0.656ab	2.92ab	1.57ab	0.837ab
120	2.36b	2.10b	0.795b	2.87a	1.96a	0.768a	3.12a	1.89a	1.370a
240	2.49ab	2.26ab	0.930ab	2.27c	1.30c	0.321b	2.67ab	1.54ab	0.771b
480	2.46ab	2.37a	1.011a	2.50bc	1.61abc	0.572ab	2.37bc	1.26bc	0.530b
960	2.66a	2.32a	1.049a	2.23c	1.32bc	0.346b	2.01c	1.00c	0.288bc
$P < F$	0.0004	0.0001	0.0004	0.0062	0.043	0.0274	0.0083	0.0279	0.0212

说明:处理间不同字母表示差异显著 ($\alpha = 0.05$)

2.2 燃煤烟气脱硫副产物对桉树养分吸收的影响

2.2.1 玄武岩砖红壤 研究结果(表5)发现供试物施用会降低树干(木质部与韧皮部的混合物)氮、磷、钾和镁含量,且供试物量在 $5.53 \sim 16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下叶片磷、镁含量也有较大幅度下降。但随着供试物量增加,树干、叶的钙养分含量亦相应增加。其中,供试物量从 0 增加 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 树干和树叶中钙含量分别提高 58.33% 和 126.97%。此外,施供试物对提高树干和树叶硼含量及叶片硫含量也有效果,且当供试物量为 $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,桉树叶片氮、磷、钾、钙、镁、硫和硼含量高于对照,表明该施用量水平对提高桉树叶片养分含量有较大作用。从养分吸收量指标看(表6),供试物量为 $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的桉树氮、磷、钾、镁吸收量明显高于对照及其他处理,有显著的养分吸收促进效应。与对照比较,供试物量为 $5.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的氮、钾、钙、硫和硼等养分吸收量也高于对照,对促进养分吸收也有效果;但供试物量达到 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,桉树对磷、钾、镁养分吸收有一定抑制,而钙吸收量则成倍增加。

供试物对桉树养分吸收的促进作用,显然对桉树生长及生物量有重要影响。统计结果表明,供试物量 $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理可显著促进桉树生长,获得较高的生物量。这与该处理良好的养分吸收促进效应有关。供试物量 $5.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $8.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,与供试物量 $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理比,多数养分吸收量指标下降,生物量亦相应降低,可能是由于养分失去平衡而演变为抑制作用所致。

2.2.2 浅海沉积砖红壤 由表5可知,在浅海沉积砖红壤上,不同供试物量处理的树干氮、磷、镁和硼含量有程度不同下降之外,施用供试物也未明显提高树干钾、硫含量,在供试物量达到 $8.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下树干钾含量还比对照有较大幅度降低;此外,供试物施用还不同程度地降低了桉树叶片磷、镁和硫含量,未明显提高桉树叶片氮、钾含量,在供试物量达到 $8.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下叶片氮含量较对照亦有一定程度降低。但与玄武岩砖红壤类似,无论是桉树干还是叶,钙含量总体上随供试物量增加而增加(表5),当供试物量达到 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,树干及叶片钙含量分别较对照高 49.05% 和 78.63%。此外,供试物还明显提高叶片硼含量。从养分吸收量指标看(表6),供试物量 $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下桉树氮、磷、钾、镁、硫和硼等养分吸收量较对照大幅增加,显著促进了对养分的吸收;供试物量 $2.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 情况下,除磷养分吸收量指标略有下降外,氮、钾、镁、硫和硼等养分吸收量也明显高于对照;但施用量达到 $8.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条

件下桉树养分吸收明显受到抑制。

表 5 脱硫副产物对树干和叶片养分含量的影响

Table 5 The effect of desulphurization byproduct on nutrient concentration in *Eucalyptus* stem and leaf

供试物 施用量/ (g·kg ⁻¹)	土壤	桉树干							桉树叶						
		氮/ (g·kg ⁻¹)	磷/ (g·kg ⁻¹)	钾/ (g·kg ⁻¹)	钙/ (g·kg ⁻¹)	镁/ (g·kg ⁻¹)	硫/ (g·kg ⁻¹)	硼/ (g·kg ⁻¹)	氮/ (g·kg ⁻¹)	磷/ (g·kg ⁻¹)	钾/ (g·kg ⁻¹)	钙/ (g·kg ⁻¹)	镁/ (g·kg ⁻¹)	硫/ (g·kg ⁻¹)	硼/ (g·kg ⁻¹)
0	玄武岩	3.16	1.65	4.83	5.52	0.34	0.46	5.31	13.23	3.51	12.50	14.53	2.76	2.55	25.69
2.67	砖红壤	2.51	1.30	4.76	3.61	0.15	0.38	22.90	15.15	3.33	12.38	18.49	2.22	2.23	32.14
4.15		3.00	1.36	4.22	6.59	0.65	0.33	13.45	17.81	3.91	12.88	20.53	3.56	2.67	37.36
5.53		1.74	1.07	3.25	6.59	0.23	0.46	12.07	11.72	1.00	10.75	15.62	2.06	4.23	30.31
8.30		2.29	0.89	4.66	6.98	0.38	0.73	7.12	16.75	1.88	12.65	24.89	2.37	2.60	50.44
16.60		2.67	1.22	2.64	8.74	0.23	0.57	14.57	15.24	2.21	10.63	32.98	1.71	3.54	66.48
0	浅海沉	3.70	1.58	3.48	6.91	0.45	0.47	17.42	15.11	2.81	9.70	21.15	2.87	3.00	35.35
2.67	积砖红	2.94	1.28	3.14	8.35	0.45	0.42	14.14	13.32	2.31	8.68	24.45	2.75	2.61	41.19
4.15	壤	2.40	0.81	3.57	8.70	0.28	0.49	10.17	15.40	1.83	10.33	32.83	2.38	2.89	47.40
5.53		2.51	0.71	3.86	7.43	0.27	—	11.38	16.34	1.86	10.63	28.96	2.13	2.49	48.73
8.30		2.76	1.38	2.81	9.49	0.28	0.52	6.99	13.23	2.37	9.75	31.81	2.65	2.21	43.13
16.60		2.72	1.43	2.64	10.30	0.28	0.46	5.82	12.83	2.82	10.00	37.78	2.31	3.68	42.44

供试物对桉树养分吸收的促进及抑制效应，对桉树生物量有较大影响。统计结果显示，供试物量 4.15 g·kg⁻¹ 条件下桉树生物量成倍增加，这明显与该处理显著促进桉树养分吸收有关。但在供试物量 8.30 g·kg⁻¹，16.6 g·kg⁻¹ 条件下，桉树养分吸收受到抑制，机体养分供应不足，导致了比对照低的桉树生物量。

表 6 脱硫副产物对桉树养分吸收的影响

Table 6 The effect of desulphurization byproduct on nutrition uptake

脱硫副产物/ (g·kg ⁻¹)	土壤	氮/ (g·株 ⁻¹)	磷/ (g·株 ⁻¹)	钾/ (g·株 ⁻¹)	钙/ (g·株 ⁻¹)	镁/ (g·株 ⁻¹)	硫/ (g·株 ⁻¹)	硼/ (g·株 ⁻¹)
0	玄武岩	0.956	0.316	1.044	1.206	0.175	0.173	1.794
2.67	砖红壤	0.810	0.222	0.823	1.021	0.106	0.120	2.764
4.15		1.540	0.454	1.453	2.293	0.316	0.210	4.414
5.53		1.063	0.254	1.191	1.975	0.176	0.362	3.738
8.30		1.163	0.198	1.193	2.112	0.170	0.220	3.525
16.60		10.38	0.223	0.792	2.504	0.113	0.237	4.782
0	浅海沉	0.905	0.229	0.656	1.384	0.154	0.448	2.711
2.67	积砖红	0.917	0.220	0.694	1.915	0.177	0.167	3.232
4.15	壤	2.036	0.346	1.755	3.497	0.296	0.390	6.820
5.53		1.516	0.230	1.286	3.089	0.190	—	5.046
8.30		0.663	0.165	0.530	1.745	0.099	0.114	2.057
16.60		0.646	0.190	0.534	2.035	0.104	0.166	1.934

3 讨论

从上述研究可知，合理施脱硫副产物能提高桉树生物量。从作物营养角度来说，这与供试物活性钙养分含量高有关。首先，供试土壤，包括玄武岩砖红壤和浅海沉积砖红壤，由于高温多雨，施肥不当，轮伐频繁等因素^[10, 11]，绝大多数天然钙被带出林地，故土壤向来缺钙偏酸。供试物有较高的活性钙含量（表 1），适量施用促进了桉树对钙养分的代谢性吸收，消除了缺钙导致的养分吸收生理障碍因素，因而促进桉树养分吸收及生长，提高生物量。研究表明，供试物量 4.15 g·kg⁻¹ 条件下桉树干和树叶钙含量适中（图 1~2），获得了较高生物量，是相对合理的施用量。

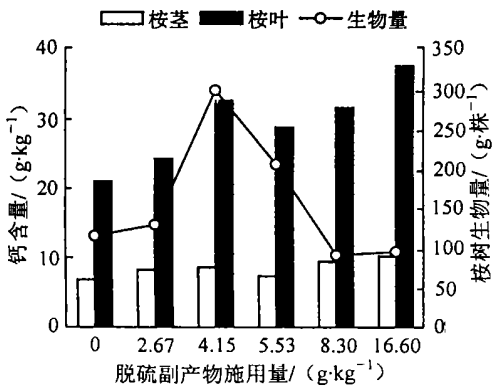


图1 浅海沉积砖红壤上钙浓度对桉树生物量的影响

Figure 1 The effect of calcium concentration on *Eucalyptus* biomass on neitic sedimentary latosol

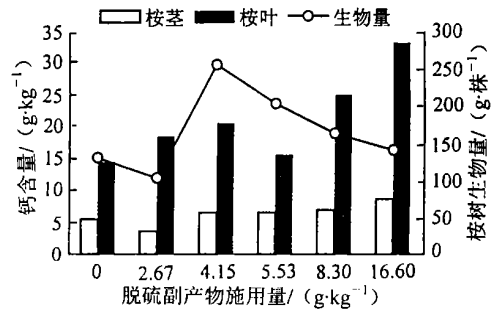


图2 玄武岩砖红壤上钙浓度对桉树生物量的影响

Figure 2 The effect of calcium concentration on *Eucalyptus* biomass on basaltic latosol

研究结果也表明, 过多或过少的施用量水平均会使供试物对桉树养分吸收的促进效应减弱, 这实际上也与供试物对桉树植株钙养分吸收的影响有关。由图1和图2可知, 桉树干和叶的钙含量总体上随供试物量增加而增加, 但生物量未随钙含量上升而增长, 而是先升后降。显然, 供试物量少, 土壤钙含量低, 供钙不足, 影响了桉树对钙养分的代谢性吸收, 未彻底消除缺钙导致的养分吸收生理障碍因素, 影响了肥效。施用量多, 土壤钙含量高, 导致了桉树对钙的非代谢性吸收, 使干和叶钙含量偏高(图1和图2), 养分供应失调, 影响了桉树对其他养分的吸收利用, 削弱了施供试物对养分吸收的促进效应, 甚至抑制养分吸收, 肥效反而下降。

试验结果还显示, 尽管适量施供试物可显著促进桉树对养分的吸收, 但除钙外, 许多养分含量指标并未增加, 这是由于桉树生物量增加, 产生了稀释效应所致。此外, 盆栽及大田试验均表明, 适量施用供试物对桉树有较好的肥效。但是由于大田试验不可控制因素较多, 盆栽和大田试验结果有一定差异。因此, 要确定适宜的大田施用量水平, 还要进一步深入研究。从本次试验结果看, 浅海沉积砖红壤上供试物量 $480 \sim 960 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及玄武岩砖红壤上 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右对桉树比较适宜。有研究结果指出, 缺硼是近年来在雷州半岛大面积爆发桉树缺素生理病的重要原因^[10-11]。本试验研究结果表明, 施供试物会促进桉树对硼养分的吸收, 可有效防治缺素垂梢病。原因可能是由于供试物有相当数量硼、钼和硅等微量元素, 一定程度上也有调节和协调土壤营养作用, 从而有效消除缺硼导致的桉树缺素垂梢病。

参考文献:

- [1] 杨剑虹, 车福才, 王定勇, 等. 粉煤灰的理化性质与农业化学行为的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 341-348.
- [2] 青木正则, 菅沼浩敏. 日本煤灰用于农业的研究[J]. 王竞, 译. 国外农业环境保护, 1993, 38(4): 32-33.
- [3] 吴家华, 刘宝山, 董云中, 等. 粉煤灰改土效应研究[J]. 土壤学报, 1995, 32(3): 334-340.
- [4] 焦有. 粉煤灰的特性及其农业利用[J]. 农业环境与发展, 1998, 15(1): 23-46.
- [5] Sims J T, Vasilas B L, Ghodrati M. Evaluation of fly ash as a soil amendment for the atlantic coastal plain: II. Soil chemical properties and crop growth[J]. Water Air Soil Poll, 1995, 81: 363-372.
- [6] Rex M. Greenhouse studies on the use of desulphurization products as sulphur fertilizers[D]. Zurich: Switzerland Technology University, 1996.
- [7] Hancklaus S, Paulsen J M, Schnug E. Field studies on the use of desulphurisation products as sulphur fertilizers[D]. Zurich: Switzerland Technology University, 1996.
- [8] 盛学斌, 刘云霞, 赵玉萍, 等. 脱硫副产物于盐渍土中的试验效果研究[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 72-77.
- [9] 北京林业大学. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1984.
- [10] 李淑仪, 廖新荣, 蓝佩玲, 等. 粤西刚果12号桉树喷施中微肥的效果研究[A]. 李生秀. 土壤-植物营养研究文集[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999, 779-783.

[11] 李淑仪, 廖新荣, 蓝佩玲, 等. 雷州桉树枝梢弯曲生理病与微肥施用效果研究初报 [J]. 土壤与环境, 1999, 8 (2): 106-109.

Mechanism and effect of desulphurization byproduct on *Eucalyptus*

XU Sheng-guang^{1,2}, LI Shu-yi^{1,2}, LAN Pei-ling^{1,2}, LIAO Xin-rong^{1,2}, CHEN Chang-he³, XU Xu-chang³

(1. Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Science, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 2.

Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Integrated Control, Guangzhou 510650, Guangdong, China;

3. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on pot experiments and field experiments, the mechanism and effect of desulphurization byproduct on *Eucalyptus* nutrition are studied. The results are as follows: (1) When applying $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ desulphurization byproduct to eucalyptuses in basaltic latosol, nutrients of N, P, K, Ca, Mg, S and B absorbed by eucalyptuses are 61%, 44%, 39%, 90%, 81%, 21%, 146% higher than those of controlled eucalyptuses. And the nutrients absorbed by eucalyptuses in neritic sedimentary latosol also increase greatly. It indicates that the applied byproduct can significantly improve the nutrition absorption of eucalyptuses. But when the quantity applied is over $8.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ or below $2.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the effect of eucalyptus nutrition absorption will be restrained. (2) Both pot and field experiments show that applying of suitable quantity of desulphurization byproduct can promote eucalyptus growth and increase its biomass. When applying $4.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ desulphurization byproduct to eucalyptuses in basaltic latosol, the weights of root, stem and leaf are 118.75%, 116.24% and 63.92% higher than those of eucalyptuses under control. And the weights of root, stem and leaf of eucalyptuses in neritic sedimentary latosol also increase greatly. But when the quantity applied is over $8.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ or below $2.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the effects will decline. (3) Proper use of desulphurization byproduct can prevent and cure tip-droop disease caused by the lack of trace elements. [Ch, 2 fig. 6 tab. 11 ref.]

Key words: silviculture; *Eucalyptus*; desulphurization byproduct; nutrition; growth; effect