

不同措施对土壤-植物系统 植物地上部产量及氟含量的影响

万红友

(郑州大学环境与水利学院 郑州 450002) (南京大学城市与资源学系 南京 210093)

黎成厚

(贵州大学生物与环境科学学院 贵阳 550025) (郑州大学生物工程系 郑州 450002)

周生路 黄云

师会勤

摘要 盆栽试验研究不同措施对土壤-植物系统植物地上部产量及 F 含量的影响结果表明, F 对黑麦草发芽有抑制作用, 干旱下植物易受 F 中毒, 黑麦草地上部鲜物质量、干物质量及 F 含量在 2 种土壤(黄壤、石灰土)间呈相同变化趋势, 试验所选 4 种物质不利于黑麦草干物质量的积累。硅钙肥、石灰对黑麦草 F 含量均为负效应, 有利于降低 F 含量, 粉煤灰对 2 种土壤黑麦草 F 含量均为正效应, 风化煤对黄壤黑麦草 F 含量表现为正效应, 而对石灰土黑麦草 F 含量则表现为负效应; 硅钙肥和风化煤对 2 种土壤黑麦草 F 含量均表现为负交互作用, 而石灰和粉煤灰对黑麦草 F 含量均为正交互作用。

关键词 土壤-植物系统 F 含量 产草量 黑麦草 F 污染

Effect of different measures on the overground yield and fluorine content of plant in soil-plant system . WAN Hong-You (College of Environmental and Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China), ZHOU Sheng-Lu, HUANG Yun (Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China), LI Cheng-Hou (College of Biology and Environment, Guizhou University, Guiyang 550025, China), SHI Hui-Qin (Department of Bio-engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China), *CJEA*, 2006, 14(1): 131 ~ 135

Abstract Potted plant experiment was carried out to study the overground yield and fluorine content of plant in soil-plant system under different measures . The results show that fluorine has a depressing effect on the spring of rye grass, it is easy to get fluorosis when it meets drought; green weight, dry weight and fluorine content of rye grass overground have the same trend between yellow soil and calcareous soil; the four materials selected do no good to the accumulation of the dry weight of rye grass; Si-Ca fertilizer and lime have negative effects on the fluorine content of rye grass, and do good to declining the fluorine content, coal fly ash has positive effect, saprolite of coal has positive effect on yellow soil, and negative effect on calcareous soil . Furthermore, Si-Ca fertilizer and saprolite of coal have a negative common effect in the two kinds of soil, while lime and coal fly ash have a positive common effect .

Key words Soil-plant system, Fluorine content, Yield of grass, Rye grass, Fluorine contamination

(Received Nov . 18, 2004; revised Dec . 27, 2004)

F 是人体和动物所必需的微量元素之一, 具有双阈值性^[1]。有关土壤-植物系统与 F 含量的关系研究已见报道^[2]。本试验研究了不同措施对土壤-植物系统植物地上部产量及 F 迁移积累的影响, 为治理土壤 F 污染提供理论依据。

1 试验材料与方法

试验所用土样为代表不同 pH 值和水溶性 F 含量的黄壤和石灰土, 均采自贵州大学南区, 取样深度为 0~15cm 表层, 其基本性质见表 1。同时测定黄壤和石灰土的游离铁含量分别为 41.3g/kg 和 23.1g/kg。试验所用植物为对 F 敏感的黑麦草(牧草)。用电位法测定土样 pH 值^[3], 以重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量^[4], 用比重计法测定土壤质地, 以连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠提取(DCB 法)邻啡罗啉比色法测定土样游离铁含量^[3], 采用离子选择电极法测定土样 F 含量^[3]。称取 0.500g 风干土于镍坩锅中, 加入 0.5g Na₂CO₃ 和 1.5g NaOH 先低温加热, 之后移入马福炉中 600℃ 下熔融 10min 并冷却, 用热水提取稀

表 1 供试土壤基本性质

Tab.1 Basic properties of tested soil samples

土壤 Soil	pH (H ₂ O)	有机质 g·kg ⁻¹ Organic matter	质地<0.01mm% Texture	全F mg·kg ⁻¹ Total F	水溶性F mg·kg ⁻¹ Water soluble F	全N g·kg ⁻¹ Total N	碱氮 mg·kg ⁻¹ Alkali-hydrolysis N	速效磷 mg·kg ⁻¹ Available P	缓效钾 mg·kg ⁻¹ Postpone K	速效钾 mg·kg ⁻¹ Available K
黄壤	4.30	29.9	中粘土(83.26)	1793	3.76	1.19	95.9	6.5	82.1	123.9
石灰土	7.26	48.0	中壤土(43.39)	846	20.0	2.44	177.9	5.8	150.3	182.7

释至 100mL,干滤纸过滤,吸取 20.0mL 试液于 100mL 容量瓶中,加入 40.0mL 柠檬酸钠(2.0mol/L)-磺基水杨酸(0.5mol/L)混合液并混匀,用 4.0mol/L HCl 调节 pH 值至 7~8,定容至 100mL 后用 F 电极测定土壤全 F 含量^[3]。称取 <2mm 土样 5.00g 于 150mL 烧杯中,加 80.0mL 去离子水加热至 60~70℃,持续搅拌 30min 并离心,在提取液中加入 2.0mol/L 柠檬酸钠 10.0mL,用水稀释至 100mL,插入 F 电极和饱和甘汞电极测定水溶性 F 含量^[3]。称取粉碎后植物样 2.00g 于镍坩锅中,加入 10.0mL 浓度为 74.0g/L 的 Ca(OH)₂ 悬乳液,先水浴蒸干,用小火灰化,之后移入马福炉中 580℃ 灰化 10min,用 20.0mL 浓度为 1mol/L 盐酸提取,定容至 100mL,吸 20mL 上清液加入 20.0mL pH5.3 的缓冲液(硝酸钠-柠檬酸钠-冰乙酸)测定植物中 F 含量^[3,6]。试验所用电极为中国科学院南京土壤研究所产 pF-1 型 F 电极,检出下限为 5×10⁻⁷ mol/L,用饱和甘汞电极作参比电极,每次均在 78-1 型磁力加热搅拌器上用 DD-2B 电极电位仪用高纯度去离子水测定。

表 2 盆栽试验 2 因素回归最优设计处理表*

Tab.2 Treatments of optimized regression design with binary diathesis in potted plant experiment

处 理 Treatments	硅钙肥/ g(x ₁) Si-Ca fertilizer	风化煤/ g(x ₂) Saprolite of coal	处 理 Treatments	石灰/ g(x ₃) Lime	粉煤灰/ g(x ₄) Coal fly ash
	0	0		0	0
	30.0	0		20.0	0
	0	40.0		0	30.0
	13.02	17.38		8.68	13.02
	30.0	27.88		20.0	20.92
	20.92	40.0		13.94	30.0

* 另设未加氟化钠、只加肥料的对照处理(CK)。

1.2g 硫酸钾并混匀,再加入 0.44g 氟化钠(按元素 F 占风干土重的 0.1g/kg 计),再次混匀,硅钙肥、风化煤、石灰、粉煤灰最小用量均为 0g,最大用量分别为 30.0g、40.0g、20.0g 和 30.0g,经计算按试验处理表(见表 2)混匀装盆,每盆装土 2.0kg,2001 年 8 月 14 日每盆播种 1.00g 对 F 敏感的黑麦草,重复 3 次,随机区组排列,共 72 盆。土壤干旱时适当浇水,11 月 7 日收割黑麦草地上部分,测定其产量和 F 含量。试验所用石灰为分析纯,硅钙肥、风化煤、粉煤灰 pH 值依次为 8.86、5.44、8.69,水溶性 F 依次为 204.5mg/kg、7.08mg/kg 和 8.81mg/kg。

2 结果与分析

2.1 各处理对黑麦草产量的影响

播种后观察黑麦草发芽及长势,8 月 18 日很少处理有黑麦草发芽,至 8 月 19 日 2 种土壤对照处理(CK)发芽状况最佳,处理 次之,黄壤各处理黑麦草均有发芽,石灰土处理 、处理 、处理 仍未发芽,说明 F 对黑麦草发芽有抑制作用,该作用在石灰土上更明显,可能与石灰土本身水溶性 F 含量较高有关(见表 1)。9 月 6 日黄壤除处理 、处理 黑麦草长势较差外,其余长势均较好,与黄壤较好的吸附性能有一定关系,而石灰土以对照处理(CK)、处理 、处理 黑麦草长势最佳,处理 、处理 、处理 长势最差。进入 9 月后秋旱不利于黑麦草生长,大多处理均出现叶尖、叶缘坏死(植物 F 中毒典型症状),一般为老叶先死,而 10 月份降雨又使黑麦草生长得以恢复,整株变绿,F 中毒症状消失。导致该现象的原因可能是干旱条件下植物蒸腾作用加强,F 在叶片中积累,植物含水量下降,导致 F 浓度在植物体内过高,而降雨可使土壤中 F 淋溶,植物蒸腾作用减弱,植物组织中水含量增大,F 在叶片中浓度下降,低于受害浓度后症状消失。不同处理黑麦草地上部产量及 F 含量见表 3。对黄壤施入硅钙肥、风化煤后植物干物质质量回归方程为:

$$\hat{y} = 1.53 - 1.79 x_1 - 2.99 x_2 + 2.03 x_1^2 + 2.58 x_2^2 - 1.26 x_1 x_2 \quad (1)$$

式中, x₁ 为硅钙肥, x₂ 为风化煤。从回归方程(1)可知硅钙肥和风化煤对黑麦草干物质质量均为负效应,且交互效应也为负效应,故二者试验条件下不利于植物产量的形成。对黄壤施入石灰、粉煤灰后植物干物质质量

试验采用盆栽试验法(底 12cm × 高 14cm × 口径 16cm),其处理为 2 套 2 因素回归最优设计^[7],分别是硅钙肥(采自贵阳磷化厂技协公司)、风化煤(采自安顺奥普尔公司) 2 因素回归最优设计和石灰(AR 级试剂)、粉煤灰(采自贵阳电厂) 2 因素回归最优设计^[8~12]。土壤经自然风干后捣碎、混匀、过 3mm 筛,每盆各加 1.3g 尿素、2.0g 过磷酸钙、

回归方程为:

$$\hat{y} = 3.55 - 4.19 x_3 - 0.24 x_4 + 1.51 x_3^2 + 0.02 x_4^2 + 0.15 x_3 x_4 \quad (2)$$

表 3 黑麦草地上部产量及 F 含量 *

Tab.3 Yield and fluorine content of rye grass overground

土 壤 Soil	项 目 Items	处 理 Treatments												
		CK												
黄 壤	鲜物质质量/ g·盆 ⁻¹	43.18	51.35	47.23	33.25	12.50	2.22	2.01	51.35	3.62	44.74	22.19	2.92	7.58
	干物质质量/ g·盆 ⁻¹	8.97	9.62	8.60	6.21	2.23	0.51	0.25	9.62	0.98	8.89	4.17	0.87	2.00
	F 含量/ mg·kg ⁻¹	11.40	12.52	10.40	15.61	9.28	8.70	8.97	12.52	8.60	11.60	10.91	10.27	12.52
石灰土	鲜物质质量/ g·盆 ⁻¹	38.63	33.53	37.55	8.76	39.16	18.40	11.53	33.53	14.89	31.16	21.66	16.16	20.79
	干物质质量/ g·盆 ⁻¹	8.08	6.73	7.34	1.36	6.78	3.25	1.93	6.73	2.68	6.43	4.50	2.93	3.98
	F 含量/ mg·kg ⁻¹	14.30	16.10	13.11	14.50	10.91	9.28	9.50	16.10	9.50	16.51	12.01	10.91	13.11

* 表中数据为 3 次重复平均值。

式中, x_3 为石灰, x_4 为粉煤灰。从回归方程(2)可知石灰和粉煤灰对黑麦草干物质质量均为负效应,石灰的作用强于粉煤灰,但交互效应为弱正效应,二者在试验条件下不利于植物产量的形成。方程(1)、(2)显著性检验见表 4。对石灰土、施入硅钙肥、风化煤后植物干物质质量回归方程为:

$$\hat{y} = 6.40 - 0.12 x_1 - 3.11 x_2 - 1.52 x_1^2 - 0.95 x_2^2 - 0.41 x_1 x_2 \quad (3)$$

由回归方程(3)可知硅钙肥和风化煤对黑麦草干物质质量均为负效应,且交互效应也为负效应,二者在试验条件下不利于植物产量的形成。对石灰土施入石灰、粉煤灰后植物干物质质量回归方程为:

$$\hat{y} = 4.25 - 1.89 x_3 + 0.06 x_4 + 0.32 x_3^2 + 0.21 x_4^2 + 0.23 x_3 x_4 \quad (4)$$

表 5 石灰土各处理植物干物质质量回归方程的 x^2 测验

Tab.5 x^2 checkout of regress equation of plant dry weight in calcareous soil

处 理 Treatments	硅钙肥、风化煤 Si-Ca fertilizer and saprolite of coal			处 理 Treatments	石灰、粉煤灰 Lime and coal fly ash		
	y	\hat{y}	$(y - \hat{y})^2 / \hat{y}$		y	\hat{y}	$(y - \hat{y})^2 / \hat{y}$
	6.73	6.75	0.000059		6.73	6.84	0.00177
	7.34	7.33	0.000014		2.68	2.60	0.00246
	1.36	1.35	0.000074		6.43	6.50	0.00075
	6.78	6.77	0.000004		4.50	4.50	0
	3.25	3.22	0.000218		2.93	2.83	0.00375
	1.91	1.89	0.000671		3.98	3.91	0.00108
合计			0.00104	合计			0.00982

* y 为实测值, \hat{y} 为回归值(即相应编码代入方程后所得数值)。

由回归方程(4)可知石灰对黑麦草干物质质量为负效应,粉煤灰为弱正效应,但交互效应为弱正效应,二者在试验条件下不利于植物产量的形成。方程(3)、(4)显著性检验见表 5。查 x^2 表, $f = k - 1 = 5$ 时,方程(1)、(2) x^2 分别为 0.00201 和 $0.00187 < x_{0.05}^2 = 11.7$, 方程(3)、(4) x^2 分别为 0.00104 和 $0.00982 < x_{0.05}^2 = 11.7$, 故其差异均不显著,即计算与实际相吻合。由此可见,黄壤和石灰土施用硅钙肥、风化煤

及石灰、粉煤灰对黑麦草干物质质量的影响几乎均为负效应,硅钙肥、风化煤交互作用为弱负效应,石灰、粉煤灰交互作用为弱正效应。黑麦草地上部鲜物质质量、干物质质量在各处理间变化大体一致,鲜物质质量、干物质质量在 2 种土壤间具有大致相同变化规律,且石灰土产草量变动较小,而黄壤各处理波动较大。石灰土处理黑麦草产量突增是其雨后猛长的结果,其鲜物质质量高达 39.16g/盆,为石灰土各处理最高,干物质质量也达 6.78g/盆,但由于其为最新长出,故水分含量较高。

表 6 黑麦草地上部 F 含量变化

Tab.6 Fluorine content of rye grass overground

处 理 Treatments	F 含量/ mg·kg ⁻¹ F content		处 理 Treatments	F 含量/ mg·kg ⁻¹ F content	
	黄壤 Yellow soil	石灰土 Calcareous soil		黄壤 Yellow soil	石灰土 Calcareous soil
CK	11.40	15.41	12.52	16.10	
	12.52	16.10	8.60	9.50	
	10.40	13.11	11.60	16.51	
	15.60	14.50	10.91	12.01	
	9.28	10.91	10.27	10.91	
	8.70	9.28	12.52	13.11	
	8.97	9.50			

2.2 各处理对黑麦草 F 含量的影响

表 6 表明黑麦草地上部 F 含量处理大于对照处理(CK)是加入 F 的结果。2 种土壤黑麦草 F 含量具有大体一致的变化规律,石灰土黑麦草各处理 F 含量大于黄壤的相应处理,这与石灰土 F 吸附能力较差及水溶性 F 含量较高有关。处理 ~ 中植株干物质质量与 F 含量呈相同变化趋势。大多数处理均使黑麦草 F 含量下降。对黄壤施入硅钙肥、风化煤后植物地上部 F 含量回归方程为:

$$\hat{y} = 8.97 - 2.28 x_1 + 0.32 x_2 + 2.18 x_1^2 + 0.64 x_2^2 - 1.18 x_1 x_2 \quad (5)$$

由回归方程(5)可知硅钙肥对 F 含量为负效应,利于降低黑麦草 F 含量,而风化煤则为弱正效应,二者呈负交互作用。对黄壤施入石灰、粉煤灰后植物地上部 F 含量回归方程为:

$$\hat{y} = 10.83 - 0.87 x_3 + 0.63 x_4 - 0.61 x_3^2 + 0.98 x_4^2 + 1.13 x_3 x_4 \quad (6)$$

由回归方程(6)可知石灰对 F 含量为负效应,利于降低黑麦草 F 含量,而粉煤灰则为正效应,二者呈正交互作用。回归方程(5)、(6)显著性检验见表 7。对石灰土施入硅钙肥、风化煤后植物地上部 F 含量回归方程为:

$$\hat{y} = 10.38 - 2.12 x_1 - 1.42 x_2 + 1.53 x_1^2 + 1.29 x_2^2 - 0.57 x_1 x_2 \quad (7)$$

由回归方程(7)可知硅钙肥、风化煤对 F 含量均为负效应,利于降低黑麦草 F 含量,二者呈负交互作用。对石灰土施入石灰、粉煤灰后植物地上部 F 含量回归方程为:

$$\hat{y} = 11.71 - 2.63 x_3 + 0.88 x_4 + 0.94 x_3^2 + 1.04 x_4^2 + 0.72 x_3 x_4 \quad (8)$$

表 8 石灰土各处理植物 F 含量回归方程的 x^2 测验Tab.8 x^2 checkout of regress equation of plant fluorine content in calcareous soil

处 理 Treatments	硅钙肥、风化煤			处 理 Treatments	石灰、粉煤灰		
	Si-Ca fertilizer and saprolite of coal y	\hat{y}	$(y - \hat{y})^2 / \hat{y}$		Lime and coal fly ash y	\hat{y}	$(y - \hat{y})^2 / \hat{y}$
	16.10	16.17	0.000303		16.10	16.16	0.000223
	13.11	13.07	0.000122		9.50	9.46	0.000169
	14.50	14.47	0.000062		16.51	16.48	0.000055
	10.91	10.88	0.000060		12.01	11.99	0.000045
	9.28	9.21	0.000600		10.91	10.81	0.000870
	9.50	9.43	0.000567		13.11	13.02	0.000584
合计			0.001715	合计			0.001945

由回归方程(8)可知石灰对 F 含量为负效应,利于降低黑麦草 F 含量,而粉煤灰则为正效应,二者呈正交互作用。回归方程(7)、(8)显著性检验见表 8。查 x^2 表, $f = k - 1 = 5$ 时,方程(5)、(6) x^2 分别为 0.001423 和 0.001374 < $x_{0.05}^2 = 11.7$, 方程(7)、(8) x^2 分别为 0.001715 和 0.001945 < $x_{0.05}^2 = 11.7$, 故差异均不显著,即计算与实际相吻合。由此可见硅钙肥、石灰对黑麦草 F 含量均为负效应,有利于降低其 F 含量,而粉煤灰均为正效应,风化煤在黄壤上表现为正效应,而在石灰土上则表现为负效应,此外硅钙肥和风化煤均为负交互作用,而石灰、粉煤灰均为正交互作用。

3 小结与讨论

F 对黑麦草发芽有抑制作用,干旱情况下植物易受 F 中毒。黑麦草地上部鲜物质质量、干物质质量及 F 含量在黄壤和石灰土 2 种土壤间呈相同变化趋势,其中干物质质量和 F 含量相同变化趋势在石灰土上表现更明显。黄壤及石灰土硅钙肥、风化煤和石灰、粉煤灰对黑麦草干物质质量的影响大多为负效应,硅钙肥、风化煤交互作用为弱负效应,石灰、粉煤灰交互作用为弱正效应,表明 4 种物质不利于黑麦草干物质质量的积累。2 种土壤硅钙肥、石灰对黑麦草 F 含量均为负效应,有利于降低其 F 含量,粉煤灰对植物 F 含量均为正效应,风化煤在黄壤上表现为正效应,而在石灰土上则表现为负效应,硅钙肥和风化煤配施 2 种土壤均为负交互作用,而石灰和粉煤灰均为弱正交互效应。该结果与室内模拟 F 污染培养后测定的水溶性 F 含量试验结果在交互效应方面基本一致,在单独效应方面存在差异^[13],这可能与作物的加入及实际栽培条件(浇水、渗漏等)不一致有关,也可能与水溶性 F 测定条件有一定关系。总之,对黄壤和石灰土而言,石灰和粉煤灰配施可一定程度增加黑麦草地上部产量,硅钙肥、石灰单独施用及硅钙肥和风化煤配施均能起到降低黑麦草地上部 F 含量的效果,而风化煤单独施用只在石灰土上能降低黑麦草地上部 F 含量。

参 考 文 献

- 1 陈国阶,余大富.环境中的氟.北京:科学出版社,1990.75~80
- 2 王云,魏复盛等.土壤环境元素化学.北京:中国环境科学出版社,1995.129~141
- 3 中国土壤学会.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科技出版社,2000
- 4 南京农业大学.土壤农化分析.北京:中国农业出版社,1994.33~36
- 5 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1978.500~508
- 6 中国科学院南京土壤研究所微量元素组.土壤和植物中微量元素分析方法.北京:科学出版社,1979.265~266
- 7 丁希泉.农业应用回归设计.长春:吉林科学技术出版社,1986.188~213
- 8 杨良金,唐宗阳,韦德海等.水稻施用硅钙肥的增产效果.土壤,2001,33(3):166~168
- 9 贺贡源,江世文.小麦施用硅钙肥效应的研究.土壤肥料,1999(3):8~11
- 10 李贵宝,焦有,郭井水.粉煤灰农业利用展望.粉煤灰综合利用,1999(3):48~52
- 11 李贵宝,单保庆,孙克刚等.粉煤灰农业利用研究进展.磷肥与复肥,2000,15(6):59~60
- 12 吴家华,刘宝山,董云中等.粉煤灰改土效应研究.土壤学报,1995,32(3):333~340
- 13 黎成厚,万红友,师会勤等.土壤水溶性氟含量及其影响因素.山地农业生物学报,2003,22(2):99~104