

# 土壤有机硫矿化动力学特征及影响因素

李书田 林葆 周卫

(中国农业科学院土壤肥料研究所, 北京 100081)

**摘要** 利用开放培养系统, 分别在 20℃ 和 30℃, 好气和淹水条件下研究了四种土壤(黑土、褐土、黄棕壤和红壤)有机硫矿化特征。结果表明, 30℃ 条件下土壤有机硫累积矿化量显著高于 20℃ 下的矿化量 ( $P < 0.01$ )。20℃ 和 30℃ 好气条件下累积矿化量分别为 17.53~24.35 mg kg<sup>-1</sup> 和 34.20~54.33 mg kg<sup>-1</sup>, 分别占有有机硫总量的 2.5%~6.5% 和 5.0%~14.5%。20℃ 和 30℃ 淹水条件下累积矿化量分别为 18.14~21.15 mg kg<sup>-1</sup> 和 26.86~30.63 mg kg<sup>-1</sup>, 分别占有有机硫总量的 2.6%~5.6% 和 4.0%~7.7%。好气和淹水下 30℃ 与 20℃ 的有机硫累积矿化量之比分别为 1.85~2.23 和 1.28~1.71。用一级动力学方程和双倒数方程计算土壤有机硫矿化势 ( $S_0$ ) 表明, 20℃ 好气培养时  $S_0$  分别为 17.82~24.88 mg kg<sup>-1</sup> 和 17.83~27.7 mg kg<sup>-1</sup>, 30℃ 好气培养时  $S_0$  分别为 35.81~61.28 mg kg<sup>-1</sup> 和 41.49~80.00 mg kg<sup>-1</sup>。20℃ 淹水条件下  $S_0$  分别为 17.50~21.49 mg kg<sup>-1</sup> 和 19.19~22.50 mg kg<sup>-1</sup>, 30℃ 淹水条件下  $S_0$  分别为 28.26~35.87 mg kg<sup>-1</sup> 和 26.59~34.25 mg kg<sup>-1</sup>。土壤有机硫矿化速率常数 ( $K$ ) 和矿化量达 50% 矿化势 ( $S_0$ ) 所需的时间 ( $K_1$ ) 受不同土壤和培养温度的影响, 都可用一级动力学方程和双倒数方程来评价。碳键硫对有机硫矿化的贡献较大, 尤其在淹水条件下更明显。

**关键词** 土壤, 有机硫, 矿化动力学, 影响因素

**中图分类号** S153.6

一般耕层土壤中的硫, 90% 以上是有机硫<sup>[1,2]</sup>。有机硫转化为无机硫后才能被作物回收利用。因此, 了解土壤有机硫的矿化速率和特征, 对预测土壤的供硫潜力是至关重要的。好气培养条件下土壤有机硫矿化研究已有较多报道<sup>[3-7]</sup>, 而淹水条件下土壤有机硫矿化规律则知之甚少。本研究利用类似 Tabatabai<sup>[4]</sup> 所用的开放系统研究中国几种代表性土壤在好气和淹水条件下有机硫矿化规律及影响因素以及各有机硫组分矿化供硫能力。研究结果将为评价中国典型土壤供硫能力提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

本研究采集四种(黑土、褐土、黄棕壤和红壤)耕层(0~20 cm)土壤。土壤样品风干后过 2 mm 筛, 供矿化试验用。另取部分土壤分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛, 用于测定土壤理化性状。土壤理化性质见表 1。

表1 供试土壤理化性状

Table 1 Properties of soils tested

土壤 Soil	质地 Texture	有机碳 Organic C (g kg <sup>-1</sup> )	全硫 Total S	无机硫 MCP-S mg kg <sup>-1</sup>	有机硫 Organic S	pH
黑土	壤土	15.31	733	21.19	711.81	6.6
褐土	壤土	9.69	425	24.92	400.08	8.2
黄棕壤	壤质砂土	12.30	401	25.15	375.85	5.7
红壤	粘土	10.90	741	29.74	711.26	4.7

## 1.2 矿化试验

称取 20 g 风干土 (2 mm) 和等量的玻璃珠 (1~2 mm) 充分混合, 放入底部垫有与管内径相同的 350 目的尼龙纱布和 2 cm 厚的无硫石英砂 (1 mm) 的淋滤管中 (直径 3 cm, 长 15 cm)。在土壤和玻璃珠混合物的上部装 2 cm 厚的玻璃球 (1~2 mm)。首先用真空泵在 60 cm Hg 抽滤下用 100 ml 0.01 mol L<sup>-1</sup> KCl 溶液分次淋洗土壤中的无机硫酸盐, 每次用 4~5 ml, 然后再用 50 ml 0.01 mol L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液淋洗, 去掉土壤中吸附态的硫酸盐。在一组淋滤管中加 0.01 mol L<sup>-1</sup> KCl 溶液, 使水层达 2~3 cm 模拟淹水条件。另一组不加 0.01 mol L<sup>-1</sup> KCl 模拟好气条件。用带孔的橡皮塞塞紧淋滤管。分别放在 20℃ 和 30℃ 的恒温培养箱中培养。每个处理设三次重复。在培养后 2、4、8、12、16、20、24 周和 28 周时, 好气培养试验和淹水培养试验分别用 100 ml 和 80 ml 0.01 mol L<sup>-1</sup> KCl 淋洗液分次 (每次加 4~5 ml 淋洗液) 在 60 cm Hg 负压下抽滤, 淋洗矿化出的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。滤液放入 100 ml 的容量瓶中, 定容后过滤, 用 ICP-AES 法测定淋洗液中的硫酸盐含量。在 28 周时, 除用 0.01 mol L<sup>-1</sup> KCl 淋洗外, 再用 50 ml 0.01 mol L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 淋洗吸附态的硫酸盐, 按每次矿化量占总矿化量的比例分配到各次的矿化量中。矿化 28 周结束后, 把土壤取出, 风干, 去掉玻璃球, 过 0.25 mm 筛, 用于测定土壤中的有机硫组分。

## 1.3 土壤硫分析方法

土壤无机硫用 0.01 mol L<sup>-1</sup> Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 提取, 比浊法测定 (MCP-S)<sup>[8]</sup>。土壤全硫用 3:3:7 的 HClO<sub>4</sub>: HNO<sub>3</sub>: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 消化, 比浊法测定<sup>[9]</sup>。氢碘酸还原硫 (HI-S) 用 Johnson and Nishita 的方法测定<sup>[10]</sup>。酯键硫 (C—O—S) 由 HI-S 减去 MCP-S 而获得<sup>[9]</sup>。碳键硫 (C—S) 即 Ni-Al (Raney-Nickle) 还原硫, 用 Freney 方法测定<sup>[11]</sup>。未知态有机硫 (UO-S) 用全硫减去 HI-S 和 C—S 获得。

## 1.4 土壤有机硫矿化潜力估算

土壤有机硫矿化势 ( $S_0$ ) 是评价土壤有机硫矿化潜力常用指标。本研究采用一级动力学方程和双倒数方程来估算  $S_0$ <sup>[5]</sup>。一级动力学方程:  $S_m = S_0[1 - \text{EXP}(-Kt)]$ , 其中:  $S_m$  为某一特定时间硫累积矿化量 (mg kg<sup>-1</sup>),  $K$  为一级动力学常数,  $t$  为矿化时间 (周)。双倒数方程:  $1/S_t = 1/S_0 + K_t/S_0 \cdot 1/t$  其中:  $S_t$  为某一时间硫累积矿化量 (mg kg<sup>-1</sup>),  $K_t$  是常数, 是矿化量为 50% 的矿化势 ( $S_0$ ) 时所需时间 (周)。

# 2 结果与分析

## 2.1 土壤有机硫的矿化量

连续淋洗 28 周后有机硫矿化量及有机硫矿化量占土壤有机硫总量的比例列于表 2 和

表2 好气条件下培养28周土壤有机硫累积矿化量

Table 2 Cumulative S mineralized in soils incubated in an aerobic condition for 28 weeks

土壤 Soil	矿化量 S mineralized		占有机硫的比例 Percentage of S mineralized in total organic S		比值 <sup>1)</sup> Ratio
	20℃	30℃	20℃	30℃	
	mg kg <sup>-1</sup> soil		%		
黑土	19.34e	35.54Bc	2.7	5.0	1.85
褐土	17.80e	34.20c	4.4	8.5	1.93
黄棕壤	24.35D	54.33A	6.5	14.5	2.23
红壤	17.53e	39.10B	2.5	5.5	2.20
F显著性检验					
	土壤	温度	土壤×温度		
	**	**	**		

\*\* 1%显著性水平 ( $P < 0.01$ )。用新复极差 (SSR) 法进行检验, 数字后大、小写字母分别表示  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  的显著性差异。

1) 30℃下有机硫矿化量与20℃下有机硫矿化量之比

表3 淹水条件下培养28周土壤有机硫累积矿化量

Table 3 Cumulative S mineralized in soils incubated in a waterlogging condition for 28 weeks

土壤 Soil	矿化量 S mineralized		占有机硫的比例 Percentage of S mineralized in total organic S		比值 <sup>1)</sup> Ratio
	20℃	30℃	20℃	30℃	
	mg kg <sup>-1</sup>		%		
黑土	20.98C	29.14ab	2.9	4.1	1.41
褐土	18.14C	30.63a	4.5	7.7	1.71
黄棕壤	21.15C	26.86b	5.6	7.2	1.28
红壤	18.55C	28.25ab	2.6	4.0	1.54
F显著性检验					
	土壤	温度	土壤×温度		
	NS	**	NS		

\*\* 1%显著性水平 ( $P < 0.01$ ), NS: No significant, 用新复极差 (SSR) 法进行检验, 数字后大、小写字母分别表示  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  的显著性差异。

1) 30℃下有机硫矿化量与20℃下有机硫矿化量之比

表3, 并计算了30℃与20℃下有机硫矿化量之比。结果表明, 20℃和30℃好气培养28周有机硫的矿化量分别为17.53~24.35 mg kg<sup>-1</sup>和34.20~54.33 mg kg<sup>-1</sup>, 分别占土壤有机硫总量的2.5%~6.5%和5.0%~14.5%。20℃和30℃淹水培养28周有机硫的矿化量分别为18.14~21.15 mg kg<sup>-1</sup>和26.86~30.63 mg kg<sup>-1</sup>, 分别占有机硫总量的2.6%~5.6%和4.0%~7.7%。好气培养条件下, 黄棕壤的矿化量显著高于其他土壤 ( $P < 0.01$ )。可能是这种土壤为砂性土, 通气良好, 有利于微生物活动和有机硫矿化。为了确定温度对有机硫矿

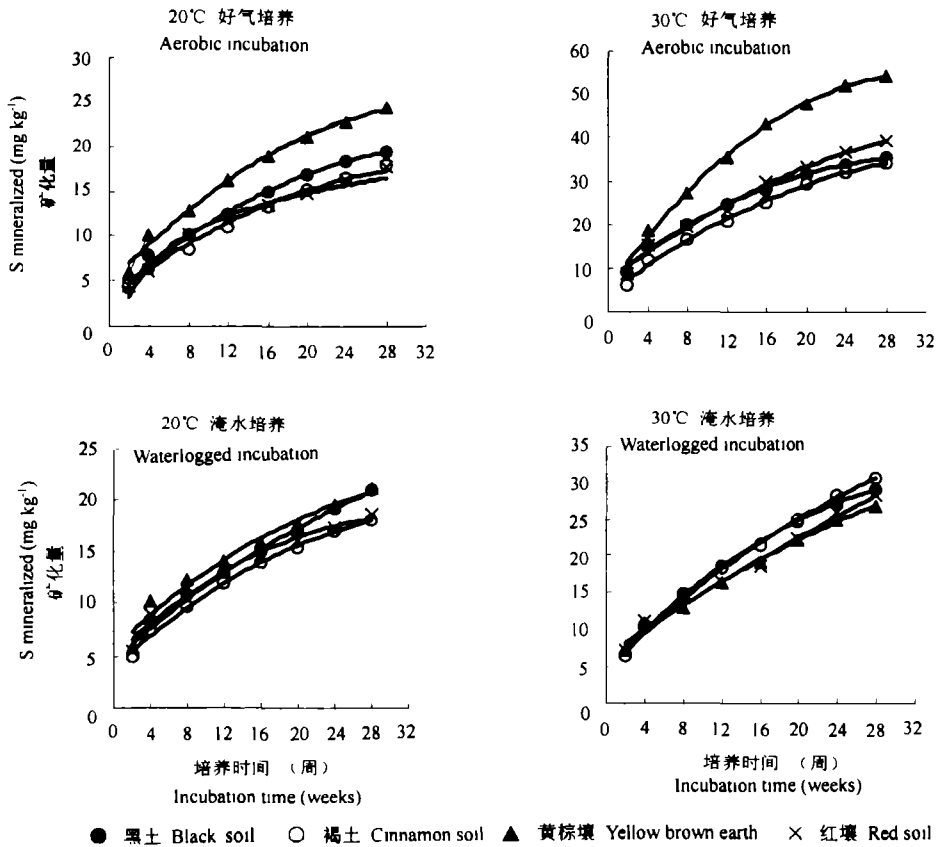


图1 土壤有机硫累积矿化量与培养时间的关系

Fig.1 Relationship between cumulative S mineralized in soils and incubation time

化的影响,我们计算了 30°C 和 20°C 下有机硫累积矿化量之比,结果表明,30°C 好气培养条件下的累积矿化量显著高于 20°C 下的矿化量 ( $P < 0.01$ ),是 20°C 下的 1.85~2.23 倍。淹水条件下培养 28 周的有机硫累积矿化量低于好气条件,而且随温度的升高,矿化量的增加也没有好气条件下的明显。30°C 淹水培养条件下的累积矿化量显著高于 20°C 下的矿化量 ( $P < 0.01$ ),是 20°C 下的 1.28~1.71 倍。

从以上分析可知,温度是影响有机硫矿化的主要因素。好气培养条件下不同土壤对有机硫矿化也具有显著影响,而且也受土壤和温度交互作用的显著影响。

从 30°C 好气和淹水培养矿化 28 周后土壤有机硫各组分的矿化量和比例来看(表 4),酯键硫(C-O-S)、碳键硫(C-S)和未知态有机硫(UO-S)都不同程度地矿化。好气条件下 C-O-S 的矿化量、占该组分的比例和占有有机硫矿化总量的比例高于淹水条件下。而 C-S 的矿化量和比例则淹水条件下大于好气条件下。有研究指出,虽然有机硫矿化与土壤中某些特定的化合物有关,尤其是酯键硫部分更活跃<sup>[12]</sup>。但碳键硫易转化为酯键硫而后被矿化<sup>[13]</sup>。未知态有机硫在好气条件下的矿化量和比例大于淹水条件下。虽然未知态有机硫的矿化量占该组分的比例较小,但占有有机硫矿化量的比例却不容忽视。

表4 30℃好气和淹水条件下培养矿化28周后土壤有机硫各组分的矿化量(%)  
和占相应各组分以及总矿化量的比例(S mg kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Amount of S mineralized in different organic S fractions (S mg kg<sup>-1</sup>), and its percentages of relevant fractions and of the total amount of S mineralized (%) after 28 weeks incubation in the aerobic and waterlogging conditions at 30℃

		黑土		褐土		黄棕壤		红壤	
		Black soil		Cinnamon soil		Yellow brown earth		Red soil	
		好气	淹水	好气	淹水	好气	淹水	好气	淹水
酯硫键	培养前含量	126.48	126.48	104.75	104.75	90.45	90.45	136.79	136.79
	矿化量	9.65	3.20	7.18	5.85	30.72	5.67	18.17	6.50
	占酯键硫比例	7.63	2.53	6.85	5.58	33.96	6.27	13.49	4.75
	占矿化总量比例	27.20	10.98	20.99	19.10	56.54	21.11	46.47	23.01
碳硫键	培养前含量	107.40	107.40	91.13	91.13	114.30	114.30	96.27	96.27
	矿化量	14.67	22.17	17.83	20.26	13.29	16.30	16.22	18.97
	占碳键硫比例	13.66	20.64	19.57	22.23	11.63	14.26	16.85	19.52
	占矿化总量比例	41.28	76.08	52.13	66.14	24.46	60.69	41.48	67.15
未知态 有机硫	培养前含量	477.93	477.93	204.20	204.20	171.10	171.10	478.20	478.20
	矿化量	11.86	3.27	9.78	5.89	11.23	2.65	6.34	4.23
	占未知态硫比例	2.48	0.68	4.79	2.88	6.6	1.55	1.33	0.88
	占矿化总量比例	33.37	11.22	28.60	19.23	20.67	9.87	16.21	14.97

## 2.2 土壤有机硫的矿化势( $S_0$ )和矿化速率

用一级动力学方程和双倒数方程分别计算 20℃ 和 30℃ 好气和淹水条件下土壤有机硫矿化势( $S_0$ )和矿化速率常数( $K$ 和 $K_1$ ) (表5和表6)。30℃ 下有机硫矿化势高于 20℃ 下有机硫矿化势。20℃ 好气和淹水条件下的矿化潜力相当, 而 30℃ 好气培养下有机硫的矿化潜力大于淹水状态。不同土壤有机硫的矿化潜力有一定的差异, 这种差异在温度较高时更明显。30℃ 好气培养下有机硫的矿化势用一级动力学方程和双倒数方程计算分别为 35.81~61.28 mg kg<sup>-1</sup> 和 41.49~80.0 mg kg<sup>-1</sup>, 分别占有有机硫总量的 5.0%~16.3% 和 5.8%~21.3%, 以黄棕壤最高, 黑土最低; 30℃ 淹水培养下有机硫的矿化势用一级动力学方程和双倒数方程计算分别为 28.26~35.87 mg kg<sup>-1</sup> 和 26.59~34.25 mg kg<sup>-1</sup>, 分别占土壤有机硫总量的 4.2%~9.0% 和 3.9%~8.6%。20℃ 好气和淹水条件下有机硫矿化势低于 30℃ 的情况。20℃ 好气培养下有机硫的矿化势用一级动力学方程和双倒数方程计算分别为 17.82~24.88 mg kg<sup>-1</sup> 和 17.83~27.70 mg kg<sup>-1</sup>; 20℃ 淹水培养下有机硫的矿化势用一级动力学方程和双倒数方程计算分别为 17.50~21.49 mg kg<sup>-1</sup> 和 19.19~22.50 mg kg<sup>-1</sup>。一级动力学常数  $K$  也受不同土壤和温度变化的影响, 但很难定量地描述温度对有机硫矿化势( $S_0$ )和一级速率常数的影响, 因为一级动力学指数方程中不包含温度这一参数。根据一级动力学方程可计算有机硫的矿化量为 50% 的  $S_0$  时所需的时间( $K_1$ ), 还可用双倒数方程来求出。矿化 50% 的  $S_0$  时所需的时间不同土壤差异很大, 并受温度的影响。用一级动力学方程计算, 好气培养条件下, 20℃ 和 30℃ 时的  $K_1$  分别为 7.1~9.1 周和 6.4~9.9 周;

表5 好气培养28周土壤有机硫矿化势( $S_0$ )和矿化速率常数( $K$ 和 $K_t$ )Table 5 Potentially mineralizable S pool ( $S_0$ ) and S mineralization rate constants ( $K$  and  $K_t$ ) in soils incubated in the aerobic condition for 28 weeks

土壤 Soil	培养温度 Incubation temperature						$K_t^{(2)}$ (Week)	
	20℃			30℃			20℃	30℃
	$S_0$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$K$ Week <sup>-1</sup>	$R^2$	$S_0$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$K$ Week <sup>-1</sup>	$R^2$		
黑土	20.45 <sup>1)</sup> (24.21)	0.088	0.9721 <sup>**</sup> (0.9904 <sup>**</sup> )	35.81 (41.49)	0.109	0.9724 <sup>**</sup> (0.9938 <sup>**</sup> )	7.9 (9.4)	6.4 (7.2)
褐土	19.40 (17.83)	0.076	0.9595 <sup>**</sup> (0.9547 <sup>**</sup> )	38.97 (46.73)	0.070	0.9868 <sup>**</sup> (0.9954 <sup>**</sup> )	9.1 (6.2)	9.9 (12.9)
黄棕壤	24.88 (27.70)	0.098	0.9648 <sup>**</sup> (0.9889 <sup>**</sup> )	61.28 (80.00)	0.076	0.9937 <sup>**</sup> (0.9968 <sup>**</sup> )	7.1 (7.3)	9.1 (14.0)
红壤	17.82 (19.27)	0.096	0.9862 <sup>**</sup> (0.9751 <sup>**</sup> )	42.39 (44.64)	0.080	0.9630 <sup>**</sup> (0.9855 <sup>**</sup> )	7.2 (7.2)	8.7 (8.3)

1) 有机硫矿化势( $S_0$ )由一级动力学指数方程计算而得, 括号内数字是用双倒数方程求得;  $K$ 是一级速率常数

2) 有机硫矿化量达矿化势( $S_0$ )的50%时所需的时间(周), 由一级动力学指数方程计算而得, 括号内数字是用双倒数方程求得

\*\* 1%的显著水平( $P < 0.01$ )

表6 淹水培养28周土壤有机硫矿化势( $S_0$ )和矿化速率常数( $K$ 和 $K_t$ )Table 6 Potentially mineralizable S pool ( $S_0$ ) and S mineralization rate constants ( $K$  and  $K_t$ ) in soils incubated in the waterlogging condition for 28 weeks

土壤 Soil	培养温度 Incubation temperature						$K_t^{(2)}$ (Week)	
	20℃			30℃			20℃	30℃
	$S_0$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$K$ Week <sup>-1</sup>	$R^2$	$S_0$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$K$ Week <sup>-1</sup>	$R^2$		
黑土	21.49 <sup>1)</sup> (21.88)	0.088	0.9411 <sup>**</sup> (0.9834 <sup>**</sup> )	31.45 (33.00)	0.081	0.9750 <sup>**</sup> (0.9893 <sup>**</sup> )	7.9 (6.5)	8.6 (8.1)
褐土	18.39 (19.19)	0.099	0.9527 <sup>**</sup> (0.9818 <sup>**</sup> )	35.87 (34.25)	0.063	0.9727 <sup>**</sup> (0.9846 <sup>**</sup> )	7.0 (6.1)	11.0 (9.0)
黄棕壤	19.19 (22.50)	0.127	0.9127 <sup>**</sup> (0.9812 <sup>**</sup> )	28.26 (26.59)	0.082	0.9271 <sup>**</sup> (0.9622 <sup>**</sup> )	5.5 (5.5)	8.5 (5.7)
红壤	17.50 (19.92)	0.140	0.9355 <sup>**</sup> (0.9908 <sup>**</sup> )	29.83 (27.62)	0.077	0.9090 <sup>**</sup> (0.9694 <sup>**</sup> )	4.9 (5.2)	9.0 (5.9)

1) 有机硫矿化势( $S_0$ )由一级动力学指数方程计算而得, 括号内数字是用双倒数方程求得;  $K$ 是一级速率常数

2) 有机硫矿化量达矿化势( $S_0$ )的50%时所需的时间(周), 由一级动力学指数方程计算而得, 括号内数字是用双倒数方程求得

\*\* 1%的显著水平( $P < 0.01$ )

淹水条件下, 20℃和30℃时的 $K_t$ 分别为5.5~7.9周和8.5~11.0周。用双倒数方程计算, 20℃和30℃好气条件下的 $K_t$ 分别为6.2~9.4周和7.2~14.0周; 淹水条件下 $K_t$ 分别为5.2~6.5周和5.7~9.0周。用一级动力学指数方程和用双倒数方程计算的土壤有机硫矿化势( $S_0$ )和矿化50%的 $S_0$ 所需的时间( $K_t$ )有一定的差异。这种差异主要是很长(28周)的培

养矿化条件下土壤有机硫矿化量与矿化时间的关系不是完全的直线关系,但用这两种方程进行计算,相关系数都达显著水平( $P < 0.01$ ),都可用于评价土壤有机硫的矿化潜力和矿化速率。

### 3 讨 论

进行有机硫矿化研究多采用间隔 2 周淋洗一次<sup>[6]</sup>。本试验采用前 2 次间隔 2 周淋洗一次,而后每隔 4 周淋洗一次。本研究发现,为了更准确地反应有机硫的矿化,建议以后研究时采用前 4 周每一周淋洗一次,因为前 4 周的矿化量占 28 周矿化总量的 30% 或更多。

以前利用开放系统对好气条件下有机硫矿化的研究很多。Pirela 研究依阿华的土壤有机硫矿化表明,20℃ 和 30℃ 下开放培养土壤有机硫累积矿化量与时间呈直线关系,14 周矿化量分别占有有机硫总量的 1.2%~9.8% 和 2.4%~17.5%, $Q_{10}$  为 1.7~4.4,平均 2.5,有机硫矿化势为  $S_0$  5~44 mg kg<sup>-1</sup><sup>[5]</sup>。Tabatabai 培养研究依阿华土壤有机硫矿化表明,20℃ 和 30℃ 下开放培养土壤有机硫累积矿化量与时间也呈直线关系,26 周矿化量分别占有有机硫总量的 3.5%~13.3% 和 8.9%~34.9%, $Q_{10}$  值为 1.9<sup>[4]</sup>。胡正义在 30℃ 下好气开放培养研究南方部分土壤有机硫矿化,累积矿化量与时间呈曲线关系,26 周的有机硫矿化量占土壤有机硫总量的 6.73%~19.8%<sup>[7]</sup>。本试验是利用开放系统,在 20℃ 和 30℃ 好气和淹水培养条件下研究土壤有机硫的矿化。好气条件下的矿化量、矿化势和占有有机硫矿化总量的比例大于淹水条件下。这可能是因为淹水条件下土壤微生物活性较低的缘故。温度对好气条件下的影响大于淹水条件下。好气和淹水条件下土壤有机硫各组分的矿化量和比例不同,碳键硫对土壤有机硫的贡献很大。这说明碳键硫在土壤供硫能力上起着重要作用,它可以通过转化为酯键硫而后被矿化<sup>[13]</sup>。然而,在种植作物的条件下土壤有机硫在淹水条件的矿化及有效性是否与开放培养系统一致,有待进一步研究。许多试验表明,有机硫矿化量与土壤全碳和全硫含量没有关系<sup>[4,5,14]</sup>。从本试验可知,虽然黑土有机硫含量较高,但好气培养条件下的矿化量和矿化速率低于有机硫含量低的黄棕壤,而淹水条件下则差异不大。这种差异与土壤机械组成、pH 以及微生物活性的关系值得研究。

用一级动力学方程和双倒数方程评价土壤有机硫矿化潜力时,土壤有机硫累积矿化量和培养时间的关系都达显著水平( $P < 0.01$ ),都可用于计算土壤有机硫矿化势( $S_0$ )和矿化速率常数( $K_1$ )值,但也有一定差异。这主要取决于矿化量和培养时间的关系。温度较低的情况下(20℃),用两种方程计算得出的  $S_0$  和  $K_1$  值差异相对较小,而温度较高时(30℃)则差异相对较大。

### 参 考 文 献

1. Freney J R. Forms reactions of organic sulfur compounds in soils. In: M A Tabatabai ed. Sulfur in Agriculture. Agronomy Series, No. 27. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. 1986. 207~232
2. Tabatabai M A. Sulfur. In Page A L, Keeney D R, Miller R H. eds. Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties. 2nd Ed. Agronomy Series Number 9. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America Publ. Madison, Wisconsin, USA, 1982. 501~538

3. Maynard D G, Stewart J W B, Bettany J R. Sulfur and nitrogen mineralization in soils compared using two incubation techniques. *Soil Biol. Biochem.*, 1983, 15:251~256
4. Tabatabai M A, Al-Khafaji A A. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44:1000~1006
5. Pirela H J, Tabatabai M A. Sulphur mineralization and potential of soils. *Biol. Fert. Soils*, 1988, 6:26~32
6. Ghan A, McLaren R G, Swift R S. Sulphur mineralization in some New Zealand soils. *Biol. Fert. Soils*, 1991, 11:68~71
7. 胡正义等. 中国南方地区典型土壤有机硫矿化速率及供硫潜力研究. 中国农业中的硫第四次国际研讨会论文集. 合肥, 安徽, 1998
8. Lisle L, Lefroy R, Anderson G, Blair G. Methods for the measurement of sulphur in plants and soil. *Plant and Soil*, 1994, 164:243~250
9. Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of Soil Analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties.* 2nd ed. 1982. 506~509
10. Johnson C M, Nishita H. Microestimation of sulfur in plant materials, soils and irrigation waters. *Anal. Chem.*, 1952, 24:736~742
11. Freney J R, Melville G E, Williams G H. The determination of carbon bonded sulfur in soil. *Soil Sci.*, 1970, 109(5):310~318
12. Bettany J R, Stewart J W B, Halstead E H. Assessment of available soil sulphur in a  $^{35}\text{S}$  growth chamber experiment. *Can. J. Soil Sci.*, 1974, 54:309~315
13. McLaren R G, Swift R S. Changes in soil organic sulphur fractions due to the long term cultivation of soil. *J. Soil Sci.*, 1977, 28:445~453
14. Swift R S. Mineralization and immobilization of sulphur in soil. *Sulphur in Agriculture*, 1985, 9:1~5

## DYNAMICS OF SOIL ORGANIC SULFUR MINERALIZATION AND AFFECTING FACTORS

Li Shu-tian Lin Bao Zhou Wei

(*Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081*)

### Summary

Mineralization of organic sulfur in four soils (Black soil, Cinnamon soil, Yellow brown earth and Red soil) was studied by means of an open-incubation system at 20°C and 30°C in aerobic and waterlogging conditions, separately. Results showed that the amount of S mineralized at 30°C was significantly greater than at 20°C ( $P < 0.01$ ), and also greater amounts of S were mineralized in the aerobic condition than in the waterlogging condition in black soil, cinnamon soil, yellow brown earth and red soil. Cumulative amount of S mineralized and the percentage as soil organic S of the four soils incubated in the aerobic condition at 20°C and 30°C was 17.53~24.35mg kg<sup>-1</sup> and 34.20~54.33mg kg<sup>-1</sup>, 2.5%~6.5% and 5.0%~14.5%, respectively, and in the waterlogging condition at 20°C and 30°C 18.14~21.15 mg kg<sup>-1</sup> and 26.86~30.63 mg kg<sup>-1</sup>,



2.6%~5.6% and 4.0%~7.7%, respectively. The ratio of the amount of S mineralized at 30°C to that at 20°C was 1.85~2.23 and from 1.28~1.71 in aerobic and waterlogging condition, respectively. The potentially mineralizable S pool ( $S_0$ ) calculated by the exponential equation and the reciprocal equation at 20°C and 30°C in the aerobic condition was 17.82~24.88 mg kg<sup>-1</sup>, 17.83~27.70 mg kg<sup>-1</sup> and 35.81~61.28 mg kg<sup>-1</sup>, 41.49~80.00 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. The potentially mineralizable S pool ( $S_0$ ) calculated by the exponential equation and the reciprocal equation at 20°C and 30°C in the waterlogging condition was 17.50~21.49 mg kg<sup>-1</sup>, 19.19~22.50 mg kg<sup>-1</sup> and 28.26~35.87 mg kg<sup>-1</sup>, 26.59~34.25 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. The organic S mineralization rate constant ( $K$ ) and the time required to mineralize 50% of  $S_0$  ( $K_i$ ) varied with soil and incubation temperature. Both the exponential equation and reciprocal equation can be used to calculate organic S mineralization potentials and rate constants. Ester sulfate (C-O-S), carbon-bonded S(C-S) and unidentified organic S(UO-S) were all mineralized during the incubation period.

**Key words** Soil, Organic sulfur, Mineralization dynamics, Affecting factor