

东北黑土有机硫矿化动力学特征及其影响因素*

迟凤琴¹ 张玉龙² 汪景宽² 魏丹¹ 周宝库¹ 张喜林¹

(1 黑龙江省农业科学院土壤肥料研究所, 黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 哈尔滨 150086)

(2 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161)

摘要 利用开放培养系统分别在 20 和 30 条件下, 研究了不同地区(北安、海伦、公主岭)黑土和黑土在不同施肥条件下有机硫的矿化特征。结果表明: 在好气培养条件下, 黑土有机硫累积矿化量随培养时间的增加不断增加, 两者之间的数量关系遵从一级动力学模式, 前 4 周的矿化量占 14 周矿化总量的 50% ~ 62%。公主岭黑土有机硫的供硫潜力最大, 且矿化速率快, 供硫强度较北安、海伦高。温度越高土壤有机硫矿化势值越大, 矿化化学反应速率常数也越大, 半衰期越短。长期肥料定位试验地土壤有机硫的矿化势依次为施用有机肥(M) > 有机肥 + NPK(MNPK) > NPK(NPK) > 未施肥(CK), 表明施用有机肥可提高土壤供硫潜力。可见, 施用有机肥对维持黑土有机硫肥力具有重要作用。

关键词 黑土; 有机硫; 矿化动力学; 影响因素

中图分类号 S153 **文献标识码** A

土壤有机硫是植物吸收硫的重要来源, 有机硫必须矿化为硫酸根作物才能吸收^[1]。试验表明, 植物所吸收的硫 45% 以上来源于土壤有机硫, 土壤有机硫对土壤有效硫状况影响很大^[2,3]。有机硫是土壤中硫的主要组分, 其生物有效性与土壤生物和生物化学转化过程有密切关系, 这些转化过程进行的速度和方向受土壤环境条件的影响, 它在一定时间内的矿化量取决于土壤的理化性质如温度、湿度、pH、养分状况、有机硫结构, 也取决于有机无机物质的加入和植物生长等因素的影响^[3~6]。黑土是我国东北地区分布面积较大的土类, 也是世界上重要的土壤类型, 以前的研究偏重于氮磷钾, 忽略了硫的研究^[7]。近年来黑土中有效硫的研究较多^[8], 黑土全硫和有效硫含量高于其他土壤硫的丰缺标准, 但施用硫肥效果明显, 黑土施硫增产潜力较大^[9]。然而对于不同地区黑土和长期施肥对黑土有机硫矿化的影响目前还未见报道。因此, 阐明黑土有机硫矿化特征、了解黑土中有机硫的矿化特征对于预测黑土供硫潜力和硫在土壤中的转化与循环过程具有重要意义, 并可为黑土合理施用硫肥提供依据。

市、海伦市和吉林省公主岭市。采集 0~20 cm 耕层土壤(采样地点见图 1)。土壤的基本理化性状见表 1。



图 1 供试土壤样品采集地点示意图

Fig. 1 A sketch map of the sampling area of black soil

从黑龙江省农业科学院黑土长期定位试验田采集 4 个不同施肥处理: 不施肥(CK)、施有机肥(M)、化肥(NPK)和有机肥与化肥配合(MNPK)的耕层土壤样品, 此长期试验地点设在哈尔滨市。试验始于 1979 年, 大豆、玉米和小麦每三年轮作一次, 秋翻地, 秋施肥。有机肥每个轮作周期施一次。土壤的基本理化性状见表 2, 各处理肥料用量见表 3。

1 材料与方法

1.1 样品采集

供试土壤分别采自典型黑土区黑龙江省北安

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011810)和国家科技支撑计划项目(2006BAD05B05)资助

作者简介: 迟凤琴(1963~), 女, 博士, 研究员, 主要从事土壤肥力方面的研究。E-mail: fqchi@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-10-14; 收到修改稿日期: 2007-05-29

表 1 不同地区黑土的基本理化性状

Table 1 Basic properties of black soils in different areas

地区 Areas	土层 Depth (cm)	样本数 Sample No.	有机质 OM (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	全硫 Total S (mg kg ⁻¹)	有机硫 Organic S (mg kg ⁻¹)	有效硫 Available S (mg kg ⁻¹)	黏粒 Clay < 0.002 mm (%)	pH
北安 Beian	0~20	82	66.57	3.33	1.88	19.49	527	449	31.30	27.5	5.8
海伦 Hailun	0~20	73	48.39	2.53	1.39	19.90	433	336	21.97	19.0	6.4
公主岭 Gongzhuling	0~20	70	21.32	1.30	0.94	21.16	290	212	28.90	17.4	7.0

表 2 肥料长期定位试验黑土的基本理化性状

Table 2 Basic properties of the black soil in a long-term fertilization experiment

处理代号 ¹⁾ Treatment code	有机质 OM (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	全硫 Total S (mg kg ⁻¹)	有机硫 Organic S (mg kg ⁻¹)	有效硫 Available S (mg kg ⁻¹)	黏粒 Clay < 0.002 mm (%)	pH
CK	26.62	1.39	0.94	21.75	360	268	26.62	12.92	6.9
NPK	28.96	1.52	1.50	19.40	390	314	36.72	12.78	6.5
M	29.14	1.49	1.19	18.22	380	281	39.60	14.06	7.0
MNPK	30.48	1.60	1.42	20.11	431	338	38.33	16.49	7.0

1) CK:不施肥 No fertilization; NPK:施 N、P、K 化肥 Applying N, P, K; M:施有机肥 Applying manure; MNPK:有机肥和化肥配合使用 Applying manure and chemical fertilizer

表 3 黑土肥料长期定位试验的施肥量

Table 3 Fertilizer application rates in the long-term fertilization experiment of black soil

作物 Crop	N (kg hm ⁻²)	P ₂ O ₅ (kg hm ⁻²)	K ₂ O (kg hm ⁻²)	M ¹⁾ (t hm ⁻²)
小麦 Wheat	150	75	75	
玉米 Maize	150	75	75	18.75
大豆 Soybean	75	150	75	

1) M: 有机肥 Manure

1.2 土壤有机硫矿化培养和分析方法

土壤有机硫矿化试验参照 Pirela 和 Tabatabai^[10]、李书田^[3]、姜丽娜^[12]方法进行。称取土壤样品 30 g(以烘干土为基数,下同),加入 30 g 石英砂(过 1~2 mm 筛),充分混合后置于淋滤管内,并尽量保持各处理间土壤松紧程度一致。每一土样设 3 次重复。为了去除土壤中已有硫酸盐的影响,先用 0.01 mol L⁻¹ 溶液润湿土壤,并平衡 12 h 以上,再用 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂ 溶液淋洗土壤至无 SO₄²⁻ 渗出;为防止添加溶液时对土壤表面击破坏作用,添加溶液前要在土壤表面铺敷滤纸。然后为淋滤管加盖防止水分蒸发,置于保温箱内在 20 和 30 下培养。分别在培养 2 周、4 周、6 周、8 周、10 周、12 周

和 14 周后用 75 ml 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂ 淋洗土壤,淋洗液定容至 100 ml,过滤,用硫酸钡比浊法测定淋洗液中的硫酸根含量。

1.3 土壤有机硫矿化动力学模型及其参数估计

土壤有机硫的矿化潜力、矿化速率常数和矿化半衰期的计算根据矿化培养数据,采用一级动力学方程计算:

$$S_t = S_0 [1 - \exp(-kt)]$$

式中, S_0 为潜在矿化势; S_t 为一定时间土壤硫累积矿化量; k 为一级动力学常数; t 为培养时间(周); $t_{0.5}$ 为常数,代表矿化半衰期,是潜在矿化势 S_0 被矿化 50% 所需的时间(周)。参数 S_0 和 k 用下述方法求得。先变形上式为:

$$S_0 - S_t = S_0 \exp(-kt)$$

等式两端同时取对数,得

$$\ln(S_0 - S_t) = \ln S_0 - kt$$

变形后的公式虽然是一直线型公式,但由于等式两端均含有欲求参数 S_0 ,所以需要先估算一 S_0 代入公式左端后,以最小二乘法计算出公式右端的两参数 S_0 和 k ;然后再将这一刚刚求出的 S_0 代回等式左端进行第二次计算,以最小二乘法求得新的等式右端的 S_0 和 k ,如此反复迭代计算,直至前后

两次求出的 S_0 相对误差小于 0.000 1。此时求得 S_0 和 k 即为一级反应方程式中的两参数。根据 S_0 和 k 即可计算出 $t_{0.5}$ ($t_{0.5} = 0.693/k$)。

2 结果与分析

2.1 黑土有机硫的矿化特征

2.1.1 不同地区黑土有机硫的矿化特征 图 2 表明了 20 和 30 条件下不同地区黑土有机硫累积矿化量与培养时间的关系。土壤有机硫累积矿

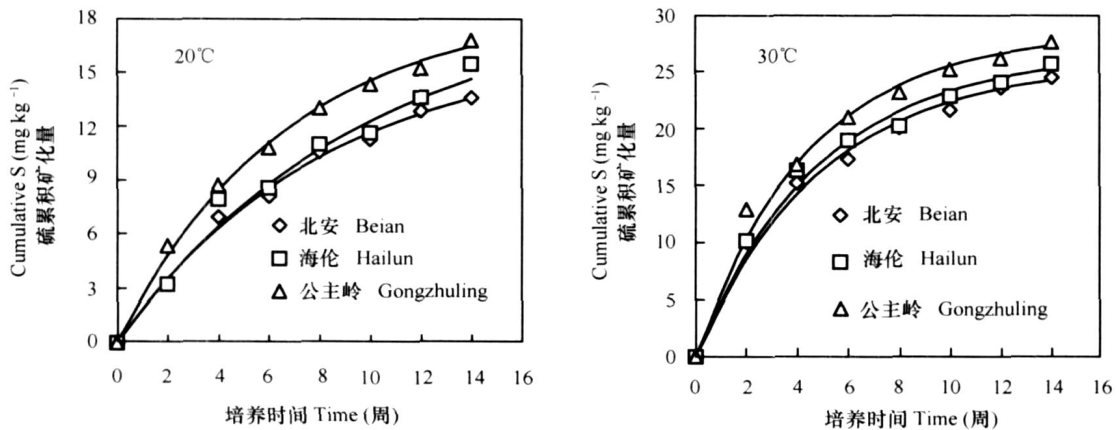


图 2 20 和 30 好气培养条件下黑土有机硫累积矿化量与培养时间的关系

Fig. 2 Relationship of cumulative mineralization of organic S in black soil with duration of incubation at 20 or 30 under aerobic condition

从三个黑土采样区的地理分布来看,公主岭黑土所处地区的气候条件相对温暖,无霜期短,气温也较海伦和北安要高,所以可以认为公主岭黑土具有更大的潜在供硫能力。

2.1.2 长期施肥黑土有机硫的矿化特征 本研究对长期不同施肥措施影响下的黑土定位试验土壤进行了 14 周的室内矿化培养试验。结果表明,施肥措施对黑土有机硫的矿化特征有明显的影响。从图 3 可以看出在 20 和 30 条件下,对照处理由于长期不施肥,作物主要吸收土壤中原有的硫素,使硫库遭到消耗,土壤有机硫矿化能力大大降低,在 14 周内有机硫的矿化仅达到 7.58 mg kg^{-1} 。在 20 下,有机硫的矿化速率为 $\text{MNPK} > \text{M} > \text{NPK} > \text{CK}$,有机肥处理和有机肥与氮磷钾配施处理的土壤有机硫矿化速率明显高于 NPK 处理和 CK 处理。在培养 14 周时的矿化量分别达到 17.68 mg kg^{-1} 和 18.12 mg kg^{-1} ,是对照的 2 倍以上,其主要原因可能是在外界提供丰富的营养条件下,土壤微生物活动比较活跃,有机硫的分解速率加快。所以合理施肥能促进有机硫在土壤中的矿化,为作物生长提供丰富的硫营养。

化量随培养时间的延长而不断增加,前期的增加量明显较后期多。

从图 2 中可以看出,培养的前 4 周有机硫矿化量远远大于其后期的矿化量(占 14 周累积矿化量的 50% ~ 62%);即随着培养时间的增加,单位时间内矿化的有机硫数量越来越少。另外,温度明显影响有机硫的矿化速率,30 条件下的有机硫累积矿化量显著高于 20 时的矿化量,而且不同土壤之间有一定的差异。在 20 和 30 条件下,黑土有机硫矿化速率均为公主岭 > 海伦 > 北安。

在 30 条件下,各处理的硫矿化速率也与在 20 条件下呈相同的趋势,只不过有机肥处理的有机硫矿化速率略高于有机肥配施化肥处理。

2.2 黑土有机硫矿化动力学特征

2.2.1 不同地区黑土有机硫矿化动力学特征 不同地区黑土有机硫矿化速率反应方程从表 4 和图 4 中可以看出,黑土有机硫矿化遵从一级动力学方程,即硫的累积矿化量与矿化时间的关系可以用 $S_t = S_0[1 - \exp(-kt)]$ 表达,当 t 时,有 $S_t = S_0$,即 S_0 为一定条件下,矿化时间足够长时,土壤中的有机硫被矿化转变为无机硫的最大值,它表达了该土壤有机态硫被矿化、供应植物吸收利用的能力,可以作为表征土壤供硫潜力大小的特征值使用,所以 S_0 又被称为土壤有机硫矿化势。另外,从上式中还可以看出 S_t 随时间增加的速度也取决于 k 值大小,在其他条件相同时, k 值越大同一时间内有机硫矿化为无机态硫的数量越多,因此它可以作为土壤有机硫矿化的“强度”指标使用。

使用非线性最小二乘法对图 1 所示试验数据进

行曲线拟合,求得黑土 20 和 30 条件下的有机硫矿化一级动力学方程,然后求得参数 S_0 和 k 值见表 4。三个地区黑土该方程式的相关系数均达到 -0.98 以上,远超过 1% 显著水平。

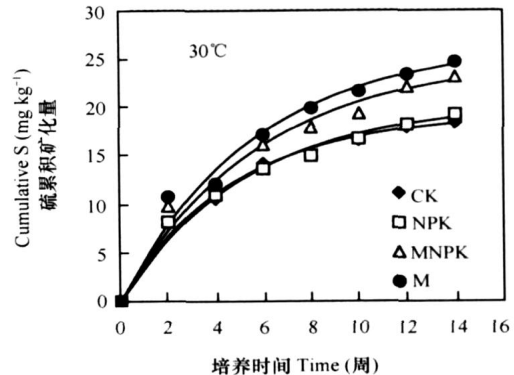
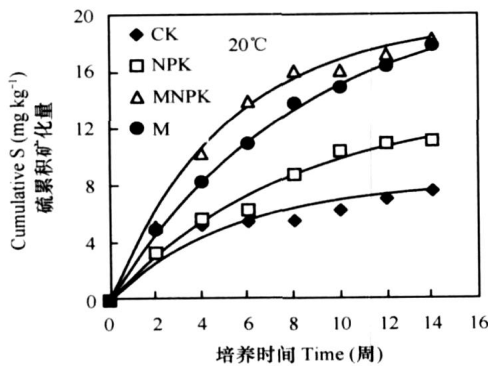


图 3 20 和 30 好气培养条件下长期施肥有机硫累积矿化量与培养时间的关系

Fig. 3 Relationship of cumulative mineralization of organic S in black soil under long-term fertilization with duration of incubation at 20 or 30 under aerobic condition

表 4 黑土有机硫矿化一级反应方程式常数

Table 4 Potentially mineralizable S_0 and S mineralization rate constants (k) of black soils incubated for 14 weeks under aerobic condition

地区 Areas	20			30		
	S_0 (mg kg^{-1})	k (周^{-1})	r	S_0 (mg kg^{-1})	k (周^{-1})	r
北安 Beian	16.70	-0.119	-0.995	25.78	-0.200	-0.990
海伦 Hailun	19.28	-0.101	-0.982	26.75	-0.203	-0.979
公主岭 Gongzhuling	18.74	-0.149	-0.992	28.41	-0.226	-0.984

$r_{0.05} = 0.666$, $r_{0.01} = 0.798$, $n = 9$

2.2.2 不同地区黑土有机硫矿化特点 (1) 温度对黑土有机硫矿化的影响。从表 4 和图 2 可以看出,三种黑土有机硫的矿化速率常数 k 、矿化势 S_0 和 $t_{0.5}$ 均明显受到温度的影响,即温度越高土壤的有机硫矿化势值越大,矿化化学反应速率常数也越大,而半衰期越短。这是因为土壤中有有机硫矿化是一生物化学过程,生物化学反应总是与温度、水分、通气条件等因素密切相关;在其他条件适宜、一定的情况下,在一定温度范围内,化学反应速率随着温度的升高而加快,温度越高化学反应进行得也越彻底。

(2) 有机硫矿化势 S_0 。从表 4 中可以看出,在 20 条件下三个地区黑土的矿化势 S_0 以海伦黑土为最大,公主岭黑土次之,但两者间差值较小,而以北安黑土的 S_0 为最小。

(3) 反应速率常数 k 。就海伦与公主岭两地黑土比较而言,虽然海伦土壤和公主岭土壤的有机硫矿化势数值相近,且海伦黑土矿化势高于公主岭黑土,但矿化速率常数 k 却差异明显。由于公主岭黑土的 k 值(绝对值)明显大于海伦黑土,致使恒温培养有机硫矿化试验结束时(14 周)公主岭黑土被矿

化的有机态硫明显高于海伦黑土。从有机硫矿化方程可知, $1 - \exp(-kt)$ 为土壤中矿化的有机硫累积量占全部能够被矿化有机硫 S_0 的比率,三种供试土壤的这一曲线如图 4 所示。从图中可以看出,三个地区有机硫累积量占全部能够被矿化有机硫 S_0 的比率仍以公主岭最大,北安次之,海伦最小。

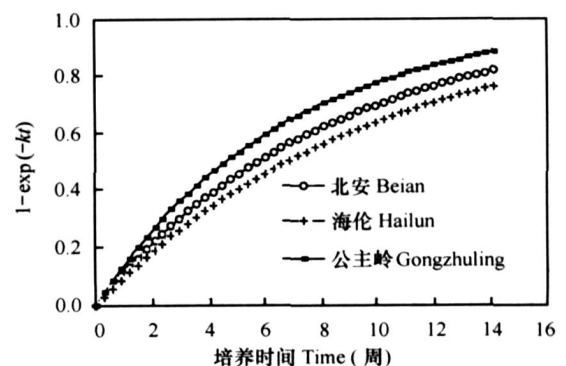


图 4 北安、海伦和公主岭土壤有机硫矿化 $1 - \exp(-kt)$ 曲线

Fig. 4 $1 - \exp(-kt)$ curves of organic S in black soils from three different areas

与 20 试验结果相似,30 条件下的土壤有机硫矿化曲线亦可以一级化学反应动力学方程表达,三种土壤有机硫矿化方程的相关系数均达到了 - 0.97 以上。与 20 条件下的试验结果所不同的是,30 条件下所得到的土壤有机硫的矿化势 S_0 以公主岭地区黑土为最大,以北安地区黑土为最低。而化学反应速率常数 k 大小顺序与 20 时比较,均以公主岭黑土最大,海伦和北安接近。三个地区黑土比较,以公主岭黑土有机硫的供硫潜力最大,而且矿化速度快,供硫的强度较其他两个地区土壤要高。

(4) 半衰期 $t_{0.5}$ 。半衰期 $t_{0.5}$ 是表达土壤有机物质矿化特征的又一重要参数。土壤有机物质的半衰期是指土壤中某种有机物质被分解、矿化 1/2 时所需要的时间,它既取决于土壤中有有机物质矿化时的环境条件,也直接取决于土壤中有有机物质种类及其数量,因此半衰期能够更综合地反映出土壤中有有机物质的矿化特点。按照化学上的半衰期概念,应用所求得的三种黑土有机硫矿化反应方程,计算不同温度下的土壤有机硫矿化“半衰期”,结果列于表 5。

表 5 表明,与矿化势相对应的有机硫被矿化 1/2 所需要的时间在三个地区黑土是不同的;20 条件下三个地区土壤中以公主岭黑土有机硫矿化势的半衰期值最小,而以海伦黑土最长,北安黑土居中;30 条件下依旧以公主岭黑土的有机硫矿化势

半衰期最短,而以北安黑土最长,海伦黑土居中,且北安黑土和海伦黑土两者相差很小。另外,就 20 和 30 两矿化温度相比,30 时的半衰期明显小于 20 时的半衰期,这说明在其他条件相同时高温条件下的矿化速率明显大于低温条件。

表 5 三种黑土硫矿化势的半衰期

采样地区 Areas	半衰期 Half-life (周)	
	20	30
北安 Beian	5.82	3.46
海伦 Hailun	6.86	3.41
公主岭 Gongzhuling	4.66	3.07

2.2.3 不同施肥措施长期影响下的黑土有机硫矿化动力学特征 (1) 长期施肥土壤有机硫矿化反应方程。从图 3 可以看出,长期定位肥料试验黑土的有机硫矿化过程亦遵从一级化学反应方程,为此,使用非线性最小二乘法对两温度下的有机硫累积矿化量 - 时间关系曲线进行拟合,结果列于表 6。从表 6 中所列相关系数以及从图 3 可以直观地看出,所求得的土壤有机硫矿化速率方程拟合效果良好,除 20 条件下的未施肥区黑土的相关系数为 - 0.968 外,其他相关系数的绝对值均在 0.98 以上。

表 6 在 20 和 30 条件下长期定位肥料试验黑土有机硫矿化反应方程式常数

Table 6 Potentially mineralizable S amount (S_0) and S mineralization rate constants (k) of the black soil from the long-term fertilization experiment incubated for 14 weeks in aerobic condition

处理代号 Treatment code	20			30		
	S_0 (mg kg^{-1})	k (周^{-1})	r	S_0 (mg kg^{-1})	k (周^{-1})	r
CK	8.22	- 0.190	- 0.968	19.26	- 0.213	- 0.992
NPK	13.56	- 0.129	- 0.983	20.40	- 0.188	- 0.985
MNPK	19.48	- 0.196	- 0.985	25.01	- 0.172	- 0.981
M	21.35	- 0.121	- 0.998	26.57	- 0.178	- 0.991

$$r_{0.05} = 0.576, r_{0.01} = 0.708, n = 12$$

(2) 长期不同施肥处理黑土有机硫矿化速率常数。温度对黑土有机硫矿化常数的影响。从表 6 中可以看出,30 条件下任何一施肥处理的有机硫矿化势均较 20 时的为高,反应速率常数 k 亦表现出同样的倾向,即在其他条件相同的情况下,温度越高能够被矿化的有机硫数量越多,而其被矿化的速率也越快。显然在土壤有机硫数量一定的情况下,

温度增加有利于近期土壤硫的供应,而不利于有机硫的保存,即不利于硫的长期、稳定供应。

矿化势 S_0 。表 5 和图 3 表明,在 20 和 30 时土壤有机硫的矿化势以施用有机肥的处理 M 为最大,其次为 MNPK 处理,再次为 NPK 处理,而以未施肥处理 CK 为最小,即施用有机肥数量越多,土壤中有有机硫含量越高,其矿化势也越大,即供硫潜力越大。

可见施用有机肥是土壤硫素供应的重要来源。

反应速率常数 k 。20 时土壤有机硫矿化反应的速率常数 k 处理间变化无明显规律,而 30 矿化试验的 k 值绝对值在不同施肥处理间为 $CK > NPK > M > MNPK$,这说明施用有机肥处理土壤中的有机硫矿化速度较未施用有机肥处理的要慢,施用有机肥不仅可以增大有机硫矿化势,增加土壤供硫潜力,且有机硫矿化速率相对较慢,这对于稳定土壤有效硫的供应是有积极意义的。

半衰期 $t_{0.5}$ 。不同施肥处理土壤有机硫矿化势的半衰期结果列于表 7。从表中可以看出,有机硫矿化势的半衰期有随施用有机肥而增长的趋势,最长的 MNPK 处理较 CK 处长 0.78 周(约 5.5 d),这也进一步说明施用有机肥对于提高黑土的供硫能力、延长供硫时间具有一定作用。温度升高,半衰期缩短。

表 7 不同施肥处理黑土有机硫矿化势的半衰期

Table 7 Half-life ($t_{0.5}$) of S_0 in black soils different in fertilization

处理代号 Treatment code	半衰期 Half-life (周)	
	20	30
CK	3.26	3.25
NPK	5.38	3.69
MNPK	3.54	4.02
M	5.74	3.89

3 讨 论

20 世纪 70 年代以来土壤学和农业化学领域的专家、学者为了合理施用氮肥和提高氮素利用率,在用数学模型计算和预测土壤供氮能力方面做了有意义的探讨。George Stanford 和 Smith 利用好气培养和间歇淋洗,建立了一种比较完善的测定土壤氮素矿化过程的培养技术,并以培养试验得到的数据为基础,依据一级反应动力学方程估算土壤氮素矿化的两个基本参数土壤氮素矿化潜力和矿化速率常数。Richter 和 Nuske 在上述方法基础上,将土壤氮素矿化过程分为两个组成部分,并用优选法分别求出他们的氮素矿化潜力 N_0 和矿化速率常数 k 。显然如果能够准确地获得 N_0 和 k 值,即可预报某一时段内土壤的累积氮素矿化量,为确定作物施肥量和施肥日期提供依据。Pirela 和 Tabatabai 将这一方法引入到有机硫矿化的研究中来,完善了硫的开放矿化培养法(open system),取得了同样的很好的效果^[10,11]。我国先后有许多学者将这一方法应用到

各种土壤上,来预测各类土壤的供硫能力,也均取得了较好的结果^[1,3,12]。对于含有机硫 78% 的黑土来说,了解其有机硫的矿化速率具有更为重要的意义,以此估计土壤硫的供应能力可以为合理施用硫肥、提高硫肥利用率、为科学地选择土壤管理措施提供理论依据。

黑土培养试验结果表明,这种修改的间歇淋洗好气培养法,可以用来测定黑土的硫素矿化过程。以培养实验测得的各个时期的 SO_4^{2-} 为基础,采用一级动力学方程可以求出土壤潜在的矿化硫量和矿化速率常数。

潜在硫矿化量是指对微生物分解比较敏感的那部分有机硫的数量,它可以很好地反映土壤硫素的供应强度,但受许多因素影响,如地理位置、温度、施肥制度、有机硫结构等。从本试验的结果中可以看出,黑土有机硫的矿化受气候因子的影响很大。虽然北安地区的黑土有机硫含量较公主岭地区高许多,但有机硫的矿化量和矿化速率常数均低于其他两地,这个矿化规律除了气候因素外,与有机质含量及其品质、全硫总量以及有机硫组成的关系还有待进一步研究,应探讨有机质含量的高低对有机硫矿化的影响。

黑土与其他土壤比较,含硫量相对较高,但受各种因素的影响较大。北方寒冷的气候是影响有机硫矿化释放的主要因素,这也是施用硫肥对作物有增产效果的原因。东北黑土习惯性施肥以高浓度不含硫的氮磷钾为主,很少施用硫肥。因此要改变以往的施肥习惯,适当施用含硫肥料,来补足土壤中硫供应不足的部分,达到平衡施肥。

测定土壤潜在可矿化硫量和矿化速率常数的目的是要深入了解硫素矿化过程和供硫特性,进而预报作物生长期间土壤养分供应情况,为适时施肥提供依据。由于矿化速率受水热条件的影响,在田间条件下,必须对 k 值进行校正。用培养试验数据得到的 S_0 和 k 来预报田间土壤供硫量,其可靠性必须用田间试验验证,因此要达到上述目的,还需做大量的深入研究。

4 结 论

1) 在好气培养条件下,黑土有机硫累积矿化量随培养时间的延长而不断增加,两者之间的数量关系遵从化学反应一级动力学模式,即前期有机硫矿化速率较快,后期有机硫矿化速率逐渐变慢;前 4 周

的矿化量占 14 周矿化总量的 50% ~ 62%。

2) 黑土表层土壤有机硫的潜在矿化量和矿化速率常数随温度的升高,有机硫的矿化速率明显加快。三个典型黑土区比较,以公主岭市黑土有机硫的供硫潜力最大,而且矿化速率快,供硫强度较北安和海伦市土壤要高。

3) 黑土有机硫的矿化速率常数 k 、矿化势 S_0 和 $t_{0.5}$ 明显受到温度的影响,即温度越高土壤有机硫矿化势值越大,矿化化学反应速率常数也越大,而半衰期越短。

4) 不同施肥措施长期影响下的黑土有机硫矿化势以施用有机肥处理最大,其次为有机肥与氮磷钾配施处理,再次为 NPK 处理,而以未施肥处理最小。即施用有机肥数量越多,土壤中有有机硫含量越高,其矿化势也越大,即供硫潜力越大。这说明施用有机肥是土壤硫素供应的重要来源。

5) 有机硫矿化势的半衰期随施用有机肥而增长,最长的 MNPK 处理较 CK 处理长 0.78 周(约 5.5 d),这进一步说明施用有机肥对于提高黑土的供硫能力、延长供硫时间具有一定作用。温度升高,各施肥处理半衰期缩短,土壤硫矿化速率加快。

致谢 本文承蒙中国科学院南京土壤研究所胡正义研究员修改指正,特此表示感谢!

参考文献

- [1] 胡正义,曹志洪. 我国南方地区典型土壤有机硫矿化速率及其供硫潜力研究. 中国农业科学, 1999, 32(6): 69~74. Hu Z Y, Cao Z H. Organic sulphur mineralization rates and potentials of soils selected in southern China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(6): 69~74
- [2] 李书田,林葆,周卫,等. 土壤中不同形态硫的生物有效性研究. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 48~57. Li S T, Lin B,

- Zhou W, et al. Study on bioavailability of sulfur fractions in soils (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(1): 48~57
- [3] 李书田,林葆,周卫. 土壤有机硫矿化动力学特征及影响因素. 土壤学报, 2001, 38(2): 184~192. Li S T, Lin B, Zhou W. Dynamics of soil organic sulfur mineralization and affecting factors (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(2): 184~192
- [4] Swift R S. Mineralization and immobilization of sulfur in soil. Sulphur in Agriculture, 1985, 9:1~5
- [5] Tabatabai MA, Al-Khafaji A A. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44:1000~1006
- [6] Williams C H. Some factors affecting the mineralization of organic sulphur in soils. Plant Soil, 1967, 26:205~223
- [7] 陈国安. 我国东北黑土地区农业中的硫素问题. 中国农学通报, 1994, 10(3): 36~38. Chen G A. Sulfur problem of agriculture in northeastern of China (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 1994, 10(3): 36~38
- [8] 郭亚芬,陈魁卿,刘元英,等. 黑龙江省主要土壤硫的形态及其有效性的研究(). 东北农业大学学报, 1995, 26(1): 27~33. Guo Y F, Chen K Q, Liu Y Y, et al. Study on sulfur fraction and availability of main soils in Heilongjiang (In Chinese). Journal of Northeast Agricultural University, 1995, 26(1): 27~33
- [9] 吴英,孙彬,迟凤琴. 黑龙江省主要类型土壤耕层有效硫状况及硫肥有效性研究. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 477~480. Wu Y, Sun B, Chi F Q. Status of soil available S and efficiency of S fertilizer in Heilongjiang Province (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(4): 477~480
- [10] Pirela H J, Tabatabai M A. Sulphur mineralization and potential of soils. Biol. Fert. Soils, 1988, 6:26~32
- [11] Maynard D G, Stewart J W, Bettany J R. Sulfur and nitrogen mineralization in soils compared using two incubation techniques. Soil Biol. Biochem., 1983, 15:251~256
- [12] 姜丽娜,詹长庚,毛美飞,等. 施肥对红壤稻田硫素演变及供硫能力的影响. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 293~299. Jiang L N, Zhan C G, Mao M F, et al. Effect of fertilization constitution on sulfur fertility development and supplied S ability of red paddy soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(3): 293~299

DYNAMICS OF SOIL ORGANIC SULFUR MINERALIZATION IN BLACK SOILS OF NORTHEAST CHINA AND ITS AFFECTING FACTORS

Chi Fengqin¹ Zhang Yulong² Wang Jingkuan² Wei Dan¹ Zhou Baoku¹ Zhang Xilin¹

(1 Soil and Fertilizer Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, The Key Lab of Soil Environment and Plant Nutrition of Heilongjiang, Harbin 150086, China)

(2 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract An open incubation method was used. Samples of black soils, collected from different areas (Beian, Hailun, and Gongzhuling) and plots of a long-term fertilization experiment, were incubated aerobically at 20 or 30 °C, respectively to study characteristics of organic S mineralization in the soils. Results show that in aerobic incubation, cumulative organic S mineralization increased with the time going on, followed the first-order kinetic model. The cumulative organic S mineralization in the

first 4 weeks accounted for 50 % ~ 62 % of the total mineralization in 14 weeks. The black soil in Gongzhuling was the highest in S supply capacity , and stronger in S supply intensity and quicker in organic S mineralization rate than in Hailun and Beian. The higher the temperature , the higher the mineralization potentiality of organic S , the higher the velocity constant of mineralization reaction , and the shorter the half-life period. In terms mineralization potential of organic S in the long term fertilization experiment , the treatments were in the order of M > MNPK > NPK > CK , showing that organic fertilizer was the major source of soil organic S , and improved soil S supply capacity.

Key words Black soil ; Organic sulfur ; Mineralization dynamics ; Affecting factor