

控释尿素硫膜对土壤性质和油菜生长的影响*

张昌爱 张 民[†] 李素珍

(山东农业大学资源与环境学院,山东泰安 271018)

摘 要 为预测硫包膜控释肥施用后大量硫膜残留对土壤生态系统造成的影响,设置硫包膜材料添加量不同的盆栽油菜试验,以研究控释尿素硫膜对土壤化学性状及植株生长的影响。研究表明:硫膜及硫磺可显著活化土壤的 Fe、Mn、Zn 等元素,对土壤中水溶性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 等含量也有较大影响;同时硫膜和硫磺的施入影响了土壤原有的酸碱平衡和氧化还原平衡,表现为土壤交换性酸和交换性铝含量增加、pH 值下降、还原性物质和活性还原物含量下降。另外施硫能促进油菜的生长并显著影响植株对 N、P、K、S 的吸收,在硫包膜尿素处理基础上继续施用较多的硫磺仍有增产效应。与硫磺相比硫膜短期内对土壤性质的影响较轻。

关键词 控释尿素硫膜;油菜;酸碱平衡;交换性酸;还原性物质

中图分类号 S146.2

文献标识码 A

硫包膜控释肥降低了控释肥的价格,同时又将硫这一植物必须的营养元素带入土壤中,所以具有良好的推广潜力和市场前景,目前已经成为控释肥研究中的热点^[1~3]。山东农业大学研制的硫包膜控释肥料已转入大规模生产和应用阶段^[4~6],硫包膜尿素(SCU, Sulfur Coated Urea)也是美国、日本、欧洲市场上较为普遍的肥料品种^[7,8]。但是硫包膜肥料的硫膜所占的比例较大,一般占成品重量的 15%~30%。这种膜材料以硫磺为主,主要成份为元素硫,而硫是一种相对比较活跃的化学元素。大量硫磺成分施入土壤,不仅影响土壤的酸碱平衡^[9]、氧化还原平衡^[10],也影响着土壤微生物及土壤动物的活动,也会造成土壤元素有效性等方面的变化^[11]。但是,针对控释肥硫膜成份造成的农业生态系统变化方面的研究较少,也未见系统的报道。

有关硫磺农用方面的研究目前只集中在硫磺作为硫肥施用方面^[12,13],研究中的用量较少,一般为 30~50 kg hm⁻²,针对硫磺超量施用危害方面的研究还未展开。为此,有必要对控释肥施用后硫膜造成的农田生态系统的影响进行系统的研究和评价,以探讨控释肥硫膜对植物、土壤、以及周围环境的影响,以可持

续发展的理念指导硫包膜控释肥的应用和推广。

本文以山东农业大学研制生产的硫包膜尿素为试材,研究大量控释尿素硫膜施入土壤后对土壤化学性状及油菜生长的影响,内容包括硫膜对土壤酸碱平衡体系、土壤还原性物质、土壤可溶性盐含量、土壤水溶液中微量元素含量及油菜生长的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自泰安市省庄镇栗子峪村村北山坡上,为酸性棕壤,其基本理化性状列于表 1 中。供试作物为油菜,品种为上海青。供试盆钵为塑料盆,直径 22cm,高 18cm⁵。浇灌用水为当地自来水, SO_4^{2-} 含量为 56.13 mg L⁻¹。

肥料样品采用山东农业大学承担的农业部农业科技跨越计划“包膜控释肥料的中试与示范”项目在本实验室制作的硫包膜控释尿素,含氮 36%,硫膜占包膜肥料的 21.7%,设计控释期约为 60 d。其他肥料分别为:大颗粒尿素(46-0-0)、磷酸二铵(18-46-0)、氯化钾(0-0-60)。

* 国家“948”项目(编号:971053)、农业部跨越计划项目(编号:2001—跨 8)和农业科技成果转化项目(编号:农字函[2004]32 号)资助

[†] 通讯作者,电话:0538-8242900;E-mail:nzhang@sdau.edu.cn

作者简介:张昌爱(1971~),男,山东肥城人,博士研究生,主要从事土壤生态及土壤健康方面的研究

收稿日期:2005-10-13;收到修改稿日期:2006-04-26

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil tested

有机质 OM (g kg ⁻¹)	有效氮 Available N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	pH ¹⁾	电导率 EC (μS cm ⁻¹)	砂粒 Sand (g kg ⁻¹)	粉粒 Silt (g kg ⁻¹)	粘粒 Clay (g kg ⁻¹)
11.64	69.72	20.45	33	5.53	72.1	444	353	203

1) 土水比 1.5 W_{soil} W_{water} = 1.5

1.2 试验方法

设置 6 个处理 4 次重复的盆栽试验,各处理设置分别为:(1)对照处理:不施肥料(CK);(2)尿素处理:施用大颗粒尿素(Urea);(3)大颗粒尿素加硫磺处理:施用大颗粒尿素加硫磺(Urea + S),硫磺及其量等同于硫包膜尿素制作时所用的硫磺;(4)硫包膜尿素处理:施用硫包膜尿素(SCU);(5)硫包膜尿素加硫磺处理:施用硫包膜尿素加硫磺(SCU + S),硫磺及其量等同于硫包膜尿素制作时所用的硫磺;(6)硫包膜尿素加 2 倍硫磺处理:施用硫包膜尿素加 2 倍硫磺(SCU + 2S),硫磺用量二倍于硫包膜尿素制作时所用的硫磺。试验中设计硫膜与不同量的硫磺共同作用于土壤体系,硫磺和硫膜在物理性状上不

一样,因而对土壤生态系统的影响也不一致,但由于硫膜的主要成分是硫磺,二者对农田生态系统影响的区别在于过程的快慢上,硫磺的影响可以反映硫膜的潜在影响。

除 CK 处理外各处理均施磷酸二铵和氯化钾,各施肥处理中氮磷钾比例和量均相同,试验处理方案列于表 2 中(N P K=2 1 1,所施肥料要求不含硫)。将所需土壤混匀,并过 2mm 筛,然后每盆称土 3.5kg,与试验材料混匀后装入塑料盆中,于 2005 年 3 月 30 日播种,每盆播种数相同,于 2005 年 4 月 25 日定苗,每盆留苗 3 棵,定期浇水,各盆浇水量严格一致,并记录浇水体积。盆栽于 5 月 20 日结束。

表 2 盆栽施肥处理方案

Table 2 Designing of the pot experiment

处理代号 Treatment code	施肥量 Fertilization amount per pot (g pot ⁻¹)				
	大颗粒尿素 Urea	硫包膜尿素 SCU	磷酸二铵 Ammonium monohydric phosphate	氯化钾 Potassium chloride	硫磺 Sulfur
1 CK	0	0	0	0	0
2 Urea	1.4	0	0.88	0.68	0
3 Urea + S	1.4	0	0.88	0.68	0.39
4 SCU	0	1.79	0.88	0.68	0
5 SCU + S	0	1.79	0.88	0.68	0.39
6 SCU + 2S	0	1.79	0.88	0.68	0.78

1.3 分析方法

土壤 pH 采用 1.5 土水比, pHSJ-3F 型酸度计电位法测定;植株全氮、磷、钾采用 H₂SO₄-H₂O₂消化法处理样品,凯式定氮法测定氮,比色法测定磷,火焰光度法测定钾;植株全硫采用 HNO₃-HClO₄消煮法处理^[14],铬酸钡比色法测定^[15]。土壤可溶性盐采用 1.5 土水比浸提,钾、钠用火焰光度法测定,钙、镁、铁、锰、锌用原子吸收分光光度法测定,硫酸根用铬酸钡比色法测定^[15],其他项目均采用常规分析测定。

2 结果与讨论

2.1 控释尿素硫膜对土壤酸碱平衡体系的影响

2.1.1 控释尿素硫膜对土壤 pH 值的影响 油菜收获后各处理土壤的 pH 值有极显著的变化(图 1),对照处理的 pH 值最高,表明施肥后造成了土壤 pH 值的下降。但出人意料的是尿素处理的土壤 pH 值竟比硫包膜尿素处理的 pH 值低,其主要原因主要在于硫膜抑止了尿素的快速释放,从而对尿素造成

的土壤酸化^[17,18]的抑制作用大于硫膜自身氧化带来的土壤酸化^[11]作用。施用尿素基础上追加相当于硫膜中相同质量的硫磺后,带来了进一步的土壤酸化;而在硫包膜尿素基础上,施加硫磺后会显著降低土壤的pH值,施加相当于硫膜中1倍和2倍质量的硫磺后,土壤pH值由6.22分别下降到5.95和5.70,差异达极显著水平。

Urea + S 处理与 SCU 处理的 pH 值差异达极显著水平,表明硫磺和由硫磺做成的硫包膜对土壤 pH 值的影响有着显著的区别:硫包被在尿素颗粒外为光滑致密的硫膜,在土壤中被氧化的作用缓慢,趋势平稳,甚至在短期内不显著。而粉状硫磺在土壤中被快速氧化。这种区别主要是由于两种物理状态硫的氧化速率差异较大所致^[10,19,20]。

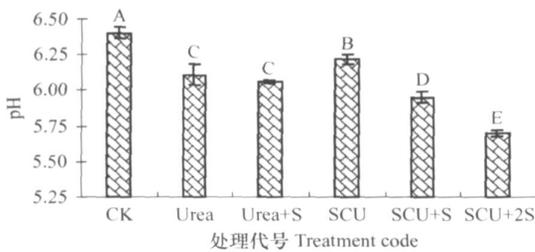


图1 各处理土壤的pH值

Fig. 1 Soil pH values in various treatments

2.1.2 控释尿素硫膜对土壤交换性酸的影响
交换性酸度说明土壤中交换性盐基不能饱和,而代替其位置的是交换性氢离子和铝离子。研究结果表

明(图2),土壤添加硫磺后,土壤交换性铝显著增加,交换性铝含量在各处理间的大小顺序为:SCU + 2S > Urea + S > SCU + S > SCU > Urea > CK。从土壤酸化的角度分析,交换性铝离子的存在,是土壤潜性酸的主要来源,因而交换性 Al^{3+} 的存在和增加不是土壤酸化的原因,而是土壤酸化的结果^[21]。因此可以看出,硫磺成分加入土壤后,影响了土壤的酸碱平衡,造成了土壤的酸化。但值得注意的是,SCU 处理中尽管有部分硫磺成分,但其对土壤酸碱平衡的影响较小,与尿素处理相比差异不显著。其主要原因在于硫膜的稳定性强,氧化速率缓慢。

土壤交换性氢离子含量在不同处理间的大小顺序为:SCU + 2S > Urea > Urea + S > SCU + S > SCU > CK。但 SCU + 2S、Urea、SCU + S 三处理之间的差异不显著。交换性氢离子和交换性铝离子构成了土壤的潜在酸度,反映了土壤进一步酸化的趋势,从分析中发现,尽管 SCU 处理含有硫磺成分,但它带来的土壤潜在酸化很小,甚至不如尿素带来的土壤酸化剧烈。

土壤交换性氢离子所占交换性酸的比例反映了土壤交换性酸的组成,其值越小表明土壤中铝的活化越明显,土壤酸碱平衡的影响可能越剧烈。各处理间交换性氢离子所占交换性酸的比例大小顺序为:SCU + 2S < SCU + S < Urea + S < SCU < CK < Urea。

从以上分析可知,单纯的硫包膜尿素对土壤酸碱平衡的扰动较轻,而加入粉状硫磺后,会带来土壤的显著酸化。而长期连续施用硫包膜控释肥后,是否会显著影响土壤酸碱平衡,还有待进一步探讨。

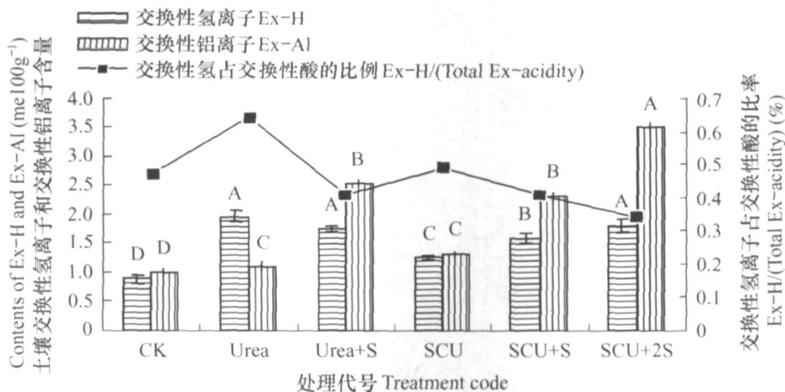


图2 各处理间土壤交换性氢离子(Ex-H)和交换性铝离子(Ex-Al)的变化

Fig. 2 Variation of exchangeable H^+ and exchangeable Al^{3+} between all treatments

2.2 控释尿素硫膜对土壤中还原性物质的影响

土壤的还原性物质含量既反映了土壤的氧化还原状态,也反映各处理对土壤氧化还原体系的影响。如图 3 所示,所有施用硫磺成分的处理中,还原性物质总量及活性还原物含量都有所下降。表明硫磺成分施入土壤后会造土壤还原性物质和活性还原物的减少,即硫磺在土壤中被氧化以呈现氧化态为主,从而减少了土壤中的还原性物质。

各处理间还原性物质的大小顺序为:CK > Urea > SCU > Urea + S > SCU + S > SCU + 2S。CK 和 Urea 处理相比差异不显著,但与其他处理相比均达到极

显著水平。SCU 处理与 Urea + S 处理差异不显著,表明在一定范围内影响还原物存在的主要是 S 的量而不是 S 的物理性状。而 SCU + 2S 处理与 SCU + S 处理相比,其还原性物质略有下降,但下降趋势减弱,表明施 S 达到一定量后,土壤固有的缓冲体系开始发挥抑制作用。

活性还原物质在各处理间的大小顺序与还原性物质总量表现一致。活性还原物所占的比例表现出的趋势也几乎与之相近,只是 Urea 处理较 CK 要高得多。活性还原物所占比例较低,一般在 6% ~ 16% 之间。

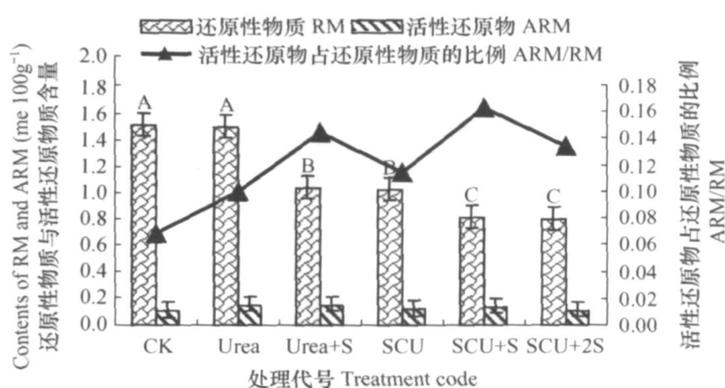


图 3 各处理间土壤中还原性物质 (RM) 和活性还原物质 (ARM) 含量

Fig. 3 Contents of soil reductive material (RM) and activity reductive material (ARM) in the treatments

2.3 控释尿素硫膜对土壤可溶性盐的影响

2.3.1 控释尿素硫膜对土壤水溶液中阴离子的影响

施用含硫材料后,土壤的 HCO_3^- 含量有明显的变化:与对照相比,Urea 处理 HCO_3^- 的含量有所增加;而施用硫磺和硫膜后会降低土壤的 HCO_3^- 含量,并且随加入量的增加,土壤 HCO_3^- 的含量会更低;硫膜和硫磺相比,对土壤 HCO_3^- 的影响较小(图 4)。

土壤中的 Cl^- 含量变化较大,与对照相比,其他

处理中土壤的 Cl^- 含量都有显著增加,其中 Urea 和 Urea + S 处理的含量增加最大,分别增加了 57.3% 和 50.0%,表明尿素对土壤氯离子含量的影响要强于硫膜;其中 SCU 处理对土壤的 Cl^- 含量的影响最小,但仍比对照提高了 28.6%。在 SCU 处理基础上施用硫磺后,SCU + 2S 和 SCU + S 两处理的土壤 Cl^- 含量有所增加,分别比 SCU 处理增加了 7.3% 和 10.9% (图 4)。

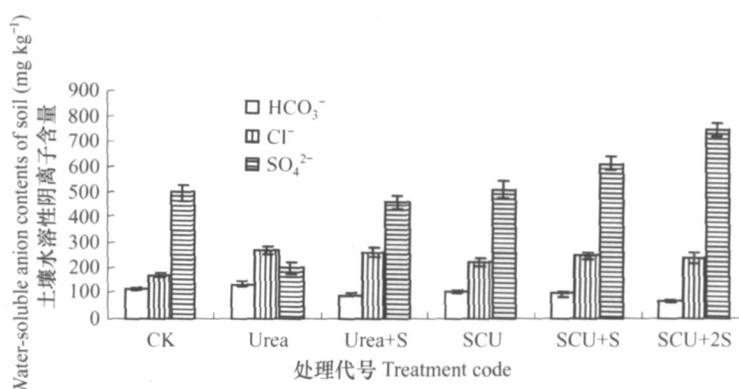


图 4 各处理土壤中水溶性阴离子含量(5 l 水溶液)

Fig. 4 Water-soluble anion contents of soil in the treatments

与 Urea 处理相比,所有施用硫包膜尿素的处理中,土壤 SO_4^{2-} 含量均有明显的增加:在尿素处理基础上施用硫磺, SO_4^{2-} 含量增加了 260.8 mg kg^{-1} ,施用硫膜处理增加了 328.9 mg kg^{-1} ,施用硫膜和单倍硫磺处理增加了 409.3 mg kg^{-1} ,施用硫膜和双倍硫磺处理,其土壤 SO_4^{2-} 含量增加了 545.9 mg kg^{-1} (图 4)。但与 CK 相比,Urea 处理中土壤的 SO_4^{2-} 含量却较低,这主要是由于 Urea 处理油菜的生物量远大于 CK 处理,从土壤中吸收的 SO_4^{2-} 也远大于 CK 处理,致使土壤中 SO_4^{2-} 的量残留较少。这表明如果不施用含硫肥料,在试验条件下会造成土壤中 SO_4^{2-} 含量的下降甚至亏缺。而 SCU 和 Urea + S 处理的土壤 SO_4^{2-} 含量与 CK 处理相近,可以认为这种用量既能保证油菜对硫的需求,又可以维系土壤 SO_4^{2-} 含量的相对稳定。而 SCU + S 和 SCU + 2S 两处理中,土壤 SO_4^{2-} 表现出累积趋势。

2.3.2 控释尿素硫膜对土壤水溶液中阳离子含量的影响 油菜收获后,各处理土壤水溶性钾、钠、钙、镁的含量也有显著的差异(图 5),其中钙离子含量较高,约占四种阳离子总量的 $53.9\% \sim 69.6\%$ 。钠、钾所占的比例较低,均在 10% 以下。

施肥处理中,土壤的水溶性钾含量出现降低趋势:与对照相比,Urea、Urea + S、SCU、SCU + S 和 SCU + 2S 处理分别下降了 4.88% 、 17.85% 、 8.98% 、 33.36% 和 25.17% ;与 Urea 处理相比,Urea + S 处理下降了 13.64% ;与 SCU 处理相比,SCU + S 和 SCU + 2S 处理土壤水溶性钾分别下降了 26.8% 和 17.8% 。土壤水溶性钾的这种趋势与油菜产量有一定的关系,即产量越高,土壤的水溶性钾被植株带走的越

多,土壤中的含量就可能越低。因而,植株对水溶性钾的吸收是影响土壤中水溶性钾含量的主要因素,土壤添加硫后通过影响植株对钾的吸收而影响土壤水溶性钾的含量。

Urea + S 处理土壤水溶性钠较 Urea 处理下降了 10.9% ;与 SCU 处理相比,SCU + S 和 SCU + 2S 处理土壤水溶性钠分别下降了 39.97% 和 21% 。施加尿素,会大幅度降低土壤中的水溶性钠含量,但如果施用含氮量相同的硫包膜尿素则会有效缓解这种降低趋势,与之相反,在尿素基础上施加等量于膜材料的硫磺后,这种降低趋势会加重。尿素在土壤中部分转化成 NH_4^+ 后,土壤溶液的交换性能加强,能够促进土壤钠的淋溶流失及作物吸收,而施硫进一步加剧这一过程的主要原因仍在于施硫加剧了土壤溶液的交换性能。

硫膜及其硫磺成份可有效活化土壤中的钙,各处理中土壤水溶性钙离子的大小顺序为:SCU + 2S > SCU + S > Urea + S > SCU > CK > Urea。Urea 处理由于油菜生物量大,尽管它能活化部分土壤钙,但土壤中的水溶性钙含量仍较对照有所下降;而其他处理土壤的水溶性钙含量与对照相比均明显增加,且随施硫量的增加而加大:SCU 处理增加 42.27% ,Urea + S 处理增加 43.06% ,而 SCU + 2S 和 SCU + S 处理分别增加了 88.81% 和 148.0% 。

与土壤中的钙相似,土壤水溶性镁含量也受到硫包膜和硫磺成份的显著影响。各处理中土壤水溶性镁含量的大小顺序为:SCU + 2S > SCU + S > Urea + S > Urea > SCU > CK。可见硫磺要比硫膜更能活化土壤镁,甚至短期内,尿素对镁的活化能力也强于硫膜。其趋势与各处理对土壤 pH 值的影响一致。

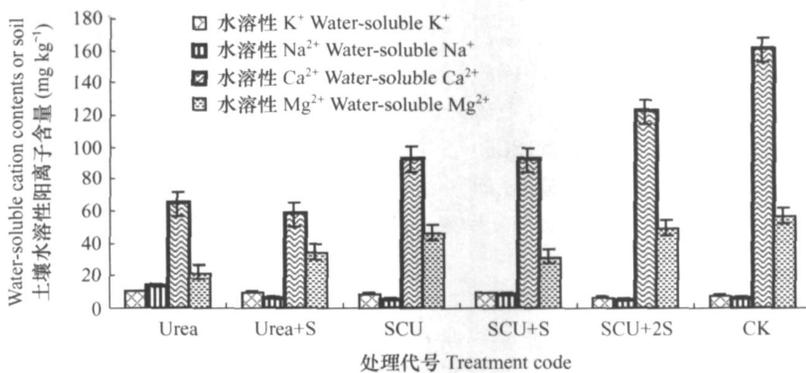


图 5 各处理土壤中水溶性阳离子含量(5 l 水溶液)

Fig. 5 Water-soluble cation contents of soil in the treatments

2.4 控释尿素硫膜对土壤水溶液中微量元素含量的影响

所有施肥处理,土壤水溶性 Fe 含量均有所增加(图 6),且随着硫膜成份量的增加,土壤水溶性 Fe 含量呈现上升趋势:与 Urea 处理相比,Urea + S 处理增加了 31.7%;而与 SCU 处理相比,SCU + S 和

SCU + 2S 处理分别增加了 24.2% 和 50.5%。Urea + S 处理与 SCU 处理相比,其土壤水溶性 Fe 含量增加了 0.17 mg kg^{-1} ,可见硫包膜尿素与尿素外另加等量于硫膜的硫磺,对土壤水溶性 Fe 含量的影响不同。这可能的主要原因是它们对土壤造成的酸化不同,因此土壤 Fe 的有效性也有了差异。

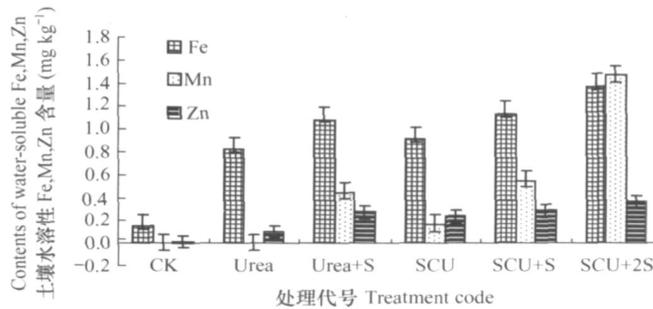


图 6 各处理土壤中水溶性 Fe、Mn、Zn 含量

Fig. 6 Contents of water-soluble Fe, Mn, Zn in soil in the treatments

在 CK 和 Urea 两处理中,土壤水溶液中用原子吸收均未检出 Mn,但在其他处理中能够检出,并随施入包膜硫成份量的增加而增加。施入包膜硫成份最大的 SCU + 2S 处理中,其水溶性 Mn 含量达到 1.47 mg kg^{-1} 。与 SCU 处理相比,SCU + S 和 SCU + 2S 处理的水溶性 Mn 含量分别增加了 2.2 倍和 7.6 倍(图 6)。Urea + S 处理与 SCU 处理相比,其水溶性 Mn 含量前者是后者的 2.6 倍,可见硫包膜和硫磺对土壤水溶性 Mn 的活化有着明显的差异。这与二者对土壤酸化作用的差异一致。

各处理间土壤水溶液中 Zn 含量的大小顺序为: SCU + 2S > SCU + S > Urea + S > SCU > Urea > CK。在 CK 和 Urea 两处理中,土壤水溶液中 Zn 含量很低,均小于 0.02 mg kg^{-1} ,但土壤施入硫包膜及硫磺后的处理中,其含量均大于 0.2 mg kg^{-1} ,表明施硫可显著活化土壤水溶性 Zn。与 SCU 处理相比,SCU + S 和 SCU + 2S 处理的水溶性 Zn 含量分别增加了 20.5% 和 50.0%。表明随硫磺施入量的增加,土壤水溶性 Zn 含量也呈上升趋势。

SCU + 2S 处理土壤水溶液中尽管 Zn 的量增加了,但 Fe、Mn 含量均高于 1.3 mg kg^{-1} ,易于造成酸性土壤中 Fe、Mn 的毒害,这可能是 SCU + 2S 处理油菜生物量较小的主要原因(见 2.5.1)。

2.5 控释尿素硫膜对油菜生长的影响

2.5.1 控释尿素硫膜对油菜生物量及根系生长的

影响 油菜生物量是反映菜用油菜生长最重要指标。各处理间油菜生物量的大小顺序为: SCU + S > SCU > Urea + S > Urea > SCU + 2S > CK(图 7)。油菜是喜硫作物,虽然土壤和浇灌水的硫含量比较高(浇灌用水和土壤水溶性 SO_4^{2-} 含量分别为 56.13 mg L^{-1} 和 480.6 mg kg^{-1}),施硫仍表现出促进油菜生长的趋势:与 Urea 处理相比,Urea + S 和 SCU 处理的生物量分别增加了 1.78% 和 2.84%;而与 SCU 处理相比,SCU + S 处理的生物量增加了 7.84%;但是 SCU、Urea + S、Urea 处理之间差异不显著。在各个处理中,SCU + S 处理的油菜生物量最高,与其他处理相比,均达到极显著水平。SCU + 2S 处理油菜的生物量只高于对照,较其他处理均低,也均达到显著水平,说明施硫过量会抑止油菜的生长。

油菜根冠比既能反映植株的生长状况,也能反映土壤的营养供应状况。适宜的根冠比可以保证植物的上部生长,但在土壤营养匮乏条件下易于形成较大的根冠比,这是植物根系的一种适应性反应^[16]。以上各个处理中,CK 处理的根冠比最大,其次是 SCU + 2S 处理,即 CK 处理表现出营养亏缺,同时 SCU + 2S 处理也表现出营养的亏缺,这可能是由于过量的硫造成了土壤化学性状的改变从而影响了植株的营养状况。SCU + S、Urea + S 和 Urea 处理的根冠比差别较小,而 SCU 处理的根冠比最低,表明 SCU 处理可

以为油菜生育期提供稳定丰富的营养,这是油菜根系惰性增加的主要原因。由此看出,在酸性棕壤上,施用

SCU 可以比施用尿素获得更高的产量,甚至在此基础上施用较多的硫磺仍有增产效应。

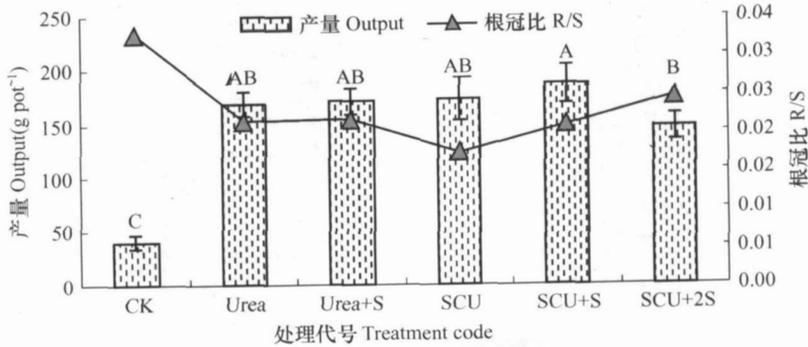


图 7 控释尿素硫膜对油菜生物量及根冠比的影响

Fig. 7 Effects of sulfur-coating of SCU on cole output and root/shoot ratio (R/S)

2.5.2 控释尿素硫膜对植株中氮、磷、钾、硫含量的影响 各处理间植株全氮含量的高低顺序为: SCU + 2S > Urea + S > Urea > SCU + S > SCU > CK(见图 8)。施肥后植株全氮含量有明显增加:与对照相比,Urea、Urea + S、SCU、SCU + S 和 SCU + 2S 处理分别增加 15.02 %、17.06 %、4.44 %、6.48 % 和 18.09 %。研究证实控释氮肥能够提高氮的利用率^[22,23],但本试验中发现施用尿素对植株全氮含量的影响要较施用硫包膜尿素明显,这主要是由于硫膜限制了尿素中氮的过量释放,从而减少了植株对氮的奢侈吸收。但在此基础上添加硫磺后,植株全氮含量有增加趋势:在尿素基础上施加等量于硫膜

的硫磺后,植株全氮增加 1.78 %;在 SCU 基础上施加等量和两倍于硫膜的硫磺后,植株全氮分别增加 1.96 %和 13.07 %。

各处理间植株全磷含量的高低顺序为: SCU + 2S > SCU + S > Urea + S > SCU > Urea > CK。尿素基础上施加等量于硫膜的硫磺后,植株全磷增加 19.94 %;在 SCU 基础上施加等量和两倍于硫膜的硫磺后,植株全磷分别增加了 17.76 %和 36.88 %,可见施硫显著增加植株中全磷的含量。在等氮等硫的 Urea + S 和 SCU 处理间,Urea + S 处理植株全磷含量高于 SCU 处理,说明不同形态的硫对植株全磷含量的影响也有所不同。

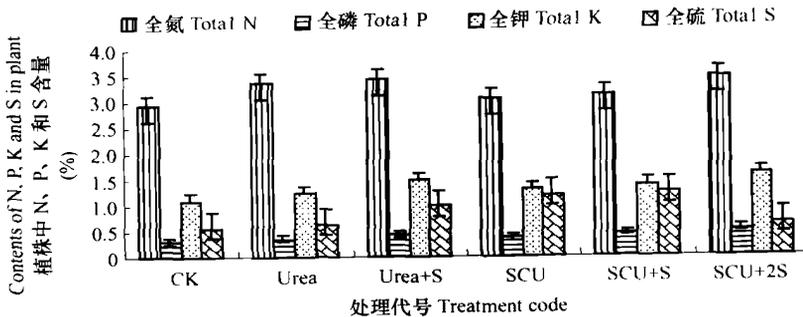


图 8 控释尿素硫膜对植株中氮、磷、钾、硫含量的影响

Fig. 8 Effects of sulfur-coating on contents of N, P, K, and S in plant

各处理间植株全钾含量的高低顺序为: SCU + 2S > Urea + S > SCU + S > SCU > Urea > CK。施硫也影响植株对钾的吸收:尿素基础上施加等量于硫膜的

硫磺后,植株全钾增加 0.26 个百分点;SCU 基础上施加等量和两倍于硫膜的硫磺后,植株全钾分别增加 0.07 和 0.28 个百分点。所有施肥处理,其植株

全钾含量均高于对照,其中 Urea + S 处理的植株全钾含量要较 SCU 处理高出 14.5%,可见即使所用肥料量一致,由于硫包膜尿素的控释效果及其硫料材物理性状的差异也会带来植株全钾含量的差异。

与植株全量氮磷钾含量的分析不同,植株全硫含量最高的却是 SCU + S 处理。各处理间植株全硫含量的高低顺序为:SCU + S > SCU > Urea + S > SCU + 2S = Urea > CK。可见施肥可以增加植株全硫含量,并且,施硫也显著增加植株的全硫含量,但随施硫量的加大,植株全硫含量的增加趋势放缓,过量后,反而会造成植株全硫含量的下降(图 8)。

3 结 论

1) 硫膜和硫磺的施用造成了土壤的显著酸化,并且土壤中交换性氢离子、交换性铝离子含量随硫膜和硫磺成份施入量的增加也呈现上升趋势。但硫膜和硫磺相比,前者对土壤酸碱平衡的影响较轻。

2) 硫膜和硫磺施入土壤后减少了土壤中活性还原物质、降低了还原物质总量,对土壤的氧化还原平衡有明显的扰动作用。

3) 土壤水溶液中的 HCO_3^- 和 Cl^- 含量随施硫量的增加而下降,SCU 和 Urea + S 处理的土壤 SO_4^{2-} 含量接近于原土。硫的用量既能保证油菜对硫的需求,又可以维系土壤 SO_4^{2-} 含量的相对稳定,而施硫更多便会造成土壤 SO_4^{2-} 累积。施硫能显著活化土壤 Ca、Mg,使得土壤水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量增加;而土壤水溶性 K^+ 、 Na^+ 含量却由于施硫而下降,这主要是受植株吸收的影响。同时施硫可显著活化土壤的 Fe、Mn、Zn,致使土壤水溶性 Fe、Mn、Zn 含量增加。

4) 施硫能促进油菜的生长,等氮条件下施用硫包膜尿素(SCU)可以较施用尿素获得更高的产量,甚至在 SCU 基础上继续施用较多的硫磺仍有增产效应。施硫也会显著促进植株对 N、P、K、S 的吸收。但过量施硫会使植株全 S 含量下降。

参 考 文 献

- [1] 刑竹,郭建华,阎宗彪. 涂层尿素在石灰性土壤上的行为. 植物营养与肥料学报,1997,3(1):16~23. Xing Z, Guo J H, Yan Z B. Behaviors of coated-urea in calcareous soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997,3(1):16~23
- [2] 谷洁,高华. 提高肥料利用率技术创新展望. 农业工程学报,2000,16(2):17~20. Gu J, Gao H. Prospects on the technical innovation to increase fertilizer use efficiency (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000,16(2):17~20
- [3] 何绪生,李素霞,李旭辉,等. 控效肥料的研究进展. 植物营养与肥料学报,1998,4(2):97~106. He X S, Li S X, Li X H, et al. The progress of studies on controlled availability fertilizers (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998,4(2):97~106
- [4] 张民,杨越超,宋付朋,等. 包膜控释肥料研究与产业化开发. 化肥工业,2005,32(2):7~12. Zhang M, Yang Y C, Song F P, et al. Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers (In Chinese). Fertilizer Industry, 2005,32(2):7~12
- [5] 姜宝雷,张民,杨越超. 硫包膜尿素养分释放特征. 化肥工业,2005,32(1):36~41. Jiang B L, Zhang M, Yang Y C. Characteristics of nutrient released from sulfur-coated urea (In Chinese). Fertilizer Industry, 2005,32(1):36~41
- [6] 张民,史衍玺,杨守祥,等. 控释和缓释肥的研究现状与进展. 化肥工业,2001,28(5):27~30. Zhang M, Shi Y X, Yang S X, et al. The progress of study on controlled-release and slow-release fertilizers (In Chinese). Fertilizer Industry, 2001,28(5):27~30
- [7] 赵秉强,张福锁,廖宗文,等. 我国新型肥料发展战略研究. 植物营养与肥料学报,2004,10(5):536~545. Zhao B Q, Zhang F S, Liao Z W, et al. Research on development strategies of fertilizer in China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004,10(5):536~545
- [8] 杜昌文,周健民. 控释肥料的研究及其进展. 土壤,2002,34(3):127~133. Du CW, Zhou J M. Progress in study of controlled-release fertilizers (In Chinese). Soils, 2002,34(3):127~133
- [9] 周卫,林葆. 土壤与植物中硫行为研究进展. 土壤肥料,1997(5):8~11. Zhou W, Lin B. The progress in study on the behavior of sulphur in soil and plants (In Chinese). Soils and Fertilizers, 1997(5):8~11
- [10] Slaton N A, Norman R J, Gilmour J T. Oxidation rates of commercial elemental sulfur products applied to an alkaline silt loam from Arkansas. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001,65:239~243
- [11] Mbdaihsh A S, Al-Mustafa W A, Metwally A L. Effect of elemental sulphur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. Plant and Soil, 1989,116(1):95~105
- [12] Rashid M, Bajwa M Z, Hussain R. Rice response to sulphur in Pakistan. Sulphur in Agriculture, 1992,16:3~5
- [13] 吴英,孙彬,迟风琴. 黑龙江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 available S and efficiency of S fertilizer in Heilongjiang Province (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001,7(4):477~480
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京:科学出版社,1983. Agro-chemistry Specialty Committee, Soil Science Society of China. ed. Soil Agro-chemistry General Analysis Methods (In Chinese). Beijing: Science Press,1983
- [15] 国家环境保护总局编. 空气和废气检测分析方法. 北京:中国环境科学出版社,1990. 298~300. State Environmental Protection Administration of China. ed. The Check and Analysis Methods on Air and Exhaust Gas (In Chinese). Beijing: China Environ-

- mental Science Press, 1990. 298 ~ 300
- [16] 张福锁主编. 植物营养:生态生理学和遗传学. 北京: 中国农业科技出版社, 1993. Zhang F S. ed. Plant Nutrition: Ecophysiology and Genetics (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993
- [17] Malhi S J, Nyborg M, Harapiak J T. Effects of long term N fertilizer induced acidification and liming on micronutrients in soil and in brome grass hay. *Soil & Tillage Research*, 1998, 48: 91 ~ 101
- [18] 许中坚, 刘广深, 余佳栋. 氮循环的人为干扰与土壤酸化. *地质地球化学*, 2002, 30(2): 74 ~ 78. Xu Z J, Liu G S, Yu J D. Soil acidification and nitrogen cycle disturbed by man-made factors (In Chinese). *Geology-Geochemistry*, 2002, 30(2): 74 ~ 78
- [19] Castellano S D, Dick R P. Modeling sulfur transformations in soils. *Soil Science*, 1991, 152(6): 448 ~ 454
- [20] Janzen H H, Bettany J R. Measurement of sulfur oxidation in soils. *Soil Science*, 1987, 143(6): 445 ~ 452
- [21] 戎秋涛, 杨春茂, 徐文彬. 土壤酸化研究进展. *地球科学进展*, 1996, 11(4): 378 ~ 401. Rong Q T, Yang C M, Xu W B. Advance in study on soil acidification (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 1996, 11(4): 378 ~ 401
- [22] Fu J R, Zhu Y H, Jiang L N. Use of controlled release fertilizer for increasing N efficiency on direct seeding rice. *Pedosphere*, 2001, 11(4): 333 ~ 339
- [23] 宋付朋, 张民, 史衍玺, 等. 控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应. *土壤学报*, 2005, 42(4): 619 ~ 627. Song F P, Zhang M, Shi Y X, *et al.* Releasing characteristics of controlled-release nitrogen fertilizer and its effects on rice yield (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 619 ~ 627

EFFECTS OF SULFUR COATING LEFT FROM USING SCU ON COLE GROWTH AND SOIL CHEMICAL PROPERTIES

Zhang Changai Zhang Min[†] Li Suzhen

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract The objective of this study was to predict the potential influence of sulfur-coating material left in the soil from using sulfur-coated urea (SCU) on agricultural ecosystem. In order to find effects of sulfur in the coating of SCU on cole growth and soil chemical properties, a pot experiment, which was designed to have 6 treatments, was conducted. Results of the experiment indicated that both the coating and sulfur applied could significantly enhance activity of Fe, Mn and Zn in the soil, and affect contents of water-soluble K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , and Cl^- in the soil. Besides, they tipped the original acid-base balance and redox balance of the soil, which was represented as increase in soil exchangeable acid and exchangeable Al, but decrease in soil pH, and contents of reductive material and active reductive material. At the same time they were shown to be able to promote cole growth and uptake of N, P, K and S. Application of sulfur could still have some crop response in yield in SCU treatments. The short-term impact of sulfur-coating on soil chemical properties was weaker than that of sulfur.

Key words Sulfur-coating left from SCU; Cole; Acid-base balance; Exchangeable acidity; Reductive material