

硫对石灰性土壤化学性质的影响*

张昌爱 张民* 曾跃春

(山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘要 通过连续两茬油菜盆栽试验,分析了硫对土壤 pH、电导率、交换性阳离子和水溶性阴离子等指标的影响。结果表明,硫能显著降低土壤 pH、增加土壤电导率,施硫会使土壤交换性 Na^+ 和交换性 K^+ 含量升高,并加剧土壤水溶性阴离子总量的累积,施硫对交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量影响较小,也未能显著改变土壤阳离子交换量和土壤碱化度。与尿素相比,硫包膜尿素对土壤 pH 和电导率的影响不显著,但对交换性阳离子和水溶性阴离子影响较大;与尿素处理相比,施硫未表现出明显的增产效应,施硫较多时,油菜产量显著降低。

关键词 硫 石灰性土壤 化学性质

文章编号 1001-9332(2007)07-1453-06 中图分类号 Q948.3 文献标识码 A

Effects of sulfur on chemical properties of calcareous soil. ZHANG Chang-ai, ZHANG Min, ZENG Yue-chun (College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2007, 18(7): 1453-1458.

Abstract: A pot trial with two continuous crops of rape was conducted to study the effects of sulfur on the chemical properties of calcareous soil. The results indicated that sulfur could decrease soil pH, while increase the electrical conductivity of soil solution markedly. Applying sulfur could enhance the contents of soil exchangeable Na^+ and K^+ and the accumulation of soil water-soluble anions, but had less effect on soil exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+} , CEC, and alkalization degree. Comparing with urea, sulfur-coated urea (SCU) had less effect on soil pH and electrical conductivity, but markedly affected soil exchangeable cations and water-soluble anions. Sulfur application had no obvious yield-increasing effect, and higher application rate of sulfur could decrease the rape yield significantly.

Key words: sulfur; calcareous soil; chemical property.

1 引言

硫磺是一种相对比较活跃的化学元素。大量硫磺施入土壤,不仅影响土壤的酸碱平衡^[17,21]、氧化还原平衡^[13],也影响着土壤微生物的活动^[2,10],还会造成土壤元素有效性等方面的变化^[3,6]。硫磺适宜在石灰性土壤上施用,主要是因为硫磺可以酸化土壤^[16],从而改善土壤的酸碱性。

有关土壤缺硫的报道日渐增多,硫肥的增产效应已被广泛接受^[4,7,20]。涂硫尿素既可以提高氮素利用率^[8,9,12],也能为土壤带入一定量的硫肥,同时其价格也较低,因而具有广阔的应用前景^[19]。目前在

硫肥的研究中,主要关注施硫的增产效应,而对施硫造成的土壤性状的影响研究较少。实际上,涂硫尿素大量在石灰性土壤上施用,由于硫膜的作用,势必会改变土壤原有的化学性状。Lukina 等^[5]研究表明,在 Cu-Ni 熔炼厂周围,土壤 pH 值、盐基饱和度都与硫磺的污染呈显著相关。森林土壤中土壤有机硫与土壤全氮、交换性钾、交换性镁等均具有显著相关性^[14]。Schaaf 等^[11]也发现,土壤 pH 值、盐基饱和度、C:N 比等受土壤硫积累的影响显著。因而在大面积推广应用涂硫尿素之前,有必要对硫膜累积造成的土壤化学性状改变进行研究,以可持续发展的理念指导硫包膜肥料的应用和推广。

本文以山东农业大学研制、由金正大公司生产的硫包膜尿素为试材,研究了大量控释尿素硫膜施入土壤后对石灰性土壤化学性质的影响。试验施用了硫膜和不同量的硫磺。硫磺和硫膜在物理性状上

* 国家引进国际先进农业科学技术“948”计划项目(971053)、农业部跨越计划项目(2001-跨8)、农业科技成果转化项目(农计函[2004]32号)和“十五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD10807)。

** 通讯作者。E-mail: mzhang@sdau.edu.cn

2006-06-09 收稿 2007-04-06 接受。

表1 供试土壤的基本理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of soil

有机质 OM (g · kg ⁻¹)	全氮 Total N (mg · kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻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)
22.06	522.36	18.4	45.98	239	201	373	426
pH (1:5) (Soil:H ₂ O)	碱度 Alkalinity (mmol · kg ⁻¹)	水溶性 Cl ⁻ S-Cl ⁻ (mmol · kg ⁻¹)	水溶性 SO ₄ ²⁻ S-SO ₄ ²⁻ (mmol · kg ⁻¹)	水溶性 K ⁺ S-K ⁺ (mmol · kg ⁻¹)	水溶 Na ⁺ S-Na ⁺ (mmol · kg ⁻¹)	水溶 Ca ²⁺ S-Ca ²⁺ (mmol · kg ⁻¹)	水溶 Mg ²⁺ S-Mg ²⁺ (mmol · kg ⁻¹)
8.43	6.12	9.04	6.18	0.09	7.84	8.05	1.30

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^[18]。

2 材料与方

2.1 供试材料

供试土壤采自山东省德州市陵县城关镇东王架村,为黄河冲击物发育成的潮土,其基本理化性状见表1。供试作物为油菜,品种为上海青。供试盆钵为塑料盆,直径22 cm,高18 cm。浇灌用水为当地自来水,SO₄²⁻含量为56.13 mg · L⁻¹,Cl⁻含量为97.54 mg · L⁻¹,Ca²⁺含量为126.24 mg · L⁻¹,Mg²⁺含量为98.61 mg · L⁻¹。

肥料采用山东农业大学承担的农业部农业科技跨越计划项目研制、金正大公司生产的硫包膜控释尿素,含氮36%,硫膜占包膜肥料重量的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)。

2.2 试验方法

试验设5个处理,各处理设置分别为:1)尿素处理,施用大颗粒尿素(Urea);2)尿素加硫磺处理,施用大颗粒尿素和硫磺(Urea+S),硫磺用量等同于硫包尿素制作时所用的硫磺量;3)涂硫尿素处理,施用硫包膜尿素(SCU);4)涂硫尿素加硫磺处理(SCU+S),施用硫包膜尿素和硫磺,硫磺及其用量等同于硫包尿素制作时所用的硫磺量;5)涂硫尿素加2倍硫磺处理(SCU+2S),施用硫包尿素和硫磺,硫磺用量2倍于硫包尿素制作时所用的硫磺量。每个处理3次重复(表2)。

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用量均相同(N:P:K=2:1:1),所施肥料要求不含S。将所需土壤混匀,过2 mm筛,然后每盆称土3.5 kg,分别与供试肥料混匀,装入塑料盆。第1茬油菜于2005年4月17日播种,每盆播种数相同,于2005年5月10日定苗,每

表2 盆栽施肥处理方案

Tab.2 Designing of fertilization treatment of the pot experiment (g · pot⁻¹)

处理代号 Treatment code	施肥量 Fertilization amount per pot				
	大颗粒 尿素 Urea	硫包尿素 SCU	磷酸二铵 Ammonium monohydric phosphate	氯化钾 Potassium chloride	硫磺 Sulfur
Urea	1.4	0	0.88	0.68	0
Urea+S	1.4	0	0.88	0.68	0.39
SCU	0	1.79	0.88	0.68	0
SCU+S	0	1.79	0.88	0.68	0.39
SCU+2S	0	1.79	0.88	0.68	0.78

盆留苗3棵,定期定量浇水。第1茬油菜盆栽试验于6月10日结束。第2茬油菜盆栽时间为2005年9月27日至12月16日,处理与第1茬一致,继续施加所有肥料,与土混匀,装入原盆,盆栽结束后,采用四分法取土0.5 kg,供分析测定。

2.3 测定方法

土壤pH及EC均采用1:5土水比浸提后,分别用pHSJ-3F型酸度计和DDS-11A型电导率仪测定。土壤可溶性阴离子采用1:5土水比浸提法,硫酸根用铬酸钡分光光度法测定^[15]。其他项目均采用常规分析方法^[1]。交换性钾、钠、钙、镁用NH₄Ac浸提,火焰光度法测定钾、钠,原子吸收分光光度法测定钙、镁。所得数据均用SAS软件进行分析。

3 结果与分析

3.1 控释肥硫膜对土壤pH的影响

第1茬盆栽结束后,各处理土壤pH的高低顺序为Urea>SCU>Urea+S>SCU+S>SCU+2S,基础土样的pH为8.43,与之相比,Urea、SCU、Urea+S、SCU+S、SCU+2S处理的土壤pH分别下降了0.38、0.53、0.43、0.59和0.65。由此可见,施硫后能显著降低土壤pH,并随施硫量的增加,土壤pH值呈下降趋势。处理间相比,除了Urea、SCU处理与其它处理差异达到显著水平外(P<0.05),其它处理间差异不显著(P>0.05)(图1)。第2茬盆栽结束后,各处理间pH差异均没有达到显著水平,但SCU

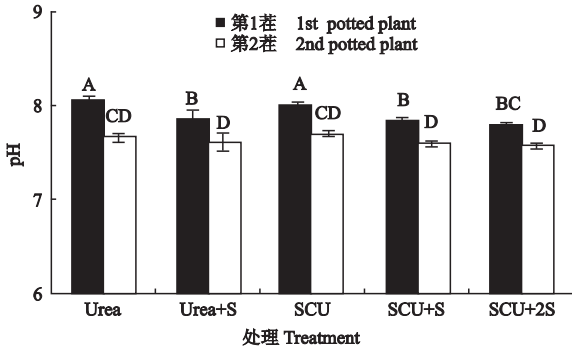


图 1 不同施肥处理土壤 pH

Fig. 1 Soil pH values in different fertilization treatments.

+2S 处理 pH 最低,而 SCU 处理 pH 最高.与 SCU 处理相比,尽管 Urea + S 处理中含硫、氮量与之一致,但后者的土壤 pH 还是下降了 0.15,表明 SCU 的施用,对土壤酸碱体系的扰动比较轻微,甚至要比尿素和硫磺粉带来的扰动轻.

各处理两茬试验间相比,土壤 pH 值发生了显著的变化.除了试验材料的影响外,种植过程本身也会造成土壤的酸化,这主要缘于作物对盐离子的吸收、作物根系活动的影响以及土壤碳酸盐的转化和矿化等.总体看来,施用尿素与施用涂硫尿素对土壤 pH 的影响在试验期内未达到显著水平,但在尿素和涂硫尿素基础上继续施加硫磺会显著降低土壤 pH.

3.2 控释肥硫膜对土壤电导率的影响

第 1 茬盆栽结束后,各处理土壤电导率大小顺序为 SCU + 2S > Urea + S > SCU + S > Urea > SCU. 与原土壤电导率(表 1)相比,所有处理的土壤电导率都显著增加.各处理间相比,施用硫磺处理电导率较高,尿素处理处于中间,而硫包膜尿素处理最低. Urea + S 与 SCU 处理相比,尽管其氮素及硫的用量一样,但由于硫的形态不一致,其土壤电导率也有差异,它们之间的差别反应出硫磺粉与包膜硫对土壤电导率的影响有一定的差别,但二者没有达到显著水平. SCU + S 与 SCU + 2S 处理与处理 SCU 处理相比,其电导率分别增加了 18.58% 和 27.43%,说明随施硫量的增加,土壤电导率有加大的趋势.在 Urea 处理基础上,施用等量于包膜硫的硫磺后,土壤电导率增加 11.67%(图 2). 第 2 茬盆栽结束后,各处理土壤电导率大小顺序与第 1 茬相似,其顺序为 SCU + 2S > Urea + S > SCU + S > SCU > Urea, 仍然是施用硫磺处理土壤电导率较高,尿素处理土壤电导率最低.由此可见,在石灰性土壤上施用硫磺及涂硫尿素均会增加土壤电导率,这意味着土壤盐害加重,不利于植物根系生长.除施用涂硫尿素外,其它施硫处理

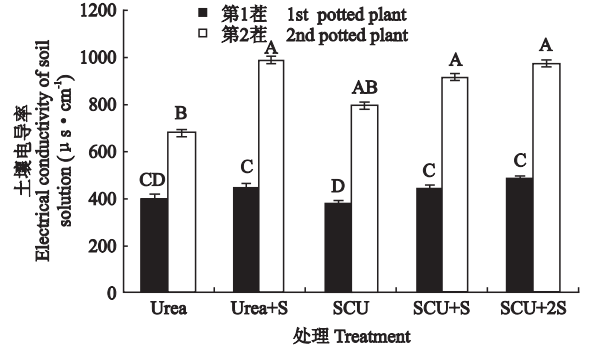


图 2 不同施肥处理土壤的电导率

Fig. 2 Electrical conductivity of soil solution in different fertilization treatments.

与尿素处理相比,其差异均显著($P < 0.05$).

各处理第 2 茬结束后与第 1 茬结束后相比,土壤电导率都有显著的增加,可见栽培过程(包括施肥及作物生理活动等)会增加石灰性土壤盐害发生的可能性.这佐证了连作障碍与土壤盐基离子增多的相关性.

3.3 控释肥硫膜对土壤交换性阳离子含量的影响

交换性阳离子含量及其组成是石灰性土壤非常重要的化学指标.结果表明,不同试验处理对土壤交换性镁和交换性钙的影响不显著(表 3),而对交换性钾、钠的影响较大.第 1 茬、第 2 茬盆栽结束后,土壤中交换性 K^+ 含量在不同处理间的高低顺序均为 Urea < Urea + S < SCU < SCU + S < SCU + 2S, 表明施硫增加了土壤交换性钾含量.与尿素处理相比, Urea + S 处理土壤交换性钾含量未达到显著水平,而其它处理均达到显著水平($P < 0.05$).交换性 K^+ 在每个处理两茬间的差异均极显著,并在两茬间呈下降趋势.这既与钾肥的施用有关,也与土壤酸化、植物吸收等其它因素有关.

第 1 茬、第 2 茬盆栽结束后,土壤交换性 Na^+ 含量的高低顺序均为 Urea > Urea + S > SCU + 2S > SCU + S > SCU. 一般认为,尿素和硫磺引起的土壤酸化,增强土壤溶液的交换性能,从而会降低土壤交换性钠含量,但结果并非如此.与基础土样相比,尿素处理使交换性钠含量升高,在此基础上施加等量与硫磺膜的硫磺后,交换性钠含量下降;在 SCU 处理基础上,随施入硫的增加,竟会增加土壤交换性钠含量.其原因有待进一步分析和验证.

第 1 茬、第 2 茬盆栽结束后,土壤阳离子交换量的高低顺序分别为: Urea > SCU + S > SCU + 2S > SCU > Urea + S 和 Urea > Urea + S > SCU + 2S > SCU

表3 不同施肥处理土壤的交换性阳离子含量

Tab.3 Exchangeable cation contents of soil in different fertilization treatments

处理代号 Treatment code	交换性钾 Exch. -K (mmol · kg ⁻¹)	交换性钠 Exch. -Na (mmol · kg ⁻¹)	交换性钙 Exch. -Ca (mmol · kg ⁻¹ /2 Ca)	交换性镁 Exch. -Mg (mmol · kg ⁻¹ /2 Mg)	阳离子交换量 CEC (mmol · kg ⁻¹)	碱化度 Alkalinization degree (%)
第一茬 1st potted plant	Urea 7.43D	53.49A	74.33A	16.98A	243.54A	22.0ABCD
	Urea + S 7.93CD	48.56BC	64.53ABC	15.88A	217.32BC	22.4ABC
	SCU 8.43C	43.45E	70.97ABC	16.74A	227.3ABC	19.1D
	SCU + S 9.84B	45.67DE	73.19AB	17.64A	237.17AB	19.3CD
	SCU + 2S 11.45A	47.58BCD	70.92ABC	17.14A	235.16AB	20.2ABCD
第二茬 2cd potted plant	Urea 5.13H	49.98B	63.71ABC	16.50A	215.52BC	23.2A
	Urea + S 5.38GH	47.95BCD	63.35BC	16.33A	212.70BC	22.5AB
	SCU 5.85G	39.50F	61.62C	17.35A	203.28C	19.5BCD
	SCU + S 6.52FE	43.09E	60.13C	16.45A	202.77C	21.8ABCD
	SCU + 2S 6.78E	45.55DE	63.04BC	16.47A	211.34BC	21.6ABCD
基础土样 Soil before experiment	6.01FG	47.07CD	64.35ABC	15.47A	212.71BC	22.1ABCD

同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

> SCU + S. 由此可见, 硫包膜尿素处理土壤阳离子交换量较低, 而尿素处理土壤交换性阳离子含量最高. 与基础土壤相比, 所有施硫处理对土壤阳离子交换量的影响均不显著.

试验用土壤的碱化度为 22.1%, 所有处理结束后的土壤碱化度介于 19% ~ 22.5%. 试验表明, 所有施硫处理与基础土样相比土壤碱化度差异未达到显著水平.

从上述分析可以看出, SCU 处理短期内具有一定的安全性, 甚至比尿素处理更容易保持土壤原有的状态, 继续施加硫磺, 尽管会影响土壤交换性阳离子含量, 但短期内也未达到差异显著水平.

3.4 涂硫尿素及硫磺对土壤水溶性阴离子含量的影响

第 1 茬盆栽结束后, 各处理土壤碱度 (CO_3^{2-} 与 HCO_3^- 含量) 大小顺序为 $\text{SCU} > \text{Urea} > \text{Urea} + \text{S} > \text{SCU} + \text{S} > \text{SCU} + 2\text{S}$. 在 SCU 基础上, 施加 1 倍及 2 倍于硫膜的硫磺后, 土壤碱度分别下降 11.9% 和 19.6%, 表明施用硫磺会降低土壤碱度. 第 2 茬盆栽结束后, 各处理土壤碱度都比第 1 茬有显著的降低. 由此可见, 人为的种植过程有利于碱性土壤碱度的降低, 加速土壤矿化.

各处理土壤 Cl^- 含量在两茬之间差异显著, 但除浇水外很难发现 Cl^- 累积的来源. 每茬各处理间土壤 Cl^- 含量差异均不显著. 加入硫成分后, 土壤水溶性 SO_4^{2-} 含量变化明显, 其测定结果很好地体现出施硫带来的影响, 同时也表明硫磺在土壤中被氧化后主要转化为 SO_4^{2-} .

正是由于 SO_4^{2-} 和 Cl^- 在不同处理间差异较大, 造成了不同处理间可溶性阴离子总量的差异. 第 1

茬和第 2 茬盆栽结束后, 各处理间阴离子总量的大小顺序分别为 $\text{SCU} + 2\text{S} > \text{SCU} + \text{S} > \text{Urea} + \text{S} > \text{Urea} > \text{SCU}$ 和 $\text{SCU} + 2\text{S} > \text{SCU} + \text{S} > \text{Urea} + \text{S} > \text{SCU} > \text{Urea}$. 其区别在于第 2 茬油菜盆栽结束后, Urea 处理的土壤阴离子含量最低, 而第 1 茬盆栽结束时, SCU 处理土壤阴离子含量最低. 这说明随着硫膜在土壤中的氧化, 硫膜对土壤阴离子含量的影响与硫磺相似, 从而加剧土壤阴离子的累积.

表4 不同施肥处理土壤水溶性阴离子含量

Tab.4 Water-soluble anion contents of soil in different fertilization treatments (mmol · kg⁻¹)

处理代号 Treatment code	水溶性阴离子含量 Water-soluble anion contents of soil			
	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	阴离子总量 Anion gross
第一茬 1st potted plant	Urea 5.85AB	11.14CD	4.45F	25.89E
	Urea + S 5.54AB	10.74CD	6.48E	29.24DE
	SCU 5.97A	10.86CD	4.38F	25.59E
	SCU + S 5.46AB	10.08CD	6.82E	29.36DE
	SCU + 2S 4.80B	9.24D	8.49D	31.02D
第二茬 2cd potted plant	Urea 3.65C	12.26ABC	2.78F	21.47F
	Urea + S 3.51C	21.30A	14.52B	53.58B
	SCU 3.65C	20.22A	10.19C	44.25C
	SCU + S 3.48C	20.50A	15.79B	55.48B
	SCU + 2S 3.44C	17.72AB	20.70A	62.56A

阴离子总量 Anion gross = $\text{C-HCO}_3^- + \text{C-Cl}^- + 2\text{C-SO}_4^{2-}$

3.5 涂硫尿素及硫磺对油菜生物量的影响

盆栽土壤化学性状的改变会影响植物生长, 反之, 植物的生长也反映土壤化学性状的优劣. 由图 3 可见, 各处理尽管施用的 N、P、K 量一样, 但其油菜鲜重却有较大的差异.

在第 1 茬盆栽中, 油菜鲜重的高低顺序为 $\text{Urea} + \text{S} > \text{Urea} > \text{SCU} > \text{SCU} + \text{S} > \text{SCU} + 2\text{S}$. 在尿素处理

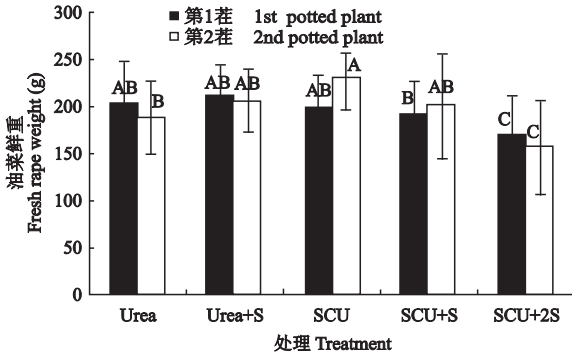


图3 不同施肥处理油菜产量

Fig.3 Rape yield in different fertilization treatments.

的基础上,施加单倍硫膜的硫磺后,油菜生物量增加,而在涂硫尿素处理的基础上,继续施加硫磺,会降低油菜生物量,并随加入量的增加,油菜鲜重降低趋势加剧,SCU+2S处理与其它处理之间差异显著($P < 0.05$),表明施硫量太多,显著影响油菜生长。

第2茬盆栽中,油菜鲜重大小顺序为 SCU > Urea + S > SCU + S > Urea > SCU + 2S,同样表明施硫可提高油菜生物量,但如果硫施用过量(SCU + 2S),也会降低油菜生物量。

3.6 各指标间的相关性

由表5可以看出,土壤pH除与水溶性 HCO_3^- 指标未表现出显著相关性外,与其它指标都具有显

著相关性,并与EC、水溶性 SO_4^{2-} 、交换性 Ca^{2+} 、交换性 Na^+ 、交换性 K^+ 等指标相关极显著。由此可见,土壤pH是石灰性土壤中一项非常重要的化学指标,它直接影响或反映了土壤的其它化学性状。土壤pH与水溶性 HCO_3^- 指标相关不显著,但并不说明它对土壤水溶性 HCO_3^- 含量没有影响,而说明试验所用土壤具有保持 HCO_3^- 含量相对稳定的缓冲力。土壤 H^+ 含量增加,会使部分 HCO_3^- 分解为 H_2O 和 CO_2 ,同时也会使土壤 CO_3^{2-} 转化成 HCO_3^- ,从而维系土壤 HCO_3^- 的相对稳定。土壤 CO_3^{2-} 不表现酸性,而土壤 HCO_3^- 又具有相对稳定性,这是各处理间土壤碱度差异不显著的主要原因。

土壤电导率表示土壤盐离子含量的高低,它与油菜产量呈显著负相关,表明石灰性土壤中盐离子增加,会对植物生长带来不利作用;土壤交换性 Ca^{2+} 、 K^+ 、水溶性 SO_4^{2-} 及交换性 Mg^{2+} 、 Na^+ 、水溶性 HCO_3^- 等指标都与土壤电导率具有显著相关性。

由于试验处理间施硫量不同,所以土壤水溶性 SO_4^{2-} 含量差别较大,而土壤水溶性 SO_4^{2-} 指标是影响土壤交换性Ca、Mg、Na含量变化的主要原因,它们之间相关极显著。土壤水溶性 SO_4^{2-} 含量也显著影响油菜产量。

表5 各指标间的相关分析

Tab.5 Analyzing of correlation among all indexes

	pH	EC	S- Cl^-	S- HCO_3^-	S- SO_4^{2-}	E- K^+	E- Na^+	E- Ca^{2+}	E- Mg^{2+}	鲜产量 Rape yield
pH	1.000									
EC	-0.553**	1.000		-						
S- Cl^-	0.336*	-0.099	1.000		-					
S- HCO_3^-	0.128	-0.284*	-0.371**	1.000						
S- SO_4^{2-}	-0.452**	0.290*	-0.233	0.079	1.000					
E- K^+	0.372**	0.268*	-0.377**	0.180	0.159	1.000				
E- Na^+	0.468**	-0.305*	0.345*	-0.169	-0.466**	-0.111	1.000			
E- Ca^{2+}	-0.527**	0.369**	-0.117	-0.005	0.556**	0.317*	-0.339*	1.000		
E- Mg^{2+}	0.283*	-0.366**	0.024	0.120	-0.399**	-0.024	0.190	-0.570**	1.000	
鲜产量 Rape yield	-0.217*	-0.252*	-0.122	0.027	0.431**	0.022	-0.307*	0.410**	-0.669**	1.000

4 结 论

1)涂硫尿素及硫膜能降低石灰性土壤pH,但在试验期内涂硫尿素与尿素处理对土壤pH的影响差异不显著,但施用硫磺后,其差异达到显著水平。

2)与尿素处理相比,除涂硫尿素处理没有显著改变土壤电导率外,其它施硫处理都造成土壤电导率显著增加。这会加剧石灰性土壤盐害发生的可能。

3)施硫会使土壤交换性 Na^+ 、 K^+ 含量升高,对土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量影响较小。施硫未能显著改变土壤阳离子交换量和土壤碱化度。

4)尽管施硫没有显著影响土壤水溶性 HCO_3^- 含量,但会加剧土壤阴离子总量的累积。主要是在增加土壤水溶性 SO_4^{2-} 含量的同时,使土壤 Cl^- 含量显著增加。硫膜对土壤水溶性阴离子含量的影响与硫磺相似。

5)与尿素处理相比,施硫在试验中并未表现出增产效应,施硫较多的处理显著降低油菜生物量。

参考文献

- [1] Agro-Chemistry Specialty Committee of Soil Science Society in China (中国土壤学会农业化学专业委员会). 1983. Soil Agro-Chemistry General Analysis Methods. Beijing : Science Press. (in Chinese)
- [2] Banerjee MR , Chapman SJ. 1996. The significance of microbial biomass sulphur in soil. *Biology and Fertility of Soils* , **22**(1) : 116-125
- [3] Cui YS , Wang QR , Dong YT , *et al.* 2004. Enhanced uptake of soil Pb and Zn by Indian mustard and winter wheat following combined soil application of elemental sulphur and EDTA. *Plant and Soil* , **261** : 181-188
- [4] Eriksen J , Mortensen JV. 2002. Effects of timing of sulphur application on yield , S-uptake and quality of barley. *Plant and Soil* , **242**(2) : 283-289
- [5] Lukina N , Nikonov V. 1995. Acidity of podzolic soils subjected to sulphur pollution near a Cu-Ni smelter at the Kola Peninsula. *Water , Air , and Soil Pollution* , **85** : 1057-1062
- [6] Modaihsh AS , Al-Mustafa WA , Metwally AL. 1989. Effect of elemental sulphur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. *Plant and Soil* , **116**(1) : 95-101
- [7] Nommik H , Vahtras K. 1982. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils// Stevenson FJ. Nitrogen in Agricultural Soils. Madison , WI : American Society of Agronomy , Inc : 130
- [8] Raigón MD , Primo Yúfera E , Maquieira A , *et al.* 1999. Available N in the root area for citrus orchards fertilized with sulphur-coated-urea and ammonium nitrosulphate. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* , **55**(3) : 187-196
- [9] Rao DLN. 1987. Slow-release urea fertilizers : Effect on floodwater chemistry , ammonia volatilization and rice growth in an alkali soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* , **13**(3) : 209-221
- [10] Rao PSS , Karunasagar I , Otta SK , *et al.* 2000. Incidence of bacteria involved in nitrogen and sulphur cycles in tropical shrimp culture ponds. *Aquaculture International* , **8**(5) : 463-472
- [11] Schaaf W , Wecker B , Pan T. 2004. Changes in top soil properties of forest soils in north-eastern Germany due to long-term element accumulation. *Plant and Soil* , **264** : 85-95
- [12] Sharma SN , Prasad R. 1980. Effect of rates of nitrogen and relative efficiency of sulphur-coated urea and nitrapyrin-treated urea in dry matter production and nitrogen uptake by rice. *Plant and Soil* , **55**(3) : 389-396
- [13] Slaton NA , Norman RJ , Gilmour JT. 2001. Oxidation rates of commercial elemental sulfur products applied to an alkaline silt loam from Arkansas. *Soil Science Society of America Journal* , **65** : 239-243
- [14] Spratt JrHG. 1998. Organic sulfur and the retention of nutrient cations in forest surface soils. *Water , Air and Soil Pollution* , **105** : 305-317
- [15] State Environmental Protection Administration of China (国家环保局). 1990. The Check and Analysis Methods on Air and Exhaust Gas. Beijing : China Environmental Science Press : 298-300 (in Chinese)
- [16] Tichy R , Fajtl J , Kužel S , *et al.* 1996. Use of elemental sulphur to enhance a cadmium solubilization and its vegetative removal from contaminated soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* , **46**(3) : 249-255
- [17] Xing Z (邢竹) , Guo J-H (郭建华) , Yan Z-B (阎宗彪). 1997. Behaviors of coated-urea in calcareous soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报) , **3**(1) : 16-23 (in Chinese)
- [18] Zhang C-A (张昌爱) , Zhang M (张民) , Chen L-X (陈凌霄). 2006. Effects of sulfur-coating from sulfur-coated fertilizer on acidic brown soil leaching characteristics. *Journal of Soil and Water Conservation* , **20**(3) : 21-24 (in Chinese)
- [19] Zhao B-Q (赵秉强) , Zhang F-S (张福锁) , Liao Z-W (廖宗文) , *et al.* 2004. Research on development strategies of fertilizer in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报) , **10**(5) : 536-545 (in Chinese)
- [20] Zhao FJ , Wood AP , McGrath SP. 1999. Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* , **212**(2) : 207-217
- [21] Zhou W (周卫) , Lin B (林葆). 1997. The progress in study on the behavior of sulphur in soil and plants. *Soils and Fertilizers* (土壤肥料) , (5) : 8-11 (in Chinese)

作者简介 张昌爱,男,1971年生,博士研究生.主要从事土壤生态及土壤健康研究. E-mail : zca2006@sina.com.

责任编辑 梁仁禄