

# 长期施氮磷化肥对不同种植体系土壤有效硫累积研究

危 锋<sup>1,2</sup>, 郝明德<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 以 22 a 定位试验为基础, 在黄土高原旱地研究了长期施用氮磷化肥, 对不同种植体系土壤有效硫在剖面上分布与累积状况。结果表明, 在 60 - 80 cm 土层各处理出现第一个累积峰, 累积峰值为: 玉米 - 小麦 (2 a) + 糜子轮作 27.07 mg/kg, 豌豆 - 小麦 (2 a) + 糜子轮作 25.42 mg/kg, 小麦 (2 a) + 糜子 - 玉米轮作 24.23 mg/kg, 豌豆 - 小麦 (2 a) + 玉米轮作 22.61 mg/kg, 小麦连作 16.56 mg/kg, 红豆草 - 小麦 (2 a) 轮作 15.14 mg/kg; 在 120 - 180 cm 土层又出现有效硫的第二个累积峰, 累积峰值为: 小麦 (2 a) + 糜子 - 玉米轮作 34.20 mg/kg, 豌豆 - 小麦 (2 a) + 糜子轮作 32.16 mg/kg, 豌豆 - 小麦 (2 a) + 玉米轮作 31.00 mg/kg, 红豆草 - 小麦 (2 a) 轮作 30.32 mg/kg, 玉米 - 小麦 (2 a) + 糜子轮作 29.16 mg/kg, 小麦连作 26.22 mg/kg。0 - 200 cm 土层有效硫总累积量玉米 - 小麦 + 糜子轮作高达 559.64 kg/hm<sup>2</sup>, 其次是小麦 + 糜子 - 玉米轮作为 538.88 kg/hm<sup>2</sup>, 豌豆 - 小麦 + 糜子轮作为 514.34 kg/hm<sup>2</sup>, 豌豆 - 小麦 + 玉米轮作为 489.58 kg/hm<sup>2</sup>, 小麦连作为 432.75 kg/hm<sup>2</sup>, 红豆草 - 小麦轮作最小为 423.68 kg/hm<sup>2</sup>。长期施用磷肥是不同种植体系有效硫在土壤中发生累积的主要因素, 有效硫在土壤剖面上有向深层迁移的趋势。不同作物对硫的吸收利用差异和不同种植方式对有效硫的累积与分布产生影响。

**关键词:** 长期试验; 氮磷化肥; 种植体系; 有效硫累积

**中图分类号:** S143; S153.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2008)05-0110-05

## Available Sulfur Accumulation in Soil Profile in a Long-term NP Chemical Fertilizer Experiment of the Different Cropping Systems

WEI Feng<sup>1,2</sup>, HAO Ming-de<sup>1,\*</sup>

(1. Institute of Soil & Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Graduate School of CAS, Beijing 100039)

**Abstract:** Based on the long-time location experiments, accumulation and distribution of available sulfur in soil of different cropping systems under the condition of 22 years' continuous application of NP chemical fertilizer in Loess Plateau were studied. The results showed that there are two peaks of available sulfur in soil profiles. The first peak occurred in 60 - 80 cm soil depth with the values of 27.07 mg/kg, 25.42 mg/kg, 24.23 mg/kg, 22.61 mg/kg, 16.56 mg/kg and 15.14 mg/kg in maize-wheat (2 a) + millet rotation, pea-wheat (2 a) + millet rotation, wheat (2 a) + millet-maize rotation, pea-wheat (2 a) + maize rotation, wheat succession and sainfoin-wheat (2 a) rotation respectively. The second peak occurred in 120 - 180 cm soil depth and the values in maize-wheat (2 a) + millet rotation, pea-wheat (2 a) + millet rotation, pea-wheat (2 a) + maize rotation, sainfoin-wheat (2 a) rotation, pea-wheat (2 a) + maize rotation and wheat succession were 34.20 mg/kg, 32.16 mg/kg, 31.00 mg/kg, 30.32 mg/kg, 29.16 mg/kg and 26.22 mg/kg, respectively, which were higher than the first available sulfur peak value. The accumulation of available sulfur in soil profiles (0 - 200 cm) in maize-wheat (2 a) + millet rotation, wheat (2 a) + millet-maize rotation, pea-wheat (2 a) + millet rotation, pea-wheat (2 a) + maize rotation, wheat succession and sainfoin-wheat (2 a) rotation were 559.64 kg/hm<sup>2</sup>, 538.88 kg/hm<sup>2</sup>, 514.34 kg/hm<sup>2</sup>, 489.58 kg/hm<sup>2</sup>, 432.75 kg/hm<sup>2</sup> and 423.68 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The results also showed that long-time application of P fertilizer was the principal factor influencing the distribution of available sulfur in soil profile at different cropping systems. Additionally, available sulfur transported to deep soils in this study. The results suggest that the difference of sulfur uptake and utilization caused by different

收稿日期: 2008-05-28      \*通讯作者 E-mail: haodong @public. xa. sn. cn

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要项目 (KZCX2 - YW - 424 - 3); 国家科技支撑计划 (2006BAD05B07); 中国科学院重大项目 (KSCX1 - YW - 09 - 07); 中国科学院农业项目 (KSCX1 - YW - N - 15 - 04) 资助

作者简介: 危锋 (1978 - ), 男, 陕西汉中, 博士研究生, 主要从事土壤养分循环与旱地农业方面的研究。E-mail: weifeng6688 @126.com

crops and cropping styles had effected accumulation and distribution of available sulfur in soil profiles.

**Key words:** long-term experiment; NP chemical fertilizer; cropping systems; available sulfur accumulation

硫是植物第四位重要的营养元素<sup>[1-2]</sup>,在植物生理及营养方面起着其它元素不可替代的作用。随着复种指数提高,农作物产量增加,含硫少的高浓度复合肥的大量施用,以及有机肥的施用减少,硫的携出量增加、归还量减少,导致土壤含硫量下降<sup>[3-4]</sup>。土壤缺硫导致作物减产,品质下降<sup>[4]</sup>。施硫肥对多种作物具有增产效应,改善品质和提高水分利用率等<sup>[5]</sup>。但这些研究大多集中在短期施用硫肥的土壤及作物效应方面。

为深入了解硫肥施用后在土壤中的变化状况,邹长明等<sup>[6-8]</sup>研究了连续 24 a 施用含硫化肥后红壤稻田硫含量变化状况。林葆等<sup>[9]</sup>以在潮土进行 20 a 的长期肥料试验,研究了长期施肥对土壤硫组分与硫素平衡状况。樊军等<sup>[10-11]</sup>对在黄土高原旱地黑垆土进行了 15 a 的长期定位试验小麦连作土壤剖面有效硫的分布与累积进行了研究。而关于不同种植体系下土壤硫素变化研究较少,本文利用长期定位试验,在黄土高原旱地 22 a 连续氮、磷化肥配施条件下对不同种植体系土壤剖面有效硫累积与分布情况进行研究,探讨不同作物以及不同种植体系下土壤剖面有效硫的累积与分布特征。以期深入了解旱地土壤硫素的变化规律,为指导平衡施肥、减轻农业面源污染、维护农田生态系统平衡提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于黄土高原中南部陕西省长武县十里铺村无灌溉条件的塬面旱地上,属暖温带半湿润大陆型季风气候,试验地海拔 1 200 m,试验区年平均气温 9.1℃,多年平均降水量 578.5 mm,无霜期 171 d, 0℃ 活动积温 3 866℃, 10℃ 活动积温 3 029℃,热量供作物一年一熟有余。农业生产全部依赖天然降水,属典型的旱作农业区。试验地土壤为粘化黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,通透性好。耕层土壤(1984 年秋季布置试验时土样分析值)有机质含量 10.5 g/kg,全氮 0.80 g/kg,速效氮 37.00 mg/kg,全磷 0.659 g/kg,速效磷 3.0 mg/kg,速效钾 129.3 mg/kg, CaCO<sub>3</sub> 108.4 mg/kg, pH 8.3。土壤肥力水平较低。试验地的地貌特征、土壤养分含量在黄土高原同类地区具有典型代表性。

### 1.2 实验设计

表 1 供试作物品种及其生育期

长期轮作培肥试验开始于	作物类型	品种名称	播种期	收获期
1984 年,共 36 个处理,108 个小区,小区面积 66.67 m <sup>2</sup> ,3 次重复,随机排列。本研究选取其中 6 个处理:即,处理 1:小麦连作,处理 2:豌豆-小麦(2 a)	小麦	秦麦 4 号(1984 ~ 1985),长武 131 (1986 ~ 1995),长武 134(1996)	9 月中旬	次年 6 月下旬
	玉米	中单二号或丹玉 13	4 月中旬	9 月中旬
	糜子	当地农家品种	7 月上旬	10 月上旬
	豌豆	白豌豆	3 月中旬	7 月上旬
	红豆草	宁夏固原	7-8 月	次年 7 月与 9 月各割一次

+ 糜子轮作,处理 3:红豆草-小麦(2 a)轮作,处理 4:豌豆-小麦(2 a)+玉米轮作,处理 5:玉米-小麦(2 a)+糜子轮作,处理 6:小麦(2 a)+糜子-玉米轮作,各处理施肥量(NP)相同,N 120 kg/(hm<sup>2</sup>·a),P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。氮肥用尿素,磷肥用过磷酸钙中含有硫酸钙(含硫 12%)。所有肥料在播种时一次性施入,定期进行除草和松土,田间管理同大田。供试作物品种及其生育期见表 1。

### 1.3 样品采集与分析

2006 年 9 月采集 0-200 cm 分层土样(每 20 cm 为一层),风干后磨碎过 1 mm 筛,用 0.15%CaCl<sub>2</sub>(25℃,1 h,液土比 5:1)浸提,BaSO<sub>4</sub> 比浊法测定有效硫<sup>[12]</sup>。数据采用 SAS 软件中相应程序进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤中有效硫的分布

本试验中的硫肥是随磷肥施入土壤的,施入的硫除部分被作物吸收利用外,其余残留于土壤中。硫主要以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 形态被作物吸收利用,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 带负电荷,在土壤溶液中随水运动,易于淋失<sup>[13]</sup>。各处理耕层土壤(0-20 cm)有效硫含量顺序为:小麦连作 11.24 mg/kg、豌豆-小麦(2 a)+糜子轮作 10.08 mg/kg、小麦(2 a)+糜子-玉米轮作 9.43 mg/kg、玉米-小麦(2 a)+糜子轮作 8.45 mg/kg、豌豆-小麦(2 a)+玉米轮作 8.11 mg/kg、红豆草-小麦(2 a)轮作 7.84 mg/kg。产生其结果的原因可能是不同作物对硫的吸收利用不同<sup>[14]</sup>,作物吸收使耕层土壤有效硫含量随着作物生育期的变化逐渐减少<sup>[15]</sup>。残留于土壤中的有效硫,部分可能被下季作物吸收利用,部分可能被化学固定形成无机硫酸盐,也可能被生物固定形成有机硫;还有一部分硫可能已经被淋溶至下层土壤。

经过 22 a 的连续施肥之后,硫素随施肥进入土壤,6 个种植体系土壤剖面均出现了有效硫不同程度的累积峰,同时各种种植体系剖面有效硫及其累积峰的剖面深度均存在差异(图 1)。对比各种种植体系剖面有效硫的分布可以发现,各处理有效硫在土壤剖面上出现双累积峰。在 60 - 80 cm 土层出现有效硫的第一个累积峰,累积峰值顺序:玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作为 27.07 mg/kg,豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作为 25.42 mg/kg,小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作为 24.24 mg/kg,豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作为 22.61 mg/kg,小麦连作为 24.23 mg/kg,红豆草 - 小麦(2 a) 轮作为 15.14 mg/kg。在 140 - 180 cm 土层各处理又出现有效硫的第二个累积峰,玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作的累积峰在 120 - 140 cm 土层,累积峰值为 29.16 mg/kg。小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作,豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作,小麦连作的累积峰在 140 - 160 cm 土层,累积峰值分别为 34.20 mg/kg,31.00 mg/kg,26.22 mg/kg。豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作和红豆草 - 小麦(2 a) 轮作的累积峰最深在 160 - 180 cm 土层,累积峰值分别为 32.16 mg/kg,30.32 mg/kg。第二个累积峰值顺序为:小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作 > 豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作 > 豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作 > 红豆草 - 小麦(2 a) 轮作 > 玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作 > 小麦连作。

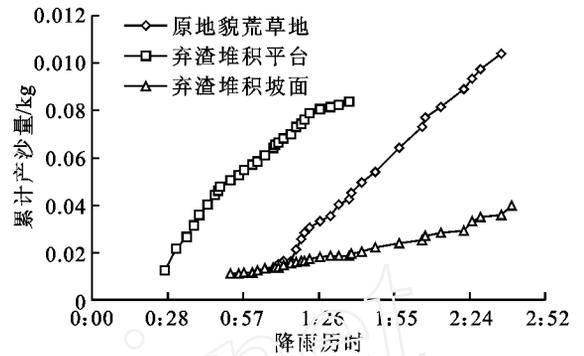


图 1 不同种植体系 NP 肥处理土壤剖面有效硫的分布

硫从表层向下层土体的累积取决于土壤溶液中  $SO_4^{2-}$  浓度、土壤水活动状况、土壤对其的吸附等因素<sup>[16]</sup>, 关于本区土壤剖面有效硫的淋溶累积影响因素已报道<sup>[10]</sup>。长期施入硫肥,会使土壤剖面有效硫发生淋溶累积现象,有效硫在土壤剖面出现了两个累积峰,且第二累积峰值均大于第一累积峰值,有效硫在土壤剖面上有向深层迁移的趋势。

2.2 土壤剖面有效硫的长期累积

为了研究长期施肥条件下不同种植体系土壤剖面累积的有效硫量,采用公式:  $A_s = p \times h \times s$  将土壤剖面  $SO_4^{2-}$  浓度换算为累积的硫量。式中  $A_s$  为土层中有效硫的累积量( $kg/hm^2$ );  $p$  为土壤容重( $g/cm^3$ );  $h$  为土层深度(cm);  $s$  为有效硫浓度( $mg/kg$ )。不同种植体系在不同土壤剖面深度有效硫累积量存在差异(表 2)。就不同种植体系在 0 - 200 cm 土壤剖面有效硫的长期累积的总量而言,玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作最大为  $559.64 kg/hm^2$ , 其次为小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作  $538.88 kg/hm^2$ , 豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作  $514.34 kg/hm^2$ , 豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作  $489.58 kg/hm^2$ , 小麦连作  $432.75 kg/hm^2$ , 红豆草 - 小麦(2 a) 轮作最小为  $423.68 kg/hm^2$ 。

表 2 不同种植体系长期施 NP 肥土壤剖面有效硫的累积量

kg/hm<sup>2</sup>

土层/cm	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6
0 - 20	29.24 a	26.22 ab	20.38 b	21.09 ab	21.97 ab	24.51 ab
20 - 40	28.04 bc	35.37 a	19.74 d	16.33 d	31.98 ab	22.84 cd
40 - 60	30.70 cd	47.41 a	26.91 d	32.16 cd	43.55 ab	36.15 bc
60 - 80	43.06 b	66.10 a	39.36 b	58.78 a	70.39 a	63.01 a
80 - 100	36.21 cd	47.09 bc	32.35 d	40.33 cd	62.35 a	53.94 ab
100 - 120	41.18 ab	38.57 ab	26.55 b	46.44 a	53.81 a	48.99 a
120 - 140	54.35 bc	59.03 bc	49.17 c	70.26 ab	75.82 a	67.57 ab
140 - 160	68.19 bc	61.38 c	71.49 bc	80.61 ab	65.34 c	88.94 a
160 - 180	56.20 c	83.62 a	78.85 a	58.04 c	72.49 ab	62.67 bc
180 - 200	45.59 c	49.55 bc	58.87 abc	65.54 a	61.95 ab	70.26 a
合计	432.75 b	514.34 a	423.68 b	489.58 ab	559.64 a	538.88 a

注: 同一行中不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作,玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作,小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作,豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作处理间差异不显著;小麦连作,红豆草 - 小麦(2 a) 轮作,豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作处理间差异不显著;豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作,玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作,小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作处理与小麦连作,红豆草 - 小麦(2 a) 轮作处理间差异显著。

轮作体系中有玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作,小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作,豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作,豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作 4 个处理 0 - 200 cm 土壤有效硫的累积量高于小麦连作,只有红豆草 - 小麦(2 a)

轮作处理低于小麦连作。说明轮作体系有效硫淋失的概率大于单一作物连作,其原因可能是不同作物生长情况和对硫的吸收利用存在差别。轮作体系中不同作物的倒茬可能对有效硫的淋失与累积产生影响。

同为粮饲轮作的小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作与玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作种植物完全相同,但作物种植次序不一致,其有效硫在土壤剖面分布和累积量也不一样,土壤有效硫的总累积量小麦(2 a) + 糜子 - 玉米轮作大于玉米 - 小麦(2 a) + 糜子轮作。说明在轮作中即使是相同作物,但作物种植次序不一致也会引起有效硫在土壤剖面上的分布与累积的差异。

同为粮豆轮作的豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作与豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作,两体系中仅有一种作物不同,其有效硫在土壤剖面分布和累积量也不一样,土壤有效硫的总累积量豌豆 - 小麦(2 a) + 糜子轮作大于豌豆 - 小麦(2 a) + 玉米轮作。说明在同种轮作中种植不同的作物,也会引起有效硫在土壤剖面分布和累积量差异,其原因可能是不同作物生长情况和对硫的吸收利用存在差别。

长期施含硫肥料是造成硫在土体中累积的主要因素,经过 22 a 连续施肥,各种种植体系有效硫在土壤剖面不同层次累积量以及累积总量出现差异。由于试验的气候条件、土壤质地、田间管理等均一致,其原因可能是不同种植作物生长状况和吸收利用硫肥存在差异,此外不同作物根系吸收富集底层硫差异可能是导致土壤硫累积差异原因之一,不同种植方式也会对剖面中有效硫的累积产生影响。

### 3 讨论与结论

土壤中硫的淋溶累积与迁移,受土壤、气候、施肥以及种植作物等多种因素影响,在许多情况下,各种因素之间的相互作用只能在数 10 年之后才被正确认识<sup>[17]</sup>。邹长明等<sup>[7]</sup>研究了红壤稻田连续 24 a 施用含硫化肥后,在 0 - 100 cm 剖面中, $\text{SO}_4^{2-}$  在表土层和底土层中有明显的累积, $\text{SO}_4^{2-}$  - S 累积的峰值出现在 0 - 20 cm 和 60 - 80 cm 土层。樊军等<sup>[10-11]</sup>研究发现,在黄土高原旱地经过 15 a 连续施用含硫肥料,对土壤剖面有效硫含量影响明显;有效硫在土壤剖面上只有一个累积峰,累积峰出现在 80 - 120 cm 土层之间。本研究发现与前人研究结果不一致,经过 22 年连续施用 NP 化肥,不同种植体系有效硫在土壤剖面上出现双累积峰。在 60 - 80 cm 土层出现第一个累积峰,在 140 - 180 cm 土层又出现有效硫的第二个累积峰,且第二累积峰值均大于第一累积峰值。有效硫在土壤剖面上的分布出现这种变化的原因可能有以下几方面:每年硫素定期施入土壤中,除过被作物吸收利用外,其余的残留在土壤中,为硫素的淋溶与迁移提供来源;本区土壤质地疏松,通透性好,为硫素在土壤剖面中迁移提供有利条件;本区降雨集中且多以暴雨形式出现, $\text{SO}_4^{2-}$  易随水运动,为硫素在土壤剖面中淋洗迁移提供介质。连年硫的投入,使硫素在上层土壤形成新的累积峰,以前形成的累积峰会继续向深层推移。有效硫在土壤剖面形成 2 个累积峰,且第二累积峰值均大于第一累积峰值,说明有效硫在土壤剖面上有向深层迁移的趋势。硫在土壤剖面中的淋溶累积是一个长期动态变化过程,硫在土壤剖面中的运移过程应与土壤水分运动结合起来做进一步研究。

施肥对促进黄土高原旱地粮食生产,提高水分利用效率,维持土地生产力做出重大贡献。然而不合理施肥也会对土壤生态环境造成负面影响,关于本区长期施肥造成硝态氮在土壤中累积已有系列研究<sup>[18-19]</sup>。邹长明等<sup>[6-8]</sup>研究了红壤稻田连续 24 a 施用含硫化肥后, $\text{SO}_4^{2-}$  - S 在土壤和植株中都有明显的累积;导致水稻 Mg, Fe, B, Mo 等元素的吸收量显著减少;造成土壤酸化,改变土壤化学性质。张昌爱等<sup>[21]</sup>研究发现,施硫能显著降低土壤 pH、增加土壤电导率,施硫会使土壤交换性  $\text{Na}^+$  和交换性  $\text{K}^+$  含量升高,并加剧土壤水溶性阴离子总量的累积。可见施硫会使土壤化学性质发生改变,并对作物产生影响。本实验连续施用含硫肥料 22 a, $\text{SO}_4^{2-}$  在土壤中大量累积,由此对土壤化学性质产生的影响以及作物效应还应做进一步研究。

刘宝存等<sup>[21]</sup>研究发现在轮作体系中,不同作物生育期内有效硫在土壤剖面上分布不同。前茬作物施肥所淋失与累积的硫素,对后茬作物硫素的吸收利用、迁移累积应引起关注。刘益仁等<sup>[22]</sup>研究了稻 - 稻 - 油种植制硫肥效应,发现在施中、高量硫条件下,土壤硫素均有不同程度盈余。施用硫肥具有明显的后效,连续两年施用硫肥后,可以隔年或隔季不施。有效硫在土壤剖面上产生累积,表明长期硫的投入超过了作物的吸收利用量。为了避免  $\text{SO}_4^{2-}$  过多累积给土壤环境造成不良影响,在保证作物生长发育的条件下可减少或间隔施用含硫肥料,以提高硫肥利用率,减轻硫肥在土壤中的淋溶累积,保护土壤生态环境。

#### 参考文献:

- [1] 周卫,林葆. 土壤与植物中硫的行为研究进展[J]. 土壤肥料,1997(5):8-11.
- [2] 刘崇群. 中国南方土壤硫的状况和对硫肥的需求[J]. 磷肥与复肥,1995,3:14-18.

- [3] 刘崇群,曹淑卿,吴锡军. 中国农业硫的概述[C]// TSI, CSAIA, CSFI. 中国硫资源和硫肥需求的现状和展望国际学术讨论会论文集. 北京:中国科学技术出版社,1993:154-162.
- [4] 胡正义,徐成凯. 土壤中的硫与环境质量[M]// 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京:中国科学出版社,2002:283-307.
- [5] 刘崇群,曹淑卿,陈国安. 中国南方农业中的硫[J]. 土壤学报,1990,27(4):390-404.
- [6] 邹长明,高菊生,王伯仁. 长期施用含硫化肥对水稻土化学性质和吸收微量元素的影响[J]. 安徽技术师范学院学报,2004,18(1):019-025.
- [7] 邹长明,高菊生,王伯仁,等. 长期施用含硫化肥对水稻产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报,2006,37(1):103-106.
- [8] 邹长明,高菊生,王伯仁,等. 长期施用含氮和含硫肥料对土壤性质的影响[J]. 南京农业大学学报,2004,27(1):117-119.
- [9] 林葆,周卫,李书田,等. 长期施肥对潮土硫、钙和镁组分与平衡的影响[J]. 土壤通报,2001,32(3):126-128.
- [10] 樊军,郝明德. 旱地长期定位施肥土壤剖面中有效硫累积及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(1):86-90.
- [11] 樊军,郝明德. 长期不同施肥对土壤剖面中有效硫累积与分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,12(5):971-973.
- [12] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [13] 美国钾磷研究所主编,加拿大钾磷研究所北京办事处编译. 土壤肥力手册[M]. 北京:中国农业科技出版社,1992:62-64.
- [14] 王庆仁,崔岩山. 不同轮作制对农田生态系统中土壤硫攫取与归还途径的研究[J]. 应用生态学报,2003,14(6):935-940.
- [15] 崔岩山,王庆仁. 冬小麦不同生育期植株与土壤的硫素动态[J]. 生态学杂志,2002,21(2):5-8.
- [16] Farina M P W, Channon P. Acid-subsoil amelioration: Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties[J]. Soil Science Society of America journal, 1988,49:175-180.
- [17] 郝明德,来璐,王改玲,等. 黄土高原塬区旱地长期施肥对小麦产量的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1893-1896.
- [18] 樊军,郝明德,党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J]. 土壤与环境,2000,9(1):23-26.
- [19] 郭胜利,党廷辉,郝明德. 施肥对半干旱地区小麦产量、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  累积和水分平衡的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(4):754-760.
- [20] 张昌爱,张民,曾跃春. 硫对石灰性土壤化学性质的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1453-1458.
- [21] 刘宝存,吴静,孙明德. 京郊小麦-玉米轮作土壤有效硫的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(1):58-62.
- [22] 刘益仁,李祖章,刘光荣,等. 稻-稻-油种植制硫肥效应及硫素平衡研究[J]. 江西农业学报,2004,16(4):14-18.

责任编辑:李鸣雷 刘 英

上接第 67 页

参考文献:

- [1] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1979.
- [2] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994:143-173.
- [3] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [4] 韦红波,李锐,杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [5] 汪有科,吴钦孝,韩冰,等. 森林植被水土保持功能评价[J]. 水土保持研究,1994,1(3):24-30.
- [6] 中野秀章著,李云森译. 森林水文学[M]. 北京:中国林业出版社,1983.
- [7] 杨立文,石清峰. 太行山主要植被枯枝落叶层的水文作用[J]. 林业科学研究,1997,10(3):281-288.
- [8] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 水土保持学报,1998(2):23-28.
- [9] 王佑民,翁俊华. 林地枯落物的水土保持作用[J]. 中国水土保持,2002,7:18.
- [10] 张振明,余新晓,牛健植,等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报,2005,19(3):139-143.
- [11] 吴钦孝,赵鸿雁,韩冰. 黄土高原森林枯枝落叶层保持水土的有效性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,29(5):95-98.
- [12] 周跃著. 云南松林侵蚀控制潜能[M]. 云南科技出版社,1999.
- [13] 汪有科. 林地枯落物抗冲机理研究[J]. 水土保持学报,1993,7(1):75-80.
- [14] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社,1995.
- [15] 张金池,臧廷亮,曾锋. 岩质海岸防护林树木根系对土壤抗冲性的强化效应[J]. 南京林业大学学报,2001,1:9-12.
- [16] 丁军,王兆骞,陈欣,等. 红壤丘陵区林地根系对土壤抗冲增强效应的研究[J]. 水土保持学报,2002,16(4):9-12.
- [17] 吴彦,刘世全,付秀琴,等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. 水土保持学报,1997(1):45-49.
- [18] 卢喜平,史冬梅,蒋光毅,等. 两种果草模式根系提高土壤抗蚀性的研究[J]. 水土保持学报,2004,18(5):64-67,124.
- [19] 李德生. 石灰岩山地植被水土保持效益的研究[J]. 水土保持学报,1993,7(2):57-62.
- [20] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J]. 水土保持通报,1999,19(1):1-9.

责任编辑:李鸣雷 刘 英