

黄土高原长期种植苜蓿对土壤硫、钙、镁的影响

危 锋^{1,2}, 郝明德^{1*}

(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 100049)

摘要: 以22年定位试验为基础, 研究黄土高原长期种植紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.) 情况下土壤硫、钙、镁组分的变化。结果表明: 长期施P使苜蓿连作耕层土壤总硫、有效硫、水溶性硫、吸附性硫、HCl可溶性硫、总无机硫和有机硫含量分别增加9.41%、62.41%、47.51%、30.07%、2.25%、5.38%和17.54%; 长期施NPM使苜蓿连作耕层土壤总硫、有效硫、水溶性硫、吸附性硫、HCl可溶性硫、总无机硫和有机硫含量分别增加20.89%、98.31%、68.44%、57.34%、8.07%、12.54%和37.69%。长期施P使苜蓿连作耕层土壤全钙、有效钙、水溶态钙、交换态钙和酸溶态钙含量增加分别增加4.64%、4.27%、11.66%、4.05%和8.59%, 但残余态钙含量降低2.21%; 长期施NPM使苜蓿连作耕层土壤全钙、有效钙、水溶态钙、交换态钙和酸溶态钙含量增加分别增加8.69%、8.30%、51.59%、6.73%和27.77%, 但残余态钙含量降低26.23%。长期施NPM使苜蓿连作耕层土壤全镁、有效镁、水溶态镁、交换态镁、酸溶态镁和残余态镁含量分别增加7.38%、61.98%、63.16%、61.85%、5.81%和8.97%。此外, 有效硫在土壤剖面上出现双累积峰, 有向深层土壤迁移的特征; 有效钙、有效镁在土壤剖面上存在淋溶累积现象。此研究结果可为苜蓿种植和管理提供依据。

关键词: 黄土高原; 苜蓿连作; 硫、钙、镁; 长期试验

中图分类号: S158.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0435(2009)03-0288-06

Effect of Long-term Alfalfa Succession on Soil Sulfur, Calcium, and Magnesium in the Loess Plateau

WEI Feng^{1,2}, HAO Mingde^{1*}

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

2. Graduate School, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Sulfur, calcium, and magnesium are essential elements in plant and play very important functions in physiology and plant nutrition. Based on the long-time stationary experiment, the changes of soil sulfur, calcium and magnesium were studied under a condition of 22-year alfalfa succession in Loess Plateau. The results show that the contents of total sulfur, available sulfur, water soluble sulfur, adsorbent sulfur, HCl soluble sulfur, total inorganic sulfur, and organic sulfur in tilled soils, after long-time P fertilizer application, increased by 9.41%, 62.41%, 47.51%, 30.07%, 2.25%, 5.38%, and 17.54%, respectively. The contents of total sulfur, available sulfur, water soluble sulfur, adsorbed sulfur, HCl soluble sulfur, total inorganic sulfur, and organic sulfur in tilled soils, after long-time NPM fertilizer application, increased by 20.89%, 98.31%, 68.44%, 57.34%, 8.07%, 12.54%, and 37.69%, respectively. The contents of total calcium, available calcium, water soluble calcium, exchangeable calcium, and HCl soluble calcium in tilled soils, after long-time P fertilizer application, increased by 4.64%, 4.27%, 11.66%, 4.05%, and 8.59%, respectively, but the content of residual calcium decreased by 2.21%. The contents of total calcium, available calcium, water soluble calcium, exchangeable calcium, and HCl soluble calcium in tilled soils, after long-time NPM fertilizer application, increased by 8.69%, 8.30%, 51.59%, 6.73%, and 27.77%, respectively, but the content of residual calcium decreased by 26.23%. The contents of total magnesium, available magnesium, water soluble magnesium, exchangeable magnesium, HCl soluble magnesium, and residual magnesium in tilled soils, after long-time NPM fertilizer application, increased by 7.38%, 61.98%, 63.16%, 61.85%, 5.81%, and 8.97%, respectively. Two peaks of available sulfur in soil profiles were detected with a transportation trend of available sulfur to deep soil layers. Additionally, the eluviation and accumulation of available calcium and magnesium occurred in soil profiles.

Key words: Loess Plateau; Alfalfa succession; Sulfur, calcium, and magnesium; Long-term experiment

收稿日期: 200809226; 修回日期: 200902213

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx 2yw2 42423); 国家重点基础研究发展计划(2005CB121101); 国家科技支撑计划(2006BAD05B07)资助

作者简介: 危锋(1972), 男, 陕西汉中, 博士研究生, 研究方向为土壤养分循环与平衡, E-mail: weifeng6688@126.com; * 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: haodong@public.xa.sn.cn

苜蓿(*Medicago L.*) 在黄土高原地区具有悠久的种植历史, 是该地区的主要栽培牧草^[1]。苜蓿富含蛋白质、多种维生素和矿物质, 是多种家畜喜食的优质饲料, 且根系发达, 抗旱、耐寒、耐瘠、截流、保土, 适应性强^[2], 因此在西部开发、生态环境建设和发展畜牧业中发挥重要作用^[3]。人们对黄土高原地区苜蓿的生产力及产量^[4-7], 苜蓿养分^[8,9]以及种植苜蓿的土壤养分^[10,11]、水分^[12-16]和理化性状^[17-20]等做了大量研究。

硫、钙、镁是作物生长发育所必需的营养元素, 对作物生长发育及新陈代谢起着独特作用^[21]。而关于长期种植苜蓿土壤中硫、钙、镁元素的变化情况研究较少。本文利用长期定位试验, 在黄土高原旱地 22 a 紫花苜蓿(*Medicago sativa L.*) 连作下对土壤硫、钙、镁元素的变化规律进行研究, 以期对苜蓿种植和管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试区位于黄土高原中南部陕西省长武县十里铺村塬面旱地。属典型的旱作农业区。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 $10.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮 $37.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.659 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $129.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CaCO_3 $108.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 8.3。土壤肥力水平较低, 钾素丰富, 氮、磷俱缺。试验地海拔 1200 m, 试验区年均气温 9.1 e , 无霜期 171 d, $\backslash 0 \text{ e}$ 活动积温 3866 e , $\backslash 10 \text{ e}$ 活动积温 3029 e , 属暖温带半湿润大陆型季风气候。试验地土壤养分含量、地貌特征在黄土高原同类地区具有典型代表性。

1.2 实验设计

长期试验开始于 1984 年, 苜蓿连作设 3 个处理: CK (不施肥); P (施 P_2O_5 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); NPM (施 N PM : N $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, P_2O_5 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, M $75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。小区面积 66.67 m^2 , 3 次重复, 随机排列。氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 有机肥用厩肥(有机质含量 $106 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $2.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $3.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $0.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。每年 3 月中旬按试验设计的用量撒施于小区, 田间管理同大田。苜蓿每年刈割两次(6 月中旬和 10 月中旬)。

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, 取 1 mm 土样过 0.25 mm 筛。

所有样品测定有效态硫、钙、镁含量, 耕层土样(0~20 cm)测定全量和不同形态硫、钙、镁含量。

数据采用 SAS 软件包相应程序进行分析。

1.4 硫的形态分级与测定

按曲东^[22]的方法分为总硫、水溶性硫、吸附性硫、HCl 可溶性硫、无机硫、有机硫、有效态硫。

全硫含量用 $\text{HNO}_3\text{HClO}_4\text{HF}$ 消化, ICP2AES 测定。其余形态硫采用 BaSO_4 比浊法测定。

1.5 钙的形态分级与测定

按 Page^[23]所采用的方法分为全钙、水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙、残余态钙。有效态钙由水溶态钙和交换态钙组成。

全钙含量用 $\text{HNO}_3\text{HClO}_4\text{HF}$ 消化, ICP2AES 测定。其余形态钙采用原子吸收法测定。

1.6 镁的形态分级与测定

按 Page^[23]所采用的方法分为全镁、水溶态镁、交换态镁、酸溶态镁、残余态镁。有效态镁由水溶态镁和交换态镁组成。

全镁含量用 $\text{HNO}_3\text{HClO}_4\text{HF}$ 消化, ICP2AES 测定。其余形态镁采用原子吸收法测定。

2 结果与分析

2.1 长期种植苜蓿对土壤硫的影响

2.1.1 耕层土壤不同硫形态含量 土壤硫的含量不仅与气候条件、成土母质及成土过程密切相关, 还易受耕作制度、作物种类、肥料施用等人为因素影响。施用过磷酸钙中含有硫酸钙含 S 量 12%, 厩肥含 S 量约 0.02%, 在黄土高原旱地经过 22 a 苜蓿连作, 其耕层土壤不同形态硫含量见表 1。施用 P、NPM 总硫含量分别为 $92.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $101.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 9.41%、20.89%。施用 P、NPM 的有效硫含量分别为 $8.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $10.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 62.41%、98.31%。总硫和有效硫含量差异均达到显著水平, 长期施用含硫肥料和有机肥能增加苜蓿连作耕层土壤全硫和有效硫的含量。

表1 耕层土壤不同形态硫含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Contents of different sulfur conformation in tilth soils

	全 S Total S	水溶性 S Water soluble S	吸附性 S Adsorbent S	HCl 可溶性 S HCl soluble S	总无机 S Total inorganic S	有机 S Organic S	有效 S Available S
CK	84.36 ^c (100)	3.01 ^b (3.57)	1.43 ^a (1.70)	51.93 ^a (61.56)	56.37 ^b (66.82)	27.99 ^a (33.18)	5.32 ^c (6.31)
P	92.30 ^b (100)	4.44 ^a (4.81)	1.86 ^a (2.02)	53.10 ^a (57.53)	59.40 ^{ab} (64.35)	32.90 ^a (35.65)	8.64 ^b (9.36)
NPM	101.98 ^a (100)	5.07 ^a (4.97)	2.25 ^a (2.21)	56.12 ^a (55.03)	63.44 ^a (62.21)	38.54 ^a (37.79)	10.55 ^a (10.35)

注: 括号内数值为各组分含量占总量百分数。同一列中不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。下同

Note: Data in brackets refer to the percentage of the relevant sulfur conformation to the total sulfur amount; means with different letters in same column are significantly different at the 0.05 level; same as below

施用 P、NPM 的水溶性硫含量分别为 $4.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 47.51% 和 68.44%, P、NPM 的水溶性硫含量差异不显著, 但 P 与 CK、NPM 与 CK 差异显著。施用含硫肥料能增加土壤水溶性硫含量。施用 P、NPM 的吸附性硫含量分别为 $1.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 30.07% 和 57.34%。吸附性硫含量差异不显著, 主要是由土壤质地和土壤胶体的吸附性能引起。施用 P、NPM 的 HCl 可溶性硫含量分别为 $53.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $56.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 2.25% 和 8.07%。HCl 可溶性硫含量差异不显著, 其原因可能是本区土壤中的硫素绝大部分由酸溶态硫构成。

总无机硫量是由水溶性硫、吸附性硫、HCl 可溶性硫 3 部分构成。施用 P、NPM 的总无机硫含量分别为 $59.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $63.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 5.38% 和 12.54%。总无机硫含量 NPM 与 CK 差异显著, P 与 NPM、CK 差异不显著。施用 P、NPM 的有机硫含量分别为 $32.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $38.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 17.54% 和 37.69%, 有机硫含量差异均不显著。本区土壤中硫的形态主要是以无机态的形式存在。

2.1.2 有效硫在土壤剖面的分布 本试验中的硫肥是随磷肥和厩肥的投入而进入土壤的, 施入的硫肥除被作物吸收部分硫素外, 其余残留于土壤中。硫主要以 SO_4^{2-} 形态被作物吸收利用, SO_4^{2-} 带负电荷, 在土壤溶液中随水运动, 易于淋失^[24]。

从图 1 可看出, CK 由于长期没有硫投入, 有效硫在土壤剖面变化较小。硫素随施肥进入土壤, NPM、P 处理土壤剖面均出现了有效硫不同程度的累积峰。在 60~80 cm 土层出现有效硫的第 1 个累积峰, 累积峰值 NPM 为 $24.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、P 为 $20.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别比 CK 高出 122.64%, 166.82%。随着土壤剖面的加深, 在 140~180 cm 土层又出现有效硫的第 2 个累积峰, P 处理的第 2

个有效硫累积峰出现在 140~160 cm 土层, 累积峰值为 $28.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高出 180.94%。NPM 处理的第 2 个有效硫累积峰出现在 160~180 cm 土层, 累积峰值为 $36.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高出 302.43%。NPM 处理第 2 个有效硫累积峰出现的土层深于 P, 有效硫累积峰值 $\text{NPM} > \text{P}$ 。

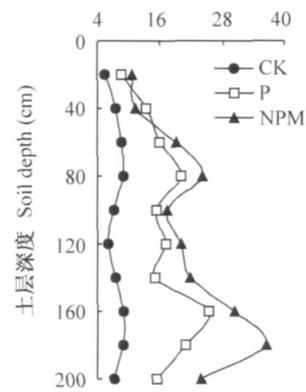
有效硫含量 Available S content ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

图1 有效硫剖面分布

Fig. 1 Distribution of available sulfur in soil profile

2.2 长期种植苜蓿对土壤钙的影响

2.2.1 耕层土壤不同钙形态含量 土壤钙的含量不仅与气候条件、成土母质及成土过程密切相关, 还易受耕作制度、作物种类、肥料施用等人为因素影响。施用过磷酸钙和厩肥含钙, 在黄土高原旱地经过 22 a 苜蓿连作, 其耕层土壤不同形态钙含量见表 2。施用 P、NPM 的全钙含量分别为 $28999 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $30120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 4.64% 和 8.69%, 差异显著。施用 P、NPM 的有效钙含量分别为 $10258 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10628 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 CK 高 4.27% 和 8.30%。有效钙含量 NPM 与 CK 间差异显著, P 与 NPM、CK 间差异不显著。长期施用含钙肥料和有机肥能增加苜蓿连作耕层土壤全钙和有效钙含量。

表2 耕层土壤不同形态钙含量(mg# kg⁻¹)

Table 2 Contents of different calcium conformation in tilth soils

	全 Ca Total Ca	水溶态 Ca Water soluble Ca	交换态 Ca Exchangeable Ca	酸溶态 Ca HCl soluble Ca	残余态 Ca Residual Ca	有效 Ca Available Ca
CK	27713 ^c (100)	283 ^c (1.02)	9555 ^b (34.48)	11677 ^c (42.13)	6198 ^a (22.37)	9838 ^b (35.50)
P	28999 ^b (100)	316 ^b (1.09)	9942 ^{ab} (34.28)	12680 ^b (43.73)	6061 ^{ab} (20.90)	10258 ^{ab} (35.37)
NPM	30120 ^a (100)	429 ^a (1.43)	10198 ^a (33.86)	14920 ^a (49.54)	4572 ^b (15.18)	10628 ^a (35.28)

施用 P、NPM 的水溶态钙含量分别为 316 mg # kg⁻¹ 和 429 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 11.66% 和 51.59%, 差异显著。施用 P、NPM 的交换态钙含量分别为 9942 mg # kg⁻¹ 和 10198 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 4.05% 和 6.73%, 交换态钙含量 NPM 与 CK 间差异显著, P 与 NPM、CK 间差异不显著。施用 P、NPM 的酸溶态钙含量分别为 12680 mg # kg⁻¹ 和 14920 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 8.59% 和 27.77%, 差异显著。P、NPM 的残余态钙含量分别为 6061 mg # kg⁻¹ 和 4572 mg # kg⁻¹, 比 CK 低 2.21% 和 26.23%, 残余态钙含量 NPM 与 CK 间差异显著, P 与 NPM、CK 间差异不显著。长期施用含钙肥料和有机肥能增加苜蓿连作耕层土壤水溶态钙、交换态钙和酸溶态钙含量, 但使残余态钙含量降低。根据各钙形态在全钙中所占比例, 其含量酸溶态钙 > 交换态钙 > 残余态钙 > 水溶态钙, CK、P、NPM 间不同钙形态所占全钙比例变化趋势基本一致。

2.2.2 有效钙在土壤剖面的分布 钙素随磷肥和有机肥的施入而进入土壤, 经过 22 a 连续施肥后, 苜蓿连作土壤剖面 0~200 cm 土层有效钙分布如图 2 所示。在 0~80 cm 土层, CK、P、NPM 各处理的变化趋势基本相同, 在 40~60 cm 土层出现一个有效钙含量降低的拐点, 在其下土层有效钙含量又都升高。在 80~200 cm 土层 CK 由于长期没有钙的投入, 其有效钙在土壤剖面上变化较小。P 处理在 100~120 cm 土层出现了全剖面上有效钙的最大值, 为 13887 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 10.90%, 在其下土层有效钙含量变化不大。NPM 处理在 140~160 cm 土层出现全剖面有效钙的最大值为 13983 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 10.33%, 在其下土层有效钙含量变化不大。有效钙土壤剖面上出现的最大值 NPM > P。长期施用含钙肥料能增加土壤剖面有效钙的含量, 有效钙在土壤剖面上存在淋溶累积现象。

2.3 长期种植苜蓿对土壤镁的影响

2.3.1 耕层土壤不同镁形态含量 土壤镁的含量不仅与气候条件、成土母质及成土过程密切相关, 还

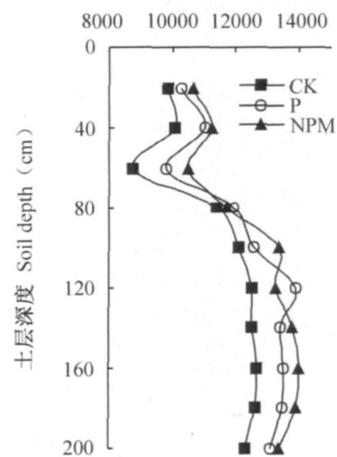
有效钙含量 Available Ca content (mg # kg⁻¹)

图2 有效钙剖面分布

Fig. 2 Distribution of available calcium in soil profile

易受耕作制度、作物种类、肥料施用等人为因素影响。与硫、钙不同, 本试验中只有施用的厩肥含镁, 在黄土高原旱地经过 22 年苜蓿连作后, 其耕层土壤不同形态镁含量见表 3。施用 P、NPM 的全镁含量分别为 9877 mg # kg⁻¹、10051 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 5.52%、7.38%。施用 P、NPM 的有效镁含量分别为 223 mg # kg⁻¹、311 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 16.15%、61.98%。全镁和有效镁含量 NPM 与 CK 间差异显著, 长期施用有机肥能显著增加苜蓿连作耕层土壤全镁和有效镁含量。

施用 P、NPM 的水溶态镁含量分别为 22 mg # kg⁻¹ 和 31 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 15.79% 和 63.16%, 差异均不显著。施用 P、NPM 的交换态镁含量分别为 202 mg # kg⁻¹ 和 280 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 16.76% 和 61.85%, NPM 与 P、CK 差异达显著。施用 P、NPM 的酸溶态镁含量分别为 8200 mg # kg⁻¹ 和 8380 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 3.54%、5.81%, NPM 与 P 差异不显著, NPM、P 与 CK 差异显著。施用 P、NPM 的残余态镁含量分别为 1453 mg # kg⁻¹ 和 1360 mg # kg⁻¹, 比 CK 高 16.43%、8.97%, 差异均不显著。长期施用有机肥能增加苜蓿连作耕层土壤

表3 耕层土壤不同形态镁含量(mg# kg⁻¹)

Table 3 Contents of the different magnesium conformation in tirth soils

	全 Mg Total Mg	水溶态 Mg Water soluble Mg	交换态 Mg Exchangeable Mg	酸溶态 Mg HCl soluble Mg	残余态 Mg Residual Mg	有效 Mg AvailableMg
CK	9360 ^b (100)	19 ^a (0.20)	173 ^b (1.85)	7920 ^b (84.62)	1248 ^a (13.33)	192 ^b (2.05)
P	9877 ^{ab} (100)	22 ^a (0.22)	202 ^b (2.05)	8200 ^a (83.02)	1453 ^a (14.71)	223 ^b (2.26)
NPM	10051 ^a (100)	31 ^a (0.31)	280 ^a (2.79)	8380 ^a (83.37)	1360 ^a (13.53)	311 ^a (3.09)

水溶态镁、交换态镁、酸溶性镁和残余态镁含量。根据各镁形态在全镁中所占比例,其含量酸溶态镁>残余态镁>交换态镁>水溶态镁,CK、P、NPM处理间不同镁形态所占全镁比例变化趋势基本一致。

2.3.2 有效镁在土壤剖面的分布 镁素随有机肥的施入而进入土壤,经过22a连续施肥后,苜蓿连作土壤剖面0~200cm土层有效镁分布如图3所示。在0~20cm土层,NPM处理由于长期施用有机肥(含有镁素),使得NPM有效镁含量远大于长期没有镁素投入的CK和P。从全剖面看:长期没有镁素的投入CK和P,其有效镁含量变化趋势基本一致,0~80cm土层有效镁含量升高;在100~140cm土层有效镁含量下降;在140~160cm土层,出现一个有效镁含量突然升高的拐点;在其下土层效镁含量又在下降。NPM的有效镁含量在土壤剖面上变化趋势从0~120cm土层几乎一直在下降,在140~180cm土层是在升高,在其下土层又表现为下降。在全剖面上有效镁的最大值出现在NPM处理的耕层,为311mg#kg⁻¹,比CK高61.98%。长期施用有机肥能增加土壤剖面有效镁的含量。NPM各处理在土壤剖面上均未出现有效镁的明显累积峰,但在土壤剖面上存在淋溶累积现象。

3 讨论

3.1 长期施用含硫肥料能增加苜蓿连作耕层土壤各形态硫含量。长期施用有机肥还可以增加土壤有机硫库^[25]。硫从表层向底土或心土的累积取决于土壤溶液中SO₄²⁻浓度、土壤水活动状况、土壤对其的吸附等因素^[26],关于本区土壤剖面有效硫的淋溶累积影响因素已报道^[27]。长期施入含硫肥料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2累积峰值大于第1累积峰值,说明有效硫在土壤剖面上有向深层迁移的特征,应与土壤水分运动结合起来做进一步研究。

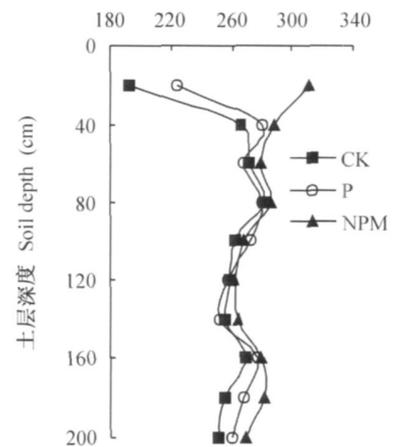
有效镁含量 Available Mg content (mg·kg⁻¹)

图3 有效镁剖面分布

Fig. 3 Distribution of available magnesium in soil profile

3.2 本区是石灰性土壤,钙含量非常丰富。长期施用含钙肥料使苜蓿连作耕层土壤全钙、水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙含量增加。有研究表明长期施用过磷酸钙能显著提高土壤中的含钙量^[28]。但NPM处理残余态钙含量显著降低,其原因可能是所施有机肥在分解过程中形成有机酸,使部分残余态钙分解转化为其他形态的钙;此外施NPM促进苜蓿生长,苜蓿根系在生长代谢过程中形成有机酸、以及苜蓿残体和凋落物分解也会形成有机酸,使部分残余态钙分解转化为其他形态的钙。长期施用含钙肥料能增加土壤剖面有效钙含量,有效钙在土壤剖面上存在淋溶累积现象。有研究表明,长期施用农家厩肥,可降低土壤耕层的钙含量,但心土层的钙含量增加,这可能是施用有机肥活化了土壤中的钙,使其向下层淋溶加强^[28]。

3.3 长期施用有机肥使苜蓿连作耕层土壤各形态镁含量增加,其原因是所施用有机肥含镁^[25],还有可能是所施用有机肥在分解过程中形成有机酸,使部分残余态镁分解转化成为其他形态的镁;此外施NPM促进苜蓿生长,苜蓿根系在生长代谢过程中

形成有机酸,苜蓿残体和凋落物分解也会形成有机酸,使部分残余态镁分解转化成为其他形态的镁。此外长期施用含镁肥料还可增加土壤剖面有效镁的含量,有效镁在土壤剖面上存在淋溶累积现象。

4 结论

4.1 长期施 P 使苜蓿连作耕层土壤总硫、有效硫、水溶性硫、吸附性硫、HCl 可溶性硫、总无机硫和有机硫含量分别增加 9.41%、62.41%、47.51%、30.07%、2.25%、5.38% 和 17.54%。长期施 NPM 使苜蓿连作耕层土壤总硫、有效硫、水溶性硫、吸附性硫、HCl 可溶性硫、总无机硫和有机硫含量分别增加 20.89%、98.31%、68.44%、57.34%、8.07%、12.54% 和 37.69%。长期施入硫肥,使 NPM、P 处理土壤剖面均出现了有效硫不同程度的累积峰。在 60~80 cm 土层出现有效硫的第一个累积峰,累积峰值 NPM 为 $24.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、P 为 $20.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;在 140~180 cm 土层又出现有效硫的第 2 个累积峰,累积峰值 NPM 为 $36.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、P 为 $28.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且第 2 累积峰值大于第一累积峰值,说明有效硫在土壤剖面上有向深层迁移的特征。

4.2 长期施 P 使苜蓿连作耕层土壤全钙、有效钙、水溶态钙、交换态钙和酸溶态钙含量增加分别增加 4.64%、4.27%、11.66%、4.05% 和 8.59%,但残余态钙含量降低 2.21%。长期施 NPM 使苜蓿连作耕层土壤全钙、有效钙、水溶态钙、交换态钙和酸溶态钙含量增加分别增加 8.69%、8.30%、51.59%、6.73% 和 27.77%,但残余态钙含量降低 26.23%。长期施用含钙肥能增加土壤剖面有效钙含量, P 处理土壤剖面 100~120 cm 土层出现了有效钙的最大值,为 $13887 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NPM 处理在 140~160 cm 土层出现全剖面有效钙的最大值,为 $13983 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。有效钙在土壤剖面上存在淋溶累积现象。

4.3 长期施用含镁肥料使苜蓿连作耕层土壤全镁、有效镁、水溶态镁、交换态镁、酸溶态镁和残余态镁含量分别增加 7.38%、61.98%、63.16%、61.85%、5.81% 和 8.97%。长期施用含镁肥料能增加土壤剖面有效镁含量, NPM 处理在耕层出现全剖面有效镁的最大值为 $311 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效镁在土壤剖面上存在淋溶累积现象。

参考文献

[1] 耿华珠,吴永敷,曹致中.中国苜蓿[M].北京:中国农业出版社,1995.25258
[2] 韩路,贾志宽,韩清芳.引进苜蓿品种在半干旱地区的生态适

应性研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):114-117
[3] 何有华.紫花苜蓿在陇中地区生态环境建设中的作用分析[J].草业科学,2002,19(7):17218
[4] 杜世平,王留芳,龙明秀.宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究[J].草业科学,1999,16(1):12217
[5] 李玉山.苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J].土壤学报,2002,39(3):404-411
[6] 郝明德,张春霞,魏孝荣,等.黄土高原地区施肥对苜蓿生产力的影响[J].草地学报,2004,12(3):1952-198
[7] 王位泰,张天锋,黄斌,等.陇东黄土高原春播紫花苜蓿生长规律及气候生产潜力评估[J].干旱地区农业研究,2007,25(5):2142-219
[8] 杨恒山,曹敏建,李春龙,等.苜蓿施用磷、钾肥效应的研究[J].草业科学,2003,20(11):19222
[9] 李丽霞,郝明德,张春霞.不同种植方式下苜蓿地上部 N、P、K 含量的动态变化[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):99-94
[10] 张春霞,郝明德,王旭刚,等.黄土高原地区紫花苜蓿生长过程中土壤养分的变化规律[J].西北植物学报,2004,24(6):1102-1111
[11] 万素梅,韩清芳,胡守林,等.黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤氮素消耗特征研究[J].植物营养与肥料学报,2008,14(1):383-390
[12] 万素梅,胡建宏,胡守林,等.不同紫花苜蓿品种水分利用效率研究[J].西北农业学报,2004,13(3):133-137
[13] 程积民,王惠娥,王静.黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化[J].应用生态学报,2005,16(3):435-438
[14] 樊军,邵明安,王全九.陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J].草地学报,2006,14(3):262-264
[15] 李军,陈兵,李小芳,等.黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J].生态学报,2007,27(1):75-89
[16] 万素梅,贾志宽,韩清芳,等.黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J].生态学报,2008,28(3):104-105
[17] 张国盛,黄高宝,张仁徒,等.种植苜蓿对黄绵土表土理化性质的影响[J].草业学报,2003,(5):88-93
[18] 杨玉海,蒋平安.不同种植年限苜蓿地土壤理化特性研究[J].水土保持学报,2005,19(2):110-113
[19] 杨恒山,曹敏建,范富,等.紫花苜蓿生长年限对土壤理化性状的影响[J].中国草地学报,2006,(6):29-32
[20] 曹永红,贾志宽,韩清芳.苜蓿生长年限对其产量及土壤性状的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):1042-108
[21] 彭克明.农业化学[M].北京:中国农业出版社,1987.192-213
[22] 曲东,尉庆丰.黄土性土壤中硫的形态分析[J].干旱地区农业研究,1995,13(1):73-77
[23] A. L. 佩奇, R. H. 米勒, (闵九康等译), 土壤分析法[M].北京:中国农业科技出版社,1991.173-182
[24] 钾磷研究所(加拿大钾磷研究所北京办事处编译).土壤肥力手册[M].1992.62-64
[25] 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
[26] Farina M P W, Channon P. Acid subsoil amelioration: Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, 49: 175-180
[27] 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
[28] Krishnamoorthy K K. Review of soil research in India [M]. Part I, New Delhi, 12th International Congress of Soil Science, 1982. 453-464