

引用格式:

易荧, 邹宜东, 范欢, 刘晓明, 肖孟宇, 陈夏晔, 张同琢, 关铭鑫, 李宏光, 黎娟, 方明, 李文. 湖南典型稻作烟区植烟土壤pH和钙镁硫元素垂直分布特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 105–112.

YI Y, ZOU Y D, FAN H, LIU X M, XIAO M Y, CHEN X Y, ZHANG T Z, GUAN M X, LI H G, LI J, FANG M, LI W. Vertical distribution characteristics of pH and calcium-magnesium-sulfur elements in tobacco-growing soil in the Hunan typical rice-tobacco areas[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 105–112.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 湖南典型稻作烟区植烟土壤pH和钙镁硫元素垂直分布特征

易荧<sup>1</sup>, 邹宜东<sup>2</sup>, 范欢<sup>2</sup>, 刘晓明<sup>3</sup>, 肖孟宇<sup>3</sup>, 陈夏晔<sup>4</sup>, 张同琢<sup>5</sup>,  
关铭鑫<sup>5</sup>, 李宏光<sup>4</sup>, 黎娟<sup>1</sup>, 方明<sup>4</sup>, 李文<sup>4\*</sup>

- (1. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南省烟草公司长沙市浏阳市分公司, 湖南 浏阳 410300;  
3. 湖南省烟草公司衡阳市公司, 湖南 衡阳 421001; 4. 湖南省烟草公司郴州市公司, 湖南 郴州 423000;  
5. 广东中烟工业有限责任公司, 广东 广州 510310)

**摘要:** 为探究湖南典型稻作烟区植烟土壤pH与钙、镁、硫元素的垂直变化规律, 在湖南郴州、衡阳、长沙3地采集0~50 cm土层(分为5层, 10 cm/层)代表性土壤样品, 测定土壤主要养分含量, 并利用经典统计方法对土壤养分含量的丰缺状况和垂直分布特征进行分析。结果表明: 湖南典型稻作烟区0~50 cm土层pH( $7.48\pm 0.67$ )和交换性镁质量分数( $(300.46\pm 174.34)$  mg/kg)较高, 交换性钙质量分数( $(4\ 914.45\pm 3\ 325.86)$  mg/kg)和有效硫质量分数( $(58.59\pm 21.33)$  mg/kg)极高; 钙镁比( $19.31\pm 16.55$ )极高, 耕作层(0~20 cm)钙镁比大于10的土壤占65.00%, 非耕作层(>20~50 cm)钙镁比大于10的土壤占68.89%, 易造成烟株生理性缺镁; 植烟土壤非耕作层的pH和交换性镁质量分数均显著高于耕作层的, 有效硫则呈现表聚性, 耕作层含量显著高于非耕作层的。土壤交换性钙、交换性镁、有效硫质量分数均与pH呈一元二次曲线关系, 且均在 $5.0 < \text{pH} \leq 7.0$ 时, 随pH升高其质量分数升高; 在 $\text{pH} > 7.0$ 时, 随pH升高其质量分数下降。由此可见, 在烟叶生产上需控施石灰石、碱性肥料和硫酸钾等, 采取措施构建合理耕层, 平衡土层养分分布, 以促进优质烟叶生产。

**关键词:** 土壤; pH; 钙; 镁; 硫; 中量元素; 垂直分布; 稻作烟区

中图分类号: S158.5; S572.062

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0105-08

## Vertical distribution characteristics of pH and calcium-magnesium-sulfur elements in tobacco-growing soil in the Hunan typical rice-tobacco areas

YI Ying<sup>1</sup>, ZOU Yidong<sup>2</sup>, FAN Huan<sup>2</sup>, LIU Xiaoming<sup>3</sup>, XIAO Mengyu<sup>3</sup>, CHEN Xiaye<sup>4</sup>, ZHANG Tongzhuo<sup>5</sup>,  
GUAN Mingxin<sup>5</sup>, LI Hongguang<sup>4</sup>, LI Juan<sup>1</sup>, FANG Ming<sup>4</sup>, LI Wen<sup>4\*</sup>

- (1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Liuyang Branch, Changsha Tobacco Company of Hunan Province, Liuyang, Hunan 410300, China; 3. Hengyang Tobacco Company of Hunan Province, Hengyang, Hunan 421001, China; 4. Chenzhou Tobacco Company of Hunan Province, Chenzhou, Hunan 423000, China; 5. China Tobacco Guangdong Industrial Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510310, China)

**Abstract:** To explore the vertical variation patterns of pH and calcium-magnesium-sulfur elements in tobacco-growing soil in the typical rice-tobacco areas in Hunan Province, representative soil samples were collected from 0 to 50 cm soil layers(divided into 5 layers, 10 cm per layer) in three locations: Chenzhou, Hengyang and Changsha. The contents of major soil nutrients were determined, and the deficiency and sufficiency status and vertical distribution characteristics of

收稿日期: 2025-04-02

修回日期: 2025-05-21

基金项目: 中国烟草总公司湖南省公司科技项目(HN2023KJ07、HN2023KJ03)

作者简介: 易荧(2000—), 女, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事烟草栽培生理研究, 1796619353@qq.com; \*通信作者, 李文, 硕士, 高级农艺师, 主要从事烟草栽培生理研究, 515105993@qq.com

soil nutrients were analyzed using classical statistical methods. The results showed that in the 0-50 cm soil layer of typical rice-tobacco areas in Hunan Province, the pH( $7.48\pm 0.67$ ) and the mass fraction of exchangeable magnesium ( $300.46\pm 174.34$  mg/kg) were relatively high, while the mass fractions of exchangeable calcium( $4\ 914.45\pm 3\ 325.86$  mg/kg) and available sulfur( $58.59\pm 21.33$  mg/kg), and the calcium-magnesium ratio( $19.31\pm 16.55$ ) were extremely high. In the plough layer(0-20 cm), 65.00% of the soil had a calcium-magnesium ratio greater than 10, and in the non-plough layer (>20-50 cm), 68.89% of the soil had a calcium-magnesium ratio greater than 10, which could easily cause physiological magnesium deficiency in tobacco plants. The pH and the mass fraction of exchangeable magnesium in the non-plough layer of tobacco-growing soil were significantly higher than those in the plough layer, while the available sulfur showed a surface accumulation phenomenon, and the content in the plough layer was significantly higher than that in the non-plough layer. The mass fractions of exchangeable calcium, exchangeable magnesium and available sulfur in the soil were all in a quadratic relationship with pH. When  $5.0 < \text{pH} \leq 7.0$ , their mass fractions increased with the increase of pH, but at the condition of  $\text{pH} > 7.0$ , their mass fractions decreased with the increase of pH. Therefore, tobacco production requires controlled use of limestone, alkaline fertilizers and potassium sulfate, and to construct a balanced plough layer to optimize nutrients and produce high-quality tobacco leaves.

**Keywords:** soil; pH; calcium; magnesium; sulfur; medium elements; vertical distribution; rice-tobacco areas

土壤是烤烟生长的介质,也是影响烟叶优质高产及可持续发展的关键因素。烟株在生长发育过程中,只有保持持续均衡的养分供给,才会收获产质俱佳的烟叶。此外,土壤养分分布与烤烟的产质量及其工业适用性之间也存在着密不可分的关系<sup>[1]</sup>。钙、镁、硫是农业生产中重要的中量元素,其含量直接影响烤烟产质量。若土壤中量元素供应过多,则烟株生长发育受阻,产量和品质降低<sup>[2]</sup>。土壤含钙量过高会导致烟叶成熟度不够,造成叶片粗糙、增厚,营养元素失衡,杂气过重<sup>[3]</sup>。镁元素过多则不利于根系的发育,影响叶组织细胞的数量,抑制烟株对养分的吸收<sup>[4]</sup>。硫供应过量会导致烟叶颜色发暗,持续可燃性降低<sup>[5]</sup>。近年来,国内学者就我国不同主烟区土壤养分丰缺状况对烟叶产量、品质的影响开展了大量研究。胡瑞文等<sup>[6]</sup>采用GPS技术研究湘西州花垣烟区土壤肥力适宜性指数,发现土壤全氮含量偏高与氯离子含量过低在一定程度上影响了土壤肥力水平。周炼川等<sup>[7]</sup>研究了烟株生长所需主要养分间的相关关系,发现有有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量与烤烟种植适宜性直接相关。邓小华等<sup>[8]</sup>研究了湘西烟区土壤养分和酸度的垂直分布特征,认为土壤养分含量和缓冲容量随土壤深度增加而减少。然而,当前研究主要集中于土壤有机质以及氮、磷、钾等大量元素,但从优质高产的烟株所需营养元素来看,中量元素(钙、镁、硫)需要量仅次于大量元素,其丰缺状况对烟叶产质量的形成也至关重要<sup>[9-10]</sup>。同时,这些元素也是主要的碱金属元素,对维持土壤矿质养分平衡及调控土壤

酸碱性有着重要影响<sup>[11]</sup>。因此,深入了解中量元素在土壤中的垂直分布对烤烟栽培具有重要意义。

烟稻轮作是一种春植烟、秋种稻的高产高收入复种模式,在改善土壤微生物的结构和多样性、提高土壤肥力和作物产量方面具有一定作用<sup>[12]</sup>。湘东和湘南地区多为湖南典型的稻作烟区,是我国主要的浓香型烟叶产区,在我国烟叶生产中具有重要地位<sup>[13]</sup>,而关于湘东和湘南稻作烟区土壤中量元素的数据统计却鲜见报道。鉴于此,笔者对湘东和湘南稻作烟区土壤中量营养元素含量丰缺状况及其与pH的关系进行研究,旨在为湖南典型稻作烟区烤烟平衡施肥及烟叶品质提升提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域为我国湘东和湘南地区,位于郴州桂阳与嘉禾、衡阳耒阳和长沙浏阳,属大陆性亚热带季风湿润气候。郴州、衡阳和长沙的年平均气温分别为18.5、19.3、19.0℃,平均年降水量分别为1 524.2、1 626.3、1 551.3 mm。

### 1.2 土壤样品采集方法

2021年晚稻收获后,在湖南郴州、衡阳、长沙3地各选取10块代表性的稻作烟田(土质为壤土且种植史达10年以上)。其中,郴州市桂阳县和平镇4块,仁义镇3块和雷坪镇2块,嘉禾县普满乡1块;衡阳市耒阳县导子镇和赤水镇各3块,竹市镇、东湖圩镇、哲桥镇和坛下乡各1块;长沙市浏阳市永

安镇3块,北盛镇、沙市镇和官渡镇各2块,淳口镇1块。在土壤翻耕之前,采用五点取样法在田块中采集D1(0~10 cm)、D2(>10~20 cm)、D3(>20~30 cm)、D4(>30~40 cm)、D5(>40~50 cm)共5层的剖面土壤,共计150个土壤样品。D1和D2层为耕作层(D1+D2),D3、D4和D5层为非耕作层(D3+D4+D5)。土壤样品于阴凉处风干,剔除作物根系及动物残体后,磨细过孔径为2 mm的筛,保存备用。

### 1.3 土壤指标测定方法

参考文献[14],采用pH计法测定(水、土质量比为2.5:1)土壤pH;采用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度计法测定交换性钙、镁质量分数;采用氯化钡比浊法测定有效硫质量分数。钙镁比以土壤中交换性钙与交换性镁的质量分数比值表示。

### 1.4 土壤pH和中量元素评价标准与方法

参考文献[15],制定稻作烟区土壤pH的分级标准。参考文献[16-17],制定土壤中量元素的分级标准。将本烟区土壤pH和交换性钙、交换性镁、有效硫质量分数分为极低、低、适宜、高和极高5个等级,详见表1。

表1 湖南典型稻作烟区植烟土壤pH和中量元素分级标准

Table 1 The pH and medium elements grading standards of tobacco-planting soils in typical rice-tobacco area of Hunan Province

级别	pH	质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )		
		交换性钙	交换性镁	有效硫
极低	≤5.0	≤400	≤50	≤5
低	>5.0~5.5	>400~800	>50~100	>5~10
适宜	>5.5~7.0	>800~1 200	>100~200	>10~20
高	>7.0~7.5	>1 200~2 000	>200~400	>20~40
极高	>7.5	>2 000	>400	>40

### 1.5 数据分析方法

采用Microsoft Excel 2021对数据进行描述性统计和分组回归分析及绘图;采用R语言进行Pearson相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 湖南典型稻作烟区植烟土壤pH分布特征

由表2可知,湖南典型稻作烟区植烟土壤在耕作层(D1+D2)的pH平均值为7.22,变化范围为5.13~8.20,变异系数为10.25%,适宜烟株生长的土

表2 湖南典型稻作烟区植烟土壤pH及其适宜性分布

Table 2 pH and suitability distribution of tobacco-planting soils in the typical rice-tobacco area of Hunan Province

土层	变化范围/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	均值±标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ %	pH适宜性分布频率/%				
				≤5.0	>5.0~5.5	>5.5~7.0	>7.0~7.5	>7.5
D1	5.13~8.03	(7.12±0.78)c	10.96	0.00	6.67	43.33	6.67	43.33
D2	5.67~8.20	(7.32±0.69)b	9.43	0.00	0.00	30.00	20.00	50.00
D1+D2	5.13~8.20	(7.22±0.74)c	10.25	0.00	3.33	36.67	13.33	46.67
D3	5.63~8.27	(7.67±0.56)a	7.30	0.00	0.00	10.00	20.00	70.00
D4	5.67~8.30	(7.64±0.57)a	7.46	0.00	0.00	10.00	23.33	66.67
D5	5.73~8.30	(7.62±0.56)a	7.35	0.00	0.00	10.00	23.33	66.67
D3+D4+D5	5.63~8.30	(7.64±0.56)a	7.32	0.00	0.00	10.00	22.22	67.78
全土层	5.13~8.30	7.48±0.67	8.96	0.00	1.33	20.67	18.67	59.33

注:同列不同小写字母表示土层间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

壤pH占36.67%;非耕作层(D3+D4+D5)的土壤pH显著高于耕作层的,平均值为7.64,变化范围为5.63~8.30,变异系数为7.32%。从全土层来看,pH>7.5的土壤占59.33%,这表明湖南典型稻作烟区植烟土壤pH整体处于较高的水平。另外,土壤pH变异系数较小,离散程度较低,这说明湖南典型稻作烟区土壤pH分布较均匀。

### 2.2 湖南典型稻作烟区植烟土壤的中量元素含量垂直分布特征

#### 2.2.1 交换性钙

由表3可知,湖南典型稻作烟区土壤交换性钙质量分数总体(全土层)变化范围为933.02~12 722.42 mg/kg,均值为4 914.45 mg/kg,变异系数为67.31%,呈高度变异。耕作层土壤交换性钙质量分数低于非耕作层

的,但差异无统计学意义。耕作层和非耕作层交换性钙质量分数变化范围分别为978.90~12 722.42、933.02~12 602.87 mg/kg,均值分别为4 724.52、5 041.08 mg/kg,变异系数分别为86.30%、54.17%。

湖南典型稻作烟区植烟土壤耕作层中交换性钙质量分数总体较高,适宜烤烟生长的土壤占8.33%,处于高水平以上(>1 200 mg/kg)的占91.67%;非耕作层中交换性钙质量分数处于高水平以上的占96.67%。

表3 湖南典型稻作烟区植烟土壤交换性钙质量分数及其适宜性分布

Table 3 Mass fraction of exchangeable calcium and suitability distribution of tobacco-planting soils in typical rice-tobacco areas of Hunan Province

土层	变化范围/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	均值±标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ %	交换性钙质量分数适宜性分布频率/%				
				≤400 mg/kg	>400~800 mg/kg	>800~1 200 mg/kg	>1 200~2 000 mg/kg	>2 000 mg/kg
D1	978.90~12 698.73	4 595.07±4 036.18	87.84	0.00	0.00	6.67	26.67	66.66
D2	1 047.43~12 722.42	4 853.97±4 183.21	86.18	0.00	0.00	10.00	26.67	63.33
D1+D2	978.90~12 722.42	4 724.52±4 077.46	86.30	0.00	0.00	8.33	26.67	65.00
D3	933.02~12 602.87	5 129.90±4 040.63	78.77	0.00	0.00	6.67	30.00	63.33
D4	965.65~9 718.33	5 105.01±1 897.66	37.17	0.00	0.00	3.33	6.67	90.00
D5	1 285.98~8 270.63	4 888.32±1 708.48	34.95	0.00	0.00	0.00	6.67	93.33
D3+D4+D5	933.02~12 602.87	5 041.08±2 730.63	54.17	0.00	0.00	3.33	14.45	82.22
全土层	933.02~12 722.42	4 914.45±3 325.86	67.31	0.00	0.00	5.33	19.34	75.33

### 2.2.2 交换性镁

由表4可知,湖南典型稻作烟区植烟土壤全土层交换性镁质量分数为53.98~910.75 mg/kg,均值为300.46 mg/kg,变异系数为58.02%,呈中等变异,非耕作层的交换性镁质量分数显著高于耕作层的。从适宜性分布频率来看,湖南典型稻作烟区植烟土

壤交换性镁质量分数总体较高,处于适宜范围的土壤占34.67%,质量分数低的土壤仅占1.33%,质量分数高与极高的土壤占64.00%。从不同土层来看,D1、D2、D3层交换性镁质量分数处于适宜水平的土壤占比均较高,分别为43.33%、56.67%、50.00%。

表4 湖南典型稻作烟区植烟土壤交换性镁质量分数及其适宜性分布

Table 4 Mass fraction of exchangeable magnesium and suitability distribution of tobacco-planting soils in typical rice-tobacco areas of Hunan Province

土层	变化范围/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	均值±标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ %	交换性镁质量分数适宜性分布频率/%				
				≤50 mg/kg	>50~100 mg/kg	>100~200 mg/kg	>200~400 mg/kg	>400 mg/kg
D1	127.38~660.38	(252.11±116.33)b	46.14	0.00	0.00	43.33	46.67	10.00
D2	109.77~589.77	(233.67±107.95)b	46.20	0.00	0.00	56.67	33.33	10.00
D1+D2	109.77~660.38	(242.89±111.65)b	45.97	0.00	0.00	50.00	40.00	10.00
D3	53.98~576.50	(213.25±111.29)b	52.19	0.00	6.67	50.00	36.67	6.66
D4	162.21~895.81	(401.46±208.13)a	51.84	0.00	0.00	16.66	46.67	36.67
D5	192.56~910.75	(401.82±197.99)a	49.27	0.00	0.00	6.67	53.33	40.00
D3+D4+D5	53.98~910.75	(338.84±197.23)a	58.21	0.00	2.22	24.44	45.56	27.78
全土层	53.98~910.75	300.46±174.34	58.02	0.00	1.33	34.67	43.33	20.67

注:同列不同小写字母表示土层间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

### 2.2.3 钙镁比

土壤中营养元素的供应水平不仅取决于元素本身有效含量,还与元素间的均衡性、协调性等因素紧密相关。当土壤中交换性钙镁比值超出5~10的正常范围时,易引发缺镁现象<sup>[18]</sup>。由表5可知,湖南典型稻作烟区植烟土壤全土层钙镁比的范围为

4.32~86.35,均值为19.31。其中,耕作层钙镁比低于5的土壤占1.67%,处于5~10范围的适宜土壤占33.33%,钙镁比大于10的土壤占65.00%;非耕作层钙镁比低于5的土壤占2.22%,处于适中范围的土壤占28.89%,钙镁比大于10.00的土壤占68.89%。

表5 湖南典型稻作烟区植烟土壤钙镁比及其适宜性分布

Table 5 Calcium to magnesium ratio and suitability distribution of tobacco-planting soils in typical rice-tobacco area of Hunan province

土层	变化范围	均值±标准差	变异系数/%	钙镁比适宜性分布频率/%		
				<5	5~10	>10
D1	5.29~64.02	(18.61±16.75)ab	90.01	0.00	43.33	56.67
D2	4.90~72.00	(21.04±18.48)ab	87.83	3.33	23.33	73.34
D1+D2	4.90~72.00	(19.83±17.53)ab	88.40	1.67	33.33	65.00
D3	5.85~86.35	(26.41±22.91)a	86.75	0.00	23.33	76.67
D4	5.21~40.67	(15.55±9.34)b	60.06	0.00	33.33	66.67
D5	4.32~36.10	(14.96±9.11)b	60.90	6.67	30.00	63.33
D3+D4+D5	4.32~86.35	(18.97±15.96)b	84.13	2.22	28.89	68.89
全土层	4.32~86.35	19.31±16.55	85.71	2.00	30.67	67.33

注：同列不同小写字母表示土层间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.2.4 有效硫

由表6可知，湖南典型稻作烟区植烟土壤全土层有效硫质量分数为25.63~132.51 mg/kg，均值为58.59 mg/kg，变异系数为36.41%，呈中等变异。在0~40 cm土层间，土壤有效硫质量分数随土层的加

深显著降低，耕作层土壤有效硫质量分数显著高于非耕作层的。其中，耕作层土壤有效硫质量分数全部处于高水平及以上，处于极高水平的占96.67%；非耕作层土壤有效硫质量分数处于高水平的占40.00%，处于极高水平的占60.00%，均高于适宜烤烟生产的临界值(16.0 mg/kg)<sup>[19]</sup>。

表6 湖南典型稻作烟区植烟土壤有效硫质量分数及其适宜性分布

Table 6 Mass fraction of effective sulfur and suitability distribution of tobacco-planting soils in typical rice-tobacco areas of Hunan Province

土层	变化范围/(mg·kg <sup>-1</sup> )	均值±标准差/(mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数/%	有效硫质量分数适宜性分布频率/%				
				≤5.00 mg/kg	>5.00~10.00 mg/kg	>10.00~20.00 mg/kg	>20.00~40.00 mg/kg	>40.0 mg/kg
D1	50.68~113.29	(80.79±19.72)a	24.41	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
D2	34.66~132.51	(69.97±19.53)b	27.91	0.00	0.00	0.00	6.67	93.33
D1+D2	34.66~132.51	(75.38±20.21)ab	26.81	0.00	0.00	0.00	3.33	96.67
D3	26.79~85.92	(54.00±14.41)c	26.69	0.00	0.00	0.00	23.33	76.67
D4	30.29~69.02	(43.85±9.94)d	22.67	0.00	0.00	0.00	43.33	56.67
D5	25.63~71.94	(44.35±12.64)d	28.50	0.00	0.00	0.00	53.33	46.67
D3+D4+D5	25.63~85.92	(47.40±13.19)cd	27.83	0.00	0.00	0.00	40.00	60.00
全土层	25.63~132.51	58.59±21.33	36.41	0.00	0.00	0.00	25.33	74.67

注：同列不同小写字母表示土层间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.3 湖南典型稻作烟区土壤中量元素质量分数与pH的关系

2.3.1 相关性分析结果

由表7可知，从全土层看，湖南典型稻作烟区植烟土壤交换性钙质量分数与pH呈极显著正相关，有效硫质量分数与pH呈极显著负相关，而交换性镁质量分数与pH则无显著相关性。在耕作层，相关性规律与全土层的一致；在非耕作层，交换性镁、有效硫质量分数分别与pH呈极显著和显著负相关，而交换性钙质量分数与pH则无显著相关性。

表7 湖南典型稻作烟区植烟土壤中量元素质量分数与pH的相关系数

Table 7 Correlation between pH and mass fractions of medium elements of tobacco-planting soils in typical rice-tobacco area of Hunan province

土层	元素质量分数与pH的相关系数		
	交换性钙	交换性镁	有效硫
D1	0.582**	0.181	-0.377*
D2	0.629**	0.325	-0.360
D1+D2	0.597**	0.144	-0.367**
D3	0.301	0.374*	-0.419
D4	0.452*	-0.278	0.114
D5	0.157	-0.360	-0.425*
D3+D4+D5	0.077	-0.305**	-0.241*
全土层	0.374**	-0.001	-0.461**

注：\*\*、\*分别表示在0.01、0.05水平上显著相关。

### 2.3.2 分组回归分析结果

由于土壤中微量元素质量分数与pH的相关关系在耕作层和非耕作层中不完全一致,其相关关系可能并不符合简单的线性回归。因此,将湖南典型稻作烟区植烟土壤pH按[5.13, 5.50), [5.50, 6.00), [6.00, 6.50), [6.50, 7.00), [7.00, 7.50), [7.50, 8.00), [8.00, 8.30]分为7组,其各组土壤样本量分别为2、5、5、21、28、59、30个,共150个样品。其中,耕作层组样本量分别为2、2、4、16、8、22、6个;非耕作层组样本数量分别为0、3、1、5、20、37、24个。分别统计不同土壤pH组中钙、镁、硫元素质量分数的平均值。采用分组回归方法,分析土壤中微量元素质量分数与pH(x)的量化关系,结果如图1所示。由图1可以看出,湖南典型稻作烟区植烟土壤交换性钙质量分数( $y_1$ )与pH呈曲线关系( $y_1=1\ 329.7x^2-18\ 600x+59\ 242$ ,  $R^2=0.844\ 8$ )。当土壤pH处于5.0~7.0

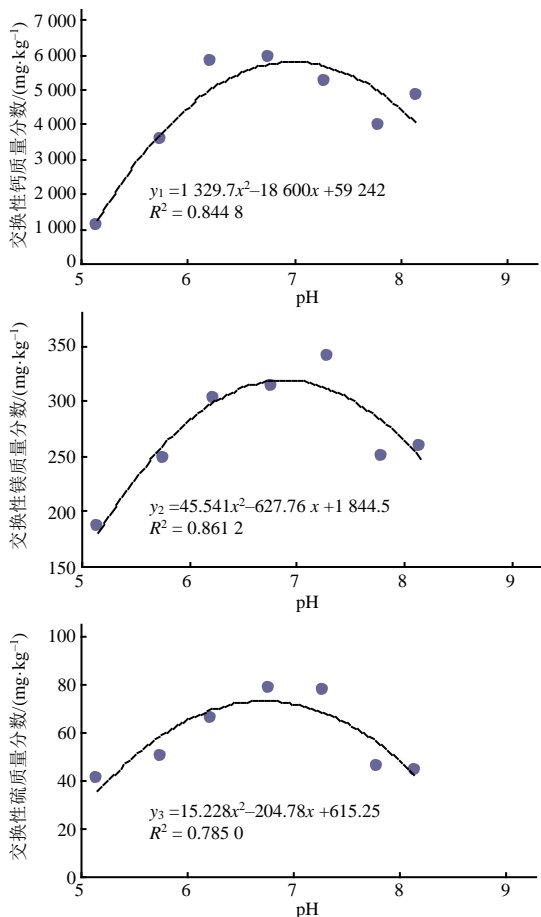


图1 湖南典型稻作烟区植烟土壤中微量元素质量分数与pH的分组回归分析结果

Fig. 1 Relationship between the mass fraction of medium elements and pH value of tobacco-planting soils in the typical rice-tobacco area of Hunan province

范围时,交换性钙质量分数随pH升高而升高;当土壤pH大于7.0时,交换性钙质量分数随pH升高而降低。交换性镁质量分数( $y_2$ )与pH呈曲线关系( $y_2=45.541x^2-627.76x+1\ 844.5$ ,  $R^2=0.861\ 2$ )。有效硫质量分数( $y_3$ )与pH也呈曲线关系( $y_3=15.228x^2-204.78x+615.25$ ,  $R^2=0.785\ 0$ )。交换性镁、有效硫质量分数随土壤pH变化的趋势均与交换性钙质量分数的一致。

### 3 结论与讨论

对湖南典型稻作烟区土壤交换性钙、交换性镁、有效硫的分析结果表明,该区土壤交换性钙、镁含量处于较高水平,其原因可能与长期大量施用硝酸铵钙和钙镁磷肥有关,同时长期使用地下水灌溉,也易导致钙离子和镁离子沉积<sup>[20]</sup>;过量石灰的施用加剧土壤中钙、镁离子的平衡失调,使其含量呈上升趋势,破坏土壤结构,形成石灰性板结田<sup>[21]</sup>。土壤有效硫含量过高,可能与烟叶生产中大量追施硫酸钾有关,进而导致耕作层的有效硫含量高于非耕作层的<sup>[15]</sup>。湖南典型烟区植烟土壤有效钙、镁的含量偏高,与其烟稻轮作、复种指数较高、施用钙镁磷肥过多有关<sup>[22]</sup>,大量的钙镁磷肥在烤烟收获后仍有部分残留在土壤中。当区域钙镁比超过正常值(10)时,容易造成烟株生理性缺镁,建议控施含钙肥料(可选择氮肥和氯化钾),以减少土壤中的交换性钙含量,从而降低钙镁比。针对高钙区和高镁区,建议在烤烟种植过程中施用其他含磷肥料代替钙镁磷肥,以减少土壤中交换性钙、镁的过度积累<sup>[23]</sup>。有效硫的含量偏高可能与大量施用硫酸钾有关,在持续补钾的过程中,硫酸根离子易在土壤中累积<sup>[24-25]</sup>。因此,生产上应减少硫酸钾等含硫肥料的施用,或改用氯化钾肥,并加强对新型含钾肥料的研究,以降低土壤中硫的含量。

另外,湖南典型稻作烟区长期浅耕也是导致耕作层土壤养分表聚的重要原因。在种植过程中,大量施用有机肥,以及收获后将根系、留茬和秸秆等直接留在耕作层,增加了浅层土壤的有机质含量;而非耕作层由于受人为耕作影响较小,土壤较为紧实,外源有机物质难以往下迁移,进而导致底层有机质不断矿化损耗<sup>[26]</sup>。刘智炫等<sup>[27-28]</sup>研究表明,长期浅耕不利于土壤养分的均衡分布,导致深层土壤

容重增加,阻碍烟草根系下扎和对养分的吸收,从而影响烤烟的产量与品质。烟稻轮作田以传统旋耕为主。ZHENG等<sup>[29]</sup>认为,长期旋耕导致耕层变薄,犁底层上移,土壤紧实度增加,土壤渗透阻力增大。采用粉垄深耕能显著改善土壤耕层结构,调节养分垂直分布状态,增强土壤的通透性,有利于土壤养分充分释放<sup>[30]</sup>,但过度频繁深耕会影响土壤结构,导致养分流失,对耕地资源造成极大的破坏。因此,可考虑秸秆覆盖配合间歇深耕(先深耕后免耕),以增加土壤大团聚体数量,提高土壤团聚体稳定性和有机碳含量<sup>[31]</sup>。另有研究<sup>[32]</sup>显示,烟稻轮作模式显著提高了土壤pH,而土壤pH是显著影响土壤细菌群落变化的环境变量,在耕作超过40年的农田中,土壤细菌群落稳定性下降,这可能是导致土壤养分垂直分布不均的原因之一。本研究中,湖南典型稻作烟区植烟土壤交换性镁和有效硫含量呈中等变异,而交换性钙含量属于高度变异,这说明土壤中微量元素空间分布受耕作方式和栽培制度等因素的影响,在不同土层之间出现较大差异。为此,生产中因地制宜地缩短连作年限,将常规耕作模式转变为间歇性粉垄深耕模式,以改善养分在耕层的分布状况,提高下层、深层养分含量。

本研究中,土壤交换性钙含量与pH呈极显著正相关关系,并且pH对交换性钙含量的影响程度大于其对交换性镁含量的影响,这与廖勇等<sup>[18]</sup>、余小芬等<sup>[33]</sup>的试验结果类似。王雅妮等<sup>[34]</sup>的研究结果表明,陇南烟区土壤交换性镁含量与pH无显著相关性;陈建国等<sup>[35]</sup>研究认为,土壤有效硫含量与pH呈负相关关系,本研究也得到相似的结论。分组回归分析结果表明,湖南典型稻作烟区土壤中微量元素含量与pH呈曲线关系,其含量峰值出现在pH为7.0左右。基于以上结果,在烟叶生产过程中,酸性土壤可选用以牡蛎壳<sup>[36]</sup>、动物骨炭<sup>[37]</sup>为主要原料的土壤改良剂,或筛选适宜的石灰替代品,防止土壤钙过量累积。

综上,湖南典型稻作烟区植烟土壤交换性钙和有效硫含量极高,交换性镁含量丰富,且各土层分布不均匀,较高的钙镁比可能会导致大部分土壤有生理性缺镁的风险。耕作层的土壤pH和交换性镁含量显著低于非耕作层的,而耕作层的土壤有效硫含量显著高于非耕作层的。土壤交换性钙、交换性镁

和有效硫含量与pH均呈曲线关系,且在pH为7.0左右时其含量最高。在今后的优质烟叶生产中,建议增施有机肥,减少石灰石与硫酸钾的施用。此外,采取深耕深松措施,构建合理耕层结构,可使土壤中钙、镁、硫元素分布更加均匀,有利于烤烟根系多方位高效吸收养分,促进湖南稻作烟区烟叶生产的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 胡国松,郑伟,王震东,等. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] LÓPEZ-LEFEBRE L R, RIVERO R M, GARCÍA P C, et al. Effect of calcium on mineral nutrient uptake and growth of tobacco[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2001, 81(14): 1334–1338.
- [3] 陈海生,刘大双,刘国顺. 河南襄城植烟区土壤中微量元素含量的空间异质性[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 582–589.
- [4] 陆元,荆永锋,周清明,等. 不同镁肥用量对湖南桑植县烤烟生长及烟叶产质量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2018, 33(3): 506–512.
- [5] 李银科,杨光宇,李忠,等. 中量元素对烟叶质量影响的研究进展[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(S1): 219–221, 226.
- [6] 胡瑞文,黎娟,向德明,等. 湘西州花垣烟区植烟土壤肥力适宜性评价及影响因素[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2018, 33(3): 520–528.
- [7] 周炼川,徐天养,张家征,等. 文山烟区植烟土壤pH分布特点及其与主要养分的相关关系[J]. *中国烟草学报*, 2014, 20(1): 61–64.
- [8] 邓小华,李源环,周米良,等. 武陵山地植烟土壤养分和酸度垂直分布特征[J]. *中国烟草科学*, 2018, 39(3): 48–58.
- [9] 朱英华,屠乃美,肖汉乾,等. 烟-稻复种连作年限对土壤钙镁硫含量的影响[J]. *华北农学报*, 2012, 27(1): 218–222.
- [10] CAMPO J, MAASS J M, JARAMILLO V J, et al. Calcium, potassium, and magnesium cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 49(1): 21–36.
- [11] 黄芬,胡刚,涂春燕,等. 岩溶区不同土地利用类型土壤钙形态分布特征[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(9): 1574–1578.
- [12] MA T T, YANG K, YANG L, et al. Different rotation years change the structure and diversity of microorganisms in the nitrogen cycle, affecting crop yield[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 193: 105123.
- [13] 周清明,邓小华,赵松义,等. 湖南浓香型烟叶的质

- 量风格特色及区域定位[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 570-579, 5.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 邓小华, 蔡兴, 张明发, 等. 喀斯特地区湘西州植烟土壤pH分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 308-313.
- [16] 罗建新, 石丽红, 龙世平. 湖南主产烟区土壤养分状况与评价[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(4): 376-380.
- [17] 陈江华, 刘建利, 李志宏, 等. 中国植烟土壤及烟草养分综合管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [18] 廖勇, 李岭, 刁朝强, 等. 贵阳市开阳县植烟土壤有效中量元素调查与分析[J]. 江西农业学报, 2015, 27(4): 37-40.
- [19] 初晓鹏, 张鑫, 杨斌, 等. 福建烟区初烤烟叶硫含量与烟叶质量的关系[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5): 496-500.
- [20] 许自成, 黎妍妍, 肖汉乾, 等. 湖南烟区土壤交换性钙、镁含量及对烤烟品质的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4425-4433.
- [21] 张思文, 陈晓辉, 蔡远扬, 等. 酸性红壤添加石灰对甜玉米幼苗生长、养分积累和土壤理化性质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(3): 41-52.
- [22] 黄文卿, 程金, 张世昌, 等. 福建省耕地土壤交换性钙空间分布特征及影响因子分析[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 848-855.
- [23] 谭军, 周冀衡, 古琦, 等. 文山植烟土壤交换性钙镁分布特征及影响因素分析[J]. 烟草科技, 2017, 50(9): 15-22.
- [24] 邓小华, 周冀衡, 赵松义, 等. 湖南烤烟硫含量的区域特征及其对烟叶评吸质量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2853-2859.
- [25] 梁颂捷, 林毅, 朱其清, 等. 福建植烟土壤pH值与土壤有效养分的相关性[J]. 中国烟草科学, 2001, 22(1): 25-27.
- [26] 周启运, 郑重谊, 荆永锋, 等. 湘南稻作烟区不同土层土壤有机质含量与氮磷钾关系研究[J]. 作物杂志, 2021(5): 114-119.
- [27] 刘智炫, 周清明, 穰中文, 等. 深耕对植烟土壤温湿度及烤烟根系发育和经济性状的影响[J]. 烟草科技, 2019, 52(12): 23-30.
- [28] 刘智炫, 刘勇军, 彭曙光, 等. 基于长期浅耕模式的烟稻轮作区土壤速效养分垂直分布特征[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(3): 28-35.
- [29] ZHENG B F, JING Y F, ZOU Y D, et al. Responses of tobacco growth and development, nitrogen use efficiency, crop yield and economic benefits to smash ridge tillage and nitrogen reduction[J]. *Agronomy*, 2022, 12(9): 2097.
- [30] 熊梓沁, 荆永锋, 贺非, 等. 粉垄深度对稻作烟区土壤理化特性及作物周年产量的影响[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(3): 46-55.
- [31] HU R W, LIU Y J, CHEN T, et al. Responses of soil aggregates, organic carbon, and crop yield to short-term intermittent deep tillage in Southern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 298: 126767.
- [32] CHEN T, HU R W, ZHENG Z Y, et al. Soil bacterial community in the multiple cropping system increased grain yield within 40 cultivation years[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 804527.
- [33] 余小芬, 李军营, 韩小女, 等. 云南曲靖植烟土壤交换性钙、镁与关联土壤属性的特征研究[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1240-1245.
- [34] 王雅妮, 梁洪波, 王树声, 等. 陇南植烟土壤交换性镁与烟叶中镁含量特征及关系分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(4): 50-54.
- [35] 陈建国, 张杨珠, 曾希柏, 等. 长期不同施肥对水稻土交换性钙、镁和有效硫、硅含量的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2064-2067.
- [36] 吴一群, 郑祥洲, 王永明, 等. 牡蛎壳调理剂对稻田土壤环境及水稻生长的影响[J]. 福建农业科技, 2022, 53(11): 53-57.
- [37] 赵文瑞, 孔群芳, 张文娟, 等. 骨粉生物质炭对酸性土壤的改良作用[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1299-1309.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正