

耕作方式对紫色水稻土全硫及有效硫的影响^①

黄小娟^{1,2}, 江长胜^{1,2}, 郝庆菊^{1,2*}, 袁雪^{1,2}

(1 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学资源环境学院, 重庆 400715;

2 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 以位于西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站 1990 年设立的长期免耕试验田为研究对象, 通过采集 0~60 cm 土壤, 应用等质量计算方法, 探讨了冬水田平作 (DP)、水旱轮作 (SH)、垄作免耕 (LM) 和垄作翻耕 (LF) 等不同耕作方式对土壤全硫和有效硫的影响。结果表明, 在 0~60 cm 深度内, 土壤全硫和有效硫含量呈现出明显的垂直递减规律, 即随着土壤深度的增加, 含量逐渐降低; 不同耕作方式下, 土壤全硫含量及储量为 LM>SH>DP>LF, 有效硫含量及储量为 LM>DP>LF>SH。长期垄作免耕提高了土壤全硫及有效硫的含量和储量, 与对照 DP 处理相比, LM 处理全硫与有效硫含量分别增加了 20.80% 和 1.31%, 储量分别增加了 19.54% 和 5.36%。耕作层 (0~20 cm), DP、SH、LM、LF 处理土壤有效硫平均含量分别为 27.15、13.45、31.43 和 24.01 mg/kg, DP、LF 以及 LM 处理为硫不缺或硫丰足, 而 SH 处理为缺硫土壤 (土壤有效硫含量<16 mg/kg)。对缺硫土壤, 应重视硫肥的施用, 以促进农作物产量和品质的提高。

关键词: 耕作; 全硫; 有效硫; 紫色水稻土

中图分类号: Q948

硫是植物生长发育不可缺少的 16 种主要营养元素之一, 被认为是继氮、磷、钾后第 4 位主要营养元素, 它参与植物体多种物质的组成。植物缺硫会造成蛋白质、叶绿素的合成受阻, 出现生长停滞、植株矮小瘦弱、嫩叶退绿黄化、产量降低等不良后果^[1-2]。据估计, 到 2012 年世界农业缺硫量每年达 1 100 万 t, 而亚洲和美洲将成为全球最严重的缺硫地区^[3]。在我国随着复种指数的增加, 农作物产量的提高, 含硫少高浓度复合肥料的发展及传统有机肥料的使用减少, 硫的归田量有减无增, 导致土壤含硫量下降, 许多地区出现缺硫现象^[4-6]。

耕作制度作为农业管理措施的一项重要内容, 对土壤质量具有较大的影响。有研究表明, 随着土壤翻耕程度的降低, 土壤养分含量逐渐增加, 免少耕有利于土壤质量的提高^[7-9]。在当前大气 CO₂ 浓度不断升高, 全球气候逐渐变暖的情景下, 国内外关于耕作方式对土壤碳的影响研究日趋火热, 研究成果非常丰富^[10-12]; 此外, 关于不同耕作方式对土壤氮的影响研究也有一些报道^[13-15]。但是, 迄今为止, 关于耕作方式

对土壤硫的影响研究还非常少见。本研究以在西南地区紫色水稻土进行了 20 年 40 茬的定位实验点为研究对象, 探讨冬水田平作、水旱轮作、垄作免耕和垄作翻耕等 4 种耕作方式对土壤全硫及有效硫的影响, 以期为农业的可持续发展提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

稻田长期垄作免耕定位试验始于 1990 年, 设在西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站内, 该站位于西南大学实验农场 ($106^{\circ}26' E$, $30^{\circ}26' N$), 海拔 230 m。气候条件属于中亚热带湿润季风气候, 年平均气温 18.3°C, 年降雨量 1 150.4 mm, 5—9 月的降雨量占全年雨量的 70%, 年均日照 1 276.7 h, 无霜期年均为 334 天, 处于北碚向斜的中部。土壤类型为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土。其基本理化性质为: pH 7.1, 有机质 23.1 g/kg, 全氮 1.7 g/kg, 全磷 0.8 g/kg, 全钾 22.7 g/kg, 碱解氮 120.1 mg/kg, 有效磷 7.5 mg/kg, 速

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (41005069 和 40805050)、教育部博士点新教师基金项目 (200806351014)、中央高校基本科研业务费专项资金 (XDKJ2009B026) 和西南大学生态学重点学科“211 工程”三期建设项目资助。

* 通讯作者 (haoqingju@163.com)

作者简介: 黄小娟 (1988—), 女, 四川自贡人, 硕士研究生, 主要从事农田生态系统碳循环研究。E-mail: huangxiaojuan88413@163.com

效钾 71.1 mg/kg, 物理性砂粒 447.4 mg/kg, 物理性黏粒 144.2 mg/kg。试验前一直采用一季中稻加冬水耕作制度。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 1990 年开始建立紫色水稻土不同耕作制度的长期定位试验, 本研究共设置了 4 个处理: ①冬水田平作 (中稻-冬水田, 简称 DP), 代表四川盆地稻田传统耕作方法, 终年处于淹水状态, 保持水层深度为 3 cm 左右。按传统方法每年三犁三耙翻耕植稻, 水稻收获后将稻茬 2 748.0 ~ 3 301.5 kg/(hm²·a) 和杂草 1 912.5 ~ 3 154.5 kg/(hm²·a) 翻入土中, 并灌冬水; ②水旱轮作 (中稻-油菜, 简称 SH), 淹水平作种植水稻, 水稻收获后, 放干田内的水, 翻耕, 将稻茬 2 697.0 ~ 3 532.5 kg/(hm²·a) 翻入土中, 种油菜。油菜生长期, 尽可能地保持四边沟内无积水。油菜收获后灌水, 翻耕将油菜残茬 768.0 ~ 987.0 kg/(hm²·a) 和杂草 6 217.5 ~ 8 004.0 kg/(hm²·a) 翻入土中, 种水稻; ③垄作免耕 (中稻-油菜, 简称 LM), 全年不翻不耕, 作垄方法为: 拉线起垄, 将垄沟的土壤抱在垄埂上, 垄面不宜用手抹平, 尽量保持土壤结构, 一垄一沟 55 cm, 垄顶宽 25 cm, 沟宽 30 cm, 沟深 35 cm, 水稻移栽到成活期间水面与垄顶齐平, 全年其余时间保持沟内水深 25 ~ 30 cm (即垄露出水面 5 ~ 10 cm)。水稻植在垄埂的两侧, 每垄栽两行, 每小区作 5 垒, 水稻收获后排水降低水位, 将沟内的稀泥扶到垄上, 稻茬 3 562.5 ~ 4 024.5 kg/(hm²·a) 覆盖, 种植油菜。油菜生长期, 沟内水位 5 ~ 10 cm (即垄露出水面 20 ~ 25 cm), 保持垄埂湿润, 第二年油菜收获后将油菜残茬 742.5 ~ 940.5 kg/(hm²·a) 和杂草 8 746.5 ~ 10 011.0 kg/(hm²·a) 埋在沟底, 灌水, 水面与垄顶齐平, 种植水稻。④垄作翻耕 (中稻-油菜, 简称 LF), 作垄规格与处理 3 相同, 油菜收获后, 翻耕将油菜残茬 742.5 ~ 940.5 kg/(hm²·a) 和杂草 8 746.5 ~ 10 011.0 kg/(hm²·a) 翻入土中, 重新作垄种稻。

每一处理小区面积为 20 m², 4 次重复, 随机区组排列。各处理施肥量均为: 尿素 125 kg/hm², 过磷酸钙 60 kg/hm², 氯化钾 75 kg/hm²。每年油菜和水稻的施肥都是过磷酸钙作底肥一次施用; 尿素用量的 2/3 作底肥, 1/3 作追肥; 氯化钾底肥和追肥各 1/2。各处理播种、施肥、水分管理一致。

1.2.2 样品的采集和制备 土壤样品采于 2009 年 4 月下旬油菜收割后, 在各耕作处理中按 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50、50 ~ 60 cm 分层采样, 采集的土样经自然风干后研磨, 取过 0.5 mm 和 2 mm

筛孔的土样备用以测定土壤全硫及有效硫。

1.2.3 土壤全硫和有效硫的测定 土壤全硫采用 Mg(NO₃)₂ 氧化-BaSO₄ 比浊法测定^[16]; 土壤有效硫采用磷酸盐-乙酸浸提-硫酸钡比浊法测定^[16]。

1.2.4 等质量土壤硫储量计算方法^[17]

$$M_{\text{soil}} = \rho_b \cdot T \cdot 10\,000 \quad (1)$$

$$M_s = M_{\text{soil}} \cdot conc \cdot 0.001 \quad (2)$$

$$T_{\text{add}} = \frac{(M_{\text{soil, equiv}} - M_{\text{soil, surf}}) \times 0.000\,1}{\rho_{b, \text{subsurf}}} \quad (3)$$

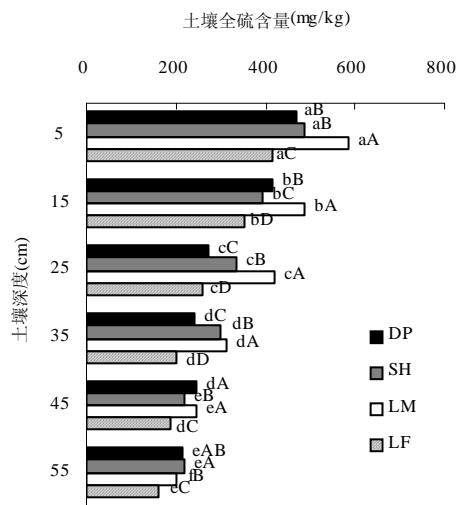
式中, M_{soil} 为单位面积土壤质量 (Mg/hm²); ρ_b 为土壤体积质量 (g/cm³); T 为土壤深度 (m); $conc$ 为土壤硫含量 (g/kg); M_s 为单位面积硫储量 (Mg/hm²)。 T_{add} 为要达到等质量土壤需要另加的亚表层土壤深度 (m); $M_{\text{soil, equiv}}$ 为最大土壤质量 (Mg/hm²); $M_{\text{soil, surf}}$ 为表层土壤质量之和 (Mg/hm²); $\rho_{b, \text{subsurf}}$ 为亚表层土壤体积质量 (g/cm³), 在此实验中为 60 ~ 70 cm 土层的土壤体积质量。

1.2.5 统计分析 利用 SPSS16.0 软件对数据进行方差分析, 用最小显著差数法 (LSD) 进行显著性检验, 采用 Excel2003 作图。

2 结果和分析

2.1 耕作方式对土壤全硫含量的影响

图 1 为不同耕作方式下土壤全硫含量的剖面分布。从图 1 可以看出, 各耕作方式下土壤全硫含量在土壤剖面上产生分异, 呈现出明显的分层性, 即随着土壤深度的增加, 全硫含量呈递减趋势。研究表明, 在一般情况下, 土壤全硫在剖面中的分布为表土含量最高, 随着土壤深度的增加而逐渐减少^[18]。比如, 黄运湘等^[19]研究发现湖南省稻田土壤全硫随着土壤剖面层次的增加, 含量逐渐减少; 李新华等^[20]研究表明, 小叶樟湿地土壤全硫含量具有明显的分层性, 即沿着剖面由上到下逐渐降低。一般而言, 全硫含量的垂直分布特征主要受制于土壤有机质的分布, 本研究的数据分析也表明, 不同耕作方式下土壤全硫与有机碳含量均呈极显著正相关 (图 2), 表层土壤有机质含量丰富, 其硫素含量也最高, 剖面下层土壤有机质含量较低, 所以其硫素含量也较少。此外, 含硫化肥的施用也会导致硫素在土壤表层富集。但也有研究者观察到不同的实验现象, 孙万龙等^[21]在黄河口滨海潮滩研究发现, 不同类型湿地土壤中硫的垂直分布特征不同, 在 0 ~ 60 cm 的深度范围内, 随土壤深度的增加, 有的表现为先降低后增加再降低的“S”型变化趋势, 有的表



(图中不同小写字母及大写字母分别表示同一处理不同深度和同一土壤深度不同处理硫含量在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同。)

图 1 不同耕作方式土壤全硫含量的剖面分布

Fig. 1 The vertical distributions of soil total sulfur under different tillage systems

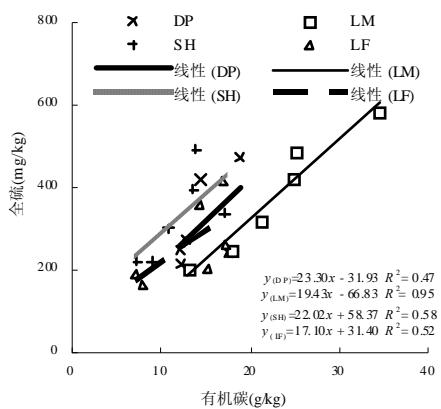


图 2 土壤全硫与有机碳的相关性

Fig. 2 Correlation between soil total sulfur and organic carbon

现为底部高表层低的变化趋势，并认为造成这种现象的原因可能是与成土母质以及有机质分布的空间异质性有关。

中国不同土壤类型全硫含量大致在 100 ~ 500 mg/kg。据统计, 南方 10 省耕作层土壤全硫平均含量为 299.2 mg/kg^[6,22]。本实验结果表明, 在耕作层 (0 ~ 20 cm), DP、SH、LM、LF 处理下的全硫平均含量分别为 442.80、441.01、534.92 和 344.27 mg/kg, 这说明西南地区紫色水稻土中的全硫含量处在中国全硫含量的变幅范围内, 并且高于南方 10 省的平均水平, 供硫潜力大。

在土壤剖面的各个层次上, 除 50 ~ 60 cm 土层全硫含量显著低于 SH 处理以外, LM 处理下的全硫含量都显著高于其他 3 种耕作处理, 而 LF 处理下各土层的全硫含量最低。在 0 ~ 60 cm 深度内, 各耕作处理下土壤全硫的含量为 LM (374.22 mg/kg) > SH (325.19 mg/kg) > DP (309.78 mg/kg) > LF (262.86 mg/kg)。相对于翻耕农作, 免耕可提高土壤全硫含量, 这一方面是因为免耕可降低土壤的扰动次数, 避免土壤结构的破坏, 降低了土壤侵蚀引起的土壤硫素的流失; 另一方面免耕提高了土壤有机质数量, 使施用的硫肥可保蓄在土壤之中^[23]。

2.2 耕作方式对土壤有效硫含量的影响

土壤有效硫包括易溶硫、吸附性硫和部分有机硫, 其剖面分布变化随土壤性质的不同而有较大的变化。图 3 为不同耕作方式下土壤有效硫的剖面分布, 从图 3 可以看出, 各耕作方式下土壤有效硫含量的剖面分布特征与全硫相同, 即呈现出明显的分层性, 随着土壤深度的增加, 有效硫含量总体上呈递减趋势。迟凤琴等^[24]在对黑土有效硫的研究中发现, 黑土有效硫含量在耕层最高, 随土层深度的增加土壤有效硫含量迅速下降。黄运湘等^[19]和李新华等^[20]的研究也都表明, 土壤有效硫含量随着土壤剖面层次的增加, 含量逐渐减少。有研究认为, 土壤有效硫在土壤剖面上的垂直递减形式主要受土壤有机碳的控制^[19,25~26], 本研究的数据分析表明, 不同耕作方式下土壤有效硫与有机碳含量均呈极显著正相关 (图 4), 因此有效硫含量也随土层增加而逐渐降低。但也有大量研究发现, 土壤有效硫含量随土壤深度的增加升高而呈现为底部累积现象。比如, 李守强^[27]研究表明, 定西县农田土壤有效硫含量随土壤深度的增加而升高, 主要累积在 50 ~ 80 cm 土层; 危峰等^[28]通过对黄土高原长期定位试验研究发现, 在 0 ~ 200 cm 土壤深度内有效硫含量呈现出明显的累积现象, 最高的累积峰值出现在 140 ~ 180 cm 土层, 另一个累积峰出现在 60 ~ 80 cm 土层。造成这种现象的原因可能有以下几点^[27~29]: ① SO_4^{2-} 带负电荷, 除特定条件外, 土壤黏粒和有机质对其吸附很少, 主要存留于土壤溶液中随水运动, 易于淋失; ② 土壤的质地疏松, 透水性强, 保水保肥力差, 当降雨集中特别是下暴雨时, 表层土壤的有效硫就易遭淋溶; ③ 大多数作物的根系主要分布在表层或亚表层, 由于常年的耕作, 使表层的土壤有效硫被作物吸收, 当硫的补充非常少时, 就会造成表层有效硫低于下层。

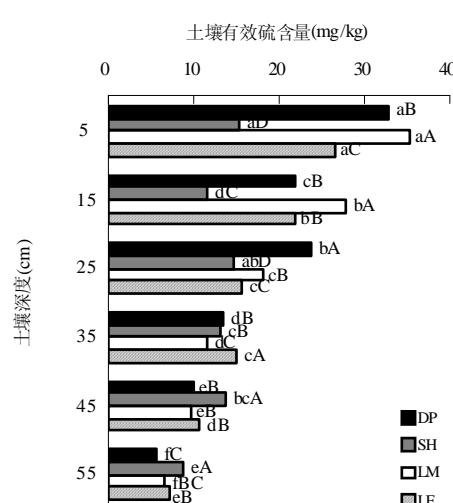


图 3 不同耕作方式土壤有效硫含量的剖面分布
Fig. 3 The vertical distributions of soil available sulfur under different tillage systems

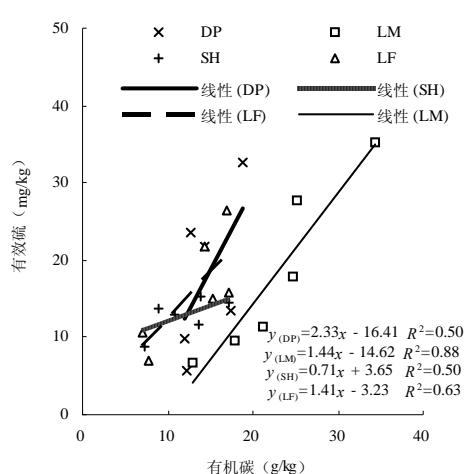


图 4 土壤有效硫与有机碳的相关性
Fig. 4 Correlation between soil available sulfur and organic carbon

在 0 ~ 20 cm 土层内, LM 处理下的土壤有效硫含量显著高于其他 3 种处理, 在 0 ~ 60 cm 深度内, 有效硫含量为 LM (18.09 mg/kg) > DP (17.85 mg/kg) > LF (16.10 mg/kg) > SH (14.70 mg/kg)。土壤芳基硫酸酯酶能催化水解有机硫化合物为有效硫, 而不同的耕作方式对土壤的水、气、热的调节作用是有差异的, 这必然会影响到土壤养分和酶活性的变化^[30-32]。研究表明, 垄作免耕以起垄、浸润、免耕为技术特点, 可增加土壤肥力, 改善土壤水热状况, 提高土壤酶活性, 尤其在土壤表层这种改善作用更为明显^[33]。土壤的酶活性可以反映整个土壤生物学的活性及土壤肥力指标, LM 处理下土壤酶活性较高, 土壤有机硫分解能

力强, 从而导致其有效硫含量高于其他几种处理。

土壤全硫只能反映该土壤对作物的供硫潜力, 而有效硫反映的则是能直接供作物吸收利用的硫的数量^[34]。土壤有效硫丰缺指标, 目前尚无统一的标准, 参考刘崇群等^[25]在研究我国南方土壤硫素状况中提出的土壤有效硫 3 级丰缺指标, 即土壤有效硫含量 < 16、16 ~ 30、30 ~ 50 mg/kg 为缺乏、不缺、丰足 3 级。本研究结果表明, 耕作层 DP、SH、LM、LF 处理下的有效硫平均含量分别为 27.15、13.45、31.43 和 24.01 mg/kg。根据上述标准衡量, SH 处理为硫缺乏, DP 和 LF 处理为硫不缺, LM 处理为硫丰足。但林葆等^[35]认为该标准偏低, 已不适应当前生产发展的要求, 他提出以 90% 相对产量对应的土壤有效硫含量测定值作为土壤有效硫临界值, 即水稻土壤有效硫缺乏的临界值为 23.8 mg/kg, 若以此值为衡量标准, DP、LM 以及 LF 处理土壤有效硫含量仍高于硫亏缺临界值, 而 SH 处理依然为缺硫土壤。

紫色水稻土有效硫含量占全硫含量的比值较低, DP、SH、LM、LF 处理下的耕作层土壤有效硫分别为全硫含量的 6.13%、3.05%、5.87% 和 6.25%, 远远低于南方 10 省的 11.5%^[22]。相关分析表明, 全硫含量和有效硫含量的相关性极显著 ($r = 0.836, P < 0.001$), 这与其他研究者的结果一致^[19,26], 说明全硫含量的高低在某种程度上可以反映土壤硫的丰缺状况。

2.3 耕作方式对等质量土壤全硫和有效硫储量的影响

当前, 在计算土壤硫储量的文献中大都是采用等深度计算方法^[21,36], 但耕作方式的改变会引起土壤体积质量 (容重) 的变化, 进而造成土壤质量的不相等, 即不同耕作处理下同等深度的土壤质量是不相等的。而单位面积或单位体积土壤硫储量又依赖于土壤质量, 所以当用等深度法计算不同耕作处理后的土壤硫储量时, 会出现一定的偏差甚至明显的错误, 不足以客观评估耕作方式改变引起的硫储量的改变^[37]。因此, 本研究借鉴 Ellert 和 Bettany^[17]提出的等质量方法来计算土壤硫储量。

表 1 列出了各耕作处理下不同深度的全硫及有效硫储量。DP 处理表层土壤在水的长期浸泡下, 土粒分散, 结构差, 土壤体积质量很低, 0 ~ 10 cm 土层土壤体积质量只有 0.75 g/cm^3 ; 起垄后, 消除了水层对土壤结构的不良影响, 土壤颗粒逐渐团聚, 土壤体积质量明显增加。SH 处理在油菜种植季节由于土壤水分含量最低, 土壤体积质量最高。因此, 该处理下 0 ~ 60 cm 土层土壤质量最大, 为 $7640 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。DP、LM 和 LF 处理要达到此土壤质量需要增加的土壤深度分别为

7.574、6.515、3.355 cm, 相应增加的全硫储量分别为0.220、0.171和0.081 Mg/hm², 有效硫储量分别为0.006、0.006和0.004 Mg/hm²。因此, 各耕作方式下全硫储量的高低顺序依次为LM(2.563 Mg/hm²)>SH(2.399 Mg/hm²)>DP(2.144 Mg/hm²)>LF(1.828

Mg/hm²), 有效硫储量为LM(0.118 Mg/hm²)>DP(0.112 Mg/hm²)>LF(0.110 Mg/hm²)>SH(0.097 Mg/hm²)。相对于翻耕农作, 免耕提高了土壤全硫及有效硫的储量, 与对照DP处理相比, LM处理全硫与有效硫储量分别提高了19.54%和5.36%。

表1 不同耕作方式下土壤全硫和有效硫储量 (Mg/hm²)

Table 1 Storages of soil total sulfur and available sulfur under different tillage systems

土壤 深度 (cm)	DP				SH				LM				LF			
	体积质量 (g/cm ³)	全硫		有效硫	体积质量 (g/cm ³)	全硫		有效硫	体积质量 (g/cm ³)	全硫		有效硫	体积质量 (g/cm ³)	全硫		有效硫
		0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	0~60	T _{add}	M _{s, add}	M _s			0~60	T _{add}	M _{s, add}
0~10	0.75	0.352	0.024	1.12	0.548	0.017	0.88	0.514	0.031	0.88	0.365	0.023	0~60	7.574	0~60	0.355
10~20	0.89	0.371	0.019	1.00	0.393	0.012	0.91	0.442	0.025	0.89	0.315	0.019	0~60	6.515	0~60	0.315
20~30	1.07	0.292	0.025	1.22	0.408	0.018	1.14	0.478	0.021	1.16	0.300	0.018	0~60	3.355	0~60	0.265
30~40	1.25	0.300	0.017	1.40	0.417	0.018	1.14	0.358	0.013	1.31	0.265	0.020	0~60	2.392	0~60	0.228
40~50	1.31	0.323	0.013	1.48	0.321	0.020	1.34	0.327	0.013	1.46	0.274	0.016	0~60	0.171	0~60	0.081
50~60	1.34	0.286	0.008	1.42	0.312	0.012	1.37	0.273	0.009	1.43	0.228	0.010	0~60	0.097	0~60	0.004
0~60	1.924	0.106		2.399	0.097		2.392	0.112		2.392	0.112		0~60	0.009	0~60	0.110
T _{add}	7.574			0			6.515						0~60		0~60	
M _{s, add}	0.220	0.006		0	0		0.171	0.006		0.171	0.006		0~60		0~60	
M _s	2.144	0.112		2.399	0.097		2.563	0.118		2.563	0.118		0~60		0~60	

注: 表中T_{add}表示DP、LM和LF处理要达到SH处理0~60 cm土层土壤质量需要增加的土壤深度(cm); M_{s, add}表示相应增加的硫储量(Mg/hm²); M_s表示相同质量土壤总的硫储量(Mg/hm²)。

3 结论

(1) 土壤全硫和有效硫含量在土壤剖面上呈垂直递减性, 即随着土壤深度的增加, 各耕作方式下土壤全硫和有效硫含量在总体上呈递减趋势。

(2) 垄作免耕可提高土壤全硫及有效硫的含量, 与对照DP处理相比, LM处理全硫与有效硫含量分别增加了20.80%和1.31%;

(3) 垄作免耕可提高土壤全硫及有效硫的储量, 与对照DP处理相比, LM处理全硫与有效硫储量分别增加了19.54%和5.36%;

(4) 不同耕作方式下土壤硫的丰缺状态也不同, LM处理为硫丰足, DP和LF处理为硫不缺, 而SH处理为硫缺乏。因此对SH处理这类缺硫土壤, 应重视硫肥的施用。

参考文献:

- [1] 赵洪涛, 周健民, 范晓晖, 刘崇群. 太湖地区主要类型水稻土上施用不同硫肥对水稻氮、硫吸收的影响. 土壤学报, 2006, 43(5): 864~867
- [2] 于群英, 熊冠庭. 凤阳县土壤有效硫含量状况及硫肥对大豆营养的影响. 安徽农学通报, 2005, 11(6): 83~84
- [3] 樊明宪, Messick DL, Brey CD, 汤建伟, 穆荣哲. 世界硫需求及硫肥状况. 磷肥与复肥, 2005, 20(6): 5~8
- [4] 迟凤琴, 魏丹, 申惠波, 吴英, 张玉龙. 黑龙江省主要耕地土壤硫素现状研究. 土壤通报, 2003, 34(3): 209~211
- [5] 黄启为, 杨志辉, 刘鹏, 黎星辉, 葛旦之. 湖南省旱地土壤硫素状况及作物施硫效应. 土壤, 2003, 32(2): 126~135
- [6] 刘崇群. 中国南方土壤硫的状况和对硫肥的需求. 磷肥与复肥, 1995(3): 14~18
- [7] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 晋小军, Li GD, Chan KY. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响. 生态学报, 2005, 25(9): 2 326~2 332
- [8] 谢德体, 魏朝富, 杨剑虹. 自然免耕下的稻田生态系统. 应用生态学报, 1994, 5(4): 415~421
- [9] 孙海国. 保护性耕作和植物残体对土壤养分状况的影响. 生态农业研究, 1997, 5(1): 47~51
- [10] Carvalho JLN, Cerri CEP, Feigl BJ, Piccolo MC, Godinho VP, Cerri CC. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. Soil & Tillage Research, 2009, 103: 342~349
- [11] López-Fando C, Pardo MT. Changes in soil chemical

- characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104: 278–284
- [12] Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A, Dieckow J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil & Tillage Research*, 2006, 86: 237–245
- [13] 高明, 李阳兵, 魏朝富, 谢德体. 稻田长期垄作免耕对土壤肥力性状的影响研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 29–33
- [14] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 储国良, 王全洪. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 549–552
- [15] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 王志明, 李生秀. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 27–30
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [17] Ellert BH, Bettany JR. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75: 529–538
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [19] 黄运湘, 郭春秋, 张杨珠, 周清, 郭朝晖. 湖南省稻田土壤硫素状况研究. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 235–238
- [20] 李新华, 刘景双, 孙志高. 三江平原小叶樟湿地植物-土壤系统中硫素分布及季节变化动态. *土壤通报*, 2007, 38(1): 85–88
- [21] 孙万龙, 孙志高, 牟晓杰, 王玲玲. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤磷、硫的分布特征. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 104–109
- [22] 刘崇群. 硫肥的重要性和我国对硫肥的需求趋势. *硫酸工业*, 1995(5): 20–23
- [23] 高云超, 朱文珊, 陈文新. 稜秆覆盖免耕土壤微生物生物量与养分转化的研究. *中国农业科学*, 1994, 27(6): 41–49
- [24] 迟凤琴, 汪景宽, 张玉龙, 魏丹. 黑土有效硫含量状况及其评价. *土壤通报*, 2007, 38(6): 1169–1173
- [25] 刘崇群, 陈国安, 曹淑卿, 刘元昌. 我国南方土壤硫素状况和硫肥施用. *土壤学报*, 1981, 18(2): 185–193
- [26] 高义民, 同延安, 孙本华, 赵护兵. 陕西农田土壤硫分布特征及其与土壤性质的关系. *西北农业学报*, 2005, 14(3): 177–180
- [27] 李守强. 定西县农田土壤有效硫含量及其剖面分布规律. *甘肃农业科技*, 2003(9): 36–37
- [28] 危峰, 郝明德. 长期施氮磷化肥对不同种植体系土壤有效硫累积研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3): 613–617
- [29] 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*. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 62–64
- [30] 张玉兰, 陈利军. 土壤芳基硫酸酯酶及其活性和农业措施影响. *土壤通报*, 2006, 37(4): 792–798
- [31] 周礼恺. *土壤酶学*. 北京: 科学出版社, 1987
- [32] Dorn JW. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 765–771
- [33] 谢德体, 陈绍兰. 水田自然免耕的理论与技术. 重庆: 重庆出版社, 2002
- [34] 汪景宽, 田晓婷, 李双异, 石岩, 安婷婷. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤中全硫和有效硫的影响. *土壤通报*, 2008, 39(4): 804–807
- [35] 林葆, 李书田, 周卫. 土壤有效硫评价方法和临界指标的研究. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(4): 436–445
- [36] 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. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 86–90
- [37] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, Drury CF. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287–1293

Tillage Effects on Soil Total Sulfur and Available Sulfur in Purple Paddy Soil

HUANG Xiao-juan^{1,2}, JIANG Chang-sheng^{1,2}, HAO Qing-ju^{1,2}, YUAN Xue^{1,2}

(1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: Soil total sulfur and available sulfur based on a long-term experiment with various tillage systems were studied in a purple paddy soil at the farm of Southwest University, Chongqing, China. The experiment included four tillage treatments: conventional tillage with rice only system (DP), conventional tillage with rotation of rice and rape system (SH), no-till and ridge culture with rotation of rice and rape system (LM), and tillage and ridge culture with rotation of rice and rape system (LF). Soil samples were collected at depths of 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 and 50-60cm. The results showed that the contents of soil total sulfur and available sulfur both decreased with the increase of soil depth. The orders of the contents and storages of soil total sulfur in 0-60cm soil layers were both in an order of LM>SH>DP>LF, and the orders of soil available sulfur were both LM>DP>LF>SH, respectively. Overall, long-term LM treatment was a valid strategy for increasing the contents and storages of soil total sulfur and available sulfur in a purple paddy soil in Southwest China. Compared with DP treatment, LM increased the contents of soil total sulfur and available sulfur 20.80% and 1.31%, and increased the storages of soil total sulfur and available sulfur 19.54% and 5.36%, respectively. The contents of soil available sulfur in plow layer (0-20cm) of DP, SH, LM and LF treatments were 27.15, 13.45, 31.43 and 24.01 mg/kg, respectively. Except SH treatment was sulfur deficient, the tillage systems of DP, LM and LF were not short of soil sulfur. Application of sulfur fertilizer for sulfur deficiency soil should be highly valued to improve yield and quality of crops.

Key words: Tillage, Soil total sulfur, Soil available sulfur, Purple paddy soil