

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.017

李继文, 柳开楼, 余喜初, 等. 稻草覆盖和香根草篱联合调控红壤坡耕地土壤团聚体粒组碳钾分配规律. 土壤, 2022, 54(4): 787–792.

# 稻草覆盖和香根草篱联合调控红壤坡耕地土壤团聚体粒组碳钾分配规律<sup>①</sup>

李继文<sup>1</sup>, 柳开楼<sup>2\*</sup>, 余喜初<sup>2</sup>, 都江雪<sup>1</sup>, 申哲<sup>1</sup>, 李浩<sup>1</sup>, 张会民<sup>1\*</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046)

**摘要:** 土壤有机碳可以通过影响土壤矿物钾释放以及解钾菌特性而对土壤钾素产生影响, 本文基于稻草覆盖和香根草篱控制红壤坡耕地水土流失长期定位试验, 通过对比常规管理(CK)、稻草覆盖(S)、稻草覆盖+香根草篱 (S+V)处理, 研究稻草覆盖及香根草篱措施对土壤主要化学性质的影响, 并分析土壤团聚体粒组分布及碳和钾在土壤团聚体粒组中的分配规律。结果表明, 在所有处理中, S+V 处理的土壤 pH、有机碳、全钾和速效钾含量显著较高, 与 CK 处理相比, S+V 处理的土壤 pH 提高了 0.23, 有机碳、全钾和速效钾含量分别提高了 6.52%、11.60% 和 11.49%。不同处理下土壤团聚体粒组分布无显著差异, 所有土壤团聚体粒组中均以 >0.25 mm 土壤团聚体粒组的比例最高。与 CK 处理相比, S 和 S+V 处理的 >2 mm 土壤团聚体粒组有机碳含量分别提高了 9.42% 和 40.03%。与 CK 处理相比, S+V 处理下 >2 mm、0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组中全钾含量分别提高了 3.67%、4.92% 和 5.14%。同时, S+V 处理下 >2 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组中速效钾含量分别比 CK 处理增加了 20.10% 和 12.28%。因此, 在红壤坡耕地上, 稻草覆盖和香根草篱联合措施是有效改善土壤团聚体粒组碳钾分配的水保措施, 一方面提升了 >2 mm 土壤团聚体粒组的有机碳含量, 另一方面也显著增加了 >2 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组的速效钾含量, 从而有利于维持土壤结构, 为保障作物高产奠定基础。

**关键词:** 土壤团聚体养分; 稻草覆盖; 香根草篱; 红壤; 坡耕地

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

## Regulation of Carbon and Potassium Distribution in Soil Aggregates of Red Soil Slope Farmland by Rice Straw Mulching and Vetiver Hedgerow

LI Jiwen<sup>1</sup>, LIU Kailou<sup>2\*</sup>, YU Xichu<sup>2</sup>, DU Jiangxue<sup>1</sup>, SHEN Zhe<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, ZHANG Huimin<sup>1\*</sup>

(1 *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2 *Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046, China*)

**Abstract:** Soil organic carbon can affect soil potassium by affecting the release of soil mineral potassium and the characteristics of potassium dissolving bacteria. Therefore, in this paper, based on the long-term positioning experiment of rice straw mulching and vetiver hedgerow to control soil and water loss in red soil slope farmland, by comparing conventional management (CK), rice straw mulching (S), rice straw mulching and vetiver hedgerow (S+V), the effects of rice straw mulching and vetiver hedgerow measures on soil main chemical properties were studied, and the distribution of soil aggregates and the distribution of carbon and potassium in soil aggregates were analyzed. The results showed that soil pH, organic carbon, total potassium and available potassium were significantly higher under S+V than CK and S, compared with CK, which were increased by 0.23 units, 6.52%, 11.60% and 11.49% respectively. No significant difference was found in the distribution of soil aggregates under different treatments, and the proportion of soil aggregates >0.25 mm was the highest among all soil aggregate components. Compared with CK, the organic carbon content of >2 mm soil aggregates were increased by 9.42% and 40.03% under S and S+V, respectively, meanwhile, the contents of total potassium in soil aggregates and >2 mm, 0.25-0.053 mm and <0.053 mm were increased by

①基金项目: 国家红壤改良工程技术研究中心开放基金项目(2020NETRCRSI-9)、江西省自然科学基金项目(20192BAB203022)和博士科研基金项目(HRBS04)资助。

\* 通讯作者(liukailou@163.com; zhanghuimin@caas.cn)

作者简介: 李继文(1994—), 男, 吉林通化人, 博士研究生, 主要从事土壤培肥和改良方面研究。E-mail: frankie716@163.com

3.67%, 4.92% and 5.14%, and the contents of available potassium in soil aggregates >2 mm and <0.053 mm were increased by 20.10% and 12.28% under S+V, respectively. Therefore, on the red soil slope farmland, the combined measures of straw mulching and vetiver hedgerow are effective soil conservation measures to improve carbon and potassium distribution of soil aggregate components, which improved organic carbon content of >2 mm soil aggregates and significantly increased available potassium content of >2 mm and <0.053 mm soil aggregates, thus is conducive to maintaining soil structure and ensuring high yield of crops.

**Key words:** Aggregate nutrients; Straw mulching; Vetiver hedgerow; Red soil; Sloping land

红壤是我国南方最主要的土壤类型之一,江西省作为我国红壤的中心区域,红壤坡耕地占全省面积的 54.78%<sup>[1]</sup>,丰富的水热资源使其具有巨大的经济发展、农业生产潜力,是重要的粮油生产用地<sup>[2]</sup>。然而,由于自然及人为等因素作用,引发水土流失加剧、土壤肥力下降等一系列问题,使该区域农业生产力的提高和可持续性发展受到严重限制<sup>[1]</sup>。由于稻草覆盖具有较好的培肥效果<sup>[3]</sup>,以及草篱具有阻控水土流失的效果<sup>[4]</sup>,近年来利用稻草覆盖和植物篱等技术进行坡耕地水土保持逐渐得到广泛的应用。范洪杰等<sup>[5]</sup>研究发现,稻草覆盖配合香根草篱处理的径流量和土壤侵蚀量分别比常规管理减少了 47.1%~79.8% 和 79.2%~99.5%。也有研究表明,稻草覆盖和香根草篱处理可以使红壤坡耕地的花生增产 41.65%~59.39%,同时显著提高土壤的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量<sup>[6]</sup>。此外,与常规管理相比,稻草覆盖配合香根草篱处理下土壤微生物生物量碳、微生物熵含量、酶活性和细菌群落结构均得到显著提升<sup>[7-9]</sup>。因此,稻草覆盖联合香根草篱技术在红壤坡耕地上具有水土流失阻控、培肥土壤和增加产量的综合效果。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其组分的大小组成和稳定性直接影响土壤的理化性质,进而影响作物生长<sup>[10]</sup>。不同粒组土壤团聚体养分分配比例可反映出土壤肥力变化以及农业管理措施成效<sup>[11]</sup>。研究发现,土壤有机碳作为土壤团聚体形成重要的胶结物质,其含量与土壤团聚体的稳定性具有密切的联系,有机物料添加至农田后,在土壤生物尤其微生物的作用下,产生的腐殖质在促进土壤团聚体的生成和稳定过程具有积极作用<sup>[12-13]</sup>。钾素作为植物生长的主要元素之一,在维持农业作物优质高产、促进代谢和提高抗逆性中发挥着重要作用,但在红壤地区,土壤钾素有效性低,钾素匮乏对作物的增产增收造成巨大挑战<sup>[14]</sup>。然而,与土壤有机碳不同,钾素主要以无机形式存在,有研究表明,虽然在不同土壤团聚体粒组中,土壤全钾和交换性钾含量无显著差异,但是,

与常规化肥处理相比,碳投入导致的微生物组成和养分周转效率在土壤不同团聚体粒组中具有差异,配施有机肥或秸秆还田可以显著提高 >2 mm 土壤团聚体粒组中的钾素含量,从而满足作物钾素需求<sup>[14-15]</sup>。

目前,有关红壤坡耕地稻草覆盖和香根草篱的研究多集中于水土流失阻控、土壤肥力指标、土壤微生物组成以及养分循环相关酶活性等方面<sup>[16-18]</sup>。此外,虽有研究分析了稻草覆盖和香根草篱对土壤团聚体粒组组成及有机碳的影响<sup>[19]</sup>,但由于稻草含有较为丰富的钾肥资源,而目前关于稻草覆盖和香根草篱联合下,红壤坡耕地的土壤团聚体粒组中钾素分配的研究还缺乏深入探讨。因此,为明确稻草覆盖和香根草篱对红壤坡耕地土壤团聚体粒组中有机碳和钾素的影响,本研究基于红壤坡耕地的田间试验,分别采集常规施肥、稻草覆盖、稻草覆盖和香根草篱联合处理的土壤样品,分析土壤团聚体粒组分布,以及土壤团聚体粒组中有机碳、全钾和速效钾含量,以期在土壤团聚体粒组水平上解析稻草覆盖和香根草篱对土壤碳钾的提升效果,从而为探讨红壤坡耕地的土壤结构改良以及合理的管理模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于江西省南昌市进贤县张公镇(116°20'24"N, 28°15'30"E)。该地区属于亚热带季风气候,年均温度 17.7~18.5 °C,年均降水量 1 537 mm,属于典型的红壤坡耕地,试验地坡度为 10°。2015 年试验开始前该坡耕地主要种植花生等旱作物,土壤类型为红壤,母质为第四纪红黏土。试验前耕层土壤理化性质为: pH 5.3, 有机碳 14.5 g/kg, 全氮 0.8 g/kg, 全磷 0.5 g/kg, 全钾 18.0 g/kg, 速效氮 55 mg/kg, 有效磷 14 mg/kg, 速效钾 280 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验始于 2009 年,设置常规管理(CK)、稻草覆盖(S)、稻草覆盖+香根草篱(S+V) 3 个处理,各处理

的化肥、稻草和香根草篱设置见表1。每个处理3次重复,随机排列,小区面积为120 m<sup>2</sup>(24 m×5 m)。种植作物为花生,种植密度为32 cm×20 cm,每年4月播种,播种量为150 kg/hm<sup>2</sup>,10月收获。对照小区和稻草覆盖小区种植72行,香根草篱联合稻草覆盖小区种植66行(其余6行为草篱),香根草篱每隔5 m双行种植。氮磷钾肥种类为尿素、钙镁磷肥和氯化钾,其中60%的氮肥和100%磷肥及50%的钾肥在花生播种前施用,40%的氮肥和50%的钾肥在花生开花前10 d撒施后进行中耕,花生出苗后进行稻草覆盖。

表1 不同处理下稻草和化肥的施用量

Table 1 Applied amounts of rice straws and chemical fertilizers under different treatments

处理	稻草 (kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥(N, kg/hm <sup>2</sup> )	磷肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , kg/hm <sup>2</sup> )	钾肥(K <sub>2</sub> O, kg/hm <sup>2</sup> )
CK	—	120	90	135
S	7 500	120	90	135
S+V	7 500	120	90	135

注:稻草的有机碳、氮、磷、钾含量分别为430、8.5、1.2、20.5 g/kg。

### 1.3 采样和指标测定

考虑到花生收获会严重扰动耕层土壤结构,为避免人为干扰,本研究于2020年11月20日(花生收获后50~60 d),在各小区由坡上至坡下走向,按“S”形5点取样法,采集0~20 cm的耕层土壤原状样品。将采集样品分为两份,一份样品去除土壤中石块、残根等杂物,风干后部分过0.15 mm筛,测定土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量;部分过1 mm筛,测定土壤pH、速效氮、有效磷、速效钾,其中pH采用

土水比1:1电极法测定,有机碳采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用半微量凯氏定氮法测定,全磷采用硫酸-高氯酸消煮法测定,全钾采用NaOH熔融-火焰光度法测定,速效氮采用1 mol/L NaOH碱解扩散法测定,有效磷采用碳酸氢铵浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用NH<sub>4</sub>AC浸提-火焰光度法测定,具体测定方法步骤参照《土壤农化分析》<sup>[20]</sup>。另一份样品去除土壤中石块、残根等杂物,风干后先进行干筛,获得>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm和<0.25 mm的土壤样品,然后按照干筛各组分比例配成200 g样品,在土壤团聚体仪上进行湿筛,从而获得>2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm和<0.053 mm的团聚体粒组样品<sup>[15]</sup>。

所有数据采用Excel 2010进行整理、SAS 9.1进行统计分析,方差分析运用最小因子法进行比较,所有图件采用Origin 8.1进行制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水保措施下土壤主要化学性质的变化

稻草覆盖和香根草篱措施显著影响红壤坡耕地的土壤主要化学性质(表2)。与常规管理(CK)和稻草覆盖(S)处理相比,稻草覆盖+香根草篱(S+V)处理下土壤pH分别显著提高了0.23和0.11个pH单位。与CK处理相比,S处理土壤有机碳、全钾和速效钾含量分别增加了0.94%、6.73%和4.52%,S+V处理则分别提高了6.52%、11.60%和11.49%。同时,S+V处理的土壤速效钾含量显著高于S处理,增幅为6.67%,这说明,稻草覆盖和香根草篱对土壤速效钾的提升具有叠加效应。

表2 不同处理下土壤主要化学性质的变化

Table 2 Soil main chemical properties under different treatments

处理	pH	有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	速效氮 (g/kg)	有效磷 (g/kg)	速效钾 (g/kg)
CK	5.17±0.12 b	14.87±0.14 b	0.89±0.06 a	0.54±0.07 a	18.28±0.64 b	57.57±5.48 a	14.51±5.33 a	287.33±5.95 c
S	5.29±0.16 b	15.01±0.13 a	0.91±0.09 a	0.54±0.07 a	19.51±0.31 a	60.03±6.44 a	14.59±4.77 a	300.33±6.92 b
S+V	5.40±0.09 a	15.84±0.67 a	0.91±0.06 a	0.57±0.05 a	20.40±0.26 a	67.75±4.45 a	15.05±2.91 a	320.33±3.47 a

注:CK:不施肥;S:稻草覆盖;S+V:稻草覆盖+香根草篱。同列小写字母不同表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

### 2.2 不同水保措施下土壤团聚体粒组分布特征

在不同处理中,土壤团聚体粒组均以0.25~2 mm的比例最高(56.40%~56.59%,图1),而>2 mm、0.053~0.25 mm和<0.053 mm的比例分别为13.83%~16.07%、15.97%~18.11%和9.56%~13.24%。在不同处理之间,土壤团聚体粒组的比例则无显著差异。

### 2.3 不同水保措施下土壤团聚体粒组中有机碳含量

稻草覆盖和香根草篱调控显著提高了较大土壤团聚体粒组(>2 mm)中的有机碳含量(表3)。与CK处理相比,S和S+V处理下>2 mm土壤团聚体粒组有机碳含量分别提高了9.43%和40.03%,其中S+V处理对>2 mm土壤团聚体粒组有机碳含量的提升幅度明显高于S处理。

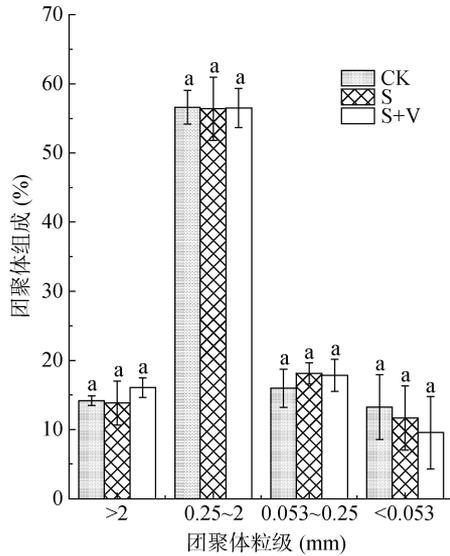


图 1 不同处理下土壤团聚体粒组分布

Fig. 1 Soil aggregate fractions under different treatments

表 3 不同处理下土壤团聚体粒组中有机碳含量

Table 3 Organic carbon contents in soil aggregate fractions under different treatments

处理	各土壤团聚体粒组中有机碳含量(g/kg)			
	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
CK	7.32 ± 0.14c	8.03 ± 0.21a	9.30 ± 0.39a	7.95 ± 0.16a
S	8.01 ± 0.22b	8.00 ± 0.36a	9.54 ± 0.21a	8.01 ± 0.22a
S+V	10.25 ± 0.36a	8.00 ± 0.44a	8.29 ± 0.32a	7.80 ± 0.41a

#### 2.4 不同水保措施下土壤团聚体粒组中全钾和速效钾含量

稻草覆盖和香根草篱措施显著影响不同土壤团聚体粒组中全钾含量(表 4)。S 处理 0.25 ~ 0.053 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组中全钾含量分别比 CK 处理增加了 3.15% 和 4.59%。与 CK 处理相比, S+V 处理下 >2 mm、0.25 ~ 0.053 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组中全钾含量, 分别提高了 3.67%、4.92% 和 5.14%。

不同于全钾含量的结果, 与 CK 处理相比, S 处

理下土壤各团聚体粒组中速效钾含量均无显著提升。但是, S+V 处理下 >2 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组中速效钾含量均显著高于 CK 和 S 处理, 与 CK 处理相比, S+V 处理下 >2 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组中速效钾含量分别提高了 20.10% 和 12.28%。

### 3 讨论

土壤团聚体是土壤结构组成的基本单元, 不同粒组土壤团聚体比例可以反映出土壤养分循环和水肥的保持能力, 土壤团聚体的稳定性则对维持农业生态系统的功能具有重要作用<sup>[21-23]</sup>。在本研究中, 由于稻草覆盖增加了外源有机碳和氮磷钾养分的投入, 再加上草篱有效阻控了土壤的养分流失<sup>[5-7]</sup>, 稻草覆盖、稻草覆盖+香根草篱处理均显著提高了土壤有机碳、全钾、速效钾含量, 这与前人的研究结果相似<sup>[6, 14, 24]</sup>, 但提升幅度略有差异, 这主要与土壤肥力水平、试验年限等有关。有研究表明, 土壤大团聚体粒组主要由植物根系和菌丝共同缠绕小粒组土壤团聚形成的, 而稻草覆盖处理以及稻草覆盖联合香根草篱处理能显著促进花生的根系部生长<sup>[25]</sup>, 但是, 常规施肥、稻草覆盖、稻草覆盖+香根草篱处理下, 土壤中各团聚体粒组比例均无显著差异。这与前人的研究不同<sup>[26]</sup>, 原因主要是本研究的试验年限较短(5 a), 土壤有机碳的增加对改善土壤团聚体结构可能存在滞后效应。此外, 红壤坡耕地上距离植物篱的远近也可能影响土壤团聚体结果。成艳红等<sup>[19]</sup>的研究表明, 与传统耕作相比, 香根草篱处理以及稻草覆盖联合香根草篱处理能显著提高篱间土壤 >2 mm 土壤团聚体粒组 5.77% 和 8.23%, 但随着距植物篱距离的增大影响减弱, 在距离草篱 2 m、4 m 处则没有显著差异。而本研究的采样方法为“S”形 5 点取样, 这可能弱化了篱间对土壤团聚体的影响, 但具体原因还有待进一步分析。

表 4 不同处理下土壤团聚体粒组中全钾、速效钾含量

Table 4 Contents of total potassium, available potassium in soil aggregate fractions under different treatments

处理	全钾(g/kg)				速效钾(mg/kg)			
	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm
CK	17.96 ± 0.22 b	17.91 ± 0.14 a	17.48 ± 0.11 b	16.35 ± 0.15 b	199.00 ± 10.22 b	189.00 ± 7.46 a	195.00 ± 5.67 a	171.00 ± 7.65 b
S	18.20 ± 0.13 b	18.33 ± 0.22 a	18.03 ± 0.20 a	17.10 ± 0.22 a	202.00 ± 12.32 b	195.00 ± 10.22 a	201.00 ± 8.22 a	174.00 ± 6.38 b
S+V	18.62 ± 0.16 a	18.38 ± 0.11 a	18.34 ± 0.24 a	17.19 ± 0.15 a	239.00 ± 13.45 a	205.00 ± 8.45 a	211.00 ± 9.14 a	192.00 ± 7.22 a

在红壤坡耕地上, 本研究发现, 稻草覆盖、稻草覆盖联合香根草篱均可以显著提升 >2 mm 土壤团聚体粒组中有机碳含量, 这与前人的研究结果相似<sup>[27]</sup>,

原因一方面是由于稻草具有丰富的木质素成分, 可直接作为内核对土壤中的小团聚体进行吸附, 形成土壤大团聚体, 新输入的有机碳首先出现在土壤大团聚体

粒组中<sup>[28]</sup>; 另一方面, 稻草作为新鲜的有机碳输入至土壤, 提高了土壤微生物生物活性, 微生物的代谢产物以及稻草的分解产物均含有多种有机胶结物质, 同样促进了 >2 mm 土壤团聚体粒组中有机碳累积<sup>[29]</sup>。同时, 由于植物篱可以通过阻控水土流失降低可溶性有机碳的流失, 再加上其根系分泌物及其残体的分解, 对土壤有机碳的补充<sup>[30]</sup>, 从而导致稻草覆盖联合植物篱处理下, 土壤大团聚体粒组中的有机碳含量显著高于稻草覆盖处理。

与土壤团聚体粒组中有机碳的结果不同, 本研究表明, 稻草覆盖以及与香根草植物篱不会显著改变土壤团聚体粒组中的全钾含量, 这与前人的研究结果相似<sup>[14-15]</sup>。但是, 稻草覆盖联合香根草篱处理下, >2 mm 和 <0.053 mm 土壤团聚体粒组中速效钾含量均得到显著提升, 主要是由于稻草覆盖增加了较多的钾素输入, 再加上香根草篱有效阻控了钾素的流失, 从而提升了>2 mm 土壤团聚体粒组速效钾含量。此外, 稻草覆盖联合香根草篱措施较好地保持了土壤水分库容, 特别是在红壤地区 7—8 月份的季节性干旱条件下, 较为湿润的土壤环境为土壤微生物创造了良好的生存环境, 加快了土壤微团聚体粒组的养分释放<sup>[7]</sup>, 这可能是土壤微团聚体粒组中速效钾素含量显著提高的主要原因。单独的稻草覆盖则与常规管理无显著差异, 而柳开楼等<sup>[15]</sup>研究表明, 长期秸秆还田显著增加了红壤团聚体粒组中的速效钾含量。这可能是因为本研究的红壤坡耕地坡度较大(10°), 其水土流失带走的速效钾抵消了稻草覆盖补充的钾素输入。

#### 4 结论

在红壤坡耕地上, 稻草覆盖和香根草篱联合调控有效提升了土壤 pH, 增加了土壤有机碳、全钾和速效钾含量。同时, 各处理的土壤中主要以 0.25~2 mm 土壤团聚体粒组的比例最高。虽然稻草覆盖和香根草篱对土壤团聚体粒组无显著影响, 但与常规施肥相比, 稻草覆盖和香根草篱显著提升了 >2 mm 土壤团聚体粒组有机碳和速效钾含量, 且 <0.053 mm 土壤团聚体粒组的速效钾含量也得到显著增加。

#### 参考文献:

[1] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6): 281-285.  
 [2] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407.  
 [3] Huang T T, Yang N, Lu C, et al. Soil organic carbon,

total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 214: 105171.

- [4] Liu H T, Yao L, Lin C W, et al. 18-year grass hedge effect on soil water loss and soil productivity on sloping cropland[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 177: 12-18.  
 [5] 范洪杰, 黄欠如, 秦江涛, 等. 稻草覆盖和草篱对红壤缓坡旱地水土流失及作物产量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(3): 550-554.  
 [6] 柳开楼, 李亚贞, 秦江涛, 等. 香根草篱和稻草覆盖对红壤坡耕地土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2015, 47(2): 305-309.  
 [7] 成艳红, 黄欠如, 武琳, 等. 稻草覆盖和香根草篱对红壤坡耕地土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4602-4612.  
 [8] 成艳红, 王馨悦, 林小兵, 等. 稻草覆盖和香根草篱措施下坡耕地红壤细菌群落结构特征及其影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(3): 522-528.  
 [9] 黄尚书, 成艳红, 钟义军, 等. 水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 468-476.  
 [10] 张贺, 杨静, 周吉祥, 等. 连续施用土壤改良剂对砂质潮土团聚体及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 791-801.  
 [11] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 596-607.  
 [12] 顾鑫, 任翠梅, 杨丽, 等. 外源有机物料添加对东北重度苏打盐碱土团聚体及有机碳的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 88-92.  
 [13] 王超, 姜坤, 卢瑛, 等. 不同有机物料施用对砖红壤团聚体组成和稳定性的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1328-1334.  
 [14] Liu K L, Han T F, Huang J, et al. Response of soil aggregate-associated potassium to long-term fertilization in red soil[J]. Geoderma, 2019, 352: 160-170.  
 [15] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 443-454.  
 [16] Mubarak M, Salem E M M, Kenaway M K M, et al. Changes in calcareous soil activity, nutrient availability, and corn productivity due to the integrated effect of straw mulch and irrigation regimes[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(3): 2020-2031.  
 [17] Ding J L, Wu J C, Ding D Y, et al. Effects of tillage and straw mulching on the crop productivity and hydrothermal resource utilization in a winter wheat-summer maize rotation system[J]. Agricultural Water Management, 2021, 254: 106933.  
 [18] Kaviani A, Kolehrouei M, Gholami L, et al. The use of straw mulches to mitigate soil erosion under different antecedent soil moistures[J]. Water, 2020, 12(9): 2518.  
 [19] 成艳红, 武琳, 孙慧娟, 等. 稻草覆盖和香根草篱对

- 红壤水稳性团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3518–3524.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 安婉丽, 谢海云, 王维奇, 等. 秸秆还田对稻田土壤水稳性团聚体养分及其生态化学计量比的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 150–156.
- [22] 刘景海, 张萍, 吴春水, 等. 园林废弃物覆盖对北京市林地土壤养分和团聚体的影响[J]. 中国水土保持, 2016(6): 54–58, 77.
- [23] 张顺涛, 任涛, 周橡棋, 等. 油/麦-稻轮作和施肥对土壤养分及团聚体碳氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 194–205.
- [24] 徐小林, 吴昌强, 李大明, 等. 稻草覆盖对花生木薯间作系统产量和土壤性状的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(29): 19–24.
- [25] 郑海金, 杨洁, 黄鹏飞, 等. 覆盖和草篱对红壤坡耕地花生生长和土壤特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 119–126.
- [26] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同施肥和耕作对坡耕地黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(2): 52–60.
- [27] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035–1041.
- [28] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [29] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 412–418.
- [30] 钟义军, 叶川, 黄欠如, 等. 红壤区坡耕地香根草篱对花生生长的空间影响[J]. 草业科学, 2013, 30(2): 231–237.