

# 不同植烟年限对土壤团聚体稳定性的影响及其相关因素分析<sup>①</sup>

张世祺<sup>1</sup>, 王沛裴<sup>2</sup>, 王昌全<sup>1\*</sup>, 何玉亭<sup>1</sup>, 沈杰<sup>1</sup>, 徐强<sup>1</sup>, 李萌<sup>1</sup>

(1 四川农业大学资源学院, 四川成都 611130; 2 什邡市农业局, 四川什邡 618400)

**摘要:** 通过野外调查、取样和室内分析, 对凉山地区不同植烟年限的土壤团聚体稳定性及其有机碳含量等相关影响因素进行研究。结果表明: 水稳性团聚体在植烟 0~5 a 期间被显著破坏, 红壤、紫色土和水稻土团聚体 MWD 值分别下降 68%、64% 和 52%; 非水稳性团聚体的破坏集中在植烟 3~5 a 期间, 3 种土壤团聚体 MWD 值依次分别下降 31%、9% 和 17%。有机碳含量影响团聚体水稳性, 尤以水稻土和紫色土表现显著。有机碳主要分布在 > 5 mm 和 < 0.25 mm 粒径团聚体中, 随植烟年限的增加, 紫色土和水稻土各粒径团聚体有机碳含量显著降低, 且 > 5 mm 和 < 0.25 mm 粒径团聚体下降最明显, 各粒径团聚体中有机碳分布越均匀。烤烟不宜连作, 连作紫色土和水稻土烟地(田)可增施有机肥, 保护土壤团聚体。

**关键词:** 植烟年限; 土壤团聚体; 稳定性; 土壤有机碳

中图分类号: S152.4 文献标识码: A

土壤团聚体是土壤质量的物质基础, 其粒径分布和稳定性决定土壤的通透性能和养分的保持与供应<sup>[1]</sup>。研究表明, 通过不同种植模式、土壤管理措施以及土壤的物质含量直接影响土壤团聚体的形成及其稳定性进而改变土壤肥力, 其中土壤有机质的变化与土壤团聚体形成、分布和稳定性的关系最为紧密<sup>[2]</sup>。土壤有机碳作为衡量土壤肥力的重要指标之一, 它的含量直接决定土壤质量。有机碳是土壤团聚体形成和稳定的重要胶结剂, 常与黏粒结合形成微团聚体, 微团聚体再逐步团聚形成大团聚体, 同时, 团聚体在形成后能够对其中储存的有机碳产生保护作用, 影响有机质的转化和分解速率<sup>[3]</sup>。起垄植烟, 一方面对土壤团聚体扰动强烈, 破坏有机碳的“保护壳”<sup>[4]</sup>; 另一方面烤烟垄作过程中土壤水、气、热条件的变化导致土壤微生物活性增强<sup>[5]</sup>, 消耗暴露在团聚体保护之外的有机碳。另外, 烤烟成熟收获的生物量占植株总生物量的比例大, 且根部、茎秆等难以还田, 从而导致以地面残余植株凋落形式回到土壤中的有机碳量大幅下降<sup>[6]</sup>。

凉山地区是四川省主要烤烟生产区, 近年来植烟土壤的退化问题已经影响到当地烟草产业的健康长远发展, 而烟草又是当地农业的支柱产业, 所以该区域

植烟土壤退化问题逐渐引起研究者的重视。长期植烟导致土壤有机碳含量降低以及团聚体结构稳定性差等是土壤退化问题的重要表现<sup>[7]</sup>。目前少见该区域植烟土壤团聚体稳定性及其影响因素的研究, 本文以四川典型植烟区凉山地区为研究对象, 通过分析不同植烟年限下土壤团聚体稳定性及相关指标的变化, 以期揭示植烟年限对团聚体稳定性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 土样采集

于凉山地区典型植烟区: 凉山州会东县姜州乡(101°29'05" E, 26°33'21" N)、攀枝花市仁和区大龙潭乡(101°52'45" E, 26°20'20" N)、攀枝花市米易县坪山村(102°07'42" E, 26°49'10" N)分别采集植烟年限为 0、3、5、8 a 的紫色土(H0、H3、H5、H8)、水稻土(P0、P3、P5、P8)、红壤(R0、R3、R5、R8)样品。采样点所在的田块、地块冬季均闲置或少量种植紫花芍, 施肥和田间管理长期采用当地烤烟种植标准模式, 即一次基肥为主, 3 次追肥为辅。本研究采样时间为 2015 年 4 月中旬。在地垄斜面采用“S”型法进行取样, 避开施肥点, 取样深度为 0~20 cm(耕作层)。采取的原状土带回实验室自然风干, 风干过程中沿土

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B18-02)资助。

\* 通讯作者(w.changquan@163.com)

作者简介: 张世祺(1993—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理性质与可持续研究。E-mail: 630287230@qq.com

块自然断裂面掰成不小于 1 cm 的土块,并测定土样的基本性质如表 1。

表 1 土壤基本性质  
Table 1 Basic properties of tested soils

土壤类型	植烟年限(a)	有机碳(g/kg)	机械组成(g/kg)		
			砂粒	粉粒	黏粒
紫色土	0	17.7 ± 0.6	288.0 ± 29.7	518.0 ± 2.2	195.0 ± 0.9
	3	13.2 ± 1.1	301.0 ± 8.3	455.0 ± 1.8	245.0 ± 0.9
	5	9.6 ± 0.7	259.0 ± 29.1	501.0 ± 15.6	241.0 ± 14.4
	8	14.6 ± 0.7	162.0 ± 40.2	588.0 ± 30.3	251.0 ± 9.7
水稻土	0	15.7 ± 1.0	334.0 ± 14.3	416.0 ± 13.3	250.0 ± 1.1
	3	12.0 ± 0.6	331.0 ± 26.4	387.0 ± 12.2	283.0 ± 14.5
	5	12.7 ± 1.1	360.0 ± 21.1	356.0 ± 12.2	284.0 ± 9.3
	8	12.3 ± 0.8	346.0 ± 27.8	369.0 ± 16.7	286.0 ± 11.1
红壤	0	9.1 ± 0.3	149.0 ± 14.5	293.0 ± 14.4	558.0 ± 14.4
	3	9.7 ± 1.1	162.0 ± 9.3	267.0 ± 31.1	571.0 ± 12.2
	5	6.9 ± 0.6	177.0 ± 6.9	325.0 ± 27.3	498.0 ± 7.8
	8	8.9 ± 0.3	147.0 ± 21.1	252.0 ± 5.8	601.0 ± 23.3

## 1.2 样品测定与分析

非水稳性团聚体组成的测定采用干筛法<sup>[8]</sup>。首先用四分法从待测样品中取约 400 g 样品,分别过 5、2、1、0.5、0.25 mm 套筛进行人工筛分,得到粒径>5、5~2、2~1、1~0.5、0.5~0.25、<0.25 mm 6 组团聚体样品,称重即得到干筛条件下各粒级团聚体含量。

水稳性团聚体含量的测定采用湿筛法<sup>[9]</sup>。根据干筛获得的各粒级团聚体百分比例称取 100 g 混合样,重复 3 次。然后将混合样置于孔径分别为 5、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛上,套筛由筛架固定,置于水桶中,底部离桶底 10 cm 高。向桶中加水至水面刚接触 2 mm 筛网,样品毛管浸润 5 min,然后启动电源,使套筛以每分钟 30 次的频率,振幅 3 cm 上下振荡 30 min,然后将留在各筛子上的团聚体冲洗到铝盒中,置于 50℃烘箱中,烘干后称重<sup>[10]</sup>。

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[11]</sup>。土壤颗粒组成的测定采用比重计法<sup>[12]</sup>。

## 1.3 数据处理

团聚体平均重量直径、几何平均直径计算方法如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

$$PAD = [(DA_{0.25} - WA_{0.25}) / DA_{0.25}] \times 100 \quad (3)$$

式中: $\bar{R}_i$ 为某粒径团聚体平均直径; $DA_{0.25}$ 为>0.25 mm 粒径干筛团聚体干重; $WA_{0.25}$ 为>0.25 mm 粒径湿筛

团聚体干重, $W_i$ 为某粒径团聚体的质量分数;MWD 为团聚体平均重量直径;GMD 为团聚体几何平均直径;PAD 为土壤的团聚体破坏率。

试验数据统计分析采用 SPSS 13.0 软件,不同植烟年限以及各级团聚体之间的显著性差异分析采用单因素方差分析方法(ANOVA),并用最小显著性差异方法进行检验,数据处理等在 Microsoft Excel 2013 中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 植烟年限对土壤团聚体分布的影响

凉攀地区未植烟土壤非水稳性和水稳性团聚体均以>2 mm 粒径为主,其中未植烟红壤中粒径>2 mm 非水稳性团聚体含量达到 751.4 g/kg;植烟 3、5、8 a 后,土壤水稳性团聚体以<0.25 mm 粒径为主,其中植烟 8 a 后红壤中粒径<0.25 mm 水稳性团聚体含量达到 459.2 g/kg。粒径>5 mm 团聚体,湿筛法测得的含量(水稳性团聚体)都小于干筛法测得的含量(非水稳性团聚体),其中植烟 8 a 后的紫色土、水稻土、红壤中粒径>5 mm 非水稳性团聚体含量分别是水稳性团聚体含量的 1.25 倍、3.43 倍、7.33 倍,红壤的变化幅度远大于紫色土和水稻土,表明红壤相对于紫色土和水稻土,其大粒径团聚体对水的崩解抗性最差。3 种植烟土壤水稳性团聚体分布随植烟年限的增加发生了显著变化,植烟 3、5、8 a 后,粒径>5 mm 水稳性团聚体含量较未植烟土壤出现显著降低,同时粒径<0.25 mm 团聚体含量显著增加,表明植烟对土壤水稳性大团聚体具有显著破坏作用。

表 2 不同植烟年限土壤非水稳性团聚体分布  
Table 2 Distribution of soil water unstable aggregates in different tobacco cropping years

处理	各级团聚体含量(g/kg)					
	> 5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	< 0.25 mm
H0	385.1 ± 15.2 ab	190.2 ± 10.2 b	170.9 ± 1.1 a	114.3 ± 9.9 a	64.3 ± 10.0 a	75.3 ± 6.2 bc
H3	403.0 ± 18.9 a	235.2 ± 11.1 b	179.7 ± 4.2 a	88.7 ± 13.3 a	41.3 ± 7.9 a	52.2 ± 4.5 c
H5	308.3 ± 26.7 b	300.8 ± 16.7a	140.8 ± 7.4 b	78.2 ± 14.5 a	58.3 ± 7.9 a	113.5 ± 14.5 ab
H8	425.6 ± 26.9 a	196.3 ± 22.2 b	122.9 ± 8.0 c	69.4 ± 15.6 a	59.8 ± 8.4 a	126.0 ± 17.2 a
P0	184.0 ± 8.9 c	179.0 ± 4.5 b	175.0 ± 10.7 b	191.7 ± 16.2 a	164.3 ± 10.0 a	106.1 ± 10.7 a
P3	418.0 ± 16.7 a	185.1 ± 11.1 b	143.0 ± 7.3 c	99.7 ± 6.1 c	60.8 ± 2.7 b	93.3 ± 8.1 ab
P5	190.2 ± 4.5 c	312.9 ± 7.1 a	239.7 ± 4.2 a	133.6 ± 8.8 b	58.2 ± 4.7 b	65.3 ± 2.2 b
P8	313.1 ± 8.9 b	204.3 ± 9.8 b	174.1 ± 9.5 b	145.0 ± 9.3 b	87.7 ± 6.1 b	75.9 ± 5.4 ab
R0	454.7 ± 41.1 a	296.7 ± 19.6 a	127.9 ± 16.2 a	54.4 ± 6.2 b	39.5 ± 6.6 b	26.9 ± 4.5 c
R3	460.4 ± 24.5 a	235.1 ± 23.3 ab	117.2 ± 17.4 ab	59.1 ± 9.3 b	64.7 ± 14.6 ab	63.7 ± 5.3 b
R5	266.9 ± 18.9 b	181.0 ± 4.5 b	133.2 ± 14.5 b	117.3 ± 12.5 a	80.0 ± 4.9 ab	221.7 ± 8.2 a
R8	266.9 ± 4.5 b	167.7 ± 12.2 b	141.5 ± 7.4 b	106.7 ± 10.8 a	100.6 ± 8.0 a	216.7 ± 3.3 a

注：不同小写字母表示同一类土壤同一粒径下不同植烟年限间的差异在  $P < 0.05$  水平显著；下同。

表 3 不同植烟年限土壤水稳性团聚体分布  
Table 3 Distribution of soil water stable aggregates in different tobacco cropping years

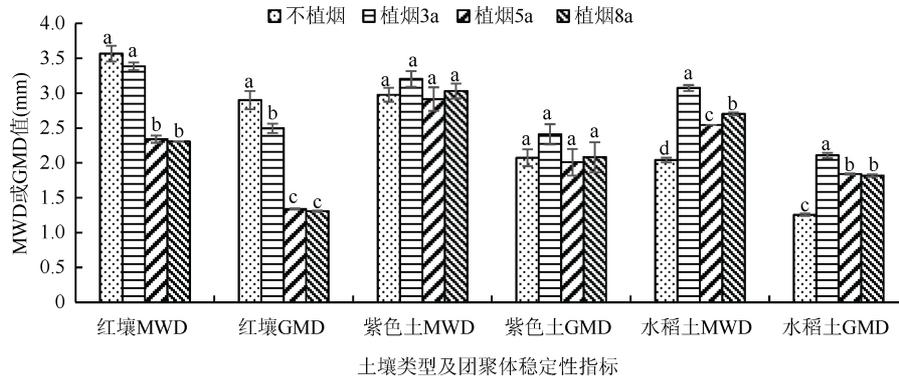
处理	各级团聚体含量(g/kg)					
	> 5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	< 0.25 mm
H0	364.1 ± 18.5 a	103.9 ± 10.4 b	194.4 ± 4.6 b	138.3 ± 16.1 b	64.0 ± 5.5 c	135.3 ± 12.2 d
H3	90.5 ± 6.2 b	117.9 ± 8.5 a	241.3 ± 6.7 a	168.3 ± 3.0 a	128.6 ± 6.7 b	253.5 ± 11.7 c
H5	49.6 ± 1.5 c	64.4 ± 3.9 d	120.0 ± 6.2 c	187.9 ± 3.3 a	194.4 ± 4.1 a	383.7 ± 4.2 a
H8	339.5 ± 16.2 a	88.0 ± 4.7 c	143.3 ± 5.0 c	66.9 ± 6.4 c	50.4 ± 1.9 c	311.9 ± 7.7 b
P0	195.9 ± 10.2 a	228.3 ± 6.9 a	179.7 ± 5.1 a	154.7 ± 7.7 b	91.5 ± 4.1 c	150.0 ± 4.8 c
P3	116.9 ± 8.5 b	47.7 ± 9.1 bc	92.6 ± 12.8 b	140.6 ± 8.3 b	263.5 ± 11.1 a	338.8 ± 11.1 a
P5	89.3 ± 5.9 b	34.2 ± 1.2 c	124.2 ± 12.9 b	240.7 ± 11.9 a	170.3 ± 5.4 b	341.4 ± 0.3 a
P8	91.2 ± 1.5 b	62.8 ± 3.7 b	125.3 ± 10.9 b	261.8 ± 12.6 a	197.4 ± 11.8 b	261.6 ± 7.8 b
R0	35.43 ± 30.2 a	215.7 ± 6.8 a	53.7 ± 7.0 c	98.8 ± 14.9 c	60.1 ± 8.1 b	217.5 ± 6.7 c
R3	124.1 ± 11.6 b	106.0 ± 11.8 b	135.1 ± 8.3 a	141.5 ± 13.1 bc	177.1 ± 7.4 a	316.3 ± 26.1 b
R5	28.5 ± 8.4 c	83.3 ± 12.2 b	88.5 ± 9.9 b	181.8 ± 16.4 ab	174.9 ± 7.3 a	443.2 ± 19.6 a
R8	36.4 ± 12.7 c	100.1 ± 13.3 b	45.3 ± 7.4 c	219.5 ± 14.6 a	139.6 ± 9.1 a	459.2 ± 16.9 a

## 2.2 植烟年限对土壤团聚体稳定性的影响

由图 1 可知，与不植烟相比，红壤植烟 3、5、8 a 后土壤团聚体机械稳定性呈下降趋势，其中植烟 5 a 后和 8 a 后表现为显著降低，MWD 值植烟 5 a 后下降 34%，植烟 8 a 后下降 35%；紫色土植烟 3、5、8 a 后团聚体机械稳定性未出现显著变化；水稻土中团聚体机械稳定性在植烟 3 a 后达到峰值，其 MWD 值是不植烟土壤的 150%，随后显著降低。

由图 2 可知，红壤植烟 3 a 后，团聚体水稳定性较不植烟显著降低，MWD 值下降 47%；植烟 5 a 后和植烟 8 a 后相对于植烟 3 a 后，团聚体水稳定性同样显著下降，MWD 值分别下降 39% 和 36%。

与不植烟相比，紫色土植烟 3 a 后，团聚体水稳定性显著降低，MWD 值下降 45%；植烟 5 a 后相对于植烟 3 a 后，团聚体水稳定性同样显著下降，MWD 值下降 34%；但植烟 8 a 后相对于植烟 5 a 和 3 a 后都出现了显著上升的趋势，MWD 值上升 146%，即在植烟 0 ~ 8 a 过程中紫色土团聚体水稳定性出现先下降再上升的趋势。水稻土植烟 3、5、8 a 后，相对于不植烟，团聚体水稳定性出现显著下降趋势，MWD 值分别下降 47%、52% 和 46%，而植烟 3、5、8 a 年间土壤团聚体水稳定性没有显著差异，即在植烟 0 ~ 8 a 过程中水稻土团聚体水稳定性出现先下降再平稳的趋势。



(图中不同小写字母表示同一类土壤同一指标在不同植烟年限间的差异显著( $P < 0.05$ ) ; 下同)

图 1 不同植烟年限土壤非水稳性团聚体的 MWD 和 GMD

Fig.1 MWD and GMD values of soil water unstable aggregates in different tobacco cropping years

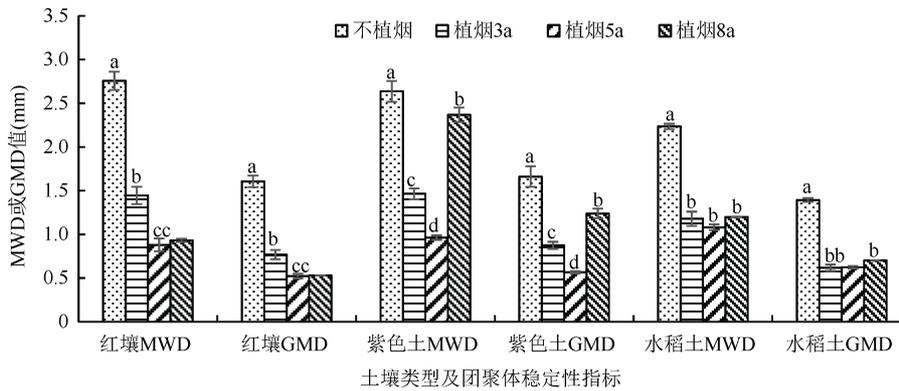


图 2 不同植烟年限土壤水稳性团聚体的 MWD 和 GMD

Fig. 2 MWD and GMD values of soil water stable aggregates in different tobacco cropping years

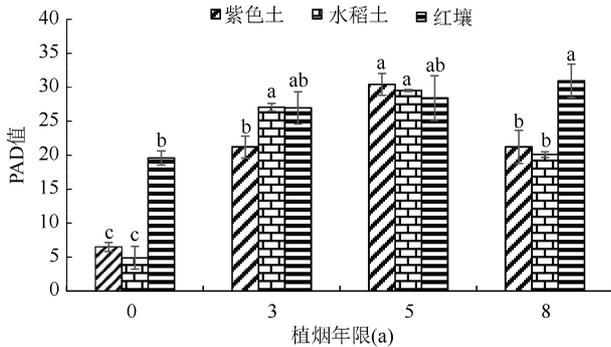


图 3 不同植烟年限土壤的团聚体破坏率(PAD)

Fig. 3 Values of percentage of aggregate disruption (PAD) under in different tobacco cropping years

紫色土和水稻土团聚体破坏率(PAD)随植烟年限的变化出现显著变化,在不植烟条件下最低,植烟 5 a 后团聚体破坏率达最高,其中紫色土和水稻土团聚体破坏率增加 395% 和 824%。植烟 3 a 后的紫色土和水稻土团聚体 PAD 值相对于不植烟土壤显著上升,这和植烟对土壤水稳性团粒结构的破坏关系密切,植烟 5 a 后 PAD 值相对于植烟 3 a 后也有显著上升,但上升趋势减弱,植烟 8 a 后 PAD 值相对于植

烟 5 a 有显著下降。不植烟条件下红壤团聚体的 PAD 值极大地高于紫色土和水稻土团聚体,相对于不植烟,植烟 3 a 和 5 a 后 PAD 值未出现显著升高,植烟 8 a 年后显著升高 158%。

### 2.3 土壤团聚体水稳性的主要影响因素

采用 Pearson 相关系数法对参试土壤样品主要指标进行两两相关的相关性分析(表 4),结果表明,在不同植烟年限下,紫色土和水稻土的有机碳含量与团聚体 GMD 值、MWD 值以及 PAD 值存在明显的相关性,相关系数  $r$  均大于 0.900,对相关系数进行检验,均达到显著水平,与现有大量关于团聚体稳定性和有机碳关系的研究结果一致,即有机碳含量与土壤团聚体稳定性显著相关。但红壤团聚体的有机碳含量与 GMD 值、MWD 值以及 PAD 值均无显著相关性,表明发育程度深、有机碳含量低的红壤团聚体稳定性的相关因素不含原土有机碳含量。对于水稻土,黏粒的质量分数与土壤团聚体 GMD 值、MWD 值、PAD 值以及有机碳含量相关性明显,而紫色土和红壤并没有出现上述规律,这可能与水稻土团聚体粒径分布规律及其土壤类型特性有关。

表 4 土壤主要指标相关关系  
Table 4 Correlation coefficients between soil indexes

		GMD	MWD	PAD	有机碳	砂粒	粉粒	黏粒
紫色土	GMD	1						
	MWD	0.942*	1					
	PAD	-0.965*	-0.836	1				
	有机碳	0.982*	0.940*	-0.965*	1			
	砂粒	-0.008	-0.321	-0.248	0.015	1		
	粉粒	0.362	0.603	-0.104	0.297	0.913*	1	
	黏粒	-0.759	-0.510	0.831	-0.675	-0.485	0.087	1
水稻土	GMD	1						
	MWD	0.994**	1					
	PAD	-0.969*	-0.952*	1				
	有机碳	0.977*	0.968*	-0.900*	1			
	砂粒	-0.436	-0.510	0.485	-0.286	1		
	粉粒	0.860	0.905*	-0.841	0.779	-0.823	1	
	黏粒	-0.982**	-0.992**	0.909*	-0.980**	0.463	-0.885	1
红壤	GMD	1						
	MWD	0.991	1					
	PAD	-0.920	-0.860	1				
	有机碳	0.216	0.343	0.185	1			
	砂粒	-0.810	-0.880	0.514	-0.747	1		
	粉粒	-0.279	-0.403	-0.121	-0.998	0.789	1	
	黏粒	0.465	0.577	-0.079	0.965	-0.896	-0.980	1

注：\*表示在  $P < 0.05$  水平显著相关；\*\*表示在  $P < 0.01$  水平显著相关；下同。

#### 2.4 植烟年限对土壤水稳性团聚体有机碳分布的影响

凉攀烟区主要植烟土壤各粒级团聚体有机碳含量随植烟年限的增加而表现出不同的趋势,其中紫色土和水稻土  $> 5$  mm 团聚体有机碳含量呈显著下降,且其下降幅度明显大于其他粒径;红壤各粒级团聚体有机碳含量变化不显著;紫色土和水稻土整体表现为各粒级团聚体有机碳含量植烟 5 a 后和 8 a 后显著下降,而红壤团聚体相关变化趋势不明显。从有机碳含量分布来看,紫色土和水稻土团聚体有机碳含量分布以  $> 5$  mm 和  $< 0.25$  mm 粒径较多,其余粒径分布较少,

其中不植烟条件下紫色土  $> 5$  mm 团聚体有机碳含量为  $1 \sim 2$  mm 团聚体的 2.42 倍;红壤团聚体有机碳含量分布以粒径  $< 0.25$  mm 团聚体较多。随着植烟年限的增加,有机碳在各粒径团聚体中的分布趋于平均。植烟 8 a 后相较于植烟 5 a 后,3 种土壤各粒级团聚体有机碳含量下降趋势不明显,部分粒级有机碳含量甚至有小幅上升趋势。3 种土壤团聚体各粒级有机碳分布情况大致相同,但红壤各粒级团聚体有机碳含量明显低于紫色土和水稻土,其中植烟 3 a 后紫色土  $> 5$  mm 粒径团聚体有机碳含量是红壤  $> 5$  mm 团聚体的 1.81 倍。

表 5 不同植烟年限土壤水稳性团聚体的有机碳分布(g/kg)  
Table 5 Distribution of organic carbon in soil water stable aggregates in different tobacco cropping years

处理	$> 5$ mm	$2 \sim 5$ mm	$1 \sim 2$ mm	$0.5 \sim 1$ mm	$0.25 \sim 0.5$ mm	$< 0.25$ mm
H0	$25.7 \pm 1.4$ a	$23.9 \pm 0.8$ a	$10.6 \pm 0.8$ b	$11.8 \pm 0.9$ a	$22.0 \pm 2.0$ a	$22.4 \pm 0.6$ b
H3	$23.3 \pm 0.7$ ab	$17.5 \pm 0.9$ a	$16.9 \pm 1.7$ a	$9.0 \pm 1.1$ a	$12.6 \pm 1.4$ b	$28.2 \pm 0.9$ a
H5	$19.0 \pm 0.6$ b	$10.8 \pm 0.9$ a	$10.0 \pm 0.6$ b	$15.8 \pm 1.6$ a	$7.6 \pm 0.1$ c	$12.8 \pm 0.5$ c
H8	$13.6 \pm 1.0$ c	$12.8 \pm 0.7$ a	$9.9 \pm 0.9$ b	$10.7 \pm 0.2$ a	$12.0 \pm 0.5$ b	$14.2 \pm 1.2$ c
P0	$26.7 \pm 1.5$ a	$20.8 \pm 1.5$ a	$17.7 \pm 0.3$ a	$15.9 \pm 1.4$ a	$18.7 \pm 0.8$ ab	$24.1 \pm 2.6$ ab
P3	$20.8 \pm 1.2$ ab	$17.6 \pm 0.9$ ab	$11.7 \pm 1.3$ b	$16.8 \pm 1.1$ a	$25.6 \pm 2.3$ a	$28.7 \pm 2.0$ a
P5	$21.2 \pm 1.6$ ab	$15.2 \pm 0.5$ b	$17.6 \pm 1.0$ a	$14.1 \pm 0.4$ a	$13.3 \pm 0.8$ b	$18.2 \pm 0.3$ b
P8	$19.3 \pm 0.4$ b	$14.3 \pm 1.1$ b	$14.7 \pm 1.1$ ab	$17.8 \pm 1.2$ a	$13.4 \pm 1.3$ b	$19.4 \pm 1.1$ b
R0	$14.5 \pm 0.4$ a	$11.8 \pm 0.3$ a	$10.2 \pm 0.4$ a	$9.4 \pm 0.3$ a	$12.9 \pm 0.4$ a	$16.3 \pm 0.4$ a
R3	$12.9 \pm 0.6$ a	$11.2 \pm 0.4$ a	$8.7 \pm 0.3$ b	$8.2 \pm 0.1$ ab	$11.6 \pm 0.2$ b	$15.2 \pm 0.3$ ab
R5	$12.1 \pm 0.7$ a	$9.6 \pm 0.5$ b	$8.7 \pm 0.3$ b	$7.1 \pm 0.6$ b	$10.0 \pm 0.2$ c	$13.2 \pm 0.6$ b
R8	$13.8 \pm 0.2$ a	$11.5 \pm 0.3$ a	$8.1 \pm 0.2$ b	$9.2 \pm 0.3$ a	$11.9 \pm 0.2$ b	$15.0 \pm 0.7$ ab

通过对红壤团聚体各粒径有机碳含量与其水稳定性的相关性分析(表 6)可知,红壤团聚体稳定性与粒径 1~2 mm 团聚体有机碳含量呈极显著相

关,与其他粒径团聚体的相关性不显著,粒径 1~2 mm 团聚体有机碳含量是影响红壤团聚体稳定性的重要因素。

表 6 红壤各粒径团聚体有机碳含量与其水稳定性的相关关系  
Table 6 Correlation coefficients between organic carbon contents and their water stabilities in different aggregate sizes

	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	GMD
>5 mm	1						
2~5 mm	0.92*	1					
1~2 mm	0.54	0.36	1				
0.5~1 mm	0.97**	0.96*	0.34	1			
0.25~0.5 mm	0.97**	0.97**	0.58	0.94*	1		
<0.25 mm	0.91*	0.95*	0.61	0.88*	0.99**	1	
GMD	0.72	0.58	0.97**	0.55	0.76	0.78	1

### 3 讨论

凉攀地区主要植烟土壤团聚体分布随植烟年限的增加发生显著变化,植烟年限为 3、5、8 a 时,>5 mm 水稳性团聚体含量相对于未植烟土壤显著降低,<0.25 mm 团聚体含量显著增加,说明植烟会导致土壤水稳性大团聚体发生大量崩解<sup>[13]</sup>。植烟土壤非水稳性团聚体>2 mm 粒径含量较多,而植烟年限为 3、5、8 a 时,其水稳性团聚体分布以<0.25 mm 粒径为主,说明在水的崩解作用下部分大粒径团聚体向更小粒径的团聚体转化,且这种趋势以红壤团聚体最强<sup>[14]</sup>:其中植烟年限为 8 a 时,紫色土、水稻土、红壤团聚体>5 mm 粒径非水稳性团聚体含量分别是水稳性团聚体的 1.25 倍、3.43 倍、7.33 倍;红壤团聚体 PAD 值在不植烟和植烟年限为 8 a 时均大于其他团聚体,表明红壤非水稳定性大粒径团聚体虽然较多,但遇水极易崩解,其原因可能是红壤团聚体中在团粒结构中起胶结作用的物质多糖、菌丝等瞬变和临时胶结剂含量较其他土壤类型的高<sup>[15]</sup>。

文倩和关欣<sup>[16]</sup>研究发现,土壤中原生矿物颗粒与细菌、真菌和植物碎屑胶结形成游离的微团聚体,同时这些微团聚体又被有机碳、铁铝氧化物、菌丝、植物根和多糖等物质胶结成大团聚体,因此植烟的土壤管理措施以及土壤中相关物质含量、形态等因素均会造成植烟土壤团聚体稳定性的变化。湿筛条件下,3 种土壤均是在不植烟时水稳性最高,且随植烟年限增加,水稳性显著下降,说明植烟年限对土壤水稳性团聚体有显著破坏作用<sup>[17]</sup>。由于红壤发育程度深,其团聚体有机碳含量明显低于紫色土和水稻土。但在不植烟条件下 3 种土壤团聚体水稳性是持平的,甚至红壤团聚体非水稳性超过紫色土和水稻土其原因是

红壤含有大量的无机胶结物且黏粒含量极高<sup>[18]</sup>,对红壤团聚体形成产生促进作用;但植烟 8 a 相对植烟 5 a 红壤团聚体水稳性显著降低,其原因可能与植烟土壤无机胶结物损失有关<sup>[19]</sup>。因紫色土发育程度浅,所以需要以有机碳为主的胶结剂参与团聚作用。植烟年限为 3、5 a 时相对于不植烟,紫色土团聚体有机碳含量显著下降,主要由于团粒结构的主要胶结剂减少导致团聚作用减弱,使团粒结构遭到破坏,水稳性显著降低;植烟 8 a 相对于植烟 5 a,粒径 2~5、0.25~0.5 和<0.25 mm 团聚体的有机碳含量均升高,且粒径 0.25~0.5 mm 团聚体达到显著水平,这可能与近年来有机肥的施用有关<sup>[20]</sup>。水稻土团聚体,植烟年限为 3、5 a 时相对于不植烟,大部分粒径团聚体有机碳含量呈现下降的趋势,团聚体水稳性显著降低,植烟 8 a 相对于植烟 5 a,水稻土各粒径团聚体有机碳含量均未出现显著变化,所以其团聚体水稳性变化不显著<sup>[21]</sup>。

干筛条件下,有机碳含量随植烟年限增加而降低:紫色土团聚体非水稳性变化不显著,而水稳性为显著降低,由此可见有机碳含量主要影响团聚体的水稳性,对非水稳性影响不大;红壤团聚体非水稳性随植烟年限的增加显著下降,说明长期植烟会破坏红壤非水稳性团聚体的胶结剂<sup>[22]</sup>;水稻土非水稳性团聚体稳定性在植烟 0~3 a 期间有一定程度的提高,且在植烟 3 a 时达到最大值,这是因为烤烟垄作提供的环境条件和当地农户大量施用有机肥增加土壤有机碳含量,从而提高非水稳性团聚体含量,在植烟年限为 0~3 a 时,减少植烟耕作对土壤团聚体的机械破坏,总体上提高非水稳性团聚体的稳定性。研究结果显示植烟初期(3 a 内)大量水稳性较差的新团聚体形成导致这段时期内土壤团聚体非水稳性不降反升,

但又由于其较差的水稳性,所以这阶段土壤团聚体水稳性呈极显著下降趋势<sup>[23]</sup>。

有机碳和团聚体是土壤两个基本组成成分,两者相互关联,密不可分。已有大量研究表明凉攀生态区长期种植烤烟造成土壤有机碳大量消耗,有机碳含量较第二次土壤普查已下降 15.96%,与土壤有机碳关系密切的碳氮比、碳磷比、碳钾比分别下降 12.22%、33.24% 和 21.39%,说明有机碳含量下降在凉攀烟区长期植烟土壤中普遍存在<sup>[24]</sup>。研究发现各粒径团聚体有机碳含量基本大于原土,表明团聚体对有机碳具有富集作用<sup>[25]</sup>。紫色土和水稻土各粒径团聚体,有机碳含量随植烟年限增加显著下降,说明植烟减弱团聚体对有机碳的保护,降低土壤有机碳含量。紫色土和水稻土团聚体水稳性随植烟年限增加显著降低的直接原因是有机碳作为土壤团聚体的主要胶结剂,其含量降低导致土壤团聚体崩解速度加快以及胶结速度减缓<sup>[26]</sup>。通过相关性分析可知,有机碳含量和紫色土、水稻土团聚体水稳性存在极显著相关<sup>[27]</sup>;而随植烟年限的增加,红壤粒径 > 5 mm 团聚体和 < 0.25 mm 团聚体有机碳含量未出现显著下降,其他多数粒径团聚体下降趋势也不明显,即在植烟过程中红壤团聚体的有机碳对团粒结构的保护效果并没有显著下降。通过相关性分析可知,虽然有机碳含量与红壤团聚体水稳性无显著相关性,但粒径 1~2 mm 团聚体有机碳含量与水稳性呈极显著相关,其他粒径团聚体有机碳含量与水稳性未出现显著相关性,这可能与各粒径团聚体有机碳组分的含量及作用有关<sup>[28]</sup>。随植烟年限的增加紫色土和水稻土粒径>5 mm 团聚体有机碳含量降低幅度较其他粒径大,即在粒径>5 mm 团聚体中,土壤团聚体的胶结剂被破坏较多,胶结能力下降较快,说明植烟对土壤团聚体的破坏主要集中在粒径较大的团聚体上<sup>[29]</sup>。3 种土壤团聚体有机碳也大多集中分布在粒径>5 mm 和<0.25 mm 2 个团聚体中,和其他利用方式土壤有机碳分布情况相似,其原因是微团聚体中的有机碳不易被耕作的机械力和微生物活动破坏,而大直径团聚体更有利于碳的截留<sup>[30]</sup>;再者,团聚体分布也表现为>5 mm 和<0.25 mm 两个粒径较多,这进一步证明有机碳在团聚体的保护下充当胶结剂连接团聚体的作用。另外,随着植烟年限的增加,有机碳在各粒径团聚体的分布趋于平均<sup>[31]</sup>。3 种土壤团聚体之间,红壤发育程度深,土壤矿化作用强,导致有机碳分解较快,所以红壤各个粒径团聚体有机碳含量明显低于紫色土和水稻土。

## 4 结论

凉攀地区植烟土壤在连作过程中,水稳性团聚体的破坏集中在植烟 0~5 a 期间,非水稳性团聚体被破坏集中在植烟 3~5 a 期间。有机碳含量是影响团聚体水稳性的重要因素,且在水稻土和紫色土团聚体中表现显著。植烟会破坏土壤团聚体中的有机碳,其中水稻土和紫色土中达到显著水平,这种破坏作用主要集中在植烟 5 a 内,未植烟土壤团聚体有机碳以粒径>5 mm 和<0.25 mm 2 个团聚体含量较多,经植烟破坏后,各粒径团聚体有机碳含量趋于平均。烤烟不宜连作,长年植烟的紫色土和水稻土可以增大有机肥施用比例,保护土壤团聚体。

## 参考文献：

- [1] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85
- [2] Hartley W, Riby P, Waterson J. Effects of three different biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181: 770-778
- [3] 龚森,李凯,关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418
- [4] 邓阳春,黄建国. 长期连作对烤烟产量和土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 840-845
- [5] 邱学礼,李军营,李向阳,等. 云南曲靖烤烟坡耕地不同农作处理的水土流失特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 98-103
- [6] 张科,袁玲,施娴,等. 不同植烟模式对烤烟产质量、土壤养分和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 124-128
- [7] 罗世琼,杨宇虹,晋艳,等. 长期培肥对烤烟-小麦轮作红壤各级团聚体氮及其酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 127-132
- [8] 郭军玲,王虹艳,卢升高. 亚热带土壤团聚体测定方法的比较研究[J]. 土壤通报, 2010(3): 542-546
- [9] 赵玉明,高晓飞,刘瑛娜,等. 不同水稳性团聚体测定方法的对比研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 138-143
- [10] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 106-113
- [11] 刘合明,杨志新,刘树庆. 不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨[J]. 生态环境学报, 2008, 17(5): 2046-2049
- [12] 陈丽琼. 比重计法测定土壤颗粒组成的研究[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(4): 97-99
- [13] 邱学礼,李军营,李向阳,等. 云南曲靖烤烟坡耕地不同农作处理的水土流失特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 98-103
- [14] 张磊,王嘉学,代云川,等. 滇东喀斯特地区红裸土表层团聚体稳定性及其影响因素研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 790-796

- [15] 王春燕, 张晋京, 吕瑜良, 等. 长期封育对内蒙古羊草草地土壤有机碳组分的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(5): 31–39
- [16] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 434–438
- [17] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116–7124
- [18] 刘晓利, 何园球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J]. 土壤, 2009, 41(1): 84–89
- [19] 郭杏妹, 吴宏海, 罗娟, 等. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6): 515–521
- [20] 陈正发, 史东梅, 谢均强, 等. 紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2721–2729
- [21] 邱佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1129–1138
- [22] 侯晓静, 杨劲松, 王相平, 等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. 土壤学报, 2015(4): 818–827
- [23] 周振方, 胡雅杰, 马灿, 等. 长期传统耕作对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 145–151
- [24] 杨梅, 王昌全, 袁大刚, 等. 不同生长期烤烟各器官 C、N、P 生态化学计量学特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 686–693
- [25] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 等. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 自然资源学报, 2011(1): 119–127
- [26] 程曼, 朱秋莲, 刘雷, 等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2835–2844
- [27] 张孝存, 郑粉莉, 王彬, 等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 90–95
- [28] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 675–682
- [29] 侯晓静, 杨劲松, 赵曼, 等. 耕作方式对滨海盐渍土有机碳含量及团聚体特性的影响[J]. 土壤, 2015(4): 781–789
- [30] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015(4): 828–838
- [31] 王义祥, 叶菁, 黄毅斌, 等. 不同经营年限对柑橘果园土壤团聚体有机碳的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015(5): 724–729

## Effects of Different Tobacco Cropping Years on Soil Aggregate Stability and Its Influential Factors

ZHANG Shiqi<sup>1</sup>, WANG Peipei<sup>2</sup>, WANG Changquan<sup>1\*</sup>, HE Yuting<sup>1</sup>, SHEN Jie<sup>1</sup>, XU Qiang<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;  
2 Shifang Agriculture Bureau, Shifang, Sichuan 618400, China)

**Abstract:** This paper studied the changes of soil aggregate stability and organic carbon in different tobacco cropping years and their influential factors in Liangshan and Panzhihua of Sichuan Province through field sampling and laboratory analysis. The results showed that water-stable aggregates were significantly damaged during in period of 0–5 years of tobacco cropping, the MWD of soil aggregates in red soil, purple soil and paddy soil decreased by 68%, 64% and 52%, respectively. Meanwhile, the destruction of the water unstable aggregates was concentrated in the period of 3–5 years of tobacco cropping, and the MWD of the soil aggregates in red soil, purple soil and paddy soil reduced by 31%, 9% and 17%, respectively. The content of organic carbon affected on the water stability of soil aggregates, especially in paddy soil and purple soil. Organic carbon was mainly distributed in aggregates with sizes of >5mm and < 0.25mm. With the increase of tobacco cropping year, the contents of organic carbon were significantly decreased in purple soil and paddy soil, especially in aggregates with sizes of >5mm and < 0.25mm, and organic carbon was distributed more uniformly in different size aggregates. It proves that continuous tobacco cropping is harmful to soil aggregation and accumulation of organic carbon, and organic fertilizer should be applied to protect and improve soil aggregation in purple soil and paddy soil.

**Key words:** Tobacco cropping years; Soil aggregate; Stability; Soil organic carbon