三峡库区坡地脐橙园保护性措施对土壤团聚体结构及碳、氮、磷含量的影响*

吴电明[1,2] 夏立忠[2†] 俞元春[1] 马 力[2] 李运东[2] 杨林章[2]

（1 南京林业大学森林资源与环境学院，南京 210037）

（2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所），南京 210008）

摘 要 依托三峡工程生态与环境秭归实验站的 8 a 长期试验，对 5 种保护性管理措施下坡地脐橙园土壤团聚体结构与团聚体碳、氮、磷含量分布特征进行了研究。结果表明，脐橙套种多年生白三叶草（CM）和脐橙园地面农作物秸秆覆盖（SM）处理表层土壤（0~5 cm）大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径（MWD）值、大于0.25 mm 水稳性团聚体氮含量及 SM 处理表层土壤大于0.25 mm 水稳性团聚体磷含量显著高于其他处理；脐橙套种黄花菜等高植物篱（CH）处理和脐橙园沿等高线埋设防渗膜（MM）处理表层土壤大于0.25 mm 水稳性团聚体含量及 CH 处理的 MWD 值显著高于常规脐橙栽植（CK）和脐橙套种小麦-花生（PC）处理；与 CK 处理相比，PC 处理大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量、MWD 值、团聚体碳含量和表层土壤团聚体氮含量没有显著变化，但 5~20 cm 土壤团聚体磷含量有升高趋势。团聚体 MWD 与大于0.25 mm 水稳性团聚体和团聚体氮含量有极显著相关关系。

关键词 三峡库区；坡地脐橙园；团聚体结构；养分分布特征

中图分类号 S152.4^{+}81 **文献标识码** A

三峡库区作为一个环境敏感和生态脆弱带，其严重的水土流失及其导致的土壤退化和面源污染问题已经引起了国内外广泛的关注[1-2]。近年来，对三峡库区土壤的退化、恢复和重建已有部分研究[3-5]，更多研究工作主要集中在如何控制坡耕地的土壤和养分流失方面[6-8]。脐橙果园作为三峡库区坡耕地利用的一种常见方式，控制坡地脐橙果园水土流失的保护性措施对土壤结构和抗蚀性的影响却鲜有报道。土壤团聚体作为土壤结构的一个重要参数，其稳定性对保障土壤肥力和评估土壤的抗蚀性有一定的参考价值[9]。而团聚体不同粒径中养分含量对于土壤养分循环、团聚体的形成和破坏以及土壤肥力的保持具有重要的意义[10]。本文依托三峡工程生态与环境秭归实验站的长期定位试验，探讨了脐橙树下种植多年生白三叶草、脐橙树下农作物秸秆覆盖等保护性管理措施对土壤团聚体及团聚体养分含量的影响，从而为果园土壤生态保护和面源污染生态控制等研究工作提供参考。

* 国家自然科学基金面上项目（30870410 和 40871147）和三峡工程生态环境监测系统（SX2009-009）资助

† 通讯作者，E-mail：lzxia@issas.ac.cn

作者简介：吴电明（1985—），男，博士研究生，从事土壤与农业生态研究。E-mail：wdming1985@yahoo.com.cn

收稿日期： 2010-08-23；收到修改稿日期： 2011-01-20

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究工作在三峡工程生态与环境秭归实验站开展。研究区位于三峡库首秭归县水田坝乡，北纬 31°3'32″，东经 110°40'33″，距长江干流约 4 km。站区属亚热带大陆性季风气候，雨热同季，气候垂直差异明显。不同海拔区土地利用方式不同，在低山（600 m 以下）河谷地带，主要发展经济林木-脐橙；在半高山地带（600~1 000 m），是粮油等作物的主产区；高山地带（1 000 m 以上），以发展林业为主。山地丘陵面积占 97.3%，耕地大部分为坡地，紫色土约占耕地面积的 78.7%。坡地土壤易遭受侵蚀，水土流失严重。

1.2 实验地介绍

秭归站典型果园径流场建于 2000 年，自 2002 年开始栽植脐橙，但脐橙在第 3 年进入生产期。本试验设 6 个径流小区，各小区面积为 5.00m×9.06m = 45.30m^2，坡度为 25°。处理分别为:(1)CM：脐橙套种多年生白三叶草；(2) SM：脐橙园地表农作物秸秆覆盖；(3) CH：脐橙套种黄花菜等高植物篱；(4) MM：脐橙园沿等高线埋设防渗膜（深度为 60 cm）；(5) CK：常规脐橙栽植；(6) PC：脐橙套种小麦-花生。由于试验土壤为紫色砂岩发育的粗骨土，砂性

表 1 径流场不同作物施肥方案

Table 1 Fertilization for different crops

作物 Crops	施肥期 Timing of application	氮 N	磷 P_2O_5	钾 K_2O
		----------（kg hm^{-2}）----------		
小麦	总量 Total	135.0	56.25	90.00
Wheat	基肥 Base fertilizer	50.63	56.25	30.00
	苗肥 Seed fertilizer	33.75	—	30.00
	分蘖肥 Tillering fertilizer	33.75	—	22.50
	穗肥 Panicle fertilizer	16.88	—	7.50
花生	总量 Total	135.0	74.96	99.00
Peanut	基肥 Base fertilizer	67.50	44.98	61.64
	苗肥 Seed fertilizer	33.75	15.00	18.68
	追肥 Topdressing fertilizer	33.75	15.00	18.68
脐橙	总量 Total	510.0	255.0	382.5
Navel citrus	春肥 Spring fertilizer	101.9	50.99	76.21
	壮果肥 Fruit fertilizer	229.4	114.7	171.5
	还阳肥 Autumn fertilizer	178.4	89.24	133.4

注：小麦和花生的施肥量为作物根床面积施肥量，实际面积仅占小区面积约 18% Note: The fertilizer application rates for wheat and peanut were calculated on root-bed area, and the actual area accounts for about 18% of the plot area

强，缺氮少磷，因此根据不同作物需肥特点，2001 年确定施肥配方和施肥量（表 1），当年施肥作物有小麦、花生、白三叶草等套种作物；2003 年至 2006 年全部按方案实施。肥料为天脊复合肥、尿素、普钙和硫酸钾等。脐橙采用人工环沟施肥，其他作物采用表施和耕翻入土相结合。2007 年开始，各小区统一为当地脐橙园平均施肥量，氮、磷和钾施量分别为 N 437.1 kg hm^{-2}、$P_2O_5$178.8 kg hm^{-2} 和 K_2O178.8 kg hm^{-2}，其中 PC 小区套作的小麦和花生的施肥量占小区施肥量的 7.6%。 SM 小区年度 6 月份覆盖麦秆（干重）为 2.2×10^4 kg hm^{-2}，9 月份覆盖花生秸秆（干重）为 8.8×10^3 kg hm^{-2}。

径流场土壤为秭归向斜出露侏罗纪紫色砂岩发育的紫色土，质地为壤土，土壤 pH 6.68，有机碳 4.82 g kg^{-1}，全氮 0.6 g kg^{-1}，全磷 0.28 g kg^{-1}，全钾 16.7 g kg^{-1}。各小区间用水泥预制板隔开，设有独立出水口和集水池。为了减少统计学误差，所有小区在建设和管理（包括施肥，杀虫，除草，收获等）方面统一进行[11]。

试验脐橙为枸橘砧木罗伯逊脐橙接穗(Naval orange)，2002 年嫁接，2004 年投产。小区沿等高线各设 3 行，每行 2 棵，行株距 3.4 m×2.5 m。

1.3 土壤采样与分析

按上坡、中坡和下坡将小区分设 3 个样方，依照随机、多点采样原则，于 2009 年 4 月分别采集每个样方 0~5 cm、5~20 cm 两个层次土壤样品。土壤采集后，置阴凉通风处摊开风干 2 d，然后将土壤掰成 1 cm 大小土块，继续风干，测定土壤团聚体及各粒级团聚体碳氮磷含量。

土壤团聚体的测定采用湿筛法[12]，称取 60g 土壤置于固定好的筛子上（从上至下直径依次为 2 mm、0.25 mm、0.053 mm），放入桶中，加水浸泡 10min，然后上下摆动筛子 3 cm，重复 50 次（2 min 内），将留在筛子上的土壤冲洗至铝盒中，50 ℃下烘至恒重，称重。

土壤养分性质参照《土壤农业化学分析方法》[13]进行测定。其中有机碳采用外加热重铬酸钾氧化法；全氮采用半微量凯氏法；全磷采用 HF-$HClO_4$ 消煮—钼锑抗比色法测定。

1.4 计算方法及数据处理

团聚体平均重量直径（MWD）的计算公式[14]为：

$$MWD=\sum_{i=1}^{n+1}\frac{r_{i-1}+r_i}{2}\times m_i$$

式中，m_i 为各级团聚体的重量百分含量；r_i 为第 i 个筛的孔径大小（mm），并且 $r_0=r_1$，$r_n=r_{n+1}$，n 为筛子数量。

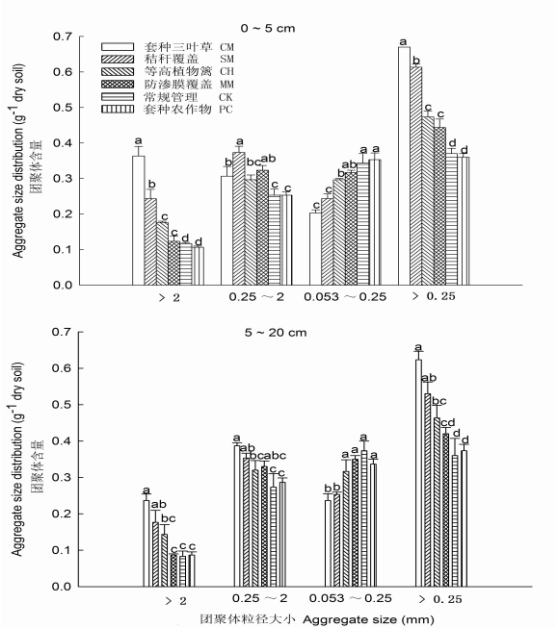
数据采用 SAS 9.2 进行统计分析，用 LSD 法进行差异显著性比较（$p<0.05$）。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体特征

2.1.1 土壤团聚体分布 在 0~5 cm，CM 处理大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量最高，达

到 0.67 g g^{-1} 干土，并显著高于其他几个处理（图 1）；SM 处理大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量次之，为 0.61 g g^{-1} 干土，也显著高于 CH、MM、CK 和 PC 处理；CH 和 MM 处理大于 0.25 mm 水稳性团聚体差异不显著，但显著高于 CK 和 PC 处理；CK 和 PC 处理大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量最低。不同处理间大于 2 mm 水稳性团聚体含量也有相同的趋势，而 0.053~0.25 mm 的团聚体含量则有相反的趋势（图 1）。在 5~20 cm，团聚体分布有相似的趋势。



注：不同字母代表处理间有显著性差异

Note: Bars are standard errors (n = 3) and values with the different letter are significantly different at level of 0.05

图 1 不同管理措施脐橙园土壤团聚体含量与粒径分布

Fig. 1 Soil aggregate contents and particle size distributions in soils of citrus orchards different in managements

表 2 不同处理团聚体平均重量直径

Table 2 Soil aggregate MWD in different treatments (mm)

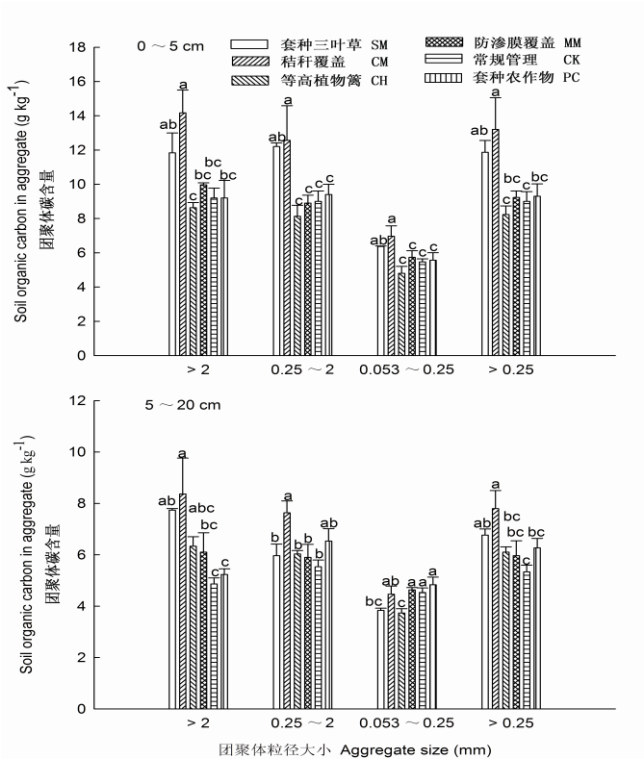
处理 Treatments	0~5 cm	5~20 cm
CM	1.63a	1.33a
SM	1.26b	1.11b
CH	0.92c	0.99b
MM	0.86cd	0.73c
CK	0.70d	0.74c
PC	0.73d	0.67c
p	<0.000 1	<0.000 1

CM：脐橙套种白三叶草 interplantation of citrus trees with white clover； SM： 脐橙园地面秸秆覆盖 mulching of crop straws；CH：脐橙园套种黄花菜植物篱 interplantation with day lily, *Hemerocallis citrina Baroni*, or contour hedgerow；CK：常规脐橙园 conventional management；PC：脐橙园套种小麦—花生

interplantation with Wheat (*Triticum aestivum Linn.*) - Peanut (*Arachis hypogaea*)

不同字母代表处理间有显著性差异（p<0.05） Values with the different letter are significantly different at level of 0.05

2.1.2 团聚体平均重量直径（MWD） 根据公式计算结果可以看出，在 0~5 cm，CM 处理 MWD 值显著的高于其他处理（表 2），SM 处理 MWD 值也显著高于 CH、MM、CK 和 PC 处理，CH 和 MM 处理间 MWD 值无显著性差异，但 CH 处理 MWD 值显著高于 PC 和 CK 处理。在 5~20 cm，MWD 值变化情况有类似趋势。



注：不同字母代表处理间有显著性差异

Note: Bars are standard errors (n = 3) and values with the different letter are significantly different at level of 0.05

图 2 不同管理措施脐橙园土壤不同粒径团聚体碳含量

Fig. 2 Carbon contents in soil aggregates different in particle size in citrus orchards different in management

2.2 土壤团聚体养分

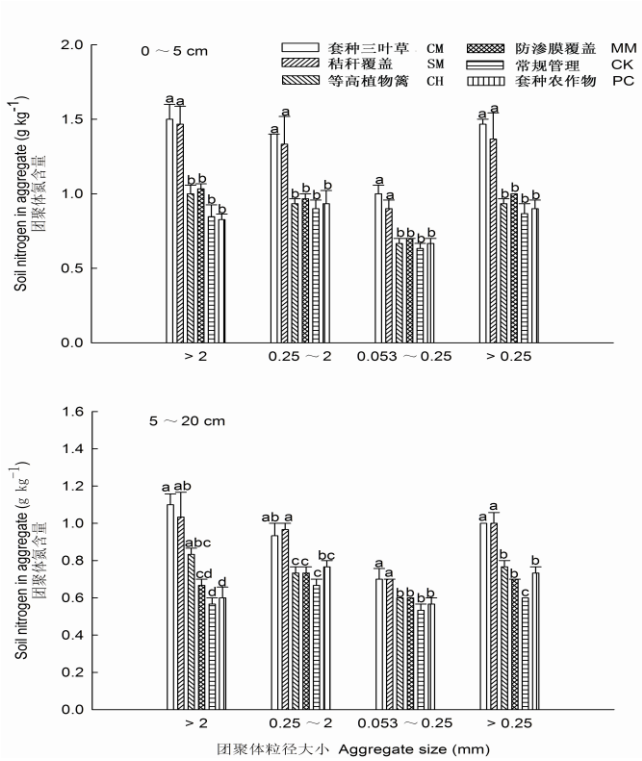
2.2.1 团聚体碳含量 从图 2 可以看出，团聚体碳主要分布在大于 2 mm 和 0.25~2 mm 的水稳性团聚体中，而在 0.053~0.25 mm 的粒径中含量相对较低。

不同管理措施同一粒径中团聚体碳含量也有很大变化。SM 处理 0~5cm 土壤大于 0.25mm 水稳性团聚体有机碳含量显著地高于 CH、MM、CK 和 PC 处理，达到 13.2 g kg^{-1}；CM 处理的有机碳含量次之，为 11.9 g kg^{-1}，并显著高于 CH 和 CK 处理；而 CH、MM、CK 和 PC 处理间无显著性差异。在 0~5 cm 其他粒径及 5~20 cm 土壤大于 2 mm、0.25~2 mm 和大于 0.25 mm 粒径中，团聚体碳含量有相似的变化规律。5~20 cm 土壤的 0.053~0.25 mm 水稳性团聚体中，MM、CK 和 PC 处理团聚体碳含量最高，并显著高于 CM 和 CH 处理；SM 处理团聚体

碳含量为 4.5 g kg^{-1}，并显著高于 CH 处理；CM 处理和 CH 处理间团聚体碳含量差异不显著。

2.2.2 团聚体氮含量　从图 3 可以看出，同一处理团聚体氮含量主要分布在大于 2 mm 和 0.25 ~2 mm 粒径中，但 0.053~0.25 mm 中的氮含量也在 0.5~1.0 g kg^{-1} 之间变动，与前两者之间差别不大。这与其他学者研究相一致[15-16]。

在 0~5 cm，同一粒径不同处理间团聚体氮含量有一致的变化趋势。CM 与 SM 处理团聚体氮含量均显著高于其他处理；CH、MM、CK 和 PC 处理间团聚体氮含量差异不显著。相对表层土壤，5~20 cm 土壤各处理团聚体氮含量均有所降低；不同处理间大于 0.25 mm 团聚体氮含量以 CK 处理最低，显著地低于 CM、SM、CH、MM 和 PC 处理；CK 和 PC 处理大于 2 mm 水稳性团聚体氮含量也显著地低于 CH 处理。



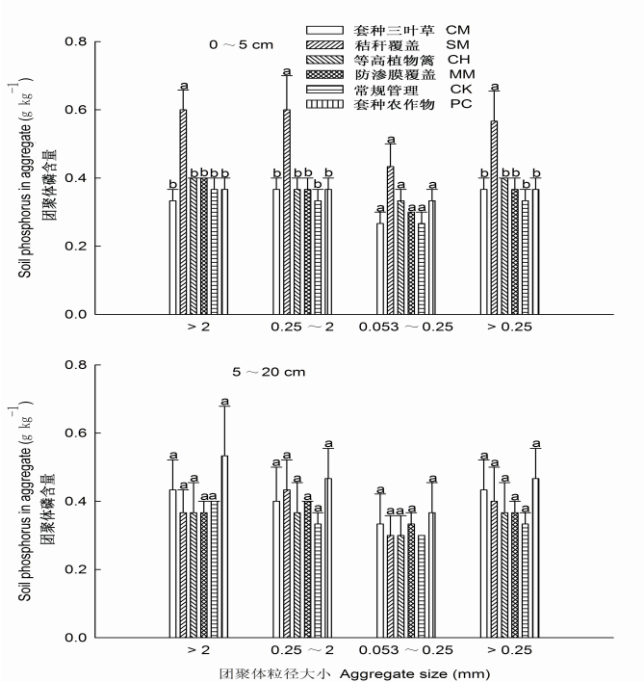
注：不同字母代表处理间有显著性差异

Note: Bars are standard errors (n = 3) and values with the different letter are significantly different at level of 0.05

图 3 不同管理措施脐橙园土壤不同粒径团聚体氮含量

Fig. 3　Nitrogen contents in soil aggregates different in particle size in citrus orchards different in management

2.2.3 团聚体磷含量 从图 4 可以看出，同一处理团聚体磷含量在不同团聚体粒径间分布较均匀，这与其他学者的研究相一致[15]。在 0~5 cm，SM 处理大于 2 mm、0.25~2 mm 和大于 0.25 mm 团聚体粒径中的磷含量均显著高于其他处理。CM、CH、MM、CK 和 PC 处理间团聚体磷含量差异不显著。在 5~20 cm，不同处理间同一粒径水稳性团聚体磷含量均无显著差异，但 PC 处理的团聚体磷含量高于其他几个处理，这可能与该处理施肥量较高有关；而 SM 处理的团聚体磷含量并没有显著高于其他处理，与 0~5 cm 的结果差异很大，可见秸秆覆盖对提高表层（0~5 cm）土壤团聚体磷含量效果明显，但对 5~20 cm 土壤团聚体磷含量还没有产生明显影响。



注：不同字母代表处理间有显著性差异

Note: Bars are standard errors (n=3) and values with the different letter are significantly different at level of 0.05

图 4 不同管理措施脐橙园不同粒径土壤团聚体磷含量

Fig. 4 Phosphorus contents in soil aggregates different in particle size in citrus orchards different in management

2.3 团聚体 MWD 与大于 0.25 mm 水稳性团聚体及团聚体养分的关系

团聚体 MWD 与大于 0.25 mm 水稳性团聚体、团聚体碳氮磷的相关关系如表 3。

从表 3 可以看出，团聚体 MWD 与大于 0.25 mm 水稳性团聚体和团聚体氮含量达到了极显著相关关系，与团聚体碳的相关系数为 0.782 2，但与团聚体碳和磷均没有显著的相关关系。因此，在表征团聚体稳定性和抗蚀性时，土壤中大于 0.25 mm 水稳性团聚体和团聚体氮含量是两个重要的参考指标。

表 3 MWD 与大于 0.25 mm 水稳性团聚体、团聚体养分的相关关系

Table 3 Relationship of MWD with > 0.25 mm water stable aggregate and nutrients in aggregate (n = 6)

	大于 0.25 mm 水稳性团聚体 >0.25 mm water stable aggregate	大于 0.25 mm 水稳性团聚体碳 Soil organic carbon in >0.25 mm water stable aggregate	大于 0.25 mm 水稳性团聚体氮 Soil nitrogen in >0.25 mm water stable aggregate	大于 0.25 mm 水稳性团聚体磷 Soil phosphorus in >0.25 mm water stable aggregate
MWD	0.978 1	0.782 2	0.952 5	0.452 6
p	0.000 7	0.066 0	0.003 3	0.367 4

3 讨 论

紫色土是典型的雏育土，其母岩风化快、成土时间短，土壤团聚体的稳定性和抗蚀性受人为活动影响大。研究表明耕作和扰动越大，对团聚体破坏越大，其抗蚀性愈低[17]。在脐橙果园试验中，脐橙套种小麦-花生处理每年两次翻耕，对土壤结构造成了一定的破坏。与常规裸地脐橙栽植相比，虽然该处理大于0.25 mm 水稳性团聚体含量没有明显变化，但多年观测数据表明，该处理加剧了土壤侵蚀和养分流失。

土壤团聚体的稳定性还与植物根系活动、有机物质输入等因素密切相关。白三叶草的根系穿插作用能够改善土壤的结构，其根系的分泌物及腐烂的根系也能够成为团聚体的胶结物质，有利于土壤大于0.25 mm 水稳性团聚体的形成[18-20]。所以脐橙套种多年生白三叶草显著增加了土壤中大于2 mm、0.25~2 mm 以及大于0.25 mm 的水稳性团聚体含量。脐橙园农作物秸秆覆盖每年向土壤输送了大量的有机物，有利于改善土壤结构、提高土壤抗蚀性。但是由于没有三叶草的固氮和根系穿插等功能，其大于0.25 mm 水稳性团聚体含量和团聚体氮含量均低于脐橙套种多年生白三叶草处理。与常规脐橙栽植相比，脐橙间作黄花菜等高植物篱和脐橙树间沿等高线埋设防渗膜处理均显著地增加了土壤大于0.25 mm 水稳性团聚体的含量。这与 Mapa 等[21]学者的研究相一致。但由于没有有机物质的大量输入，其对土壤结构的改善作用不及脐橙套种多年生白三叶草和脐橙园农作物秸秆覆盖处理。

团聚体稳定性的定量化指标主要包括团聚体平均重量直径（MWD）、团聚体破碎率（PAD）及团聚体相当消散系数（RSI）等。其中 MWD 是表征团聚体稳定性的最重要、最常用指标[22]，其也与土壤侵蚀有很好的相关性[23-24]。Le Bissonnais[22]根据 MWD 值将团聚体稳定性划分为 5 个等级（表 4）。

表 4 团聚体稳定性和等级[22]

Table 4 Soil aggregate stability and its classes according to MWD values[22]

等级 Class	MWD 值 MWD value (mm)	团聚体稳定性 Aggregate stability
1	<0.4	非常不稳定 Very unstable

2	0.4~0.8	不稳定 Unstable
3	0.8~1.3	中等稳定 Medium
4	1.3~2.0	稳定 Stable
5	>2.0	非常稳定 Very stable

本研究中，脐橙套种多年生白三叶草处理 MWD 值在 0~5 cm 和 5~20 cm 分别为 1.66 mm 和 1.33 mm，应该为 4 等级，即稳定团聚体等级；脐橙园地表秸秆覆盖、脐橙间作黄花菜等高植物篱和脐橙园沿等高线埋设防渗膜处理 MWD 值均处于 0.8~1.3 mm 之间，属于中等稳定团聚体等级；而脐橙树套种小麦-花生和常规裸地脐橙栽植处理 MWD 值均低于 0.8 mm，属于不稳定团聚体等级。可见，5 种坡地保护性管理措施以脐橙套种多年生白三叶草对于改善团聚体稳定性的效果最好。

土壤有机质与团聚体之间有着非常密切的关系。研究表明，土壤团聚体是多级团聚的产物，有机质是土壤团聚体形成过程中的重要胶结物质[25]。因此，土壤团聚体粒径越大，有机碳含量越高。在本研究中，不同处理间均有大于2 mm 和 0.25~2 mm 水稳性团聚体中有机碳含量高于 0.053~0.25 mm 的趋势，这也与刘晓利等[15]的研究结果一致。骆东奇等[17]研究发现，土壤有机质是影响坡耕地紫色土团聚体抗蚀性的重要内在因素，人为作用主要是通过增加有机质含量促进团聚体的稳定性和抗蚀性。在脐橙果园管理措施中，脐橙园农作物秸秆覆盖和脐橙套种多年生白三叶草均显著增加了 0~5 cm 土壤大于0.25 mm 团聚体碳的含量，而其他几种管理措施间大于0.25 mm 团聚体碳含量差别不大。因此，这两种管理方式对于保护三峡库区坡地脐橙果园土壤团聚体稳定性和抗蚀性起到重要作用。

相关分析表明，团聚体 MWD 不仅与土壤大于0.25mm 水稳性团聚体有很好的相关性，而且与团聚体氮达到了极显著相关关系（表 4）。氮在土壤中主要以有机态存在，其含量往往与有机碳变化趋势相一致。在本研究中，团聚体碳与团聚体氮含量变化趋势是相似的，这与其他学者的研究结果类似[15]。由于三峡库区紫色砂岩发育的脐橙果园土壤养分含量低，缺氮、低磷[8]，农作物秸秆覆盖和套种多年生白三叶草，不仅可提高团聚体氮含量，而且还可以提高土壤团聚体的稳定性和抗蚀性。农作物秸秆覆盖还有利于增加 0~5cm 土壤团聚体磷含量。

综上所述，在三峡库区紫色土陡坡地脐橙园，采用农作物秸秆覆盖和种植多年生白三叶草，能够显著地提高土壤中大于0.25mm 水稳性团聚体的含量，显著地改善团聚体稳定性，并显著地增加了水稳性团聚体中碳氮的含量。间作黄花菜等高植物篱虽然能有效控制水土流失，但对土壤团聚体稳定性及团聚体碳氮磷地影响不明显。脐橙园套种小麦-花生，其土壤中大于 0.25mm 水稳性团聚体和 MWD 值均显著地低于其他 4 种保护性管理措施，土壤团聚体稳定性低。

参 考 文 献

[1] Meng Q H, Fu B J, Yang L Z. Effects of land use on soil erosion and nutrient loss in the Three Gorges Reservoir Area, China. Soil Use Manage, 2001, 17(4): 288-291

[2] Liu J, Diamond J. China's environment in a globalizing world. Nature, 2005, 435(7046): 1 179-1 186

[3] 章家恩，徐琪. 三峡库区退化土壤的恢复与重建研究. 长江流域资源与环境, 1998, 7(3): 57-62. Zhang J E, Xu Q. The restoration and reconstruction of degraded soils in the Three Gorges Reservoir Area (In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1998, 7(3): 57-62

[4] 杨林章，董元华，马毅杰. 三峡库首地区土地资源潜力与生态环境建设. 北京：水利水电出版社，2007: 25-39. Yang L Z, Dong Y H, Ma Y J. Land resource potential and ecological environment in Three Gorges Reservoir Area (In Chinese). Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 2007: 25-39

[5] 韩庆忠，夏立忠，向琳，等. 三峡库区脐橙园土壤养分、酸度变化特征与施肥管理对策——以秭归县水田坝乡为例. 土壤, 2008, 40(4): 602-607. Han Q Z, Xia L Z, Xiang L, et al. Characteristics of soil nutrients and acidity and fertilization management of hillside orange gardens in Three Gorges Region-A case study of Shuitianba town, Zigui city (In Chinese). Soils, 2008, 40(4): 602-607

[6] 吴电明，夏立忠，俞元春，等. 坡耕地氮磷流失及其控制技术研究进展. 土壤, 2009, 41(6): 857-861. Wu D M, Xia L Z, Yu Y C, et al. Reviews on mechanisms of nitrogen, phosphorus losses from sloping farmland and control techniques (In Chinese). Soils, 2009, 41(6): 857-861

[7] 许峰，蔡强国，吴淑安，等. 三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究——以等高植物篱为例. 地理研究, 2000, 19(3): 303-310. Xu F, Cai Q G, Wu S A, et al. A study on soil nutrient loss control by slope eco-engineering in the Three Gorges Reservoir region-Taking the contour hedgerows as an example (In Chinese). Geographical Research, 2000, 19(3): 303-310

[8] 夏立忠，杨林章，李运东. 生草覆盖与植物篱技术防治紫色土坡地土壤侵蚀与养分流失的初步研究. 水土保持学报, 2007, 21(2): 28-31. Xia L Z, Yang L Z, Li Y D. Perennial alfalfa and contour hedgerow on reducing soil, nitrogen and phosphorus losses from uplands of purple soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 28-31

[9] Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I. Theory and methodology. Eur J Soil Sci, 2005, 47(4): 425-437

[10] Guggenberger G, Zech W, Thomas R. Lignin and carbohydrate alteration in particle-size separates of an oxisol under tropical pastures following native savanna. Soil Biol Biochem, 1995, 27(12): 1 629-1 638

[11] Hurlbert S H. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. Ecol Monogr, 1984, 54(2): 187-211

[12] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64(2): 681-689

[13] 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: 107-170. Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemical (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 107-170

[14] 郑晓萍，卢升高. 富铁土团聚体稳定性的表征及其物理学机制. 浙江大学学报：农业与生命科学版，2005, 31(3): 305-310. Zheng X P, Lu S G. Characterization and physical mechanisms of aggregate stability in Ferrisols (In Chinese). Journal of Zhejiang University: Agric Life Sci Edition, 2005, 31(3): 305-310

[15] 刘晓利，何园球，李成亮，等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征. 土壤学报, 2009, 46(2): 255-262. Liu X L, He Y Q, Li C L, et al. Distribution of soil water stable aggregates and soil organic C , N and P in upland red soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 255-262

[16] Elliott E. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50(3): 627-633

[17] 骆东奇，侯春霞，魏朝富，等. 紫色土团聚体抗蚀特征研究. 水土保持学报, 2003, 17(2): 20-23. Luo D Q, Hou C X, Wei C F, et al. Study on characteristics of purple soils aggregates erosion-resistant (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 20-23

[18] Rasse D P, Smucker A J M, Santos D. Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64(2): 725-731

[19] Goulet E, Dousset S, Chaussod R, et al. Water-stable aggregates and organic matter pools in a calcareous vineyard soil under four soil-surface management systems. Soil Use Manage, 2004, 20(3): 318-324

[20] Haynes R J, Beare M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. Soil Biol Biochem, 1997, 29(11/12): 1 647-1 653

[21] Mapa R B, Gunasena H P M. Effect of alley cropping on soil aggregate stability of a tropical Alfisol. Agroforest Syst, 1995, 32(3): 237-245

[22] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility 1. Theory and methodology. Eur J Soil Sci, 1996, 47(4): 425-437

[23] Reichert J M, Norton L D. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. Soil Sci, 1994, 158(3): 159-169

[24] 闫峰陵，史志华，蔡崇法，等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响. 土壤学报, 2007, 44(4): 577-583. Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on ultisoils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 577-583

[25] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil Till Res, 2004, 79(1): 7-31

EFFECTS OF PROTECTIVE MANAGEMENT OF NAVEL ORANGE ORCHARDS ON SLOPE LAND ON STRUCTURE OF AND CARBON, NITROGEN AND PHOSPHORUS CONTENTS IN SOIL AGGREGATES

Wu Dianming[1,2] Xia Lizhong[2†] Yu Yuanchun[1] Ma Li[2] Li Yundong[2] Yang Linzhang[2]

(1 *College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China*)

(2 *State Key Lab of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract Based on the 8-year long experiment at the Zigui Ecological and Environmental Experiment Station for the Three-Gorge Project, effects of five citrus orchard protective management practices were studied on structure of and nutrient (C, N and P) distributions in soil aggregates in navel orange orchards located on slopeland. It was found that Treatment CM (interplantation of citrus trees with white clover, *Trifolium repens Linn.*) and Treatment SM (mulching of crop straws) were obviously higher than the other treatments in content of >0.25mm water stable aggregates (WSA), aggregate mean weight diameter (MWD) and nitrogen content in >0.25 mm WSA in surface soil (0~5 cm), and Treatment SM was higher than all the other treatments in phosphate content in >0.25mm WSA in surface soil (0~5cm); Treatment CH (interplantation with day lily, *Hemerocallis citrina Baroni*, or contour hedgerow) and Treatment MM (counter embedment of impermeable membrane) were significantly higher than CK (conventional management) and Treatment PC (interplantation with Wheat (*Triticum aestivum Linn.*) - Peanut (*Arachis hypogaea*)) in >0.25 mm WSA and Treatment CH was also significantly higher than CK and PC treatments in aggregate MWD. Compared with CK, Treatment PC did not have any significant effect on >0.25mm WSA, MWD, soil carbon in aggregate and soil nitrogen

in aggregate in the surface soil (0~5cm), but increased soil phosphorus in aggregates in the 5~20cm soil layer. Aggregate MWD was significantly related to contents of >0.25 mm WSA and nitrogen in aggregates.

Key words Three-Gorges Reservoir Area; Citrus slope land; Aggregate stability; Aggregate nutrients