施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体及碳氮磷含量的影响

朱秋丽[1]，王 纯[1]，严锦华[2]，仝 川[1,3]，曾 瑜[2]，王维奇[1,3]

(1. 福建师范大学地理研究所，福州 350007；2. 闽榕茶业有限公司，福州 350018；
3. 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室，福州 350007)

摘要：为了研究施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体与碳、氮和磷含量的影响，以福州河滨茉莉园土壤为研究对象，对对照(C)、秸秆(S)、秸秆＋石膏(SG)、秸秆＋生物炭(SB)和秸秆＋炉渣(SS)5 种处理样地 0—10，10—20，20—30 cm 土层土壤团聚体分布和稳定性，包括＞0.25 mm 团聚体含量($DR_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)以及土壤碳、氮、磷含量和化学计量比进行了测定分析。结果表明：5 种处理团聚体均以 0.053～0.25，0.25～2 mm 粒级为主。与对照相比，单施秸秆团聚体 $DR_{0.25}$、MWD 和 GMD 值分别减小了 19.86%，19.18%和 37.98%，D 增加了 14.26%，团聚体稳定性降低；秸秆＋石膏、秸秆＋生物炭和秸秆＋炉渣与单施秸秆相比，$DR_{0.25}$ 和 MWD 相差不大，GMD 较单施秸秆分别增加了 2.34%，0.63%和 12.67%，D 分别减少了 2.31%，6.26%和 5.01%，团聚体稳定性增强。秸秆、秸秆＋石膏、秸秆＋生物炭和秸秆＋炉渣与对照相比，0—10 cm 表层土壤碳、氮、磷含量均显著增加，10—20，20—30 cm 土层变化不大，表现为养分向表层富集的现象。综合比较分析，石膏、生物炭和炉渣可以作为秸秆还田配施改良剂，以提高秸秆还田的功效。

关键词：秸秆；废弃物；土壤团聚体；碳、氮、磷；茉莉

中图分类号：S141.4；S158　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2017)04-0191-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.031

Effects of Straw and Waste Application on Soil Aggregates and Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Jasmine Garden

ZHU Qiuli[1], WANG Chun[1], YAN Jinghua[2], TONG Chuan[1,3], ZENG Yu[2], WANG Weiqi[1,3]

(1. *Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007;
2. *Minrong Tea Co., Ltd, Fuzhou* 350018; 3. *Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007)

Abstract: In order to study the effects of straw and waste application on the soil aggregates and soil carbon, nitrogen and phosphorus in the riverside jasmine garden in Fuzhou, the distribution and stability of soil aggregates, including ＞0.25 mm soil aggregates ($DR_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D), and the content and stoichiometric ratio of soil carbon, nitrogen and phosphorus of 0—10, 10—20 and 20—30 cm soil layers were examined in the control (C), straw (S), straw＋gypsum (SG), straw＋biochar (SB), straw＋slag (SS) amendments plots. The results showed that 0.053～0.25 mm and 0.25～2 mm particles were the predominant contributor. Compared with the control, $DR_{0.25}$, MWD and GMD under the straw treatments decreased by 19.86%, 19.18%, and 37.98%, respectively, whie D increased by 14.26%, and aggregate stability decreased. Compared with the straw amendment plots, in the straw＋gypsum, straw＋biochar, straw＋slag treatments plots, both $DR_{0.25}$ and MWD varied slightly, and GMD increased by 2.34%, 0.63%, and 12.67%, respectively, whereas, D was reduced by 2.31%, 6.26%, and 5.01% respectively, furthermore, aggregate stability also increased. Compared with control, in the straw, straw＋gypsum, straw＋biochar, straw＋slag treatments plots, carbon, nitrogen and phosphorus content were significantly increased in 0—10 cm soil, , however, those in 10—20 and 20—30 cm soil layers varied slightly, showing the accumulation of nutrients to the surface soil layer. In all, the results indicating that biochar and slag can be taken as the combination amendments with straw returning to improve the effect of straw returning.

收稿日期：2017-03-13

资助项目：国家自然科学基金项目(41571287)；福州市科技计划项目(2014-G-66，2016-N-86)；福建师范大学地理科学学院研究生科研创新基金项目(GY201610)

第一作者：朱秋丽(1989—)，女，河南周口人，硕士研究生，主要从事稻作环境研究。E-mail：zhuqiuli15@163.com

通信作者：王维奇(1982—)，男，辽宁沈阳人，助理研究员，主要从事稻田生态环境研究。E-mail：wangweiqi15@163.com

Keywords: straw; wastes; soil aggregate; carbon, nitrogen, phosphorus; jasmine

农作物秸秆含有丰富的碳、氮、磷、钾、镁、钙、硫等植物生长所必须的营养元素[1],我国目前每年秸秆产量约为8亿吨[2]。秸秆还田不仅可以解决秸秆焚烧或者直接丢弃造成的资源与环境问题,还可以提高土壤肥力、作物产量[3],减少免耕稻田温室气体 CH_4 排放[4]等。同时秸秆还田也面临一些技术问题,秸秆C/N一般在60～80之间[5],不利于微生物分解(适宜C/N在25～30);秸秆还田后只有5.3%～43%的秸秆碳转化为土壤稳定性碳,相当一部分秸秆碳会以 CO_2 或 CH_4 的形式损失进入大气中[6]。因此,选择适宜的配施改良剂增加秸秆还田功效,对于土壤固碳减排与土壤肥力的提升均具有重要意义。石膏、生物炭和炉渣均是源于工农业生产中的废弃物,其中石膏和炉渣便宜、易得,生物炭是由秸秆等农业废弃物经高温制备,作为肥料和土壤改良剂的施加也是资源再利用的有效形式,但其在农业实践中配合秸秆还田同步施加的研究尚鲜见报道,并且三者均为碱性物质,预期可以改良酸性土壤,实现农田的可持续生产。

福州是茉莉花茶的发源地,优越的生态环境和气候条件,独特的加工工艺,使得福州茉莉花茶驰名中外。但是由于茉莉花茶产业过度的不良竞争,品质不断下降,福州茉莉花茶逐渐被中国茶叶市场边缘化[7],同时随着城镇化进程的不断推进,茉莉花种植面积不断减少[8],茉莉花茶产业受到严重威胁。因此,加强茉莉种植的管理与保护,对于农业文化遗产传承和茉莉花茶产业发展都具有重要意义。基于此,本研究探究秸秆还田,及其与石膏、生物炭和炉渣混施对茉莉园土壤团聚体的稳定性和养分含量的影响,对实现工农业废弃物资源化、生态环境保护与农业可持续发展均具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省福州市(118°08′—120°31′E,25°15′—26°39′N),属于亚热带海洋性季风气候,全年冬短夏长,温暖湿润,雨量充沛,无霜期达326 d,年平均日照时间为1 700～1 980 h,年降水量为900～2 100 mm,年平均气温为19.6 ℃,最冷月为1—2月,最热月为7—8月[9]。

茉莉(*Jasminum sambac* (L.) Ait)为多年生灌木,性喜温暖湿润,在通风良好、半阴的环境生长最好,土壤以含有大量腐殖质的微酸性砂质土壤最为适合。本试验中供试作物为单瓣茉莉,2008年4月由人工扦插进行种植(高10 cm)。茉莉的生长阶段分为:枝叶生长期(4月初至5月初)、花蕾萌芽期(5月初至5月下旬)、盛花期(6月初至9月)。每年3月底至4月初,气温20 ℃左右时将茉莉剪至约7 cm,剪掉的枝叶一部分用于还田,一部分运出,还田量约3 500 kg/hm^2。4月中旬进行第1次施肥,施肥量为110～150 kg/hm^2,第一茬茉莉花采摘结束后进行第2次施肥,施肥量为90～110 kg/hm^2,肥料类型为俄罗斯产复合肥,N∶P_2O_5∶K_2O=16%∶16%∶16%。

1.2 试验设计

试验于2015年4月开始,设置5个处理组,施加不同工农业废弃物,分别为:对照(无施加)(C)、秸秆(S)、秸秆+石膏(SG)、秸秆+生物炭(SB)、秸秆+炉渣(SS),每个处理设置3个重复,共15个小区,每个小区面积为10 m^2,随机区组排列。每个小区秸秆施加量为3 500 kg/hm^2,石膏、生物炭和炉渣施加量均为8 000 kg/hm^2,所有材料施加前均过2 mm孔筛[10],在茉莉移栽前施加到试验田里,移栽后,依据常规统一水肥管理。

供试秸秆来自茉莉的枝叶,其碳、氮、磷以及钾含量分别为455.73,22.08,1.27,21.87 mg/g,生物炭以茉莉的枝叶为原材料制备。石膏来自福州建筑业废物,主要含有 SiO_2(0.7%)、CaO(43.1%)、SO_3(54.4%)、Fe_2O_3(0.4%)、MgO(0.5%)和 K_2O(0.1%)。炉渣来自福建金星钢铁公司,主要含有 SiO_2(27.7%)、CaO(35.7%)、SO_3(1.3%)、Fe_2O_3(6.2%)、P_2O_5(0.1%)、MgO(4.3%)和 K_2O(2.7%)。本研究中选用的添加物均具有增加土壤养分,减少稻田养分损失的作用[11],且不会带来环境风险[10]。

表1 试验土壤基本性质

指标	土层深度/cm	C	S	SG	SB	SS
容重/(g·cm^{-3})	0—10	1.67	1.39	1.40	1.53	1.49
	10—20	1.56	1.59	1.45	1.56	1.63
	20—30	1.63	1.55	1.56	1.69	1.59
pH	0—10	4.77	4.53	4.58	5.29	6.04
	10—20	4.85	4.65	4.47	4.95	4.97
	20—30	4.84	4.69	4.67	4.82	4.86
电导率/(mS·cm^{-1})	0—10	0.16	1.45	0.26	0.11	0.18
	10—20	0.10	0.31	0.67	0.09	0.08
	20—30	0.13	0.35	0.32	0.14	0.12

1.3 土样采集与测定

土样采集:2015年9月,茉莉成熟期采集0—30 cm土层的土壤,分3层,每10 cm为一层,每个试验小区3个重复,将每一层土样分别装入自封袋中密封,同时用100 cm^3 的环刀对每一层土壤取样,一并带回实验室;将采集的鲜土样品挑去动植物残体、根系和石块后,分出部分样品置于0～4 ℃冷藏,其余样品置于阴凉通风处自然风干待用。

土样测定:土壤容重采用环刀法测定;土壤含水

量采用称重法测定；土壤电导率和 pH 值采用水土质量比为 2.5∶1，分别用便携式电导计（2265FS，USA）和便携式 pH 计（STARTER 300，USA）测定；土壤全碳、全氮含量采用碳氮元素分析仪（Elementar Vario MAX CN，Germany）测定；土壤全磷含量先采用 $HClO_4-H_2SO_4$ 消煮法，再用连续流动分析仪（Skalar San++，Nerthland）测定；水稳性团聚体含量采用湿筛法[12]分离出<0.053，0.053～0.25，0.25～2，>2 mm 粒级的团聚体测定。

1.4　土壤团聚体稳定性指标

（1）>0.25 mm 水稳定性大团聚体含量[13]（$DR_{0.25}$）：

$$w_i=M_i/(M_1+M_2+M_3+M_4)\times 100\%$$

$$DR_{0.25}=\sum_{i=1}^{n}(w_i)$$

即 $DR_{0.25}=M_{r>0.25}/M_T=1-M_{r<0.25}/M_T$

（2）平均质量直径[14]（MWD）：

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

（3）几何平均直径[14]（GMD）：

$$\mathrm{GMD}=\exp\left[\sum_{i=1}^{n}M_i\ln\bar{R}_i/\sum_{i=1}^{n}M_i\right]$$

（4）分形维数[15]（D）：

$$\frac{M(r<\bar{R}_i)}{M_T}=\left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right)^{3-D}$$

即 $\lg\left[\frac{M(r<\bar{R}_i)}{M_T}\right]=(3-D)\lg\left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right)$

式中：w_i 为第 i 级团聚体质量百分比；M_i 为第 i 级团聚体质量；$\bar{R}_i$ 为某粒级团聚体平均直径；M_r 为各粒级团聚体质量之和；$R_{\max}$ 为团聚体最大粒径；$M(r<\bar{R}_i)$ 为小于 $\bar{R}_i$ 团聚体质量之和。

1.5　数据处理与分析

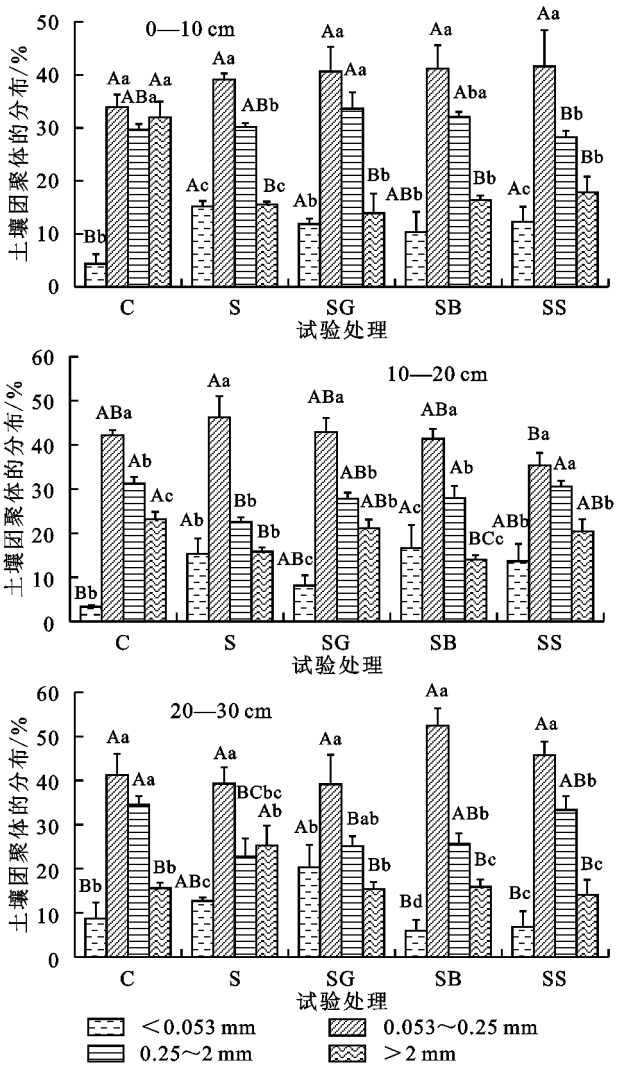
运用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件进行数据整理与分析，采用 Origin 8.0 软件作图。采用 SPSS 19.0 的单因素方差分析法分析各处理土壤团聚体稳定性指标 $DR_{0.25}$、MWD、GMD 和 D 差异性，采用 Pearson 相关分析法分析土壤团聚体各粒级百分含量及各稳定性参数的相关性。

2　结果与分析

2.1　施加秸秆与废弃物对土壤团聚体分布特征影响

一般以 0.25 mm 为界线将水稳性团聚体分为水稳性大团聚体（>0.25 mm）和水稳性微团聚体（<0.25 mm）。从图 1 可以看出，秸秆与废弃物施加对水稳定性团聚体分布影响显著（$P<0.05$）。C、S、SG、SB 和 SS 处理团聚体百分含量均以 0.053～0.25，0.25～2 mm 粒级为主，>2 mm 粒级次之，<0.053 mm 粒级含量最少；不同粒级团聚体百分含量随粒级增大先增大后减小；随土层深度增加 0.25～2 mm 粒级团聚体百分含量显著减少，即水稳定性大团聚体含量随土层深度的增加而减少。

S 与 C 处理相比，0—10 cm 土层，<0.25 mm 粒级团聚体含量呈增加趋势，其中<0.053 mm 粒级团聚体含量显著增加（$P<0.05$），增加 249.10%；>0.25 mm粒级团聚体含量呈减少趋势，其中>2 mm 粒级团聚体含量显著减少（$P<0.05$），减少 51.49%。10—20 cm 土层，<0.25 mm 粒级团聚体含量显著增加（$P<0.05$），<0.053 mm 和 0.053～0.25 mm 粒级团聚体含量分别增加 362.62%和 9.62%；>0.25 mm 粒级团聚体含量显著减少（$P<0.05$），0.25～2 mm 和 2 mm 粒级团聚体含量分别减少 27.96%和 31.56%。20—30 cm 土层，<0.25 mm 粒级团聚体含量与>0.25 mm 粒级团聚体含量变化不大。各土层整体表现为<0.25 mm 粒级水稳定性微团聚体含量增加，>0.25 mm 粒级水稳定性大团聚体含量减少（图 1）。



注：图柱上方不同大写字母表示同一粒级不同处理团聚体百分含量在 $P<0.05$ 水平上差异显著；不同小写字母表示不同粒级同一处理团聚体百分含量在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

图 1　不同处理土壤团聚体的分布

SG、SB和SS与S处理相比，0—10 cm土层，0.053～0.25，0.25～2，>2 mm粒级团聚体含量均呈增加趋势，<0.053 mm粒级团聚体含量呈减小趋势，但未达到显著差异水平(图1)。SG、SB和SS较S处理，<0.053 mm粒级团聚体含量分别减少了22.01%，31.78%和19.06%；0.053～0.25 mm粒级团聚体含量分别增加了3.77%，5.09%和6.27%，>0.25 mm粒级团聚体含量分别增加了4.08%，6.19%和0.95%。

与S处理相比，10—20 cm土层SG、SB和SS处理0.25～2，>2 mm粒级团聚体含量均呈增加趋势，<0.053，0.053～0.25 mm粒级团聚体含量呈减小趋势，但也未达到显著差异水平(图1)。SG、SB和SS处理<0.25 mm粒级水稳定性微团聚体含量分别减少了54.29%，2.16%和34.15%，>0.25 mm粒级团聚体含量分别增加了27.50%，9.40%和32.64%。

20—30 cm土层，与S处理相比，SG、SB和SS处理0.053～0.25，0.25～2 mm粒级团聚体含量均呈增加趋势，<0.053，>2 mm粒级团聚体百分含量减小，但也未达到显著差异水平(图1)。其中0.25～2 mm粒级团聚体百分含量分别增加了10.12%，12.46%和46.14%。

2.2 施加秸秆与废弃物对土壤团聚体稳定性的影响

土壤水稳定性大团聚体含量($DR_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)是反映土壤团聚体稳定性的常用指标。因此，本研究采用不同处理不同深度土壤团聚体$DR_{0.25}$、MWD、GMD和D作为评价土壤团聚体稳定性的参数。从表2可以看出，秸秆与废弃物施加对土壤团聚体稳定性的影响差异显著($P<0.05$)。S与C处理相比，$DR_{0.25}$、MWD和GMD分别减小了19.86%，19.18%和37.98%，D增加了14.26%。SG、SB和SS与S处理相比，$DR_{0.25}$和MWD与S相差不大，GMD呈不同程度的增加，较S处理分别增加了2.34%，0.63%和12.67%，D呈不同程度的减少，分别减少了2.31%，6.26%和5.01%。

表2 秸秆与废弃物施加对土壤团聚体$DR_{0.25}$、MWD、GMD和D的影响

指标	土层深度/cm	C	S	SG	SB	SS
$DR_{0.25}$/%	0—10	61.72±6.64aA	45.67±2.06bAB	47.53±9.74bA	48.50±1.87bA	46.11±6.97bA
	10—20	54.45±2.44aAB	38.40±3.35bcB	48.96±2.74abA	42.00±6.24bA	50.93±3.89aA
	20—30	50.09±3.56aB	48.04±7.22aA	40.09±2.85aA	41.55±2.57aA	47.44±9.44aA
MWD/mm	0—10	2.31±0.32aA	1.33±0.07bAB	1.28±0.40bA	1.41±0.08bA	1.46±0.31bA
	10—20	1.80±0.16aB	1.28±0.11bB	1.65±0.19aA	1.22±0.15bA	1.62±0.27aA
	20—30	1.39±0.11abB	1.83±0.43aA	1.27±0.14bA	1.32±0.14bA	1.29±0.37bA
GMD/mm	0—10	0.85±0.22aA	0.38±0.03bB	0.42±0.12bAB	0.44±0.03bA	0.42±0.06bA
	10—20	0.63±0.06aAB	0.33±0.03bcB	0.50±0.07abA	0.34±0.11bcA	0.48±0.12bA
	20—30	0.46±0.04abB	0.50±0.14aA	0.31±0.04bB	0.41±0.02abA	0.46±0.15abA
D	0—10	2.15±0.22bA	2.53±0.03aA	2.45±0.02aAB	2.39±0.18abA	2.46±0.14aA
	10—20	2.13±0.05bA	2.52±0.11aA	2.35±0.12abB	2.50±0.20aA	2.49±0.14aA
	20—30	2.33±0.19abA	2.51±0.00abA	2.59±0.13aA	2.19±0.30bA	2.22±0.24abA

注：表中数字后不同大写字母表示不同土层间同一处理稳定性指标在$P<0.05$水平上差异显著；不同小写字母表示同一土层内不同处理稳定性指标在$P<0.05$水平上差异显著。

2.3 土壤团聚体各粒级含量与各稳定性参数相关性

利用Pearson相关性分析，评价土壤团聚体各粒级含量及其各稳定性参数之间的关系，结果见表3。其中，$DR_{0.25}$与<0.053 mm和0.053～0.25 mm粒级团聚体呈极显著负相关，与0.25～2 mm和>2 mm粒级团聚体呈极显著正相关；MWD与0.053～0.25 mm粒级团聚体呈极显著负相关，与0.25～2 mm和>2 mm粒级团聚体呈极显著正相关；GMD与<0.053 mm和0.053～0.25 mm粒级团聚体呈显著负相关，与>2 mm粒级团聚体呈极显著正相关；D与<0.053 mm粒级团聚体呈极显著正相关，与0.053～0.25 mm和>2 mm粒级团聚体含量呈显著负相关。土壤团聚体稳定性参数MWD、GMD与$DR_{0.25}$极显著正相关；D与$DR_{0.25}$呈极显著负相关。

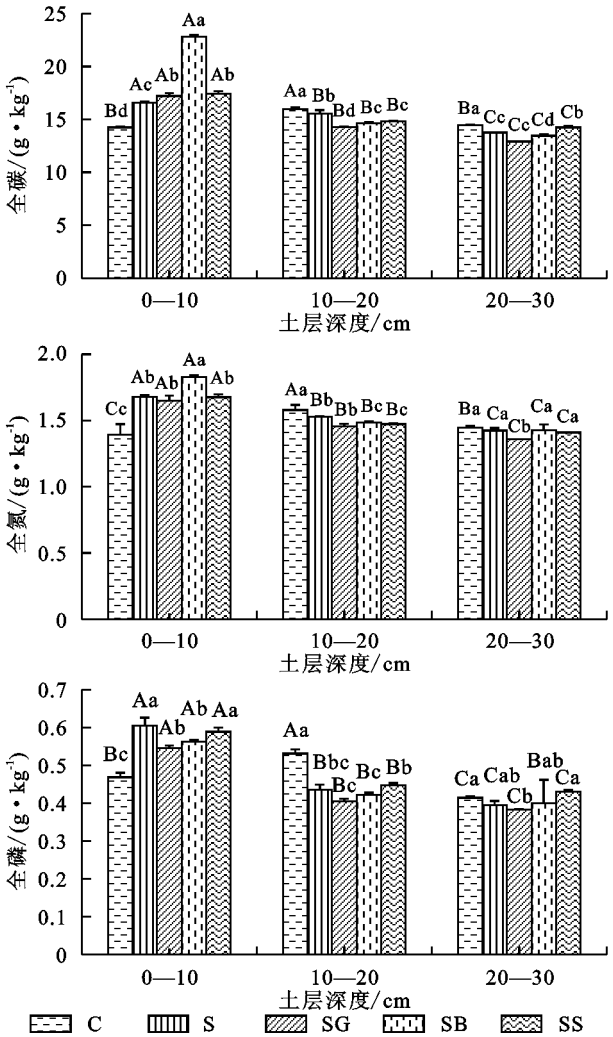
表3 $DR_{0.25}$、MWD、GMD、D与各粒级团聚体含量相关性分析

项目	<0.053	0.053～0.25	0.25～2	>2	$DR_{0.25}$	MWD	GMD	D
<0.053	1	−0.449**	−0.237	−0.348*	−0.448**	0.028	−0.653**	0.922**
0.053～0.25	−0.449**	1	−0.343*	−0.442**	−0.597**	−0.897**	−0.308*	−0.417**
0.25～2	−0.237	−0.343*	1	−0.125	0.557**	0.407**	0.266	−0.207
>2	−0.348*	−0.442**	−0.125	1	0.754**	0.721**	0.858**	−0.327*
$DR_{0.25}$	−0.448**	−0.597**	0.557**	0.754**	1	0.873**	0.894**	−0.411**
MWD	0.028	−0.897**	0.407**	0.721**	0.873**	1	0.660**	0.032
GMD	−0.653**	−0.308*	0.266	0.858**	0.894**	0.660**	1	−0.646**
D	0.922**	−0.417**	−0.207	−0.327*	−0.411**	0.032	−0.646**	1

注：表中**表示极显著相关($P<0.01$)；*表示显著相关($P<0.05$)。

2.4　施加秸秆与废弃物对土壤碳、氮和磷含量的影响

从图 2 可以看出，不同处理、不同土层土壤碳、氮和磷含量达到显著差异水平（$P<0.05$）。5 种处理 0—10，10—20，20—30 cm 土层碳、氮和磷含量随土层加深显著减小（$P<0.05$），秸秆与废弃物施加的作用减弱。0—10 cm 土层土壤碳、氮和磷平均含量分别为 17.66，1.65，0.55 g/kg，10—20 cm 土层土壤碳、氮和磷平均含量分别为 15.04，1.50，0.45 g/kg，20—30 cm 土层土壤碳、氮和磷平均含量分别为13.77，1.41，0.40 g/kg。



注：图柱上方不同大写字母表示不同土层同一处理养分含量在 $P<0.05$ 水平上差异显著；不同小写字母表示同一土层不同处理养分含量在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

图 2　土壤全碳、全氮和全磷含量的分布

0—10 cm 土层，土壤碳、氮和磷的变化范围分别为 14.26～22.81，1.39～1.83，0.47～0.61 g/kg，变异系数分别为 17.28%，9.62%和 9.60%。与 C 处理相比，S、SG、SB 和 SS 处理土壤碳、氮和磷含量均显著增加（$P<0.05$）（图 2），碳含量分别增加了 16.27%，20.76%，60.03%和 22.17%，氮含量分别增加了 20.55%，18.63%，31.45%和 20.49%，磷含量分别增加了 29.25%，16.60%，20.23%和 25.70%；10—20 cm 土层，土壤碳、氮和磷的变化范围分别为 14.27～15.97，1.46～1.58，0.41～0.53 g/kg，变异系数分别为 4.64%，3.29%和 10.94%；20—30 cm 土层，土壤碳、氮和磷的变化范围分别为 12.91～14.45，1.36～1.45，0.38～0.43 g/kg，变异系数分别为 4.49%，2.39%和 4.54%。10—20 cm 和 20—30 cm 土层，S、SG、SB 和 SS 处理土壤碳、氮和磷含量与对照相差不大。

3　讨 论

3.1　施加秸秆与废弃物对团聚体分布影响

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元[16]，其多少在一定程度上反映了土壤通透性、持水性、养分供储等能力的高低，是土壤肥力的基础以及评价土壤质量的主要指标[16]。形成土壤团聚体的胶结物质主要包括有机胶结物质[17]（有机残体和菌丝等粗有机质）、无机胶结物质（铁、铝氧化物和氢氧化物以及二氧化硅和碳酸钙等[18]和有机无机复合体[19]。本研究中秸秆施加使得 0—10，10—20，20—30 cm 土层，<0.25 mm 粒级水稳定性微团聚体含量增加，>0.25 mm 粒级水稳定性大团聚体含量减少，说明秸秆施加后短期内水稳定性大团聚体数量减少，微团聚体数量增多，主要是因为茉莉为多年生灌木，大田种植是多年免耕，秸秆还田过程增加了对土壤的扰动，土壤团聚体受到破坏，大团聚体破裂成较小的团聚体。与此同时，本研究发现秸秆还田配施石膏、生物炭和炉渣均提高了水稳定性大团聚体数量，减少了微团聚体数量，主要是因为石膏、生物炭和炉渣与秸秆混施显著增加了表层土壤 pH，这有利于植物的根系生长、土壤微生物繁殖与活动以及土壤有机质的形成，根系分泌物和通过微生物活动代谢形成的有机、无机胶结物质数量随之增加，土壤的团聚作用增强，从而促使大团聚体的数量随之增多。此外，石膏施加后还可以直接增加土壤中胶结物质的含量，因为石膏的主要成分是 $CaSO_4$，施加后可以增加土壤中 Ca^{2+} 的含量，进而构建阳离子桥增强团聚体的团聚作用[20]，从而使大团聚体的数量增多。

3.2　施加秸秆与废弃物对团聚体稳定性的影响

团聚体稳定性指标中 $DR_{0.25}$ 可以判别土壤结构的好坏，表征土壤的抗侵蚀能力，提高水稳定性大团聚体的含量和质量，是提高土壤抗侵蚀能力的有效途径[21]。对团聚体的稳定性评价不仅要重视水稳性大团聚体的数量，还要重视团聚体的直径。土壤团聚体分形维数不仅可以表示土壤结构，还可以说明土壤含蓄水分和保持水土的功能[22]。其中 $DR_{0.25}$、MWD 和 GMD 值越大，大团聚体的含量越高，土壤抗侵蚀能力越强；D 值越小，土壤容重越小，土壤含蓄水分和保持水土的功能越强，土壤的结构越稳定。土壤团聚体稳定性主要受耕作方式、土壤有机质、土壤微生物、气候条件及植被覆盖等因素影响[19]。本研究中秸秆施

加使得水稳定性大团聚体数量较对照减少，描述团聚体稳定性的关键指标 $DR_{0.25}$、MWD 和 GMD 较对照减小，D 较对照增大，说明秸秆施加后短期内团聚体稳定性有所降低，主要是因为秸秆还田过程增加了对土壤的扰动，破坏土壤结构，大团聚体间胶结的菌丝断裂和半分解状态的有机质矿化速率加快，土壤间黏连的胶结物质减少，土壤的团聚作用和吸附能力随之降低；此外，茉莉为木本植物，其秸秆较水稻、小麦等草本植物含木质素较多，不易分解，在短期内并不会显著增加土壤重要胶结物质（有机质）含量，其残存过程反而会对团聚体的胶结团聚过程产生阻碍有关，正如本研究中秸秆施加后明显降低了土壤容重，说明土质变得更疏松，不利于团聚体的胶结。与此同时，本研究发现秸秆配施石膏、生物炭和炉渣处理样地与单施秸秆相比，增加了团聚体的稳定性，主要原因是石膏、生物炭和炉渣的施加可以直接或间接的增加作为土壤水稳定性团聚体形成基础的有机质固存，如本研究中选用的生物炭富含碳水化合物和长链烯烃等有机大分子[23]，含碳量高达 45.57%，可以直接增加土壤中有机质含量；此外，石膏、生物炭和炉渣的施加显著增加了表层土壤 pH，这有利于微生物和植物根系活动，促进土壤有机质的合成，增加团聚体的疏水性，从而增强土壤的抗侵蚀能力。另外，有机物还能增强团聚体间的黏结力和抗张强度，其吸收水的容量远大于土壤矿物，从而提高团聚体稳定性[24]。除此之外，石膏和炉渣的施加还可以直接增加土壤中无机胶结物质的含量，石膏的主要成分是 $CaSO_4$，施加后可以增加土壤中 Ca^{2+} 的含量，Ca^{2+} 的吸附性较强，炉渣中含有丰富的 SiO_2、CaO 均为重要的无机胶结剂，所以 Ca^{2+}、SiO_2 和 CaO 的增多也可增强团聚体的团聚作用，进而增强土壤的抗侵蚀能力和团聚体的稳定性。

3.3 施加秸秆与废弃物对土壤碳、氮、磷养分的影响

与对照相比，秸秆及其配施石膏、生物炭和炉渣处理都显著增加了 0—10 cm 表层土壤的碳、氮、磷含量，主要是因为茉莉秸秆含有丰富有机质，其施加后可以直接增加土壤的碳、氮、磷含量。秸秆还田配施石膏、生物炭和炉渣较单施秸秆显著增加了表层土壤的碳含量，特别是对于配施生物炭处理效果最为明显，这与生物炭自身碳与养分含量有关[25]。与此同时，由于本研究秸秆配施的废弃物均为碱性物质，其施加后会增加土壤的 pH，这对于本研究区酸性土壤而言具有重要的改良功能，并可进一步促进土壤微生物的繁殖与活动，从而加速秸秆分解和养分释放，增加土壤养分含量。

此外，本研究中秸秆与废弃物混施处理较单施秸秆处理相比，表现为表层土壤养分增加，水稳定大团聚体数量增多，团聚体稳定性增强，三者的变化趋势一致，主要是由于碳、氮、磷是土壤有机质的主要组成元素，而土壤有机质和团聚体是保持土壤结构和肥力的基础，二者相互作用，不可分割，后者是前者存在的场所，前者是后者存在的胶结物质[17]。

4 结论

（1）对照、秸秆、秸秆＋石膏、秸秆＋生物炭和秸秆＋炉渣 5 种处理团聚体均以 0.053～0.25 mm 和 0.25～2 mm 粒级为主，＞2 mm 粒级次之，＜0.053 mm 粒级含量最少，不同粒级团聚体含量随粒级增大先增大后减小，＞0.25 mm 水稳定性大团聚体数量随深度增加而减少，土壤的团聚作用和团聚体的稳定性随土层加深而减弱。

（2）与对照相比，单施秸秆的处理团聚体 $DR_{0.25}$、MWD 和 GMD 值分别减小，D 值增加，团聚体稳定性降低；秸秆＋石膏、秸秆＋生物炭和秸秆＋炉渣与单施秸秆相比，$DR_{0.25}$ 和 MWD 值变化不大，GMD 值增加，D 值减小，团聚体稳定性增强。

（3）单施秸秆、秸秆＋石膏、秸秆＋生物炭和秸秆＋炉渣，均能增加 0—10 cm 表层土壤的碳、氮和磷含量，10—20cm 和 20—30cm 变化不大；5 种处理土壤碳、氮和磷含量均随土层深度的增加而减小。

致谢：本研究在野外采样和室内分析过程中得到福建师范大学湿地研究中心刘小慧、黄晓婷、徐康和宋旭同学的帮助，在资料收集过程中得到南京农业大学农业资源与生态环境研究所程琨老师的帮助，在此一并表示深深地感谢！

参考文献：

[1] 韩瑞芸，陈哲，杨世琦. 秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J]. 中国农学通报，2016，32(9)：148-154.

[2] Wang Y, Bi Y, Gao C. The assessment and utilization of straw resources in China[J]. Agricultural Sciences in China，2010，9(12)：1807-1815.

[3] 徐永刚，马强，周桦，等. 秸秆还田与深松对土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. 土壤通报，2015，46(2)：428-432.

[4] 李成芳，寇志奎，张枝盛，等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报，2011，30(11)：2362-2367.

[5] 杨滨娟，黄国勤，徐宁，等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报，2014，34(13)：3779-3787.

[6] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Geoderma，2006，136(3/4)：708-715.

[7] 苏秀平. 福州茉莉花茶产业发展研究[D]. 福州：福建农林大学，2014.

[8] 林贤彪,颜燕燕,闵庆文,等.福州茉莉花农生态补偿意愿值及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(2):65-71.

[9] 胡喜生,洪伟,吴承祯,等.福州市土地生态系统服务时空分异特征[J].中国环境科学,2013,33(5):881-888.

[10] Wang W, Sardans J, Lai D Y F. et al. Effects of steel slag application on greenhouse gas emissions and crop yield over multiple growing seasons in a subtropical paddy field in China[J]. Field Crops Research, 2015, 171(2):146-156.

[11] Wang W, Zeng C, Sardans J. et al. Amendment with industrial and agricultural wastes reduces surface-water nutrient loss and storage of dissolved greenhouse gases in a subtropical paddy field[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 231(9):296-303.

[12] 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.

[13] 朱秋丽,曾冬萍,王纯,等.废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J].环境科学学报,2016,36(8):3000-3008.

[14] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱.黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J].生态学报,2006,26(2):364-372.

[15] 苏静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J].水土保持通报,2009,29(5):114-117.

[16] 王丽,李军,李娟,等.轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2014,25(3):759-768.

[17] 窦森,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.

[18] 谭文峰,周素珍,刘凡,等.土壤中铁铝氧化物与黏土矿物交互作用的研究进展[J].土壤,2007,39(5):726-730.

[19] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.

[20] 陈友媛,王俊鹏,赵文娟,等.碳酸钙对黄河口潮间带沉积物微团聚体的影响[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(4):87-94.

[21] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4):1360-1365.

[22] 丁文峰,丁登山.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J].地理研究,2002,21(6):700-706.

[23] 尚艺婕,王海波,史静.生物质炭对土壤团聚体微域环境及重金属污染的作用研究[J].中国农学通报,2015,31(7):223-228.

[24] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.

[25] Enders A, Hanley K, Whitman T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance[J]. Bioresource Technology, 2012, 114(3):644-653.

(上接第 165 页)

[11] 肖霜霜,陈武荣,许燕萍,等.武夷山山地土壤有机碳的垂直分布规律及影响因素研究[J].安徽农学通报,2008,14(11):65-67.

[12] 高雪松,何鹏,邓良基,等.丘陵区坡面土壤有机碳及颗粒有机碳分布特征[J].生态环境学报,2009,18(1):337-342.

[13] 李海波,韩晓增,尤孟阳.不同土地利用与施肥管理下黑土团聚体颗粒有机碳分配变化[J].水土保持学报,2012,26(1):184-189.

[14] 窦森,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.

[15] 朱姝,窦森,关松,等.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):127-136.

[16] 牛莉芹,程占红,张峰.五台山草甸多样性分析[J].干旱区研究,2010,27(4):573-577.

[17] 周萍.南方典型稻田土壤有机碳固定机制研究[D].南京:南京农业大学,2005.

[18] 杨益,牛得草,文海燕,等.贺兰山不同海拔土壤颗粒有机碳、氮特征[J].草业学报,2012,21(3):54-60.

[19] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰,等.黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J].自然资源学报,2010,25(2):218-226.

[20] 沈艳,傅瓦利,蓝家程,等.岩溶山地不同土地利用方式土壤颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的分布特征[J].水土保持研究,2012,19(6):1-6.