DOI:10.13671/j.hjkxxb.2015.0625
安婉丽,高灯州,潘婷,等.2016.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,36(5):1833-1840
An W L, Gao D Z, Pan T, *et al*. 2016.Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain[J].Acta Scientiae Circumstantiae,36(5):1833-1840

# 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响

安婉丽[1],高灯州[1],潘婷[1],曾从盛[1,2],王维奇[1,2,*]

1. 福建师范大学地理研究所,福州 350007
2. 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室,福州 350007

**收稿日期**:2015-07-11　　**修回日期**:2015-08-19　　**录用日期**:2015-08-20

**摘要**:为阐明早稻与晚稻生长期土壤水稳性团聚体分布及其稳定性对秸秆还田的响应,以福州平原红壤水稻田为研究对象,对秸秆还田后早稻田和晚稻田土壤水稳性团聚体分布特征及其稳定性,包括粒径>0.25 mm 团聚体的百分含量 $R_{0.25}$、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)和分型维数($D$)进行测定与分析.研究结果表明,秸秆还田和对照样地,0~40 cm 土层中早稻与晚稻生长期土壤均表现为水稳性团聚体组成以微团聚体(<0.25 mm 粒级团聚体)为主,团聚体粒级越大,含量越少;秸秆还田对 0~40 cm 土层中早稻田土壤水稳性大团聚体和微团聚体总含量的影响均不显著,但秸秆还田显著增加了晚稻田土壤水稳性大团聚体(粒径>0.25 mm)含量($p$<0.05),并显著减少了土壤水稳性微团聚体含量($p$<0.05);秸秆还田对早稻田土壤水稳性团聚体 MWD、GMD 和 $D$ 值影响均不显著,但显著增加了晚稻田土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值,显著降低了土壤水稳性团聚体 $D$ 值($p$<0.05);秸秆还田对早稻田土壤水稳性团聚体稳定性影响不显著,但显著增加了晚稻田土壤水稳性团聚体稳定性($p$<0.05).

**关键词**:秸秆还田;土壤水稳性团聚体;团聚体稳定性;稻田;福州平原

**文章编号**:0253-2468(2016)05-1833-08　　**中图分类号**:S152.4　　**文献标识码**:A

# Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain

AN Wanli[1], GAO Dengzhou[1], PAN Ting[1], ZENG Congsheng[1,2], WANG Weiqi[1,2,*]

1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007
2. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007

**Received** 11 July 2015; **received** in revised form 19 August 2015; **accepted** 20 August 2015

**Abstract**: In order to clarify the response of the soil water-stable aggregate distribution and stability to the straw returning in the early and late paddy field, the paddy field of Fuzhou plain was chosen as the study object, and the soil water-stable aggregate distribution and stability, including the percentage of aggregates particle size bigger than 0.25 mm $R_{0.25}$, mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter(GMD) and fractal dimension($D$) were determined and analyzed in the early and late paddy field after straw retuning. The results showed:①Micro-aggregate(<0.25 mm aggregate) was the main composition of water-stable aggregate for the 0~40 cm soil in the early and late paddy field, and the aggregate concentration decreased as the grain size increment. ②Water-stable macro-aggregate and micro-aggregate concentration were not significantly influenced by straw returning in the early paddy field. However, water-stable macro-aggregate concentration significantly increased($p$<0.05) and micro-aggregate concentration significantly decreased($p$<0.05) for the 0~40 cm soils in the late paddy field after straw returning.③MWD, GMD and $D$ did not significantly change in early paddy field after straw returning. However, MWD and GMD significantly increased ($p$<0.05) and $D$ significantly decreased($p$<0.05) for the soils in the late paddy field after

**基金项目**:国家自然科学基金(No.41571287,31000209);福建省科技厅重点项目(No.2014Y0054,2014R1034-3);福建省自然科学基金(No.2014J01119)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No.41571287,31000209), the Key Project of Science and Technology Department of Fujian Province(No.2014Y0054,2014R1034-3) and the Natural Science Foundation of Fujian Province(No.2014J01119)

**作者简介**:安婉丽(1990—),女,E-mail:woshianwanli@163.com; *通讯作者(责任作者),E-mail:wangweiqi15@163.com

**Biography**: AN Wanli(1990—)female, E-mail: woshianwanli@163.com; * **Corresponding author**, E-mail:wangweiqi15@163.com

straw returning. ④Straw retuning did not significantly influence soil water-stable aggregate stability in the early paddy, but significantly promoted soil water-stable aggregate stability ($p<0.05$) in the late paddy.

**Keywords**: straw returning; soil water-stable aggregates; aggregate stability; paddy filed; Fuzhou plain

## 1 引言(Introduction)

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,对土壤的理化性质有着重大影响(Tisdall *et al.*,1982).一般将粒级>0.25 mm 的团聚体称为大团聚体,而粒级<0.25 mm的团聚体称为微团聚体(赵红等,2011).土壤团聚体的数量多少在一定程度上反映了土壤持水性、供储养分、通透性等能力的高低,其组成和基本特性是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程与作用的主要指标之一,是土壤肥力的基础和评价土壤质量的关键指标(Rattan,2000).

土壤团聚体构成比例失调及团聚体稳定性下降是土壤结构退化的主要表现,对农业的可持续生产具有重要影响(王丽等,2014).张鹏等(2012)通过对粒径> 0.25 mm 大团聚体稳定性分析发现,秸秆还田有利于提高土壤机械稳定性和水稳性团聚体结构水平,增加土壤稳定性并改善土壤结构状况.农田土壤作为受人类影响最为明显的土壤类型之一,国内外关于农田土壤团聚体影响方面的研究也越来越多,但这些学者多从耕作方式(周虎等,2007;武均等,2015)、种植年限(刘文利等,2014)、种植方式(王丽等,2014)、添加物(邢玮等,2014)和微生物(程丽娟等,2014)角度出发.秸秆还田是近年来国内外大力推广的一种保护性耕作措施,已有相关研究表明,秸秆还田可改善土壤的结构和理化性质,提高土壤有机质含量(詹其厚等,2003;陈金海等,2011),但其还田后对土壤理化性状的影响研究主要集中在旱地土壤(张鹏等,2012;王海霞等,2012)的小麦秸秆(马宗国等,2003;韩新忠等,2012)和玉米秸秆(赵凡等,2011;慕平等,2012)等方面.对于稻田土壤,特别是对比不同生长季节水稻土壤对水稻秸秆还田的响应特征,尚鲜见报道.

水稻是重要的粮食作物,其产量高低对人类生存影响深刻.针对当前关于秸秆还田对稻田土壤团聚体影响研究的不足,本文对早稻与晚稻生长期土壤团聚体分布及其稳定性对秸秆还田的响应开展研究,这对科学评价秸秆还田在稻田应用中的可行性及有效管理与指导秸秆还田实践均具有重要意义.

## 2 研究区与研究方法(Study area and methods)

### 2.1 研究区概况

研究区位于福建省福州市城郊南部,乌龙江北岸,该区属亚热带海洋季风气候,年均气温为 19.6 ℃,年均降水量 1392.5 mm,蒸发量为 1413.7 mm,相对湿度为 77.6%.区内地貌类型主要为冲海积平原,地表平坦,海拔 3~5 m,零星分布剥蚀丘陵地貌(陈世亮,2009).采样点位于福州市仓山区盖山镇福建省水稻研究所吴凤综合实验基地(26.1°N,119.3°E)内,该实验基地共有稻田 7 $hm^2$,水稻栽培品种为江西省农科院研发的和盛 10 号,每季水稻生长期约为 3 个月,区内实行早稻-晚稻-蔬菜(莴笋)的轮作制度.实验前对翻耕后的田地进行人工整平,以保持土壤的均一性,水稻生长期水分管理采用传统的灌溉方式,即水稻前期实行水淹管理,水稻分蘖期后实行淹水-烤田-湿润灌溉相结合,实验区秸秆还田量为 3.3 $t\cdot hm^{-2}$.本实验区土壤类型为潴育型水稻土,土壤容重为 1.1 $g\cdot cm^{-3}$,pH 为 6.5,土壤耕作层有机碳含量为 18.1 $g\cdot kg^{-1}$,全氮含量为 1.2 $g\cdot kg^{-1}$,全磷为 1.1 $g\cdot kg^{-1}$(马永跃等,2012).

### 2.2 实验设计与样品采集

本实验于 2012 年稻田犁耕前施加秸秆,在实验区选择相对平整且人为干扰较少的稻田.早稻时期设置实验组(ZJ)和对照组(ZD),晚稻时期同样设置实验组(WJ)和对照组(WD)两组,其中,每组设置 3 个重复.早晚稻实验组的还田量以实验区水稻秸秆产生量(约为 3.3 $t\cdot hm^{-2}$)为依据,将上季稻的秸秆截成小段覆盖还田,对照组秸秆不还田.水稻收获后,在每个重复样地,用采土器分别采集每个实验小区 0~40 cm 土柱,并按照深度分为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 4 层,装入自封袋带回实验室,挑去动植物残体、根系和石块后置于阴凉通风处自然风干之后装袋保存.

### 2.3 土壤水稳性团聚体测定

**2.3.1 水稳性团聚体测定方法** 将土样置于套筛顶部(套筛孔径依次为 2、1、0.5、0.25 mm(Kemper *et al.*,1986),底部装有底盒)用绳子固定好,确保套筛在水中不会分离,之后将套筛放入桶中,向桶中注水,使水面离套筛顶部约 3 cm,在水中静置浸泡

10 min,浸泡的同时用重物压住套筛使之不会移动.浸泡结束后,双手固定套筛,以 30 次·min$^{-1}$的速率在水中上下振荡 2 min(郝翔翔等,2013),上下移动的垂直距离不超过 3 cm,将各级粒径的土样分别洗入烧杯中,烘干后称量,记为 $M_i$.

2.3.2　计算公式　本实验参数主要有土壤水稳性团聚体百分含量 $W_i$、粒径>0.25 mm 水稳性团聚体的百分含量 $R_{0.25}$、分型维数 $D$、平均质量直径 MWD 和平均几何直径 GWD.稳定性团聚体含量计算方法参考南京土壤所编制的土壤理化分析方法(中国科学院南京土壤研究所,1978),公式如下:

$$W_i = M_i/(M_1 + M_2 + M_3 + M_4) \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{0.25} = W_1 + W_2 + W_3 \quad (2)$$

式中,$W_i$($i$ = 1、2、3、4,下同)依次表示 1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒级团聚体的百分含量,$M_i$为第 $i$ 级团聚体的质量(g),$R_{0.25}$指粒径>0.25 mm 团聚体的百分含量.

MWD(mm)和 GWD(mm)采用邱丽萍等(2006)和王丽等(2014)推导出的公式计算:

$$\mathrm{MWD} = \sum_{i=1}^{n}(\bar{R}_i W_i)/\sum_{i=1}^{n} W_i \quad (3)$$

$$\mathrm{GWD} = \exp\left[\sum_{i=1}^{n} M_i \ln \bar{R}_i/\sum_{i=1}^{n} M_i\right] \quad (4)$$

分型维数采用杨培岭等(1993)推导的公式计算:

$$\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{max}}\right)^{3-D} \quad (5)$$

两边同时取对数,可得:

$$\lg\left[\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T}\right] = (3 - D)\lg\left(\frac{\bar{R}_i}{R_{max}}\right) \quad (6)$$

式中,$\bar{R}_i$ 是筛分出来的某一级别团聚体的平均直径(mm),$M_T$是各个粒级团聚体的总质量(g),$R_{max}$是团聚体的最大粒级(mm),$M(r < \bar{R}_i)$ 是粒级小于 $\bar{R}_i$ 的团聚体的质量(g).

2.4　数据处理

基于 Excel2007 整理计算出相关参数(包括百分含量 $W_i$、分型维数 $D$、平均质量直径 MWD、平均几何直径 GWD 和 $R_{0.25}$的均值与标准差),用 SPSS 19.0对数据进行统计分析,用 One-way ANOVA 方差分析分析实验组与对照组总体、相同土层和粒径的团聚体含量、MWD、GMD、$R_{0.25}$、分形维数 $D$ 之间的差异性;用 Person 相关系数分析 MWD、GMD、$R_{0.25}$和分形维数 $D$ 之间的相关关系;用 Origin8.0 软件作图.

## 3　结果与分析(Result and analysis)

### 3.1　秸秆还田对土壤水稳性团聚体数量的影响

早稻生长期,对照组(ZD)、实验组(ZJ)中水稳性团聚体均以微团聚体(<0.25 mm 粒级团聚体)为主,团聚体粒级越大,含量越少(图 1).秸秆还田后,

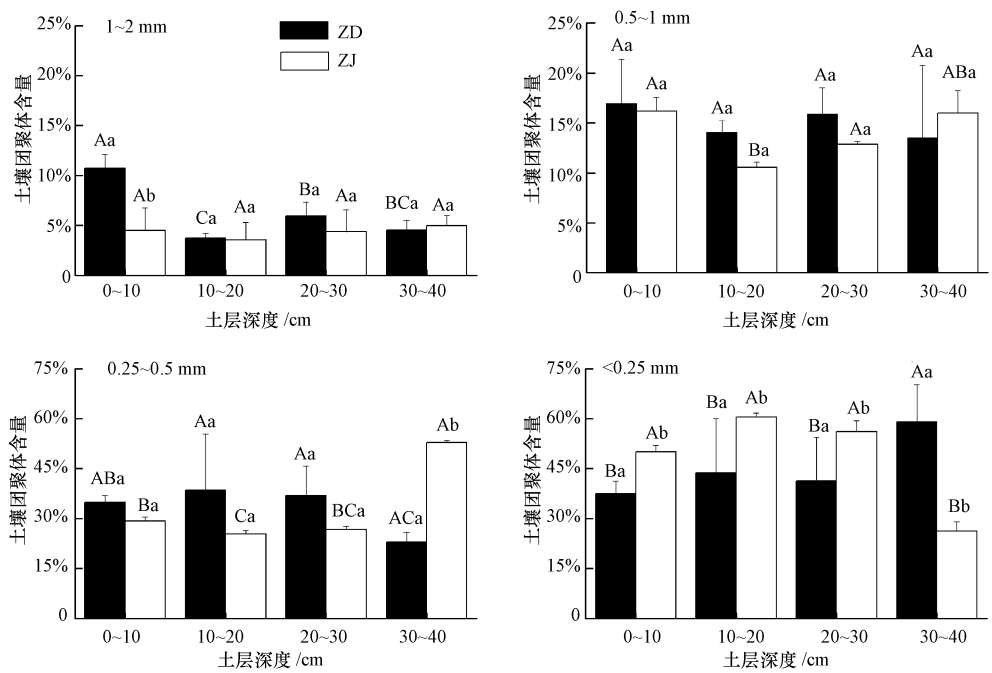



**图 1　早稻土壤水稳性团聚体含量分布**(图中不同小写字母表示对照组和处理组的组间差异显著($p$<0.05),不同大写字母表示组内差异显著($p$<0.05),下同)

Fig.1　Distribution of soil water-stable aggregates in early paddy field

早稻水稳性大团聚体数量($R_{0.25}$)在 0~30 cm 土层均减少,在 30~40 cm 土层上升($p<0.05$),尤其是 0~10 cm 土层中 1~2 mm 水稳性大团聚体数量降低显著($p<0.05$),30~40 cm 土层中 0.25~0.5 mm 粒级水稳性团聚体数量上升显著($p<0.05$).水稳性微团聚体数量在 0~30 cm 土层显著升高,在 30~40 cm 土层显著减少($p<0.05$).总体而言,秸秆还田对早稻田水稳性大团聚体和微团聚体含量的影响均不显著.

晚稻生长期,对照组(WD)和实验组(WJ)不同土层中水稳性团聚体与早稻情况相同,均以微团聚体为主,团聚体粒级越大含量越少(图 2).秸秆还田后,0~40 cm 土层中水稳性大团聚体除了 0.25~0.5 mm 粒级团聚体在 20~30 cm 土层稍有下降外,均表现为增加的趋势,特别是>0.5 mm 粒级水稳性团聚体数量在 0~20 cm 土层显著增加($p<0.05$).秸秆还田后,水稳性微团聚体含量减少,且在 0~20 cm 土层减少显著($p<0.05$).总体而言,秸秆还田显著增加了晚稻田土壤水稳性大团聚体含量,降低了水稳性微团聚体含量($p<0.05$).

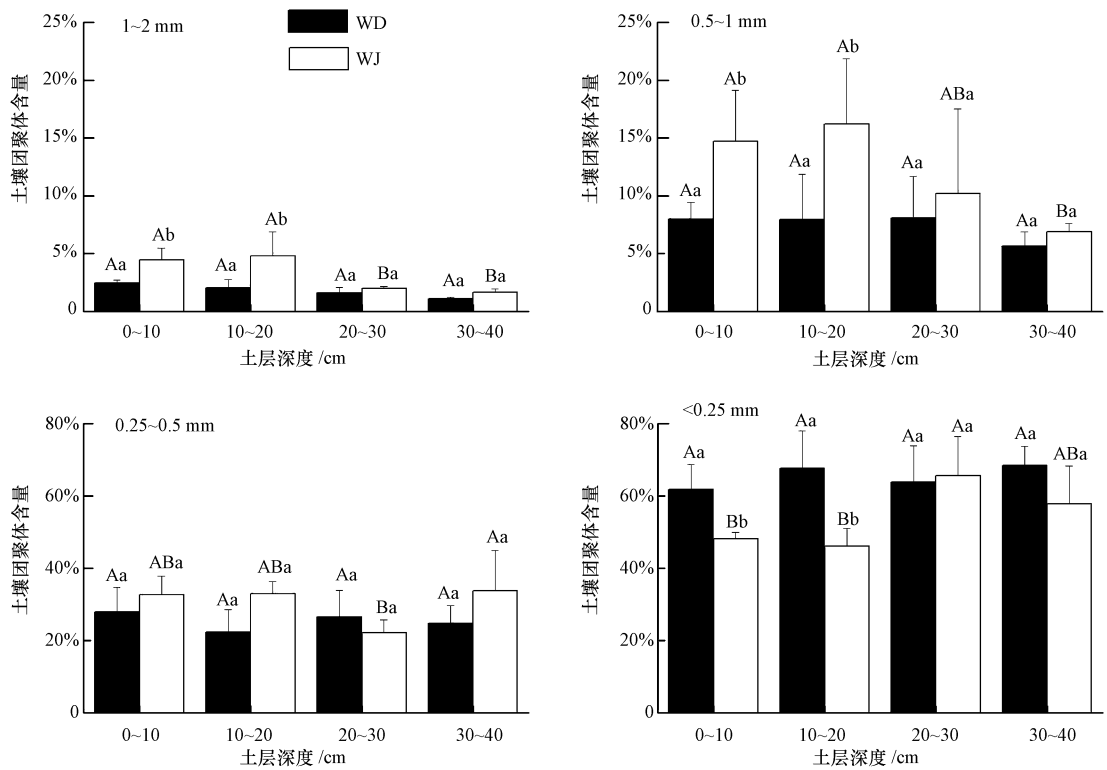



**图 2 晚稻土壤水稳性团聚体含量分布**

Fig.2 Distribution of soil water-stable aggregates in late paddy field

3.2 秸秆还田对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

3.2.1 秸秆还田对土壤水稳性团聚体 GMD 和 MWD 的影响 秸秆还田后,早稻土壤水稳性团聚体的 GMD 和 MWD 均表现为在 0~30 cm 土层显著下降($p<0.05$),其中,MWD 随土层深度的下降幅度依次为 28.92%、18.63%、19.82%,GMD 下降幅度依次为 10.51%、9.71%、9.44%;30~40 cm 土层早稻土壤水稳性团聚体 GMD 和 MWD 分别显著上升 22.66%和 15.23%($p<0.05$).说明秸秆还田在 0~30 cm 土层降低了早稻田土壤水稳性团聚体的稳定性,在 30~40 cm 土层提高了土壤水稳性团聚体稳定性.但综合考虑 0~40 cm 早稻土壤水稳性团聚体的 GMD 和 MWD 的变化,秸秆还田对 0~40 cm 早稻土壤水稳性团聚体的 GMD 和 MWD 的影响均不显著.

秸秆还田之后,晚稻 0~40 cm 土层土壤水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 显著增大($p<0.05$).其中,0~20 cm 土层 MWD 和 GMD 增加最为明显, MWD 增加幅度依次为 22.72%、30.89%($p<0.05$),GMD 则依次增大 9.23%和 13.36%($p<0.05$).综合考虑 0~40 cm 晚稻土壤水稳性团聚体的 GMD 和 MWD 的变化,秸秆还田显著增加了 0~40 cm 晚稻土壤水稳性团聚体的 GMD 和 MWD($p<0.05$),这一变化趋势与

晚稻水稳性大团聚体的数量变化一致,与水稳性微　　团聚体的数量变化恰好相反.

**表 1　早稻、晚稻田土壤水稳性团聚体平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、$R_{0.25}$和分形维数($D$)**

Table 1　Mean mass diameter (MWD), geometric mean diameter(GMD), $R_{0.25}$ and fractal dimension($D$) of soil water-stable aggregates in early and late paddy field

| 指标 | 深度/cm | 各指标值(早稻) | | 各指标值(晚稻) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ZD | ZJ | WD | WJ |
| MWD/mm | 0~10 | 0.465±0.042[a] | 0.361±0.025[b] | 0.278±0.020[a] | 0.360±0.003[b] |
| | 10~20 | 0.360±0.042[a] | 0.303±0.025[b] | 0.259±0.049[a] | 0.374±0.052[b] |
| | 20~30 | 0.398±0.058[a] | 0.332±0.034[b] | 0.264±0.036[a] | 0.316±0.040[a] |
| | 30~40 | 0.329±0.066[a] | 0.425±0.027[b] | 0.238±0.017[a] | 0.275±0.022[a] |
| | 0~40 | 0.388±0.068[a] | 0.355±0.053[a] | 0.260±0.032[a] | 0.325±0.058[b] |
| GMD/mm | 0~10 | 0.613±0.024[a] | 0.555±0.011[b] | 0.506±0.018[a] | 0.557±0.002[b] |
| | 10~20 | 0.566±0.043[a] | 0.516±0.009[b] | 0.491±0.033[a] | 0.567±0.028[b] |
| | 20~30 | 0.584±0.046[a] | 0.533±0.016[b] | 0.499±0.029[a] | 0.545±0.026[a] |
| | 30~40 | 0.528±0.043[a] | 0.623±0.016[b] | 0.483±0.013[a] | 0.512±0.024[a] |
| | 0~40 | 0.573±0.045[a] | 0.557±0.045[a] | 0.495±0.023[a] | 0.537±0.036[b] |
| $R_{0.25}$ | 0~10 | 0.625±0.038[a] | 0.500±0.020[b] | 0.383±0.070[a] | 0.519±0.019[b] |
| | 10~20 | 0.563±0.162[a] | 0.395±0.012[b] | 0.324±0.108[a] | 0.539±0.049[b] |
| | 20~30 | 0.587±0.130[a] | 0.439±0.033[b] | 0.363±0.101[a] | 0.344±0.077[a] |
| | 30~40 | 0.410±0.112[a] | 0.738±0.028[b] | 0.316±0.052[a] | 0.423±0.105[a] |
| | 0~40 | 0.546±0.126[a] | 0.518±0.143[a] | 0.346±0.079[a] | 0.466±0.100[b] |
| $D$ | 0~10 | 2.373±0.062[a] | 2.533±0.012[a] | 2.667±0.085[a] | 2.505±0.025[b] |
| | 10~20 | 2.405±0.271[a] | 2.664±0.002[b] | 2.727±0.111[a] | 2.481±0.079[b] |
| | 20~30 | 2.389±0.220[a] | 2.615±0.027[b] | 2.681±0.117[a] | 2.705±0.085[a] |
| | 30~40 | 2.647±0.130[a] | 2.069±0.068[b] | 2.733±0.056[a] | 2.608±0.138[a] |
| | 0~40 | 2.453±0.186[a] | 2.470±0.254[a] | 2.702±0.087[a] | 2.563±0.119[b] |

注:表中不同小写字母表示同一季稻相同土层对照组和处理组的差异显著($p$<0.05).

3.2.2　秸秆还田对土壤水稳性团聚体分型维数的影响　秸秆还田后,早稻田土壤水稳性团聚体分形维数在 0~30 cm 土层升高,30~40 cm 土层降低,其中,0~30 cm 土层分形维数依次增大 6.35%、9.71%、8.63%,30~40 cm 土层降低 27.91%.综合考虑 0~40 cm 早稻土壤水稳性团聚体的分型维数的变化,秸秆还田对 0~40 cm 早稻土壤水稳性团聚体分型维数的影响不显著(表 1).

秸秆还田后,晚稻田土壤水稳性团聚体分型维数除 20~30 cm 土层增加 0.9%之外,0~10 cm、10~20 cm 和 30~40 cm 土层依次降低 6.46%、9.91%和 4.81%.综合考虑 0~40 cm 晚稻土壤水稳性团聚体的分型维数的变化,秸秆还田显著降低了 0~40 cm 晚稻土壤水稳性团聚体的分型维数(表 1,$p$<0.05),这一变化与晚稻 0~40 cm 土层水稳性微团聚体数量变化一致,而与晚稻水稳性大团聚体数量变化恰相反.

3.3　土壤水稳性团聚体组成、稳定性表征指标的相关性

土壤水稳性团聚体各粒径含量及各稳定性参数之间的关系表明(表 2),MWD、GMD 和 $R_{0.25}$之间均显著相关($p$<0.01),并且三者均与分形维数 $D$ 显著负相关($p$<0.01);$R_{0.25}$分别与 MWD 和 GMD 呈显著正相关,与分形维数 $D$ 呈显著负相关($p$<0.01);<0.25 mm粒级的团聚体含量与 MWD 、GMD 和 $R_{0.25}$ 均呈显著负相关($p$<0.01),与分形维数 $D$ 显著正相关($p$<0.05),即当土壤中 $R_{0.25}$升高时,土壤水稳性团聚体表现为 MWD 和 GMD 增大,分形维数 $D$ 减少;当粒径<0.25 mm 水稳性团聚体的百分含量升高时,土壤水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 均减小,分形维数 $D$ 增大.

**表 2 MWD、GMD、$R_{0.25}$、$D$ 与各粒径水稳性团聚体含量相关性**($n$ = 156)

Table 2 Correlation among MWD, GMD, $R_{0.25}$, $D$, and different fraction water-stable aggregates concentration

| | | MWD | GMD | $R_{0.25}$ | $D$ | 各粒级团聚体含量 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 1~2 mm | 0.5~1 mm | 0.25~0.5 mm | < 0.25 mm |
| MWD | | 1 | 0.980** | 0.924** | −0.864** | 0.879** | 0.883** | 0.649** | −0.924** |
| GMD | | | 1 | 0.979** | −0.945** | 0.787** | 0.839** | 0.779** | −0.979** |
| $R_{0.25}$ | | | | 1 | −0.980** | 0.670** | 0.758** | 0.884** | −1.000** |
| $D$ | | | | | 1 | −0.590** | −0.684** | −0.916** | 0.980** |
| 各粒级团 | 1~2 mm | | | | | 1 | 0.697** | 0.343* | −0.670** |
| 聚体含量 | 0.5~1 mm | | | | | | 1 | 0.390* | −0.758** |
| | 0.25~0.5mm | | | | | | | 1 | −0.884** |
| | <0.25 mm | | | | | | | | 1 |

注:** $p$<0.01, * $p$<0.05.

## 4 讨论(Discussion)

### 4.1 秸秆还田对稻田土壤肥力与水稻生长的影响

已有研究表明,在双季稻秸秆还田试验中,水稻秸秆还田可以提高水稻分蘖数、叶面积指数和地上部分干物质量及增加水稻单位面积穗数和每穗实粒数(叶文培,2008),叶面积指数的增加使植物进行光合作用增强,利于有机物质积累与产量提高;另一方面,秸秆还田可以提高土壤中养分含量及酶的活性,增加土壤中动物、微生物等的数量和多样性(刘骅等,2007),且秸秆还田后土壤孔隙度增加,容重变轻,收缩率和破碎系数均减小,使土壤通透性得到改善(王振忠,2002).说明秸秆还田对土壤质量和结构均有有利影响,这也是秸秆还田之后水稻增产的另一重要原因.

### 4.2 秸秆还田对稻田土壤水稳性团聚体数量的影响

本实验中,秸秆还田之后,早稻 0~40 cm 土层水稳性大团聚体总体含量变化不显著,这主要取决于早稻期间秸秆还田的分解特征,这一过程将改变作为团聚体促成的土壤有机质的质量和微生物的数量与功能(陈建国等,2011).早稻生长期间,由于处于福建的湿季,降水比较频繁,秸秆基本处于稻田淹水环境中,而且早稻生长期间温度也较低,这将使得秸秆分解速率相对较慢,且分解释放到土壤中的碳多以惰性碳为主,碳输入数量与质量的有限性并未促进微生物的生长及土壤水稳性大团聚新核形成的胶体的产生.因此,早稻生长期,秸秆还田并未显著促进土壤水稳性大团聚体的形成,由此可以推断出不同深度早稻土壤水稳性大团聚体和微团聚体含量的变化主要是两者的相互转化造成的.在 0~30 cm 土层,早稻水稳性大团聚体含量降低,微团聚体含量升高,主要因为 0~30 cm 土层水分含量多,水分通过溶解和软化团聚体的胶结物质,使胶结剂由凝胶状态变成溶胶状态,降低其胶结能力(徐爽等,2014),导致水稳定性大团聚体被破坏形成粒径较小的团聚体;与之相反,30~40 cm 土层受外界扰动和水分、温度等条件影响较小,微团聚体在微生物作用下胶结形成大团聚体.

晚稻生长期间,秸秆还田后,0~40 cm 土层水稳性大团聚体均增多,这一结论符合于 Six 等(1998)的土壤大团聚体周转及土壤有机质(SOM)变化的胚胎发育模型,其模型中认为,新的植物残茬,如本研究中的水稻秸秆加入时,可促进团聚体中颗粒有机质(POM)的形成,POM 被黏土矿物质和微生物分泌的粘液包裹,形成新微团聚体的核心,在土壤有机质胶结作用下,微团聚体、矿物质和 POM 结合形成大团聚体,促进土壤大团聚体数量增加.与此同时,本研究晚稻生长季节主要处于福建的旱季,降水天数相对较少,且温度较高,水分蒸发快,水稻生长期主要以人工灌溉为主,所以存在明显的干湿交替现象.有研究已经证实,存在明显干湿交替作用的稻田,水稻秸秆还田可在一定程度上丰富土壤微生物的多样性(张晓文等,2006),进而促进晚稻田土壤团聚体的形成(李自刚等,2008;张晓文等,2006),这是本研究晚稻生长期秸秆还田后土壤水稳性大团聚体增加的又一重要原因.此外,Jastrow (1996)的研究表明,输入土壤的植物残体主要通过真菌菌丝体生长和其它微生物的分解活动,使土壤颗粒与矿物质结合在一起,这是本研究秸秆还田促进大团体形成的另一原因.结合以上研究结果,晚稻生长季节气温较高,秸秆还田后,较高的温度导致

秸秆分解和有机碳输入相对较快,有机质等胶结物质含量增加较多.同时,土壤中微生物种类和数量增加,分解活动加强,植物残茬大量输入土壤后,一方面养分输入增多,另一方面微生物分泌粘液将矿物质、微团聚体和 POM 胶结形成大团聚体.秸秆覆盖还田后,0~20 cm 土层有机碳、胶结物质和微生物等的数量及微生物的种类较 30~40 cm 土层多,因此,在晚稻生长期,秸秆还田后 0~20 cm 土层水稳性大团聚体含量增多,微团聚体减少的现象要比 30~40 cm 土层显著.

### 4.3　秸秆还田对稻田土壤水稳性团聚体稳定性的影响

平均质量直径 MWD 和平均几何直径 GMD 可以反映土壤团聚体的大小分布状况(邱莉萍等,2006),大团聚体的百分含量越高,MWD 值越大,说明团聚体的平均粒径团聚程度越高(张保华等,2006);团聚体越稳定,GMD 值越大(赵红等,2011).分形维数 $D$ 能较好地描述土壤团聚体数量组成和土壤水分分配(高飞等,2010),$D$ 值越小说明土壤结构稳定性越好.本研究表明,MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 之间均显著相关($p<0.01$),并且三者均与分形维数 $D$ 显著负相关($p<0.01$),表明 MWD、GMD、$R_{0.25}$ 和分形维数 $D$ 均可以用来表征土壤团聚体稳定性,且其在表征团聚体稳定性的过程中具有一致性.此外,本研究中,秸秆还田后,早稻土壤在 0~40 cm 土层水稳性团聚体 GMD、MWD、分形维数 $D$ 均变化不大,这与本研究中秸秆还田对早稻田土壤水稳性大团聚体含量变化的影响不显著密切相关(图 1、表 1、表 2).因为秸秆进入土壤后,其分解过程对水稳性大团聚体形成所需的胶结物质、微生物的数量及多价金属阳离子含量均有影响,早稻生长期间,降水比较频繁,长期淹水,秸秆还田对这三者综合影响的促进与抑制的平衡导致早稻土壤水稳性大团聚体含量变化不显著,因而早稻土壤水稳性团聚体 GMD、MWD、分形维数 $D$ 均无显著变化.

晚稻实验组(WJ)土壤 0~40 cm 土层水稳性团聚体 MWD 和 GMD 总体显著增大,分形维数显著减小,说明秸秆还田使晚稻土壤水稳性团聚体稳定性提高,这主要是因为秸秆还田使晚稻田水稳性大团聚体含量增多(图 2、表 1、表 2)的缘故,由于土壤水稳性团聚体稳定性与大团聚体含量显著正相关,与分形维数显著负相关,土壤中较大粒级团聚体越多,团聚体的 MWD 和 GMD 值越大,分形维数值越小(张保华等,2006),这一研究结论在杨茹萍等(2010)、张保华等(2006)、高飞等(2010)的研究中也得到了证实.在本研究中,水稳性大团聚体含量主要是通过以下几个原因得到提高,进而增强土壤团聚体的稳定性.第一,主要通过人工灌溉,存在干湿交替现象,有利于团聚体形成;第二,秸秆分解快,提供丰富的活性碳源并促进微生物、菌根的生长,加快大团聚体形成;第三,施入土壤中的秸秆可促进团聚体中颗粒 POM 形成,在微生物的作用下,最终促使水稳性新团聚体核心的形成.

## 5　结论(Conclusions)

1)福州平原稻田对照与秸秆还田处理中,0~40 cm 早稻和晚稻土壤水稳性团聚体均以微团聚体为主,团聚体粒级越大含量越少.

2)秸秆还田对 0~40 cm 早稻田土壤水稳性大团聚体和水稳性微团聚体含量的影响均不显著,但秸秆还田显著增加了晚稻田土壤水稳性大团聚体含量,并减少了水稳性微团聚体含量.

3)秸秆还田对 0~40 cm 早稻田土壤水稳性团聚体 MWD、GMD 和 $D$ 值影响不显著,但显著增加了晚稻田土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值,且显著降低了土壤水稳性团聚体 $D$ 值.

4)秸秆还田对早稻田土壤水稳性团聚体稳定性影响不显著,但显著增加了晚稻田土壤水稳性团聚体稳定性.

**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林贤彪、欧阳林梅、朱秋丽和刘小慧同学的帮助,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,在此一并表示深深的感谢.

**责任作者简介**:王维奇(1982—),男,助理研究员,长期从事湿地生态环境研究,在国内外核心学术刊物上发表论文 50 余篇.

**参考文献(References)**:

陈建国,田大伦,闫文德,等.2011.土壤团聚体固碳研究进展[J].中南林业科技大学学报,31(5):74-80

陈金海,李艳丽,王磊,等.2011.两种基于芦苇秸秆还田的改良措施对崇明东滩围垦土壤理化性质和微生物呼吸的影响[J].农业环境科学学报,30(2):307-315

陈世亮.2009.福州南台岛地热前景浅析[J].福建地质,28(4):310-314

程丽娟,来航线,李素俭,等.1994.微生物对土壤团聚体形成的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),22(4):93-97

高飞,贾志宽,韩清芳,等.2010.有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J].干旱地区农业研究,28(3):100-106

韩新忠,朱利群,杨敏芳,等.2012 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,31(11):2192-2199

郝翔翔,杨春葆,苑亚茹,等.2013.连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J].中国农学通报,29(35):263-269

Jastrow J D.1996.Soil aggregate formation and the actual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry,28:665-676

Kemper W D, Rosenau R C. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution//Klute A.Methods of Soil Analysis Part1.Physical and Mineralogical Methods(2nd ed)[M].Madison,WI: ASA and SSSA.425-442

李自刚,李兴道,蒋媛媛,等.2008.水稻秸秆还田对河南沿黄稻区土壤细菌群落分子多态性影响[J].河南农业大学学报,42(1):90-94

刘骅,林英华,王西和,等.2007.长期配施秸秆对灰漠土质量的影响[J].生态环境,16(5):1492-1497

刘文利,吴景贵,傅民杰,等.2014.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持学报,28(1):129-135

马永跃,仝川,王维奇,等.2012.浮萍对福州平原稻田 CH4 与 N2O 排放的影响分析[J].中国生态农业学报,20(6):723-727

马宗国,卢绪奎,万丽,等.2003.小麦秸秆还田对水稻生长及土壤肥力的影响[J].作物杂志,(5):37-38

慕平,张恩和,王汉宁,等.2012.不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J].中国生态农业学报,20(3):291-296

邱莉萍,张兴昌,张晋爱.2006.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,26(2):364-372

Rattan L.2000.Physical management of soil of the tropics: Priorities for the 21century[J].Soil Science,165:91-207

Six J, Elliott E T, Paustian K, *et al*. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grass land soil[J].Soil Science Society of America Journal,62:1367-1377

Tisdall J M, Oades J M. 1982. Orgnic matter and water-aggregate [J]. Journal of Soil Science,33:141-163

王海霞,孙红霞,韩清芳,等.2012.免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J].应用生态学报,23(4):1025-1030

王丽,李军,李娟,等.2014.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,25(3):759-768

王振忠,董百舒,吴敬民.2002.太湖稻麦地区秸秆还田增产及培肥效果[J].安徽农业科学,30(2):269-271,274

武均,蔡立群,齐鹏,等.2015.不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J].中国生态农业学报,23(3):276-284

邢玮,赵慧敏,徐钰,等.2014.短期氮添加对杨树人工林土壤表层水稳态团聚体的影响[J].贵州农业科学,42(12):129-133

徐爽,王益权,2014.不同类型土壤团聚体化学稳定性分析[J].农业机械学报,45(4;):173-178

杨培岭,罗远培,石元春.1993.用粒级的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,38(20):1896-1899

杨如萍,郭贤仕,吕军峰,等.2010.不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持学报,24(1):252-256

叶文培,谢小立,王凯荣,等.2008.不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J].中国水稻科学,22(1):65-70

詹其厚,袁朝良,张效朴.2003.有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制[J].土壤学报,40(3):420-425

张保华,刘子亭,何毓蓉,等.2006.应用分形维数研究土壤团聚体与低吸力段持水性的关系[J].土壤通报,37(5):857-860

张鹏,贾志宽,王维,等.2012.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,45(8):1513-1520

张晓文,赵改宾,杨仁全,等.2006.农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J].农业工程学报,22(Z1):107-109

赵凡,何秀云,沈玉梅,等.2011.玉米秸秆还田保护性耕作对产量及土壤理化性状影响的灰色关联分析[J].干旱地区农业研究,29(4):208-213,218

赵红,袁培民,吕贻忠,等.2011.施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤,43(2):306-311

中国科学院南京土壤研究所.1978.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社

周虎,吕贻忠,杨志臣,等.2007.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,40(9):1973-1979