

# 长期施肥条件下不同粒径土壤团聚体中 Bradford 反应土壤蛋白质含量的差异\*

聂 军<sup>1,2,3,4</sup> 周健民<sup>1†</sup> 王火焰<sup>1</sup> 陈小琴<sup>1</sup> 杜昌文<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(4 农业部望城红壤水稻土生态环境重点野外科学观测试验站, 长沙 410125)

**摘 要** 主要研究了稻—稻连作方式下长期不同施肥对不同粒径土壤团聚体中 Bradford 反应土壤蛋白质 (BRSP) 含量的影响及 BRSP 与土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 之间的关系, 同时为简化 BRSP 测定过程, 探讨了用过 1 mm 筛土壤代替 1~2 mm 土壤团聚体研究 BRSP 含量的可行性。研究结果表明, 长期不同施肥显著影响土壤 1~2 mm 团聚体中总 BRSP (T-BRSP) 和易浸提 BRSP (EE-BRSP) 含量。有机无机肥料配合施用能显著提高土壤中 BRSP 含量, 以 NPK+稻草还田提高 BRSP 含量的效果最佳。经 25 a 施用不同肥料后, 1~2 mm 土壤团聚体中 2 种形态 BRSP 含量与土壤 SOC 和 TN 含量呈显著正相关。试验发现, <1 mm 土壤团聚体中同样有 BRSP, 且处理间的变化趋势与 1~2 mm 团聚体间的变化趋势相似。试验结果显示, 过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量与 1~2 mm 团聚体中含量的相关性均达到极显著水平, 且土壤 SOC 和 TN 含量的相关性也均达到极显著水平。

**关键词** 长期施肥; 不同粒径团聚体; Bradford 反应土壤蛋白质; 土壤  
**中图分类号** S157.4 **文献标识码** A

最近, 美国学者 Wright 等<sup>[1-4]</sup>发现在 121 高温下, 用中性至碱性的柠檬酸钠可以从 1~2 mm 土壤团聚体中提取出一种难以分解、且含量丰富的 Bradford 反应蛋白质物质, 并将其命名为球囊霉素 (Glomalin)。Wright 当时认为在条件如此苛刻的浸提过程中, 除了球囊霉素外, 其他大多数蛋白质均已被破坏。后来, Rosier 等<sup>[5]</sup>在土壤中加入牛血清蛋白, 在 121 高温下, 用中性至碱性的柠檬酸钠浸提, 用 Bradford 法测定时, 依然有部分牛血清蛋白可以检测出来, 同时发现落叶和土壤混合后立即浸提, 用 Bradford 法测定时, 发现落叶与土壤混合后土壤中的 Bradford 反应蛋白质含量显著增加。这一结果说明在这种浸提条件下浸提出来的物质并非单一球囊霉素, 而是含金属离子蛋白质混合物。因此, Rosier 等建议将这种物质命名为 Bradford 反应土壤蛋白质 (Bradford reactive soil protein, BRSP)。尽管 BRSP 的成分和来源尚未完全探明, 但是其在土壤中

具有非常重要的作用。已有研究表明, BRSP 在改善土壤结构、促进土壤物质循环和螯合土壤潜在毒性元素等方面发挥着重要作用<sup>[2,3,6-8]</sup>。有研究认为 BRSP 相当于一种“超级黏结剂”, 其对土壤团聚体的形成起着重要作用<sup>[2]</sup>, 其黏附土壤颗粒的能力较其他用热水提取的土壤碳水化合物强 3 倍~10 倍<sup>[3]</sup>。在土壤团聚体形成过程中, BRSP 以其强大的黏结能力将小的土壤颗粒黏成直径 <0.25 mm 的微聚合体, 然后形成大聚合体, 进而形成一个较小的土壤单位<sup>[2,3,8]</sup>。BRSP 是一种与氮相连的低聚糖, 是土壤有机质的主要组成部分<sup>[9]</sup>, 由于其在土壤中的含量丰富且稳定, 对土壤碳氮循环也有着十分重要的作用。此外, BRSP 还具有吸附金属阳离子的能力<sup>[3]</sup>, 能有效地螯合不同的重金属离子, 特别是污染土壤中 Cu、Pb、Cd 等离子<sup>[10]</sup>, 这可能为重金属污染土壤修复提供了一条新的途径。

最初对 BRSP 的研究主要集中在自然森林土壤

\* 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB410810) 资助  
† 通讯作者

作者简介: 聂 军 (1972~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事新型肥料研究与开发  
收稿日期: 2007-01-21; 收到修改稿日期: 2007-04-05

1~2 mm团聚体中<sup>[11]</sup>,后来发现人工林和农业土壤中1~2 mm团聚体中也存在BRSP,但其含量的高低顺序是自然森林土壤>人工林>农业土壤<sup>[12]</sup>。进一步研究发现,尽管BRSP是一种非常稳定的糖蛋白,在自然条件下其降解周期较长,但是许多农艺管理措施均影响其含量,如不同作物种类<sup>[8]</sup>、土地利用方式<sup>[12-14]</sup>、耕作制度<sup>[15,16]</sup>和作物轮作方式<sup>[17]</sup>等。施肥是影响土壤物理、化学、生物和生物化学特性最主要的农业措施之一,然而有关施肥对土壤BRSP含量的影响未见报道。本研究的目的是:1)利用长期定位施肥试验,研究长期不同施肥处理对稻田土壤1~2 mm团聚体中BRSP含量的影响;2)探讨<1 mm土壤团聚体中是否含有BRSP,并探讨长期不同施肥对<1 mm土壤团聚体中的BRSP含量的影响;3)研究用过1 mm筛的土壤代替1~2 mm土壤团聚体来改进土壤BRSP测定方法的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

长期定位施肥试验点位于湖南省望城县黄金乡(北纬112°30′,东经28°37′,海拔高度为100 m)。该试验点于1981年开始,年平均降雨量1370 mm,年均气温17℃,无霜期约为300 d。供试土壤为第四纪红土发育的红黄泥(铁聚水耕人为土)。试验土壤起始pH为6.9,土壤有机质为35.5 g kg<sup>-1</sup>,全氮为2.05 g kg<sup>-1</sup>,碱解氮为151.0 mg kg<sup>-1</sup>,有效磷为10.2 mg kg<sup>-1</sup>,交换性钾为62.3 mg kg<sup>-1</sup>(1 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAc浸提)。

试验共设9个处理:1)不施肥(CK);2)施氮磷肥(NP);3)施氮钾肥(NK);4)施磷钾肥(PK);5)施氮磷钾肥(NPK);6)施氮磷肥+稻草还田(NPS);7)施氮钾肥+猪粪(NKM);8)施氮磷钾肥+稻草还田(NPKS);9)施氮磷钾+石灰(NPKCa)。重复3次。每个小区之间用30 cm宽水泥埂隔开,重复之间排水沟宽度为50 cm,2个区组之间用水泥埂隔开。N、P和K化肥品种分别是尿素、过磷酸钙和氯化钾。每年分析猪粪和稻草的养分含量。猪粪的有机质含量平均为29.1 g kg<sup>-1</sup>,全氮8.0 g kg<sup>-1</sup>,全磷11.35 g kg<sup>-1</sup>,全钾4.98 g kg<sup>-1</sup>;稻草含全氮8.6 g kg<sup>-1</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 3.0 g kg<sup>-1</sup>,K<sub>2</sub>O 25.0 g kg<sup>-1</sup>。在1981~2005年期间,氮肥按早稻N 150 kg hm<sup>-2</sup>和晚稻N 180 kg hm<sup>-2</sup>施入,其中50%的N作基肥在移栽前一天施入,50%在分蘖期做追肥施入;

磷肥按早晚稻每季P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg hm<sup>-2</sup>施入;钾肥按早晚稻每季K<sub>2</sub>O 120 kg hm<sup>-2</sup>施入;猪粪按早晚稻每季15 t hm<sup>-2</sup>施入。猪粪、磷肥和钾肥均在移栽前作基肥施入。稻草还田量按早晚稻每季2.62 t hm<sup>-2</sup>施入,稻草切割成10~20 cm左右长度,在犁田前还田。石灰按早晚稻每季CaO 975 kg hm<sup>-2</sup>施入。

长期肥料田间试验早晚稻品种分别为早熟常规稻和晚熟杂交稻。早熟常规稻在每年的4月28~30日移栽,晚熟杂交稻在每年的7月15~20日移栽。长期肥料田间试验在整个水稻生育期间的田间管理与当地农民的大田管理一致。

### 1.2 样品采集

土壤样品于2005年3月在犁田前采集,采样深度为0~15 cm的耕层土壤。风干,进行土壤团聚体、全氮、有机碳和土壤BRSP含量分析。

### 1.3 样品分析方法

**1.3.1 土壤团聚体分离方法** 土壤团聚体分离方法是依据Mendes<sup>[18]</sup>、Sainju<sup>[19]</sup>、彭新华<sup>[20]</sup>和李辉信<sup>[21]</sup>的方法,并略做修改:田间采集的原状土样用硬质铝盒装好,并保证土壤不受到挤压,在室温下风干,当土壤含水量达到土壤塑性(含水量约25%左右)时,用手轻轻地将大土块沿着自然脆弱带掰成不同大小的土壤团聚体,然后在室温条件下继续风干,直至土块在1 mm左右。将风干的土壤样品进行干筛,分离出>5 mm、3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm和<0.5 mm的土壤团聚体,上述土壤团聚体按照其所占比例称取一定量的样品,进行湿筛,分离出1~2 mm、0.5~1 mm和<0.5 mm的土壤团聚体,备用。

**1.3.2 土壤中BRSP的提取与测定** 土壤中BRSP的提取按照Wright和Upadhyaya的方法。具体步骤:称取湿筛的1~2 mm、0.5~1 mm和<0.5 mm的土壤团聚体和过1 mm筛的土壤1 g,加入8 ml浸提液。土壤中总Bradford反应蛋白质(T-BRSP)的浸提液是50 mmol L<sup>-1</sup>、pH 8.0的柠檬酸钠溶液,易浸提Bradford反应蛋白质(EE-BRSP)的浸提液是20 mmol L<sup>-1</sup>、pH 7.0的柠檬酸钠溶液。EE-BRSP是在121℃下浸提30 min,立即将浸提液用高速冷冻离心机在10 000 r min<sup>-1</sup>下离心5 min,悬浮液贮存以备测定用。BRSP是在121℃下浸提60 min,立即将浸提液用高速冷冻离心机在10 000 r min<sup>-1</sup>下离心5 min,然后补充浸提液,连续浸提,直至浸提液无棕红色存在。2种形态土壤BRSP均采用考马斯亮兰法测定。

土壤全氮 (TN) 和有机碳 (SOC) 是过 100 目筛的土壤用 C/N/S 分析仪 (Vario MAX) 测定。

#### 1.4 统计分析

所有测定指标均是重复 3 次, 结果取其平均值, 采用 SPSS11.5 软件进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 长期施肥对不同粒径团聚体中 BRSP 含量的影响

**2.1.1 1~2 mm 团聚体中 BRSP 含量** 长期施肥对稻田土壤 1~2 mm 团聚体中 BRSP 含量的影响如图 1 所示。从图 1 可以看出, 长期施用不同的肥料对土壤 1~2 mm 团聚体中 T-BRSP 含量有极显著的影响 ( $F = 19.591, p < 0.001$ )。N、P、K 肥配合稻草还田极显著提高了土壤 1~2 mm 团聚体中 T-BRSP 含量, 而单施化肥降低了 T-BRSP 含量, 尤其缺素施肥处理降低 T-BRSP 含量的作用更为显著。在试验所设施肥处理中, NPKS 处理中土壤 1~2 mm 团聚体中 T-BRSP 含量最高, 为  $5.49 \text{ mg g}^{-1}$ , 其次是 NPS 处理, 为  $5.22 \text{ mg g}^{-1}$ ; NP 处理中土壤 T-BRSP 含量最低, 为  $4.27 \text{ mg g}^{-1}$ , 其次是 PK 和 NK 处理, 分别为  $4.31$  和  $4.66 \text{ mg g}^{-1}$ 。长期不同施肥对土壤 1~2 mm 团聚体中 EE-BRSP 含量的影响与其对 T-BRSP 含量的影响相似, 长期施用不同肥料极显著地影响土壤 EE-BRSP 含量 ( $F = 62.479, p < 0.001$ )。NPKS 处理中 EE-BRSP 含量最高, 为  $2.61 \text{ mg g}^{-1}$ , PK 处理中的最低,  $2.01 \text{ mg g}^{-1}$ 。从图 1 还可以看出, 不施肥处理的土壤 T-BRSP 较

单施化肥处理高。

过去对土壤中 BRSP 的研究主要集中在不同植物种类<sup>[8]</sup>、土地利用方式<sup>[12~14]</sup>、耕作制度<sup>[15,16]</sup>和作物轮作制度<sup>[17]</sup>对 1~2 mm 团聚体中 BRSP 含量的影响, 关于长期不同施肥对土壤中 BRSP 含量的影响未见报道。因此, 探讨不同施肥措施对 1~2 mm 团聚体中 BRSP 含量的影响十分重要。本试验结果表明, 与其他农业措施显著影响土壤 BRSP 含量一样, 长期不同肥料施用显著影响土壤中 BRSP 含量。在同一田块, 同一种植制度 (稻-稻-冬闲) 和相同的耕作方式 (牛耕) 下, 进行了连续 25 a 不同肥料施用试验, 各长期施肥处理对土壤的物理破坏一致。然而, 不同长期施肥处理间 1~2 mm 土壤团聚体中的 BRSP 存在显著差异。这一结果说明施肥也是影响土壤中 BRSP 含量的农业措施之一。长期 N、P、K 肥配合稻草还田或 N、P 肥配合稻草还田均能显著提高 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量, 这可能是由于长期稻草还田后改变了土壤理化特性和微生物特性<sup>[22,23]</sup>, 从而增加 BRSP 的产生。同时, N、P、K 肥配合稻草还田能明显提高水稻产量<sup>[24,25]</sup>, 增加水稻根系的数量<sup>[24]</sup>。长期大量的还田稻草和留田根系可能带入了一定量的 BRSP。同时, 本试验结果表明, 长期单施化肥处理 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量较不施肥处理中的低。这可能是由于长期施用化肥后, 不仅影响土壤微生物多样性和活性, 且导致土壤酸化和板结, 不利于土壤中 BRSP 的产生。因此, 合理和优化利用稻草资源在维持农业和土壤的可持续发展中具有十分重要的意义。

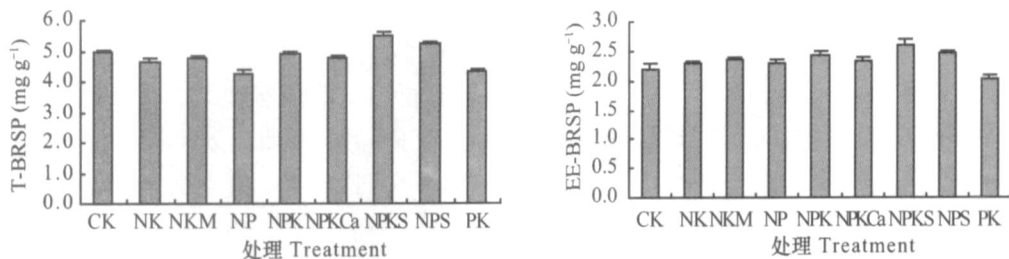


图 1 长期施肥对 1~2 mm 团聚体中 BRSP 含量的影响

Fig. 1 Effect of long-term fertilization on BRSP content in 1~2 mm aggregates

**2.1.2 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 与 SOC 含量的相关性** 土壤有机质是土壤碳的储藏形式, 是土壤肥力的重要物质基础, 也是评价土壤质量的重要指标之一<sup>[26]</sup>, 在调节土壤理化性质、提供作物养分、改善土壤结构及减少环境负面影响等方面具有

重要作用, 直接影响作物产量和土壤肥力的高低<sup>[27,28]</sup>。BRSP 是一种糖蛋白, 是土壤有机质的主要组成部分, 是土壤有机碳的一个重要来源<sup>[8]</sup>。已有研究表明, 不同土地利用方式、耕作制度和作物轮作方式下, 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 与

SOC含量具有显著的正相关性<sup>[8,12~17]</sup>。本文研究了长期不同施肥条件下,各处理土壤中 BRSP与有机碳的关系。试验结果(图 2)表明,经 25 a不同肥料施用后,不同施肥处理土壤中 2种形态 BRSP(T-BRSP和 EE-BRSP)含量与土壤 SOC均呈现显著或极显著的线性正相关( $r_{T-BRSP} = 0.8454^{**}$ ,  $r_{EE-BRSP} = 0.6835^*$ )。

长期不同肥料施用条件下,各处理土壤中输入的碳素数量不同,同时由于不同处理的留田根系产量也不相同,从而引起了土壤 SOC含量的差异。土壤中

SOC含量的差异会引起一系列土壤特性的差异,如土壤物理、化学和微生物以及作物生长等方面。这些差异可能对土壤中 BRSP的产生形成较大的影响。前人的试验结果表明,不同的农业措施对土壤中 SOC和 BRSP的影响一致。这种一致表现为不同农业措施土壤中的 SOC与 BRSP含量间呈显著线性相关。在本试验中,长期不同施肥各处理间 SOC含量与其 BRSP(T-BRSP和 EE-BRSP)含量间同样呈现高度线性正相关关系。这从另一个角度说明施肥是影响土壤中 BRSP含量的农业措施之一。

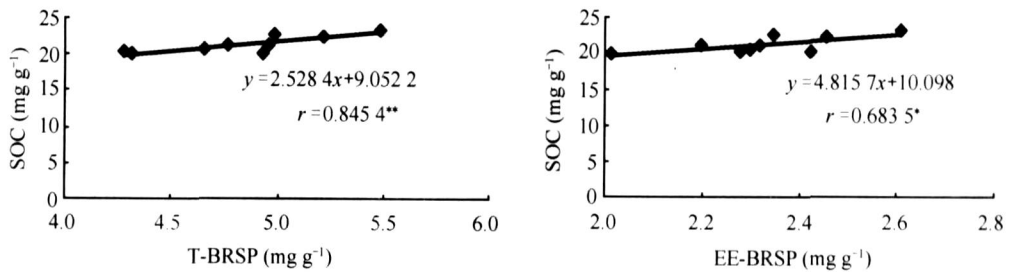


图 2 1~2 mm 土壤团聚体中 T-BRSP和 EE-BRSP与 SOC含量的相关性

Fig. 2 Correlation of T-BRSP and EE-BRSP in 1~2 mm aggregates with SOC

2.1.3 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP与土壤 TN 含量的相关性 土壤氮素在农业生态系统中占有极其重要的地位,是大多数农业和自然陆地生态系统植物光合作用和初级生产过程中最受限制的营养元素之一。施肥是影响土壤氮素含量最主要的农业措施之一,大量研究表明不同施肥措施显著影响土壤全氮含量<sup>[29,30]</sup>。BRSP是一种含氮土壤有机物,已有研究表明 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP含量与土壤 TN 含量呈显著正相关。本试验结果(图 3)显示,在同一田块经 25 a施用不同肥料后,不同施肥处理间土壤 TN 含量存在显著差异,而 1~2 mm 团聚体中 2种形态 BRSP含量与土壤 TN 含量均达到 1%的极显著水平线性正相关( $r_{T-BRSP-TN} = 0.8387^{**}$ ;  $r_{EE-BRSP-TN} = 0.7464^{**}$ )。

与长期不同施肥引起土壤中 SOC含量的差异相似,长期不同施肥处理土壤中的 TN 含量也存在较大的差异,这与前人的研究结果相似<sup>[31]</sup>。BRSP是一种含氮化合物,土壤 TN 含量的差异必然会引起土壤 BRSP含量的差异。已有研究表明,在不同植物种类<sup>[8]</sup>,土地利用方式<sup>[12~14]</sup>、耕作制度<sup>[15,16]</sup>和作物轮作制度<sup>[17]</sup>的影响下,土壤 TN 和 BRSP呈现相同的变化趋势,即土壤 TN 和 BRSP存在显著线性正相关关系。稻草含有 0.6%~0.8%左右的氮素,稻草还田有利于提高土壤中的氮素<sup>[32]</sup>。在本试验中,因长期不同施肥引起的土壤中 TN 和 BRSP的变化也呈现相同的趋势。经连续 25 a施用不同肥料后,土壤 TN 含量与 1~2 mm 团聚体中 2种形态 BRSP含量均呈现极显著正相关。

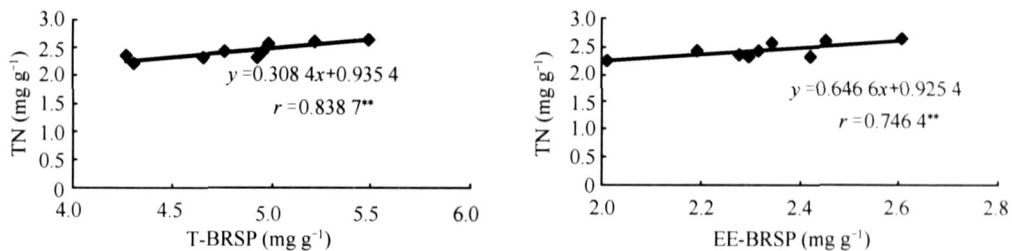


图 3 1~2 mm 土壤团聚体中 T-BRSP和 EE-BRSP与 TN 含量的相关性

Fig. 3 Correlation of T-BRSP and EE-BRSP in 1~2 mm aggregates with soil TN

## 2.2 0.5~1 mm和<0.5 mm团聚体中 BRSP含量

国外学者主要研究了 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量,关于 <1 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量状况报道较少。本试验结果(图 4 和图 5)表明,0.5~1 mm 和 <0.5 mm 土壤团聚体中均含有 BRSP,且长期不同施肥对 0.5~1 mm 和 <0.5 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量具有极显著的影响。方差分析结果显示,各施肥处理间 0.5~1 mm 团聚体中的  $F_{T-BRSP} = 10.573$ ,  $p < 0.001$ ,  $F_{EE-BRSP} = 7.729$ ,  $p < 0.001$ ; <0.5 mm 团聚体中  $F_{T-BRSP} = 3.975$ ,  $p = 0.007$ ,  $F_{EE-BRSP} = 17.463$ ,  $p < 0.001$ 。长期施肥对 0.5~1 mm 和 <0.5 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量影响的趋势基本与对 1~2 mm 团聚体中的趋势

相似,平衡施肥(NPK处理)或有机无机肥料配合施用(NPKS、NPS和NKM处理)可提高0.5~1 mm和<0.5 mm土壤团聚体中的BRSP含量,但各施肥处理0.5~1 mm和<0.5 mm土壤团聚体中BRSP间的含量差异要小于1~2 mm团聚体之间的差异。

<1 mm 土壤团聚体中的 BRSP 含量暗示着 BRSP 并不只是存在于 1~2 mm 土壤团聚体中,而是在不同粒径的团聚体中均有存在,这就说明存在对现有测定 1~2 mm 团聚体中 BRSP 的方法进行改进的可能,用过 1 mm 筛的土壤代替 1~2 mm 团聚体来研究土壤中 BRSP,以省去分离出 1~2 mm 团聚体繁琐、复杂的过程。

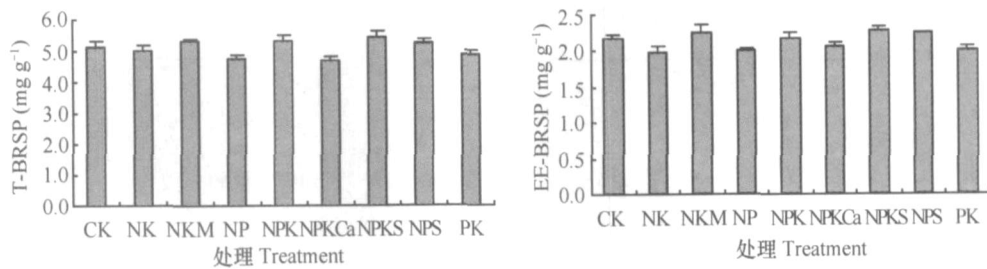


图 4 长期施肥对 0.5~1 mm 团聚体中 BRSP 含量的影响

Fig. 4 Effect of long-term fertilization on BRSP content in 0.5~1 mm aggregates

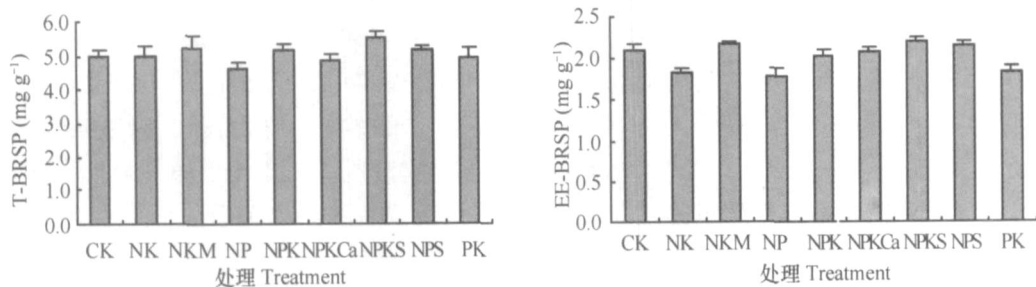


图 5 长期施肥对 <0.5 mm 团聚体中 BRSP 含量的影响

Fig. 5 Effect of long-term fertilization on BRSP content in <0.5 mm aggregates

## 2.3 土壤 BRSP 测定方法的改进

**2.3.1 过 1 mm 筛土壤中 BRSP 含量** 国外学者对 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量进行了大量的研究,而分离出 1~2 mm 团聚体的过程是比较繁琐、复杂的。本研究试图探讨改进土壤 BRSP 的测定方法,用过 1 mm 筛土壤代替 1~2 mm 团聚体来测定土壤中 BRSP。试验结果(图 6)表明,不同施肥处理过 1 mm 筛土壤中 BRSP 含量变化趋势与 1~2 mm 团聚体中 BRSP 含量变化趋势相似。各施肥处理间 BRSP 含量的差异呈现极显著差异 ( $F_{T-BRSP} =$

27.588,  $p < 0.001$ ;  $F_{EE-BRSP} = 7.909$ ,  $p < 0.001$ )。有机无机肥料配合施用处理过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量较高,尤其是 N、P、K 肥配合稻草还田提高土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量的作用更为显著。

**2.3.2 过 1 mm 筛土壤中 BRSP 含量与 1~2 mm 团聚体中 BRSP 的相关性** 分析过 1 mm 筛土壤中 BRSP 含量与 1~2 mm 团聚体中的相关性发现(图 7),过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 分别与 1~2 mm 团聚体中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量的相关

性均达到 1% 的极显著水平, 相关系数分别为 0.816 和 0.789 4。这一结果说明用过 1 mm 筛土

壤代替 1~2 mm 土壤团聚体来测定土壤中 BRSP 含量的可能性。

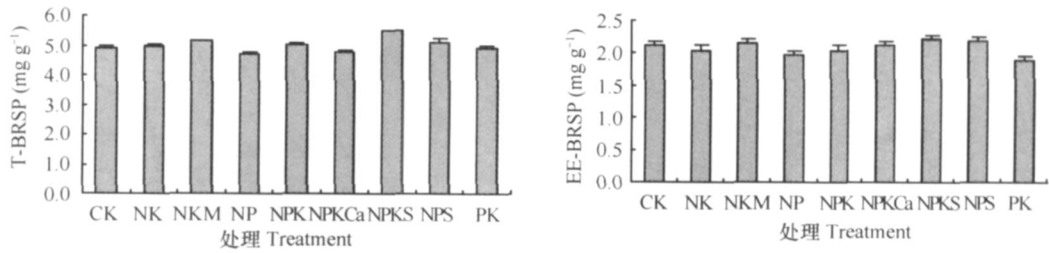


图 6 长期施肥对过 1 mm 筛土壤中 BRSP 含量的影响  
Fig. 6 Effect of long-term fertilization on BRSP content in the whole soil

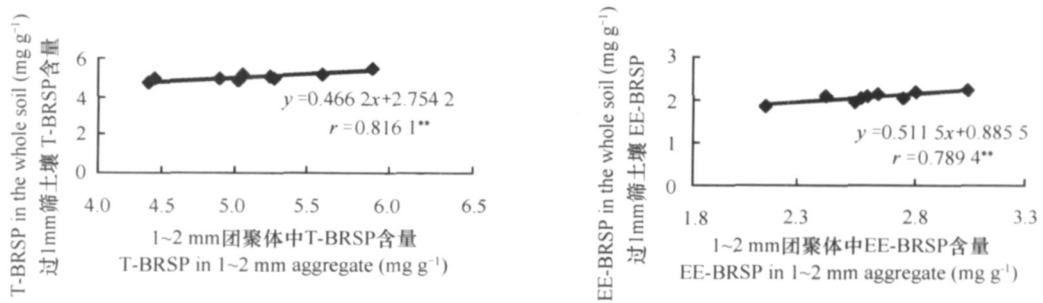


图 7 过 1 mm 筛土壤中 BRSP 含量与 1~2 mm 团聚体中 BRSP 含量的相关性  
Fig. 7 Correlation of BRSP in 1~2 mm aggregates with BRSP in the whole soil

2.3.3 过 1 mm 筛土壤中 BRSP 与土壤 SOC 和 TN 的相关性 前人及本试验结果均已证实了 1~2 mm 土壤团聚体中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量与土壤 SOC 和 TN 呈显著或极显著正相关。过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量与土壤 SOC 含量的

相关性如图 8 所示。从图 8 可以看出, 过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 与土壤 SOC 的相关系数分别为 0.790 7 和 0.909 9, 均达到 1% 的极显著水平。这一结果说明, 过 1 mm 筛土壤中 BRSP 含量可以作为土壤有机碳含量的一个指标。

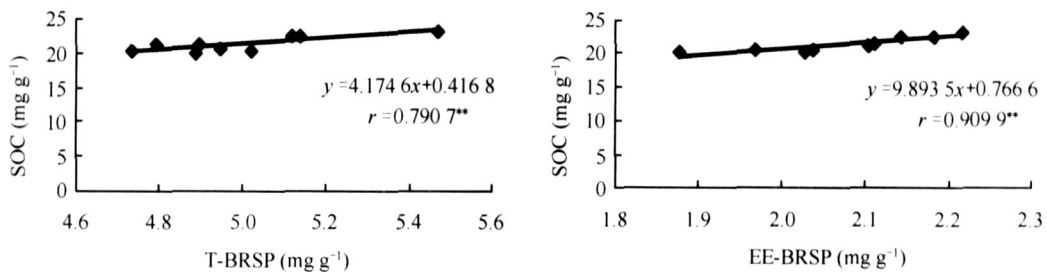


图 8 过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 与 TN 含量的相关性  
Fig. 8 Correlation of T-BRSP and EE-BRSP in the whole soil with soil TN

与过 1 mm 筛土壤中的 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量与土壤 SOC 相关性相似, 过 1 mm 筛土壤中的 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量与土壤 TN 含量的相关性同样均达到 1% 的极显著水平, 相关系数分别为 0.732 6 和 0.934 9。

用过 1 mm 筛土壤代替 1~2 mm 团聚体改进土壤 BRSP 测定的结果说明, 长期不同施肥处理对过 1 mm 筛土壤中的 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量的影响与其对 1~2 mm 团聚体中的 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量的影响趋势相似, 且过 1 mm 筛土壤中的 2 种

形态的 BRSP 与 1~2 mm 团聚体中的含量具有极显著的相关性,说明过 1 mm 筛土壤中的 BRSP 含量可以表征 1~2 mm 团聚体中的 BRSP 含量。同时,过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量与土壤

SOC 和 TN 均呈极显著相关关系。所以,本试验结果说明可以对现有测定土壤中进行改进,用过 1 mm 筛土壤代替 1~2 mm 团聚体来进行测定。

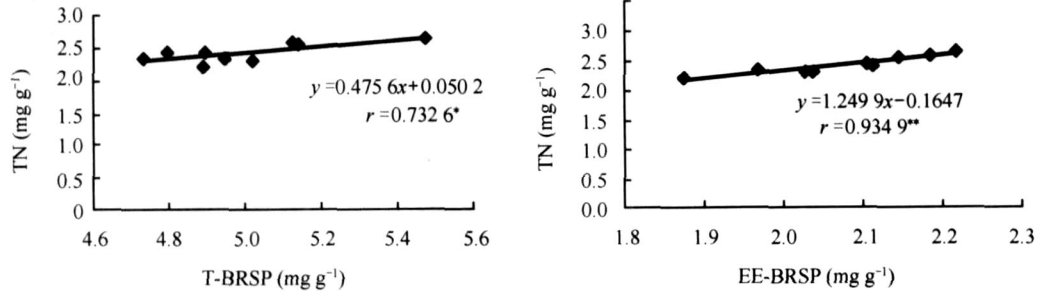


图 9 过 1 mm 目筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 与 TN 含量的相关性

Fig. 9 Correlation of T-BRSP and EE-BRSP in the whole soil with soil TN

### 3 结 论

BRSP 在土壤团聚体形成过程中发挥着重要作用,是土壤 C、N 库的一个重要组成部分。本试验结果表明,长期不同施肥能显著影响 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量,有机无机肥料配合施用能显著提高 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量,尤其氮磷钾肥配合稻草还田。在同一田块经长达 25 a 施用不同肥料后,土壤 1~2 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量与土壤 SOC 和 TN 含量呈显著正相关。

试验发现 < 1 mm 土壤团聚体中同样含有 BRSP。长期不同施肥对 < 1 mm 土壤团聚体中 BRSP 含量影响的趋势与对 1~2 mm 团聚体中的影响相似。有机无机肥料配合施用能提高 < 1 mm 团聚体中 BRSP 含量。

过 1 mm 筛土壤中的 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量分别 1~2 mm 团聚体中的 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量具有极显著的相关性。同时,过 1 mm 筛土壤中 T-BRSP 和 EE-BRSP 含量分别与土壤 SOC 和 TN 极显著相关。这一结果说明用过 1 mm 筛土壤代替 1~2 mm 团聚体来测定土壤 BRSP 是可行的。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci*, 1996, 161: 575 ~ 586
- [ 2 ] Wright S F, Upadhyaya A, Buyer J S. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis. *Soil Biol Biochem.*, 1998, 30:

- 1 853 ~ 1 857
- [ 3 ] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*, 1998, 198: 97 ~ 107
- [ 4 ] Wright S F, Jawson L. A pressure cooker method to extract glomalin from soils. *Soil Sci Soc Am J.*, 2001, 65: 1 734 ~ 1 735
- [ 5 ] Rosier C L, Hoye A T, Rillig M C. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools. *Soil Biol Biochem.*, 2006, 38: 2 205 ~ 2 211
- [ 6 ] Miller R M, Jastrow J D. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biol Biochem.*, 1990, 22: 579 ~ 584
- [ 7 ] Tisdall J M. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Aust J. Soil Res.*, 1991, 29: 729 ~ 743
- [ 8 ] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species. *Plant Soil*, 2002, 238: 325 ~ 333
- [ 9 ] Rillig M C, Allen M F. What is the role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant-to-ecosystem responses to Elevated CO<sub>2</sub>? *Mycorrhiza*, 1999, 9: 1 ~ 8
- [ 10 ] González-Chávez M C, Carrillo-González R, Wright S F, *et al*. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 2004, 130: 317 ~ 323
- [ 11 ] Wright S F, Franke-Snyder M, Morton J B, *et al*. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plants Soil*, 1996, 181: 193 ~ 203
- [ 12 ] Rillig M C, Ramsey P W, Morris S, *et al*. Glomalin, an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. *Plant Soil*, 2003, 253: 293 ~ 299
- [ 13 ] Bedini S, Avio L, Argese E, *et al*. Effects of long-term land use on arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 120: 463 ~ 466
- [ 14 ] Halvorson J J, Gonzalez J M. Bradford reactive soil protein in

- Appalachian soils: Distribution and response to incubation, extraction reagent and tannins *Plant Soil*, 2006, 286: 339 ~ 356
- [15] Wright S F, Starr J L, Paltineanu I C. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition *Soil Sci Soc Am. J.*, 1999, 63: 1 825 ~ 1 829
- [16] Borie F, Rubio R, Rouanet J L, *et al* Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol *Soil Till Res*, 2006, 88: 253 ~ 261
- [17] Wright S F, Anderson R L. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains *Biol Fertil Soils*, 2000, 31: 249 ~ 253
- [18] Mendes I C, Bandick A K, Dick R P, *et al* Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops *Soil Sci Soc Am. J.*, 1999, 63: 873 ~ 881
- [19] Sainju U M, Terrill T H, Gelaye S, *et al* Soil aggregation and carbon and nitrogen pools under rhizoma peanut and perennial weeds *Soil Sci Soc Am. J.*, 2003, 67: 146 ~ 155
- [20] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23 (10): 2 177 ~ 2 183. Peng X H, Zhang B, Zhao Q G Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (10): 2 177 ~ 2 183
- [21] 李辉恒, 袁颖红, 黄如如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43 (3): 422 ~ 429. Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, *et al* Effects of fertilization on organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (3): 422 ~ 429
- [22] 陈德章. 稻草还田对土壤理化性质及产量的影响. *土壤肥料*, 2000 (5): 24 ~ 27. Chen D Z Effect of rice straw returned into field on soil physical-chemical characteristic and yield (In Chinese). *Soils and Fertilizers*, 2000 (5): 24 ~ 27
- [23] 谭周进, 李倩, 李建国, 等. 稻草还田量对晚稻土微生物数量及活度的动态影响. *农业环境科学学报*, 2006, 25 (3): 670 ~ 673. Tan Z J, Li Q, Li J G, *et al* Effect of returning quantity of rice-straw to soil on quantities and activity of microbial in paddy soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (3): 670 ~ 673
- [24] 王玄德, 石孝均, 宋光煜. 长期稻草还田对紫色水稻土肥力和生产力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (3): 302 ~ 307. Wang X D, Shi X J, Song G Y. Effects of long-term rice straw returning on the fertility and productivity of purple paddy soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11 (3): 302 ~ 307
- [25] 唐茂艳, 何礼健, 秦华东, 等. 免耕和稻草还田对金优 253 立苗速度与根系生长及产量的影响. *中国农学通报*, 2005, 21 (9): 154 ~ 157. Tang M Y, He L J, Qin H D, *et al* Influence of no-tillage and straw incorporation on Jinyou 253 grain yield and root growth and seeding standing of cast transplanting rice during seedling standing period (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21 (9): 154 ~ 157
- [26] Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: A review. *Soil Till Res*, 2003, 70: 1 ~ 18
- [27] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响. *土壤学报*, 2005, 42 (5): 769 ~ 776. Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (5): 769 ~ 776
- [28] 蔡燕飞, 章家恩, 张杨珠, 等. 稻作制度对红壤性水稻土有机质特征的影响. *土壤*, 2006, 38 (4): 396 ~ 399. Cai Y F, Zhang J E, Zhang Y Z, *et al* Effect of rice-based cropping systems on organic matter properties in paddy soil derived from red earth (In Chinese). *Soils*, 2006, 38 (4): 396 ~ 399
- [29] 卢萍, 杨林章, 颜廷梅, 等. 稻麦轮作条件下化肥氮素对土壤氮的替换作用. *土壤学报*, 2006, 43 (6): 948 ~ 953. Lu P, Yang L Z, Yan T M, *et al* Replacement of soil nitrogen by fertilizer nitrogen under rice-wheat rotation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (6): 948 ~ 953
- [30] Dang T H, Cai G X, Guo S L, *et al* Effect of nitrogen management on yield and water use efficiency of rainfed wheat and maize in Northwest China. *Pedosphere*, 2006, 16 (4): 495 ~ 504
- [31] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. *土壤学报*, 2002, 39 (1): 89 ~ 96. Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (1): 89 ~ 96
- [32] 邱孝焯, 蔡元呈, 林勇, 等. 稻草还田对红壤性水稻土肥力的影响. *中国农学通报*, 2006, 22 (1): 188 ~ 190. Qiu X X, Cai Y C, Lin Y, *et al* Effect of returning field of straws on the red soil fertility of rice (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22 (1): 188 ~ 190



## BRADFORD REACTIVE SOIL PROTEIN CONCENTRATIONS IN AGGREGATES DIFFERENT IN PARTICLE SIZE UNDER LONG-TERM FERTILIZATION

Nie Jun<sup>1,2,3,4</sup> Zhou Jianmin<sup>1†</sup> Wang Huoyan<sup>1</sup> Chen Xiaoqin<sup>1</sup> Du Changwen<sup>1</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Soil and Fertilizer Institute of Hunan, Changsha 410125, China*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(4 *Key Field Monitoring Experimental Station for Reddish Paddy Soil Eco-environment in Wangcheng, Ministry of Agriculture of China, Changsha 410125, China*)

**Abstract** Studies were carried out on Bradford reactive soil protein (BRSP) concentrations in aggregates different in particle size and relations of BRSP with soil organic C and total N in fields of long-term fertilization experiment under a continuous rice-rice cropping system. At the same time, in order to simplify the process of the soil BRSP test, attempts were made to explore feasibility of determining soil BRSP concentration using whole soil passed through 1 mm sieve instead of 1 ~ 2 mm soil aggregates. Results show that long-term fertilization significantly affected concentrations of soil total BRSP (T-BRSP) and easily extractable BRSP (EE-BRSP) in 1 ~ 2 mm aggregate. Soil BRSP was increased sharply by application of inorganic fertilizer plus organic manure, especially in the treatment of N, P, K plus rice straw. After 25 years of continuous fertilization, regardless of treatments, both T-BRSP and EE-BRSP in 1 ~ 2 mm aggregates were highly correlated with SOC and TN. It was found in the experiment that BRSP existed in < 1 mm aggregates and showed a tendency similar to what the aggregates did in variation from treatment to treatment. It was also discovered that it is feasible to determine soil BRSP using the whole soil passed through 1 mm sieve, because both T-BRSP and EE-BRSP in the whole soil are highly correlated not only with those in 1 ~ 2 mm aggregates, but also with SOC and TN in the soil.

**Key words** Long-term fertilization; Aggregate particle size; BRSP; Soil