

黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布

邱莉萍^{1,2}, 张兴昌^{1,2*}, 张晋爱¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 土壤养分和生物酶是衡量土壤肥力的指标, 土壤团聚体性质则决定了土壤物理结构的好坏, 探讨不同培肥措施下土壤养分和生物酶在团聚体中的分布, 对合理培肥和改善土壤性状具有重要的实际意义。对连续 25a 的长期有机培肥定位试验地进行测定, 结果表明: 培肥增加了大级别土壤团聚体、特征微团聚体的数量, 显著地改善了土壤结构。培肥土壤团聚体平均重量直径、特征微团聚体 $C/F_{0.01}$ 较无肥对照土壤有显著增加。长期培肥增强了土壤化学、生物性质的“微域”变异性。相同培肥措施下土壤主要养分含量和酶活性均随土壤团聚体直径的增大而减小。除厩肥处理土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶外, 其它各培肥土壤的养分含量和酶活性均在 $< 0.01\text{mm}$ 级别特征微团聚体中含量高、活性大。相同级别团聚体和特征微团聚体中, 养分含量和酶活性在不同培肥土壤间基本表现出施厩肥处理 $>$ 施秸秆处理 $>$ 施化肥处理 $>$ 对照的规律性。将团聚体的含量和养分含量或酶活性在团聚体中的丰度结合考虑, 发现 $> 5\text{mm}$ 级别团聚体中养分含量或酶活性对土壤的贡献率最大。结果充分地显示着土壤性质在不同空间尺度下、不同管理措施下变异的复杂性和多样性。

关键词: 长期培肥; 土壤养分; 土壤酶; 团聚体; 特征微团聚体

文章编号: 1000-0933(2006)02-0364-09 中图分类号: Q143, S153.6, S154.2 文献标识码: A

Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization

QIU Li-Ping^{1,2}, ZHANG Xing-Chang^{1,2*}, ZHANG Jin-Ai¹ (1. College of Resource and Environment, Northwest Sci & Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 364 ~ 372.

Abstract: The plant nutrient and microbial enzyme concentrations in a soil, and the degree of soil aggregation reflect the quality of the soil's chemistry, biology, and physical structure respectively. Each of these three measures responds to a soil's long-term fertility management: long-term applications of either organic or mineral fertilizers will strongly influence both the levels of plant nutrients and microbial activity, and the soil physical structure. Insight into the soil quality may therefore also be gained from the relationship between these three measures. Our aim was investigating the influence of different fertilization regimes on nutrient and enzyme levels in soil aggregates, as well as the degree of aggregation itself.

We chose four treatments from the long-term fertilization experiment on the Loess Plateau at Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Shaanxi, China, which was established in 1977. Treatments varied the fertilizer material—maize straw, manure, chemical fertilizer, and control (no fertilizer)—with fertilizer being applied after both plowing and planting. The experiment used a randomized complete block design with three blocks and 12 plots measuring 19.8 m^2 . A wheat-maize crop rotation in a year, commonly used in the region, was adopted for this experiment. The soil in the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40371076); 西北农林科技大学科研创新团队, 研究骨干支持和研究生教育创新科研资助项目

收稿日期: 2004-12-17; 修订日期: 2005-04-19

作者简介: 邱莉萍(1979~), 女, 江西赣州人, 博士生, 主要从事土壤生物质量研究. E-mail: qiulp79@163.net

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40371076)

Received date: 2004-12-17; Accepted date: 2005-04-19

Biography: QIU Li-Ping, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil biologic quality. E-mail: qiulp79@163.net

study site is a heavy loam Lou soil (Earth-cumuli-ortho anthrosols according to the Chinese classified system) with a average fertility level.

After 25 years of consistent crop rotation and fertilization, soil samples were collected in 2002 just before planting the winter wheat. Topsoil (0~20cm) samples were collected using a five-point method in each plot. Samples were air-dried, then machine-sieved into five aggregate size fractions: >5mm, 2~5mm, 1~2mm, 0.25~1mm, and <0.25mm. After passed through 1mm sieve, micro-aggregates were classified into two parts divided by 0.01mm by using physical shaking and sedimentation. Aggregate size fractions were then passed through 1mm and 0.25mm sieves prior to nutrient and enzyme analysis. Soil organic matter, total N, and total P were measured in duplicate using standard methods. Enzyme analysis was performed in triplicate: soil urease by the Hoffman method, invertase by the T. A. цербачкова method, and alkaline phosphatase by the Ф. X. Хазиев method. All fertilization increased the degree of aggregation and the quantity of aggregates in the soil, significantly improving soil structure over the control treatment. Mean weight diameter of soil aggregates, and $C/F_{0.01}$ of micro-aggregates increased from the control to the fertilizer treatments. Long-term fertilization amplified the variance of soil chemical and biological properties within soil microenvironments. Within a given treatment, nutrient content and enzyme activity tended to decrease with increasing aggregate size, with the highest values generally occurring in the 0.01mm characteristic micro-aggregates. Nutrient and enzyme levels followed the pattern manure > maize straw > chemical fertilizer > control across all aggregate size fractions. Despite their lower concentrations of nutrients and enzymes, large aggregates accounted for most of the nutrients and enzymes in the topsoil. There was a significant positive correlation between nutrient levels, enzyme levels, and aggregate size, showing a consistent impact of fertility regime on soil quality.

Key words: long-term fertilization; soil nutrients; soil enzymes; macro-aggregate; micro-aggregate

在干旱半干旱地区,土壤入渗率、土壤的盐渍化和次生盐渍化程度与表层土壤有机质含量和土壤各级团聚体、微团聚体的含量密切相关。土壤团聚体、微团聚体以土壤有机无机复合体为基础,在有机无机胶结物质的作用下形成,是衡量土壤物理性质好坏,表征土壤肥力和“土肥相融”的一个重要指标^[1-3]。已有研究表明,土壤团聚体稳定性与土壤微生物量呈显著相关。有机质分解菌往往是土壤酶的重要来源,土壤酶活性与土壤结构参数间可能存在某种相关关系。Dick 等^[4]发现森林土壤的容重与脱氢酶、磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性之间呈显著的负相关。Marten 等^[5]发现土壤酶活性与土壤容重呈负相关,而与水分子入渗率呈正相关。由此看出,土壤酶活性与土壤结构间必然存在着稳定的相关性。

土壤酶是一个敏感的生物指标,它对土壤的扰动性具有指示作用。关于不同级别团聚体、微团聚体中土壤主要养分的分布已有报道^[6-8],但对各级别土壤团聚体、微团聚体中酶活性的分布研究较少^[9]。为了进一步揭示长期培肥改土的作用效果,了解土壤中主要养分含量与酶活性在团聚体和微团聚体中的分布及其两者的相关性,本试验对不同培肥措施土壤团聚体、微团聚体中主要养分含量与酶活性进行研究,探讨了土壤中主要养分和酶在土壤团聚体、微团聚体的分布特征及培肥对其分布的影响,企图揭示土壤微域生物性状,为合理培肥和改善土壤物理性状与生物性状提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验区位于西北农林科技大学有机肥培肥土壤长期定位试验田(部分方案见表1)^[10],试验小区面积为19.8m²。每年在小麦播前按方案要求分别1次施入玉米秸秆、有机厩肥和化肥,并翻入20cm土层内。各处理均设置3次重复,随机区组排列,实行小麦-玉米一年两熟制的轮作种植制度。

培肥试验开始前该基础土壤的基本性状为:有机

表1 长期定位培肥试验方案设计 (kg/hm²)

Table 1 The design of long-term fixed experiment about improvement of soil fertilizing

处理 Treatments	尿素 Urea	过磷酸钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	玉米秸秆 Maize-straw	厩肥 Manure
对照 Control (CK)	0	0	0	0
化肥 Fertilizer (CF)	450	525	0	0
秸秆 Maize-straw (SW)	450	525	18750	0
厩肥 Manure (BM)	450	525	0	37500

质 14.0g/kg,全氮 0.89 g/kg,全磷 0.67 g/kg,碱解氮 54.45mg/kg,速效磷 7.5 mg/kg,属中等肥力水平,土壤类型为重壤质壤土(系统分类命名为土垫旱耕人为土,Earth-cumuli-orthic anthrosols),pH 7.9。经过连续培肥 25a 后于 2002 年冬小麦播种前采样,各处理土样的主要性状见表 2。采样时先去除表层未腐解的秸秆,每个试验小区分别用五点法取 0~20cm 耕层土样,并混匀风干,处理通过 1mm 和 0.25mm 筛备用。另采 0~20cm 原状土壤样品供土壤团聚体组成分析用。

1.2 测定方法

土壤团聚体分析:沙维诺夫法^[11]分级(干筛法)。

土壤微团聚体分析:物理振荡沉降法^[11]。

土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷分别采用丘林法、开氏法、酸溶-钼锑抗比色法、碱解扩散法和 Olsen 法测定^[12];土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和多酚氧化酶活性,分别用 Hoffmann 与 K. Teicher 法、T. A. щербакoвa 法、Ф. X. Хазиев 法和 Щ. Галстян 法测定^[13],单位分别以 NH₃-N, μg/(g·h)、glu., μg/(g·h)、ph(OH), μg/(g·h)、紫色没食子酸, μg/(g·h)表示。

表 2 土样的理化性状

Table 2 The nutrients content and yield of the bulk soils

处理 Treatments	有机质 Organic matter(g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolysable N (mg/kg)	全磷 Total P (g/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)
CK	15.118	1.023	51.625	0.698	6.836
CF	15.975	1.068	55.125	0.776	14.634
SW	18.726	1.364	71.750	0.784	17.430
BM	22.486	1.489	87.938	1.018	51.184

2 结果与分析

土壤团聚体、微团聚体的形成和土壤生物酶性状改善都不同程度地依赖于土壤管理水平。长年进行有机肥培肥能使土壤中有机质明显得到积累,因此,必然对其团聚体、微团聚体形成有一定改善作用。同时,土壤酶活性在不同大小团聚体间的分布也有一定规律性^[14,15]。通过对连续 25a 长期定位试验田土壤团聚体、微团聚体中主要养分和酶活性分布的研究得出以下结论:

2.1 不同培肥土壤团聚体、微团聚体的组成

不同培肥处理的土壤团聚体组成如图 1 所示。干筛后各级别团聚体含量在培肥处理间变化规律为: >5mm 团聚体含量平均为 41.14%,变化区间为 39.84%~42.85%;5~2mm 团聚体含量平均为 17.50%,变化范围为 16.89%~18.44%;2~1mm 团聚体含量平均为 9.53%,变化范围为 8.83%~10.20%;1~0.25mm 团聚体含量平均为 21.75%,变化范围为 20.75%~22.41%。所有 >0.25mm 团聚体含量平均为 89.91%,变化区间为 88.54%~91.97%,其中 BM>SW>CF>CK。说明大级别团聚体在培肥土壤中占取绝对优势,体现了培肥的作用与效果。不同级别团聚体分布也比较均匀,长期施用有机肥能显著改善土壤团聚体的结构,增加团聚体尤其是较大团聚体的含量^[16]。

为进一步了解长期培肥土壤结构的整体分布状况,求出了土壤的平均重量直径(MWD, mean weight diameter)。平均重量直径是基于不同直径团聚体的重量和大小拟定的,可用式(1)求得^[17]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \quad (1)$$

式中, \bar{x}_i 是筛分出来的某一级别团聚体的平均直径, W_i 是该级别团聚体的相应重量占土壤样品干重的分数。MWD 大小全方位地反映了土壤的团聚状况。经

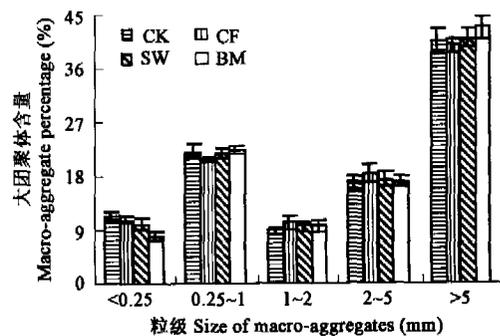


图 1 大团聚体的组成

Fig. 1 The composition of macro-aggregates

过长期培肥后,土壤团聚体 MWD 发生显著变化,无肥、施化肥、施秸秆和施厩肥处理 MWD 分别为 2.926mm、2.947mm、2.973mm 和 3.047mm,施肥处理大于无肥对照,有机物质培肥处理的 MWD 明显高于化肥处理,说明有机肥培肥显著地改善了土壤团聚体的基本组成,再次体现长期土壤培肥的作用与效果。

直径小于 0.01mm (F, fine) 与大于 0.01mm (C, coarse) 的特征微团聚体在持水量与释水、保蓄养分与释供养分方面具有显著不同的作用:肥力水平较高的土壤,其大小级别的特征微团聚体比肥力水平较低的土壤具有较好的保供性能,因此,陈恩凤等^[2]以 0.01mm 为界划分大、小级别的微团聚体,并将它们称为“特征微团聚体”。为了能直观地看出培肥对土壤微团聚体组成的影响,将大于 0.01mm 的特征微团聚体与小于 0.01mm 的特征微团聚体的比值 (C/F_{0.01}) 做了计算。

从表 3 可看出,施用肥料尤为有机肥料改土,能使特征微团聚体的组成比例发生较明显的变化:小于 0.01mm 级别特征微团聚体减少,大于 0.01mm 级别特征微团聚体增加,团聚作用明显加强,施肥处理 C/F_{0.01} 的比值较对照都有所升高。由此可判断出,长期进行培肥从基础上提高土壤的肥力水平,增加土壤大于 0.01mm 级别微团聚体的数量,改良土壤的物理结构,改善土壤对水、肥的保持与供应性能。

2.2 培肥土壤团聚体中主要养分含量和酶的分布

2.2.1 培肥土壤团聚体中主要养分含量的分布

图 2 明确显示,随土壤团聚体直径逐渐增大,其中的有机质含量依次显著地减小,这是因为土壤有机质很少以游离态形式存在于土壤中,而是被细小的矿质颗粒牢固地吸附,与之结合在一起形成有机-无机复合体,因此,团聚体颗粒直径越小,比表面积越大,吸附

的有机物质就越多。另外,在初级团聚过程中,有机质也起着极为重要作用,即有机质在团聚体形成的初级团聚阶段所显示的作用比后期团聚阶段要更加明显。因此,小直径团聚体中有机质含量高于大直径团聚体中有机质含量。图 2 同时显示,在长期土壤培肥过程中,各级团聚体中有机质含量相应地提高,同一级别团聚体,不同培肥土壤呈现出 BM > SW > CF > CK 规律,且随着培肥水平提高,有机质含量随团聚体直径变化曲线斜率也明显地增大,在小直径的团聚体中增长幅度要明显高于大直径团聚体中的增长幅度。实验证明培肥作用首先体现在增加团聚体的数量,其次,才改善了团聚体质量即向更大团聚体的形成方向发展。

受有机质的影响,全氮含量在团聚体中的分布随团聚体直径增大而减小(图 3),依次为:[< 0.25mm] 级别团聚体 > [0.25 ~ 1mm] 级别团聚体 > [1 ~ 2mm] 级别团聚体 > [2 ~ 5mm] 级别团聚体 > [> 5mm] 级别团聚体。除有机质起主要作用外,不同级别团聚体对 NH₄⁺ 的吸附性能也有差异,小级别的团聚体比表面积较大,有较强的保存和吸附氮素养分的能力,随颗粒直径的增大,对 NH₄⁺ 的吸附量也减小^[18]。同一级别团聚体不同培肥措施下,施肥土壤的各级别团聚体中全氮含量均比对照高,且施有机肥对全氮的增加效果明显优于施化肥处理。

表 3 供试土样的特征微团聚体组成

Table 3 The composition of characteristic micro-aggregate in the tested soils

特征微团聚体 Characteristic micro-aggregate	CK (%)	CF (%)	SW (%)	BM (%)
< 0.01mm	51.466	48.907	45.776	49.676
> 0.01mm	48.534	51.093	54.224	50.324
C/F _{0.01}	0.943	1.045	1.185	1.013

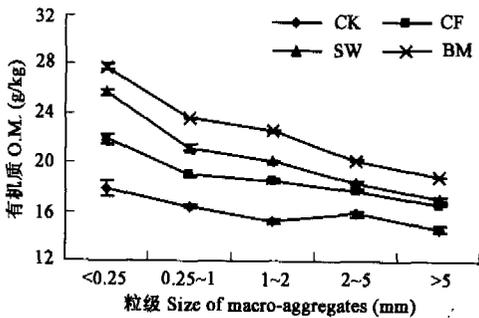


图 2 有机质在不同粒级大团聚体中的分布

Fig. 2 Distribution of O.M. in different macro-aggregates

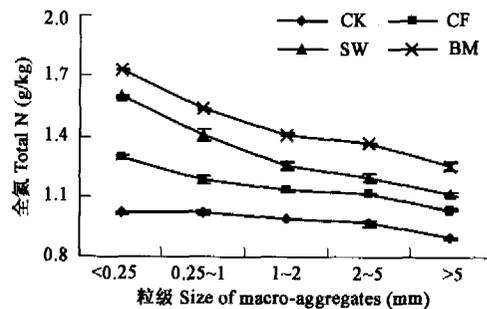


图 3 全氮在不同粒级大团聚体中的分布

Fig. 3 Distribution of total N in different macro-aggregates

不同级别团聚体中全磷含量的分布与有机质和全氮的分布很相似(图4),施厩肥、秸秆和无肥处理中,全磷含量在各级别团聚体中的分布以 $<0.25\text{mm}$ 级别为最高,并随颗粒直径增大而呈下降趋势;就不同培肥措施而言,在同一级别团聚体中均具有 $\text{BM} > \text{SW} > \text{CF} > \text{CK}$ 变化趋势,施肥特别是施有机肥能显著增加各级别团聚体中全磷的含量。无论是有机态磷还是大量无机态磷,其在细小颗粒上吸附量总是高于大颗粒上的吸附量,这是早被众多学者所证实的事实^[19]。

2.2.2 培肥土壤团聚体中酶活性的分布 同一级别团聚体中,不同培肥措施对脲酶活性呈现 $\text{BM} > \text{SW} > \text{CF} > \text{CK}$ 变化规律(图5),且受有机质分布的影响,在 $<0.25\text{mm}$ 级别团聚体中,各培肥措施土壤脲酶活性的差异最大。施有机肥培肥土壤脲酶活性显著高于其他土壤,特别是施用厩肥对提高脲酶活性具有更为显著地改善作用,有两方面的原因:一是施用厩肥本身向土壤中提供了脲酶产生的底物;另外施用厩肥为土壤提供了大量的有机物质和养分,促进了植物根系的生长和微生物的繁殖,提高了脲酶的活性。在不同级别团聚体中,施厩肥和秸秆土壤脲酶活性随直径增大而呈明显减小的趋势,变幅分别为 $203.20 \sim 294.91\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 $166.70 \sim 206.60\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$;施化肥和无肥处理脲酶活性随团聚体直径的变化不大,变幅分别为 $151.12 \sim 177.75\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 $138.40 \sim 157.63\mu\text{g}/\text{g}$ 。小直径团聚体中脲酶活性大于大直径团聚体中脲酶活性,原因在于土壤颗粒越小表面积越大,吸附的有机质含量越多,因此对脲酶的影响也越大,这也间接地证明了脲酶同样绝大部分是结合在土壤有机无机复合体中的。

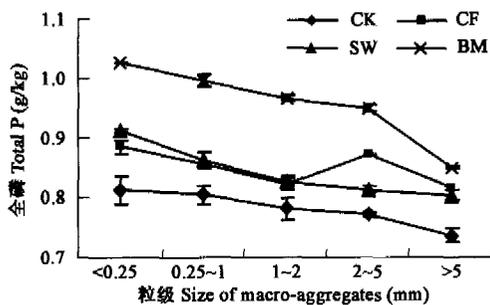


图4 全磷在不同粒级大团聚体中的分布

Fig. 4 Distribution of total P in different macro-aggregates

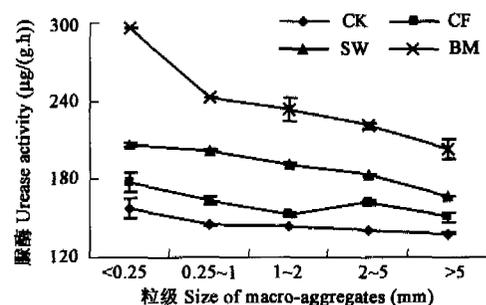


图5 脲酶在不同粒级大团聚体中的分布

Fig. 5 Distribution of Urease activity in different macro-aggregates

不同级别团聚体中碱性磷酸酶变化趋势与脲酶相似,但变化程度和各土壤处理间的差异有所不同,尽管在同一级别团聚体中仍有 $\text{BM} > \text{SW} > \text{CF} > \text{CK}$ 变化趋势,与脲酶的变化相比,施用有机肥和无机化肥培肥的土壤对碱性磷酸酶都有明显地改善与提高,且两者之间差异相对较小(图6)。施用有机肥提供了大量的有机物质,有机物质在分解过程中产生分子量不同的有机酸,具有改善土壤磷素营养状况功能。不同级别土壤团聚体中,碱性磷酸酶活性随团聚体直径增大而呈现出减小趋势,其中施厩肥处理土壤中碱性磷酸酶活性变化最为明显,其变化幅度为 $117.80 \sim 209.38\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$;长期施化肥土壤碱性磷酸酶活性仅在 $<0.25\text{mm}$ 的团聚体中显著高于其他级别团聚体;而无肥土壤碱性磷酸酶活性不仅整体水平低,在不同级别土壤团聚体间变化幅度也很小,最大值与最小值之间的级差仅为 $44.59\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。

蔗糖酶与脲酶、碱性磷酸酶有所不同,它在不同级别团聚体中的变化幅度随培肥措施不同而有所不同(见图7)。施用化肥土壤中各级别团聚体中蔗糖酶活性的变化最为显著,随团聚体直径增大而呈急剧减小的趋势,变化幅度为 $1243.31 \sim 2097.32\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$;其次变幅相对较大的为无肥对照土壤,而施用厩肥和秸秆的土壤蔗糖酶活性在不同级别团聚体间变化比较平缓。长期施用有机肥对土壤蔗糖酶均衡分布机理还有今后继续探讨的必要。

2.2.3 土壤团聚体中养分含量和酶活性对土壤的贡献率 将各级土壤团聚体的含量(权数)和不同级别团聚体中养分和酶的含量(丰度)进行统一考虑,不仅更加详细地反映各级团聚体对土壤基本性质的贡献率,更能全面地和客观地反映长期进行土壤培肥的作用与效果。

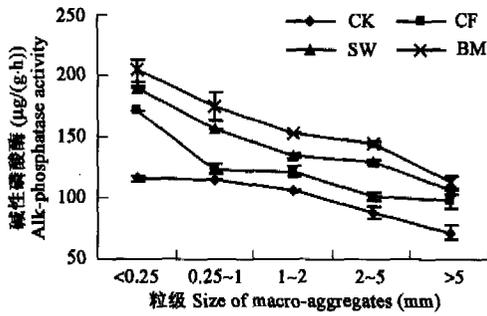


图 6 碱性磷酸酶在不同粒级大团聚体中的分布

Fig.6 Distribution of alk-phosphatase activity in different macro-aggregates

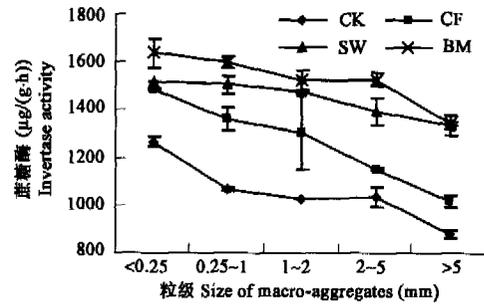


图 7 蔗糖酶在不同粒级大团聚体中的分布

Fig.7 Distribution of invertase activity in different macro-aggregates

各级别土壤团聚体中养分和酶在土壤中的贡献率用式(2)进行计算,结果见表 4。

$$\text{团聚体的贡献率} = \frac{\text{该级团聚体中养分或酶含量} \times \text{该级团聚体的含量}(\%)}{\text{土壤中养分含量或酶含量}} \times 100\% \quad (2)$$

从表中看出仅就 5 个级别的土壤团聚体而言,对土壤有机质、全氮、全磷、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶的贡献率大小依次均为:[>5mm 团聚体] > [0.25 ~ 1mm 团聚体] > [2 ~ 5mm 团聚体] > [< 0.25mm 团聚体] > [1 ~ 2mm 团聚体],其中约 35% 以上的贡献率来自于土壤中 >5mm 团聚体,尽管 >5mm 团聚体中各种养分含量和各类酶的含量都很低,但是由于土壤中这个级别的团聚体含量占了绝对优势,所以,它的贡献率才显示了最高值。

表 4 土壤各级别团聚体对土壤养分含量和酶活性的贡献率(%)

Table 4 Contributing rates of macro-aggregates fractions in soil fertility and Enzymatic activities

项目 Items	处理 Treatments	< 0.25mm	0.25 ~ 1mm	1 ~ 2mm	2 ~ 5mm	> 5mm
有机质 Organic matter	CK	13.0	23.1	8.9	16.2	38.8
	CF	12.5	22.1	9.8	18.1	37.5
	MS	13.4	23.6	9.8	16.7	36.5
	BM	10.9	24.7	10.6	16.8	37.0
全氮 Total N	CK	12.7	23.2	9.6	17.8	36.7
	CF	12.1	22.0	10.1	18.2	37.6
	MS	13.1	24.3	10.2	16.8	35.6
	BM	10.9	24.4	10.3	17.1	37.3
全磷 Total P	CK	11.4	23.5	8.1	16.7	40.3
	CF	10.6	20.9	9.5	19.1	39.9
	MS	11.2	22.7	9.6	16.9	39.6
	BM	10.1	23.9	11.2	18.0	36.8
脲酶 Urease	CK	13.3	22.2	9.9	17.0	37.7
	CF	12.6	21.3	10.5	18.9	36.7
	MS	12.4	23.4	11.2	17.8	35.2
	BM	11.4	23.7	10.9	17.1	36.8
碱性磷酸酶 Alkali-phosphatase	CK	14.4	27.3	10.5	16.2	31.6
	CF	14.1	21.6	10.7	16.2	37.4
	MS	14.2	25.8	9.2	16.9	33.9
	BM	10.1	28.5	8.7	17.0	35.7
蔗糖酶 Invertase	CK	14.6	23.3	9.4	17.5	35.2
	CF	13.9	24.6	11.6	18.5	35.4
	MS	9.4	23.7	8.4	16.9	41.6
	BM	6.8	25.1	8.0	17.4	42.7

2.3 培肥土壤特征微团聚体中主要养分含量和酶活性的分布

微团聚体在旱地土壤和有机质含量贫乏的土壤中普遍存在,大多是一些初级的复合体或复粒存在,微团聚体中养分含量和酶活性可以在更小的尺度范围内揭示土壤肥力的本质特征。

2.3.1 培肥土壤特征微团聚体中主要养分含量的分布 由图 8 可看出,在各种培肥情况下, < 0.01mm 特征微团聚体中土壤有机质含量明显地、甚至成倍地高于 > 0.01mm 特征微团聚体,说明绝大部分有机质被 < 0.01mm 特征微团聚体吸附。在相同级别特征微团聚体中,培肥土壤有机质含量明显高于对照,施肥处理中又以施入有机肥对增加特征微团聚体中的有机质含量效果为最佳,说明土壤有机质与细小的无机颗粒间的密切关系。

与有机质分布相似(图 9,10),在相同培肥措施下, < 0.01mm 特征微团聚体中全氮、全磷含量明显高于 > 0.01mm 特征微团聚体。特别是在 > 0.01mm 特征微团聚体中,施有机肥的全氮、全磷含量远远高于对照和施化肥处理,充分地体现了土壤有机肥培肥的作用与机理。在相同级别微团聚体中,不同培肥处理间全磷含量均为:BM > SW > CF > CK,尤其 < 0.01mm 的特征微团聚体中,施厩肥处理与其它培肥处理全磷含量相差很大。在 < 0.01mm 级别特征微团聚体的土壤中,施有机肥处理全氮含量高于施化肥和无肥处理,但施化肥和无肥对照处理间的全氮量相当,揭示原因可能要从氮素的形态上进一步去探讨。

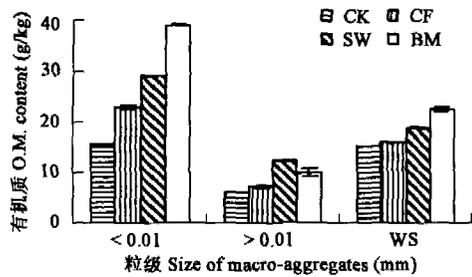


图 8 有机质在不同微团聚体中的分布

Fig. 8 Distribution of O. M. in different characteristic micro-aggregates

* WS 代表过 1mm 筛土壤 WS stand for the soil which passed 1mm sieve

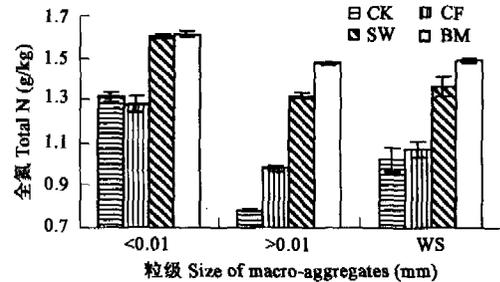


图 9 全氮在不同微团聚体中的分布

Fig. 9 Distribution of total N in different characteristic micro-aggregates

* WS 代表过 1mm 筛土壤 WS stand for the soil which passed 1mm sieve; 下同 the same below

2.3.2 培肥土壤特征微团聚体中酶活性的分布 从不同培肥壤土特征微团聚体中脲酶的分布(图 11)可看出:在相同培肥措施下,脲酶活性为 < 0.01mm 特征微团聚体中高于 > 0.01mm 特征微团聚体,而碱性磷酸酶及蔗糖酶活性除厩肥处理有所不同外(图 12,13),其它各培肥土壤酶活性分布规律与脲酶相似。在同一级别特征微团聚体中,脲酶、碱性磷酸酶及蔗糖酶活性均为 BM > SW > CF > CK,特别是在 > 0.01mm 级别特征微团聚体,施肥的较对照无肥处理脲酶活性得到明显增加,说明施肥特别是施用有机肥能增加大小级别特征微团聚体中脲酶、碱性磷酸酶活性。

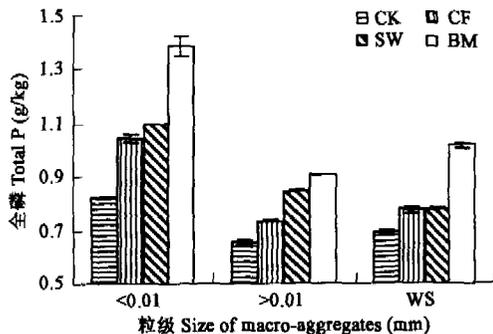


图 10 全磷在不同微团聚体中的分布

Fig. 10 The distribution of total P in different characteristic micro-aggregates

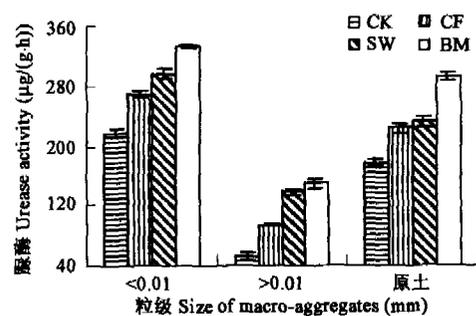


图 11 脲酶在不同微团聚体中的分布

Fig. 11 Distribution of urease in different characteristic micro-aggregates

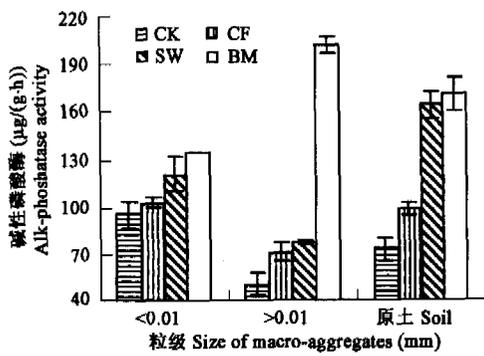


图 12 碱性磷酸酶在不同微团聚体中的分布

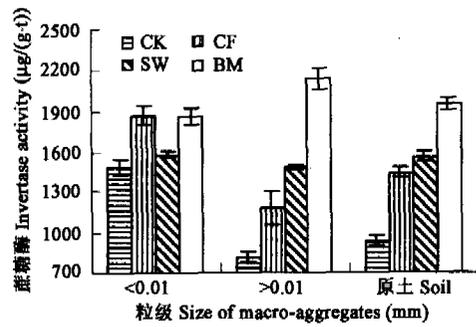


图 13 蔗糖酶在不同微团聚体中的分布

Fig.12 Distribution of alk-phosphatase in different characteristic micro-aggregates

Fig.13 Distribution of invertase in different characteristic micro-aggregates

2.4 土壤团聚体、微团聚体中基本肥力因子与土壤酶的相关分析

土壤酶活性与土壤中基本肥力因子间有显著相关性,国内外已有许多报道^[20-22]。本试验在此基础上研究了不同培肥措施下各级别土壤团聚体、特征微团聚体中主要养分含量与酶活性的相关性,结果表明(表 5, 6),各级别土壤团聚体中脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与其有机质、全氮、全磷的含量均呈极显著正相关;各级别土壤特征微团聚体中,除碱性磷酸酶和有机质含量无显著正相关外,脲酶和蔗糖酶活性与其有机质呈显著正相关;脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与全氮、全磷的含量也均呈极显著或显著正相关,说明 3 种酶活性的分布与土壤中主要养分的分布密切相关,可以表征土壤肥力水平和作为衡量土壤肥力的生物指标。

表 5 土壤团聚体中酶活性与主要养分含量的相关系数

Table 5 The coefficients between soil enzymatic activities and the nutrient contents in macro-aggregate

酶类 Enzymes	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P
脲酶 Urease	0.893**	0.933**	0.917**
碱性磷酸酶 Alkaline-phosphatase	0.963**	0.944**	0.847**
蔗糖酶 Invertase	0.872**	0.898**	0.829**

总样本数 Total sample number N = 20

表 6 土壤特征微团聚体中酶活性与主要养分含量的相关系数

Table 6 The coefficients between soil enzymatic activities and the nutrient contents in characteristic micro-aggregate

酶类 Enzymes	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P
脲酶 Urease	0.929**	0.721**	0.928**
碱性磷酸酶 Alkaline-phosphatase	0.548	0.912**	0.741**
蔗糖酶 Invertase	0.635*	0.901**	0.801**

总样本数 Total sample number N = 8

3 结论

(1)长期土壤培肥效果体现在改善土壤基本性状:一方面显著加强了土壤的团聚作用,提高了土壤中较大团聚体含量;另一方面,改善了土壤团聚体的质量,使得各级团聚体中主要养分含量都有明显的提高。

(2)土壤中生物性状确实具有极为明显的“微域”分布差异性,土壤内部性状本身就存在着极大的变异特征。从不同尺度研究土壤性质时空变异性,并从更加微观水平甚至分子水平揭示土壤演化机理必然成为当今土壤科学发展的前沿领域。

(3)在微域尺度范围内,土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与土壤基本肥力因子之间关系密切,因此,土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性也可表征土壤肥力水平。

References:

[1] Xiong Y, Chen J F. The significance of improving soil fertility in the development of agricultural production. Chinese Journal of Soil Science, 1963, (4): 1~6.

[2] Chen E F, Zhou L K, Wu P Y. Performances of soil micro-aggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their composition in judging fertility level. Acta Pedologica Sinca, 1994, 31(1): 18~24.

[3] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. Acta Ecologica

- Sinica, 2003, 23(10): 2176 ~ 2182.
- [4] Dick R P. Enzyme activities as integrative indicators of soil healthy. In: Park Hurst CE *et al.* Eds. Bioindicators of Soil Health. United Kingdom, Oxon: CAB International, 1997. 121 ~ 156.
- [5] Marten D A. Management and crop residue influence soil aggregate stability. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(3): 723 ~ 727.
- [6] Xing X R, Li F Y. Effect of organic materials on the composition characteristics of micro-aggregates in albic soils and their nutrient contents. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 42 ~ 44.
- [7] Dou S, Zhang J H, Xu X C, *et al.* Organic matter in different fractions of micro-aggregates in Brown earths. *Chinese Journal of Soil Science*, 1992, 23(2): 52 ~ 54.
- [8] Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 71 ~ 74
- [9] Wang J K, Tang Y D, Zhang J H, *et al.* Enzyme activities in fractions of micro-aggregates in Brown earths with different fertility levels in Liaoning Province. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(2): 185 ~ 189.
- [10] Zhang Y P, Zhang F S, Fan X L. Inspiration of a 21 years fixed fertilization experiment. Shaanxi Yangling: Northwest Sci & Tech University of Agriculture and Forestry Press, 2002.
- [11] Liu X Y. Soil physics and its research methods. Shanghai: Shanghai Sci. & Tech. Press, 1981.
- [12] Nanjing Institute of Soil Science, CAS. Analysis of soil physical and chemical properties. Shanghai: Shanghai Sci. & Tech. Press, 1981.
- [13] Guan S Y. Soil enzyme and its research methods. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [14] Gupta VVSR, Germida J J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol & Biochem.*, 1998, 20: 777 ~ 786.
- [15] Mendes C, Bandick A K, Dick R P, Bottomley P J. Microbial biomass and activities in soil aggregates by winter cover crops. *Soil Sci. Soc Am. J.*, 1999, 63: 873 ~ 881.
- [16] Zobeck T M, Popham T W, Skidmore E L, *et al.* Aggregate-mean diameter and wind-erodible soil predictions using dry aggregate-size distributions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, 67: 425 ~ 436.
- [17] Hiller D. Soil physics. Xi'an: Shaanxi People Education Press, 1998.
- [18] Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(5): 65 ~ 71.
- [19] Xu Y C, Shen Q R, Mao Z S. Contents and distribution of forms of organic P in soil and particle size fractions after long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 593 ~ 598.
- [20] Zhang C E, Chen X L. Characteristics of soil enzymatic activity and nutrient of pasture from abandoned field in different years on the Loess hilly areas. *Acta Agrestia Sinica*, 1997, 5(3): 195 ~ 199.
- [21] He W X, Zhu M E. Relationship between urease activity and fertility of soils in Shaanxi Province. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4): 392 ~ 398.
- [22] Xiao L, Li G, He W X. Study on the effects of fertilization on soil enzymatic activities. *Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis*, 1999, 27(5): 142 ~ 146.

参考文献:

- [1] 熊毅, 陈家坊. 提高土壤肥力在发展农业生产中的重要意义. *土壤通报*, 1963, (4): 1 ~ 6.
- [2] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义. *土壤学报*, 1994, 31(1): 18 ~ 24.
- [3] 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): 2176 ~ 2182.
- [6] 荆雪荣, 李法云. 有机物料对白浆土微团聚体组成及其养分含量的影响. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 42 ~ 44.
- [7] 窦森, 张继宏, 须湘成, 等. 棕壤不同粒级微团聚体中有机质特性的研究. *土壤通报*, 1992, 23(2): 52 ~ 54.
- [8] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. *生态学报*, 2004, 24(1): 71 ~ 74.
- [9] 汪景宽, 汤方栋, 张继宏, 等. 不同肥力棕壤及其微团聚体中酶活性比较. *沈阳农业大学学报*, 2000, 31(2): 185 ~ 189.
- [10] 张一平, 张福锁, 樊小林, 等. 二十一年长期土壤培肥定位试验的启示. 陕西杨凌: 西北农业大学出版社, 2003.
- [11] 刘孝义. 土壤物理及土壤改良研究法. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [17] D. 希勒尔. 土壤物理学概论. 西安: 陕西人民教育出版社, 1988.
- [18] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2000, 33(5): 65 ~ 71.
- [19] 徐阳春, 沈其荣, 郭泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响. *土壤学报*, 2003, 40(4): 593 ~ 598.
- [20] 张成娥, 陈小利. 黄土丘陵区不同撂荒年限自然恢复的退化草地土壤养分及酶活性特征. *草地学报*, 1997, 5(3): 195 ~ 199.
- [21] 和文祥, 朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析. *土壤学报*, 1997, 34(4): 392 ~ 398.
- [22] 肖玲, 李岗, 和文祥, 等. 旱地不同培肥方式对土壤酶活性影响的研究. *西北农业大学学报*, 1999, 27(5): 142 ~ 146.