植物营养与肥料学报 2012,18(5):1135-1143
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同肥力水平土壤团聚体的稳定性及对氮肥盐溶液的响应

徐爽,王益权*,王浩,祝飞华,冉艳玲,陈静
(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 在室内利用筛分技术研究了关中地区相同质地类型3个不同肥力水平塿土团聚体的组成及其稳定性,并在4个不同浓度氯化铵溶液中进行湿筛,探讨了不同肥力土壤团聚体对盐溶液的反应特征及抗化学物质分散的能力,以便揭示长期施用无机氮肥对土壤团聚体的作用与影响。结果表明,干、湿筛结果显示3个肥力水平土壤直径>0.25 mm团聚体的含量均随肥力水平的升高显著增加,供试塿土团聚体的水稳性较差,湿筛后直径<0.25 mm的微团聚体含量在85%以上,而富有农学价值的直径在1～5 mm的水稳性团聚体在高肥力土壤中含量仅为2.80%,中肥力土壤为1.47%,低肥力土壤为0.84%。3种肥力土壤团聚体组成受氯化铵溶液浓度的影响,在4种浓度的氯化铵溶液中湿筛后,直径2～5 mm的团聚体的含量随溶液浓度增大而减少,而0.25～2 mm团聚体含量明显增加。试验得到的主要结论为,不同肥力水平土壤团聚体质量差异明显;团聚体的化学稳定性受盐溶液浓度和肥力水平的共同作用,随氮肥溶液浓度增大,团聚体组成集中在0.25～2 mm的较小范围,盐分使得多级的团聚体组成向单一化方向变化;高肥力土壤受氮肥溶液的影响相对较弱,中、低肥力土壤对氮肥溶液的响应则较为强烈。

关键词: 土壤肥力;团聚体组成;团聚体盐破坏率;团聚体化学稳定性
中图分类号: S152.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)05-1135-09

Effects of nitrogen fertilizer solution on stability of soil aggregates under different fertility levels

XU Shuang, WANG Yi-quan*, WANG Hao, ZHU Fei-hua, RAN Yan-ling, CHEN Jing
(*College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Chemicals can greatly influence the aggregation of soil stability. The effects of NH_4Cl solution on stability of cultivated soil aggregates in Guanzhong area were studied. Soil aggregations were analyzed under dry sieving and sulfurous wet sieving conditions. Soil mean weight diameter, geometric mean weight diameter composition of soil aggregates and percentage of aggregate chemical destruction were calculated. The results indicate that under the dry sieving and wet sieving conditions, the percentages of >0.25 mm soil aggregates are significantly increased with the increase of soil fertility, while the water-stability of the tested soil aggregates is low. The percentage of <0.25 mm soil aggregates is larger than 85%, while the content of agricultural valuable water-stable aggregates(1-5 mm) is only 2.80% in high fertility soil, 1.47% in middle fertility and 0.84% in low fertility. Concentration of NH_4Cl solution influences composition of soil aggregates, the contents of 2-5 mm soil aggregates are increased with the increase of NH_4Cl concentration relatively, and the contents of 0.25-2 mm soil aggregates are increased significantly. In conclusion, soil aggregations under different fertility levels are greatly different, and both soil fertility level and concentration of salt solutions can influence chemical stability of soil aggregates. Soil aggregates composition focus to 0.25-2 mm with the increase of concentration of NH_4Cl solution, which results in homogenization of soil aggregates. Relative to the high fertility soil, middle and low fertility soils are affected more

收稿日期: 2011-11-30　　**接受日期:** 2012-04-23
基金项目: 农业部苹果园沼肥应用技术研究与示范项目(201001070070)资助。
作者简介: 徐爽(1985—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事土壤物理研究。E-mail: xush0225@sina.com
*通讯作者 E-mail: soilphysics@nwsuaf.edu.cn

severely by the nitrogen fertilizer solution.

Key words: soil fertility; composition of soil aggregates; percentage of aggregate chemical destruction; chemical stability of soil aggregates

土壤团聚体及其稳定性是影响土壤肥力和环境问题的关键因素之一[1],也是土壤团聚体质量的重要特征之一。同时,土壤团聚体的稳定性也受到土壤肥力及环境的影响。前人已对土壤肥力与土壤水稳性团聚体组成的关系做了大量研究[2-5],发现土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体与土壤中有机碳、全氮、全磷、速效磷、碳酸钙和阳离子交换量(CEC)具有极显著的正相关性,土壤水稳性团聚体的含量(WSA)和平均重量直径(MWD)随土壤有机质含量的增高而增大,土壤有机质补充减少,矿化速度加快,腐殖质品质降低,是水稳性团聚体稳定性降低的主要原因。尤其在近十多年来,众多学者进行了施肥对土壤团聚体水稳定性影响的研究[6-14],认为施用有机肥具有明显改善土壤团聚化状况,促进土壤团聚体形成和提高团聚体稳定性的作用。这些关于土壤团聚体稳定性的概念与成果基本上体现在水稳定性和机械稳定性两个方面,对影响团聚体稳定性的因素研究主要体现在有机物料数量与质量方面。给土壤施入外源化学物质,诸如多年施用化肥、农药对团聚体稳定性的影响研究仍鲜见报道。其次,以上关于团聚体稳定性的研究结论均是在纯水溶液中进行一定程度分散后,通过筛分分级定量所得出的,其实验条件与农田土壤状态有着很大差异。众所周知,农田长期大量地施用无机化肥、农药等化学品,灌溉水体程度不同地携带有化学污染物进入土壤,其土壤溶液实际上是溶解有各种化学物质的稀溶液,会对土壤团聚体稳定性产生一定作用与影响,足见土壤团聚体的稳定性不应仅局限于传统的"机械稳定性、水力学稳定性和生物学稳定性"3 个概念范畴,还理所当然地包含着"化学稳定性"的内容。基于此,进一步研究不同肥力类型团聚体稳定性对于投入化学物品的反应程度,建立起土壤团聚体的化学稳定性的概念与理论既是当今农业生产发展现状的重要课题,又是土壤科学深入发展的重要研究内容。

土壤团聚体的化学稳定性受到多种因素作用,其中土壤肥力水平是最为主要的影响因素,本文选取具有相同发生学特征和质地类型的塿土作为供试材料,以生产上常使用的氮肥对团聚体稳定性的影响作为研究切入点,在室内将不同肥力水平的土壤团聚体在不同浓度的氮肥溶液中湿润浸泡与筛分,以分析盐溶液对团聚体的影响程度与团聚体组成的变化趋势,以期探求不同肥力水平农田土壤团聚体的化学稳定性,揭示长期施用化肥对土壤团聚体的影响,从而指导农业生产,保持和改善土壤质量。

1 材料与方法

1.1 采样地区概况

供试土样采自陕西关中地区杨凌渭河头道塬区农田表层(0—20 cm)土壤,土壤类型属由黄土母质上发育的塿土(系统分类为土垫旱耕人为土,*Earth-cumuli-orthic anthrosols*)。塿土是具有人为土粪堆垫层的人为影响下形成的土壤,土粪堆垫层是因为长期施用大量土杂肥形成的,由于早期村庄分布稀疏,受到运输条件限制,土粪培肥呈现距离村庄越远,土粪施用量越少的规律,由此造成了塿土发育形成后土壤肥力等性质存在一定差异。

杨凌地区年平均降水量为 650.6 mm、年平均气温为 12.9℃、无霜冻日数为 219 d/a、平均日照时数为 2196 h、活动积温为 4185.0℃、总辐射量为 114.8 kcal/cm^2。多年来实行小麦—玉米一年两熟轮作种植制度。

1.2 样品采样及制备方法

于 2010 年 4 月小麦返青期进行采样。选择在同一个地区具有相同土壤发生学特性和物理特性、依据田间小麦长势和实地调查情况,判断在具有 3 种肥力水平的田块里设置采样点,并在长势较好、长势一般和长势相对较差的农田各选取 2 块田作试验重复,在每块农田按照"S"型布置了 15 个采样点,分别采集耕层原状土壤样品和扰动样品。原状土样品用塑料饭盒盛装,防止运输过程中被破坏,在室内风干过程中沿自然裂隙用手掰成直径在 1 cm 以上的小土块,用作团聚体组成和稳定性的测定。扰动土样在室内经风干过筛后用于土壤质地和土壤肥力测定,其中供试土壤质地测定用吸管法,供试土壤砂粒(0.05 ~ 1 mm)含量为 18.4% ~ 20.3%,粉粒(0.001 ~ 0.05 mm)含量为 46.8% ~ 47.6%,粘粒(<0.001 mm)含量为32.1% ~ 34.8%,物理性粘粒(<0.01 mm)含量为 54.8% ~ 57.2%,依据卡庆斯基质地分类制,供试土壤的质地类型为重壤质,3

种肥力水平的土壤质地无显著差异。土壤其它理化性状见表 1。土壤有机质含量用丘林法测定,土壤碱解氮含量用扩散法测定,土壤速效磷含量用 Olsen 法测定,土壤速效钾含量用 NH_4OAc 提取—火焰光度法测定,土壤碳酸钙含量用气量法测定[15]。根据测定结果将样品分为高、中、低 3 个肥力等级。根据表 1 结果,供试土壤肥力等级差异明显。供试土壤属于石灰性母质,其碳酸钙作为无机胶结剂在团聚体稳定性方面具有重要作用,3 种肥力土壤碳酸钙含量虽然有差异,但未达到显著水平。

表 1　供试土壤肥力状况

Table 1　Fertility situation of tested soil

肥力水平 Fertility level	有机质 Organic matter (g/kg)	碱解氮 Alkaline hydrolysable N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	碳酸钙 Calcium carbonate (g/kg)
高 High	30.4 ±0.56 a	147.3 ±3.22 a	112.2 ±6.72 a	365.2 ±8.82 a	86.6 ±0.024 a
中 Middle	23.1 ±0.72 b	113.4 ±4.71 b	55.1 ±2.81 b	222.7 ±4.49 b	84.3 ±0.016 a
低 Low	17.8 ±0.68 c	77.7 ±0.53 c	25.2 ±0.35 c	166.7 ±2.99 c	82.5 ±0.032 a

注(Note): 同列数据后不同字母表示不同肥力水平间差异达到5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at the 5% level.

1.3　土壤团聚体稳定性分析

1.3.1 土壤团聚体机械稳定性分析　团聚体机械稳定性测定采用干筛法,在电震动筛分机上进行干筛[16]。将自然风干的原状土样先除去植物残体及小石块。每次取 100 g,放入最大孔径(10 mm)的土壤筛上面,套筛下边的土壤筛孔径依次为 7、5、3、2、1、0.5 及 0.25 mm,底层放置底盒,以备收取 < 0.25 mm 的土壤团聚体。将盛土套筛放在电振荡筛分机上筛分 5 min,依次取样并称量,按照团聚体直径大小依次分为 < 0.25 mm、0.25 ~ 0.5 mm、0.5 ~ 1 mm、1 ~ 2 mm、2 ~ 3 mm、3 ~ 5 mm、5 ~ 7 mm 和 7 ~ 10 mm 共计 8 个级别,计算干筛后土壤团聚体组成情况。

1.3.2 土壤团聚体化学稳定性分析　土壤团聚体化学稳定性采用了在不同浓度氮肥盐溶液中湿筛分散、分级定量的研究方法。湿筛采用萨维若夫(Саввинов)法,以干筛法所得土壤团聚体的组成百分比为基础,从各级别团聚体中称量,组配成用于湿筛的土壤样品 50 g,为了防止堵塞筛孔,样品不含 < 0.25 mm 的微团聚体,将样品放入 500 mL 三角瓶中,每个土样重复 4 次。试验处理分别设置 0 mol/L (纯水)、0.1 mol/L、0.3 mol/L、0.5 mol/L 的 NH_4Cl 氮肥溶液共计 4 个水平,取各浓度氮肥溶液 300 mL,沿三角瓶壁缓慢加入以便湿润土样,然后浸润土样 24 h,将经过浸润处理的土壤样品分别转入容量为 1000 mL 的沉降筒中,补加各浓度氮肥溶液至 600 mL 处,拧紧沉降筒塞的螺母以便密封,匀速转动手柄 5 min(30 次/min),使土壤样品在溶液中被冲击与分散。将分散完成后的土壤样品转移至淹埋在水中的筛孔从上到下分别为 5 mm、3 mm、2 mm、1 mm 及 0.25 mm 的一组套筛上,在水中上下晃动数次后,将留到各级筛子上的团聚体冲洗入蒸发皿,在水浴锅上蒸干后移入烘箱烘至恒重并称重,测定在不同盐溶中经湿筛后的土壤团聚体组成。

1.4　数据处理

对测定后获得的数据,分别计算 > 0.25 mm 团聚体的含量($R_{0.25}$),平均重量直径(MWD),几何均重直径(GMD),团聚体破坏率(PAD)等指标[17],用于评价团聚体的稳定性。

为了更直观地分析盐浓度对土壤团聚体的作用,本文将土壤团聚体破坏率(PAD)稍作修改,表达为 $PAD_{x/w}$,姑且称之为"土壤团聚体盐破坏率"。

$$PAD_{x/w} = \frac{W_w - W_x}{W_w} \times 100\% \qquad (1)$$

式中: W_w 表示在纯水中湿筛后直径 > x (mm) 的团聚体重量百分含量; W_x 表示在盐溶液中经湿筛处理后直径 > x (mm) 的土壤团聚体的重量百分含量。$PAD_{x/w}$ 若为正值,表示盐溶液处理后土壤团聚体稳定性能降低(分散),$PAD_{x/w}$ 若为负值则表示盐处理后土壤团聚体稳定性能增加(抑制分散),数值的绝对值越大,表明作用越明显。

数据采用 SPSS 17.0 软件进行显著性检验和相关性分析,多重比较采用邓肯法。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体机械稳定性与肥力水平的关系

土壤团聚体机械稳定性可以用经震动干筛后团聚体组成情况来衡量。表层团聚体的机械稳定性用来度量抗机械破坏的能力,决定着土壤的气体交换、抗风蚀的能力,与土壤肥力水平有着明显的相关性。图1为不同肥力水平团聚体组成的累计曲线,表明在土壤颗粒组成与其它化学性状基本一致的情况下,不同肥力水平土壤团聚体的机械稳定性差异明显。肥力水平较低土壤的机械稳定性的团聚体在直径较小区域内递增明显,表明其团聚体稳定性较差;高肥力土壤的机械稳定性团聚体是在直径较大范围区域才明显递增,说明其团聚体稳定程度较高。

从表2可以看出,3种肥力水平土壤之间>0.25mm团聚体的质量百分含量($R_{0.25}$)、团聚体的平均质量直径(MWD)值和几何均重直径(GMD)值均有不同程度的差异性,统计分析显示,相同肥力水平不同重复处理间其差异不明显,而在不同肥力水平间其差异达到显著或极显著水平,表明土壤肥力水平较高的土壤团聚体各项指标值较大,稳定性差异较为明显。

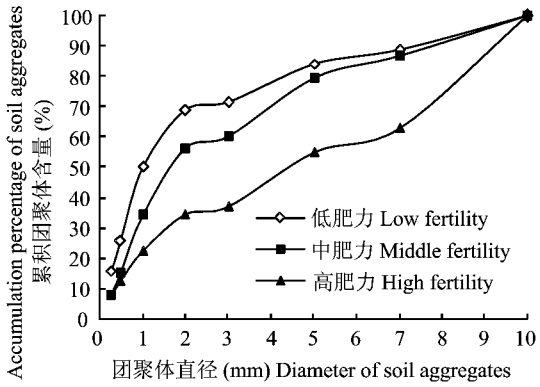

图1 土壤团聚体累积曲线

Fig.1 Accumulation curve of soil aggregation

表2 土壤机械稳定性团聚体性状

Table 2 Characteristics of the mechanically stable aggregates

肥力水平 Fertility level	大于0.25 mm团聚体百分含量(%) Percentage of > 0.25 mm aggregates($R_{0.25}$)	平均重量直径 MWD (mm)	几何均重直径 GMD (mm)
高 High	92.2±1.20 a	4.67±0.06 a	2.99±0.04 a
中 Middle	92.4±0.35 a	2.93±0.49 b	1.74±0.35 b
低 Low	85.2±0.78 b	2.32±0.32 b	1.12±0.14 b

注(Note): MWD—Mean weight diameter; GMD—Geometric mean diameter. 不同字母表示不同肥力水平间差异达到5%显著水平 Different letters in a column mean significant among different fertility levels at the 5% level.

2.2 土壤团聚体水稳定性与肥力水平的关系

土壤团聚体的水力学稳定性是评价土壤质量的重要指标,它直接关系到土壤水分的入渗性能与保蓄能力,也是评价土壤抗水蚀性的重要指标。在纯水中湿筛后的土壤团聚体组成同样与土壤肥力水平之间表现出明显的相关性。不同肥力水平土壤的水稳性团聚体组成见表3。

表3 水稳定性团聚体组成

Table 3 Composition of the water-stable aggregates

肥力水平 Fertility level	水稳定性团聚体含量 Contents of water-stable aggregates(%)					
	>5 mm	5～3 mm	3～2 mm	2～1 mm	1～0.25 mm	<0.25 mm
高 High	0.26 a	0.70 a	0.84 a	1.26 a	11.01 a	85.93 c
中 Middle	0.59 a	0.34 b	0.37 a	0.76 a	8.71 b	93.73 b
低 Low	0.22 a	0.07 b	0.28 a	0.49 a	3.87 c	95.07 a

注(Note): 不同字母表示不同肥力水平间差异达到5%显著水平 Different letters in a column mean significant among different fertility levels at the 5% level.

威廉姆斯(Вильямс)认为,直径 >0.25 mm 的团聚体是评价土壤结构性能的重要指标[18],从表 3 可以看出,不同肥力土壤间直径 <0.25 mm 的水稳性团聚体含量存在显著差异,呈现为土壤肥力水平越高, <0.25 mm 水稳性团聚体含量明显减少,也意味着 >0.25 mm 的水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)就越多(表 4),供试土壤团聚体的 MWD 值和 GMD 值等指标与 $R_{0.25}$一样,也均与土壤肥力水平间呈现出不同程度的相关性,同样表现为肥力水平越高,其数值越大的规律。不同大小的团聚体具有不同的农学价值和水文学及环境学价值,直径过大的团聚体间孔隙过大,易漏水漏肥,过小团聚体遇水易堵塞孔隙,影响水分入渗和土壤气体交换。就供试土壤而言,肥力较高土壤的直径在 0.25 ~5 mm 间的水稳性团聚体含量明显高于中低等肥力的土壤,特别是直径在 0.25 ~1 mm 的水稳性团聚体含量随着土壤肥力的下降显著降低。不同肥力水平间直径 >5 mm 水稳性团聚体含量没有显著差异。如果按照 Вильямс、Соколовский、Саввинов 等人[19]提出的直径在 1 ~5 mm 的团聚体才是农业上最有价值的观点看,供试土壤级别的水稳性团聚非常少,整体上其团聚体水稳性很差,但是直径在 1 ~5 mm 的水稳性团聚体含量与土壤肥力水平间却存在着显著的相关性,高肥力土壤该级别团聚体为 2.80%,中肥力土壤为 1.47%,低肥力土壤仅为 0.84%,证明培肥土壤有助于改善土壤团聚体状况。

团聚体破坏率是表征其稳定性的重要指标,表 4 表明,直径 >0.25 mm 团聚体的破坏率($PAD_{0.25}$)随着土壤肥力的变化呈现极显著的变化规律,土壤肥力越高,湿筛后团聚体遭到的破坏程度越小,表征着其团聚体的水稳定性就越强,相反,肥力水平较低者,团聚体的水稳性很差,培肥土壤有助于改善土壤团聚体的质量。

表 4　土壤水稳定性团聚体性状

Table 4　Characteristics of the water-stable aggregates

肥力水平 Fertility level	大于 0.25 mm 团聚体百分含量 Percentage of > 0.25 mm aggregates($R_{0.25}$) (%)	平均重量直径 MWD (mm)	几何均重直径 GMD (mm)	团聚体破坏率 $PAD_{0.25}$ (%)
高 High	14.1 ±0.06 a	0.26 ±0.03 a	0.17 ±0.02 a	83.4 ±0.60 c
中 Middle	10.5 ±0.38 b	0.23 ±0.01 b	0.15 ±0.01 b	88.3 ±0.90 b
低 Low	4.9 ±0.04 c	0.17 ±0.01 b	0.13 ±0.02 c	94.2 ±0.65 a

注(Note): MWD—Mean weight diameter; GMD—Geometric mean diameter; $PAD_{0.25}$—Percentage of aggregate chemical destruction. 数值后不同字母表示不同肥力水平间差异达到5%显著水平 Values followed by different letters in a column mean significant among different fertility levels at the 5% level.

2.3　土壤团聚体化学稳定性与肥力水平的关系

土壤中的化学物质通过离子交换过程改变胶体上的离子组成、影响矿物膨胀性能,土壤溶液中化学物质溶解团聚体的胶结剂使大团聚体分散和破坏,也可以通过电解质对分散粘粒的絮凝作用促进团聚化作用影响团聚状况。长期使用化学物质对团聚状况及其对团聚体质量的影响一直是学术界关注的重要问题。

$R_{0.25}$和 GMD 是表征土壤团聚体组成的参数[20],就此而言,由图 2 和图 3 首先可以清楚地看出不同肥力土壤在不同浓度氯化铵溶液湿筛处理后,直径 >0.25 mm 的团聚体含量和 GMD 值均随着土壤肥力水平的增加而提高,证实提高土壤肥力改善了土壤团聚状况。其次,与用纯水湿筛对照处理相比,经不同浓度氯化铵溶液处理的土壤其 $R_{0.25}$总体上也有增大趋势(图 2),说明氯化铵溶液处理增加了直径 >0.25 mm 的团聚体含量。图 3 表明,不同肥力水平土壤在不同盐溶液中湿筛后,其团聚体几何均重直径(GMD)变化规律有明显的差异性。对于低肥力土壤而言,较低浓度氯化铵(0.1、0.3 mol/L)处理土壤 GMD 值增大,当氯化铵溶液浓度达到 0.5 mol/L 时,GMD 值减小; 但氯化铵溶液处理土壤的 GMD 值始终大于纯水处理。对于中、高肥力土壤,0.1 mol/L 氯化铵处理的 GMD 值小于不加盐处理,0.3 mol/L 和 0.5 mol/L 氯化铵处理的土壤 GMD 值均大于不加盐处理。盐溶液对不同肥力土壤团聚体组成有一定的影响,其影响程度既取决于土壤的肥力水平,也取决于盐溶液浓度。不同性

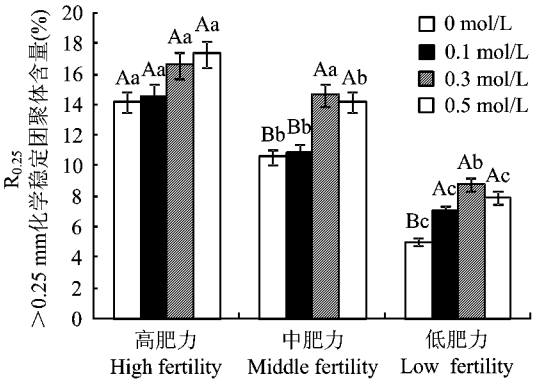

图2 不同浓度的氯化铵溶液对>0.25 mm化学稳定性团聚体含量的影响

Fig. 2 Effect of different NH_4Cl concentrations on $R_{0.25}$ (percentage of >0.25 mm of chemical-stable aggregates)

[注(Note): 方柱上不同大写字母表示相同肥力不同氯化铵浓度间的差异达到5%显著水平,不同小写字母表示相同氯化铵浓度的不同肥力间的差异达到5%显著水平 Different capital letters above the bars mean significant among different NH_4Cl concentrations at the 5% level under the same fertility level, and the different lowercase letters mean significant among different fertility levels at the 5% under the same NH_4Cl concentration.]

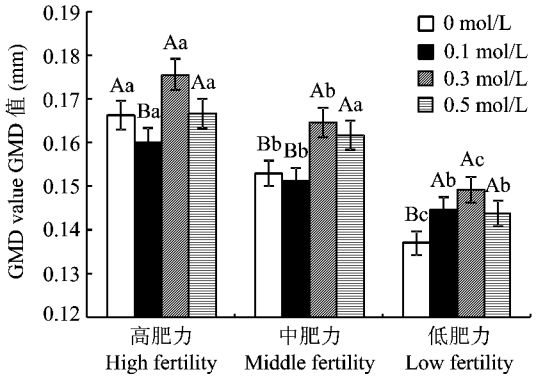

图3 不同浓度的氯化铵溶液对土壤化学稳定性团聚体GMD值的影响

Fig. 3 Effect of different NH_4Cl concentrations on GMD of chemical-stable aggregates

[注(Note): GMD—Geometric mean diameter. 方柱上不同大写字母表示相同肥力不同氯化铵浓度间的差异达到5%显著水平,不同小写字母表示相同氯化铵浓度不同肥力间的差异达到5%显著水平 Different capital letters above the bars mean significant among different NH_4Cl concentrations at the 5% level under the same fertility level, and the different lowercase letters mean significant among different fertility levels at the 5% under the same NH_4Cl concentration.]

状的土壤中未被团聚的活性粘粒含量不同,盐分对其团聚化过程的作用方向不同。

$R_{0.25}$和GMD等只能表征土壤团聚体组成的整体状况,不能作为受外界因素影响条件下团聚体变化方向和变化程度的敏感指标。表5显示经不同浓度氯化铵溶液处理后,3种不同肥力水平土壤团聚体组成表现出的变化规律。一般情况而言,随氯化铵溶液浓度递增,有破坏土壤中直径>2 mm的且最有农业价值的较大水稳性团聚体的含量,增加直径0.25～2 mm较小团聚体含量的趋势。

对较大团聚体的分散是在中、高肥力土壤上有所显现的,是因为该地区土壤水稳性团聚体较少的

表5 土壤化学稳定性团聚体组成

Table 5 Distribution of the soil chemical-stable aggregates

肥力水平 Fertility level	团聚体直径(mm) Diameter	团聚体组成 Soil aggregates composition(%)			
		0 mol/L NH_4Cl	0.1 mol/L NH_4Cl	0.3 mol/L NH_4Cl	0.5 mol/L NH_4Cl
高 High	>2	1.8±0.02	1.4±0.04	1.5±0.05	1.3±0.02
	0.25～2	12.3±0.15	13.1±0.06	15.0±0.14	15.9±0.24
	<0.25	85.9±1.06	85.5±1.91	83.5±1.68	82.8±1.82
中 Middle	>2	1.9±0.08	1.1±0.03	0.9±0	1.0±0.02
	0.25～2	8.9±0.05	9.4±0.12	13.6±0.12	13.1±0.11
	<0.25	89.2±0.78	89.5±0.13	85.5±1.62	85.9±1.24
低 Low	>2	0.6±0	0.8±0.02	0.7±0	0.7±0.03
	0.25～2	4.3±0.06	6.2±0.08	8.0±0.03	7.2±0.12
	<0.25	95.1±0.04	93.0±2.05	91.3±2.23	92.2±2.11

缘故,使得这种规律表现得不显著。但随着氯化铵浓度增加,土壤中直径为 0.25 ～2 mm 较小团聚体的含量却显著增加,一方面是因为较大团聚体被分散的缘故,另一方面是电解质溶液对土壤中未被团聚颗粒的絮凝和对较小微团聚体的进一步团聚作用的缘故,后一种效应在低肥力土壤上表现得较为明显。实验资料证实土壤溶液中无机化学物质对大团聚体的分散和对小团聚体的再团聚作用同时存在,使得土壤团聚体组成趋向单一均质化,作用结果不符合优质土壤对多级团聚体组成的要求。

盐分对土壤团聚体稳定性的影响才是揭示长年使用化学物质条件下农田土壤团聚体状况变化的核心内容。图 4 为根据公式(1),且以纯水处理为基础计算的不同浓度氯化铵溶液处理后"土壤团聚体盐破坏率"的基本情况,用 $PAD_{0.25/w}$表示。由此可以看出,在不同浓度的氯化铵溶液中湿筛后,各肥力土壤团聚体盐破坏率都为负值,表明在供试氯化铵溶液浓度范围内各处理均有明显抑制土壤团聚分散的作用。至于抑制原因尚待深入研究,将在另外文章中予以讨论。不同肥力水平土壤团聚体对盐溶液的反应具有显著不同的灵敏度。对于高肥力土壤而言,其团聚化程度与水平相对较高,团聚体稳定性对盐溶液的反应敏感性要比中、低肥力土壤对盐溶液的敏感性差很多。中、低肥力土壤的团聚化程度低,对盐溶液的反应极为强烈。

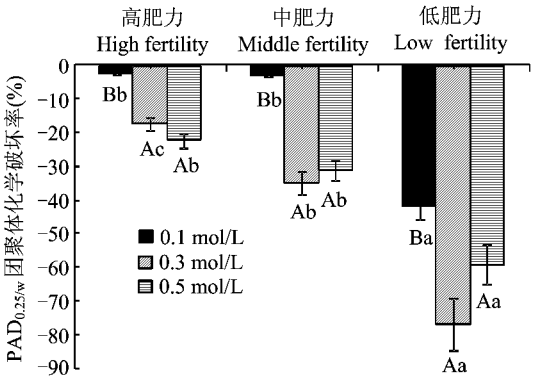

图 4　不同肥力水平下土壤团聚体化学破坏率

Fig. 4　Percentages of aggregate chemical destruction under different soil fertility levels

[注(Note): $PAD_{0.25/w}$—Percentage of aggregate chemical destruction. 方柱下不同大写字母表示相同肥力不同氯化铵浓度间的差异达到 5% 显著水平,不同小写字母表示相同氯化铵浓度不同肥力间的差异达到 5% 显著水平 Different capital letters below the bars mean significant among different NH_4Cl concentrations at the 5% level under the same fertility level, and the different lowercase letters mean significant among different fertility levels at the 5% under the same NH_4Cl concentration.]

3　讨论

长期给土壤投入化学物质,对土壤团聚体有明显的作用和影响,化学物质对于土壤团聚体既可能产生促进作用,也可能产生分散与破坏作用。同时,土壤肥力水平与团聚化程度不同,对外源化学物质的反应也有所不同。

相关研究表明,土壤团聚体破坏率与有机质含量的相关系数达 0.8898[9],土壤有机质含量越高,团聚体破坏率越低。本文研究不仅同样证实了有机质含量较高的土壤团聚体的机械稳定性和水稳定性均高于有机质含量相对较低的土壤,而且得出了团聚化水平较高的土壤对化学物质反应的程度低,而团聚化较低的土壤对化学物质的反应极为强烈。化学物质对较大直径的土壤团聚体有破坏作用,对于较小团聚体有提高作用,使得多级的土壤团聚体趋向于单一化。土壤有机质含量不同,团聚化水平差异很大,未被团聚的活性颗粒多少也有不同,化学氮肥溶液对于大团聚体的破坏和对分散颗粒絮凝[20]及对微团聚体再团聚的作用程度不同。关中地区农田土壤有机质含量少,团聚体主要依靠无机碳酸钙为胶结剂,而氯化铵溶液呈弱酸性,对土壤中碳酸钙的溶解作用(石灰反应),会增加溶液中钙离子(Ca^{2+})含量,钙离子对粘粒的絮凝能力较强,且与粘粒和有机质结合形成有机 - 无机复合体,从而促进团聚化作用,故氯化铵溶液对大团聚体的分散作用小于团聚作用。其次任何电解质对团聚体既有分散破坏的作用,又有团聚作用,关键取决于浓度大小。已有研究发现,增大土壤溶液中的氯化钾浓度,有利于土壤中较小团聚体的形成,且能够增加团聚体稳定性[21],土壤溶液中氯化钾能够增大土壤中小团聚体的含量和稳定性,并且能够增大土壤的剪切力[22]。对于供试的 3 种氯化铵溶液浓度而言,超过了氯化铵对颗粒的絮凝极限(0.0250 ～0.0125 mol/L[23]),使得本试验土壤在氯化铵溶液作用下呈现的团聚作用显著于破坏作用。在田间土壤溶液中电解质的浓度一般很低,故对团聚体的破坏作用不得小视。不过团聚化程度高的土壤对盐的反应敏感度差,因此培肥土壤仍然是关键措施。

4　结论

土壤团聚体的机械稳定性和水稳定性都与土壤

肥力水平之间表现出明显的相关性,土壤肥力越高团聚体稳定性越强。氮肥盐溶液进入土壤后,在分散大团聚体的同时,对微团聚的粘粒有絮凝作用,还对微团聚体具有再团聚作用,溶液浓度越大对 >2 mm 的大团聚体的破坏作用越显著,对 <0.25 mm 的微团聚体的再团聚作用也越明显,在盐溶液作用下土壤团聚体组成向 0.25 ~2 mm 的较小直径范围内集中,降低了团聚体质量,破坏了土壤多级团聚体组成体系。土壤团聚体组成对氮肥溶液的响应程度与土壤肥力水平也存在着显著的相关关系,团聚化程度较高的高肥力土壤受氮肥溶液的影响较弱,而团聚化程度相对较低的中、低肥力土壤对氮肥溶液的响应则较为强烈。土壤肥力水平对团聚体的机械稳定性、水稳定性和化学稳定性都起到一定的作用。

参考文献:

[1] 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.
Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(3): 415-421.

[2] 宇万太,沈善敏,张璐,等. 黑土开垦后水稳性团聚体与土壤养分的关系[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2287-2291.
Yu W T, Shen S M, Zhang L *et al*. Relationships between water-stable aggregates and nutrient status in black soil after reclamation [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(12): 2287-2291.

[3] 戴全厚,刘国彬,薛萐,等. 侵蚀环境退耕撂荒地水稳性团聚体演变特征及土壤养分效应[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 61-64, 77.
Dai Q H, Liu G B, Xue S *et al*. Dynamics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties on abandoned Arable Land in Eroded Hilly Loess Plateau [J]. J. Soil Water Conserv., 2007, 21(2): 61-64, 77.

[4] 袁德玲,张玉龙,唐首锋,等. 不同灌溉方式对保护地土壤水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 126-128, 134.
Yuan D L, Zhang Y L, Tang S F *et al*. Effect on soil water-stable aggregates of different irrigation methods in protected field[J]. J. Soil Water Conserv., 2009, 23(3): 126-128, 134.

[5] 张治伟,傅瓦利,张洪,等. 石灰岩土壤结构稳定性及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 164-168.
Zhang Z W, Fu W L, Zhang H *et al*. Study on structural stability of limestone soil and its influencing factors [J]. J. Soil Water Conserv., 2009, 23(1): 164-168.

[6] 陈欣,史奕,鲁彩艳,王国宏. 有机物料及无机氮对耕地黑土团聚体水稳性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 284-287.
Chen X, Shi Y, Lu C Y, Wang G H. Effect of organic materials and inorganic N on water stability of aggregates in cultivated black soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(3): 284-287.

[7] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
Liu E K, Zhao B Q, Mei X R *et al*. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(4): 1035-1041.

[8] Lu S G. Role of organic matter in formation and stability of aggregates in mulberry plantation soils[J]. Pedosphere, 2001, 11(2): 185-188

[9] 姜灿烂,何园球,刘晓利,等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 715-722.
Jiang C L, He Y Q, Liu X L *et al*. Effect of ling-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2010, 47(3): 715-722.

[10] 赵红,袁培民,吕贻忠,李季. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 306-311.
Zhao H, Yuan P M, Lü Y Z, Li J. Effects of organic manure application on stability of soil aggregates [J]. Soils, 2011, 43(2): 306-311.

[11] 王胜涛. 耕作和有机物质投入对土壤碳库和团聚体稳定性的影响[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2005.
Wang S T. Effect of farming and organic application on soil carbon content and aggregates stability[D]. Beijing: MS thesis, China Agricultural University, 2005.

[12] 安婷婷,汪景宽,李双异,等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 369-373.
An T T, Wang J K, Li S Y *et al*. Effects of manure application on organic carbon in aggregates of black soil[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(2): 369-373.

[13] Zhang M K, He Z L, Chen G C *et al*. Fornation andwater stability of aggregates in red soil as affectted by organic matter [J]. Pedosphere, 1996, 6(1): 39-45.

[14] 李江涛,张斌,彭新华,赖涛. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 912-917.
Li J T, Zhang B, Peng X H, Lai T. Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(6): 912-917.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-81.
Bao S D. Soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 25-81.

[16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978. 514-518.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis of soil[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 514-518.

[17] Guber A K, Pachepsky Y A, Levkovsky E V. Fractal mass size

scaling of wetting soil aggregates[J]. Ecol. Model., 2005, 182: 317-322.

[18] 姚贤良，程云生. 土壤物理学[M]. 北京：农业出版社，1986.
Yao X L, Cheng Y S. Soil physics [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.

[19] 柯夫达 B A(陆宝树，等译). 土壤学原理(上册)[M]. 北京：科学出版社，1981. 236-246.
Ковда B A (Lu B S *et al* Trans.). Soil science principle(Vol. 1)[M]. Beijing: Science Press, 1981. 236-246.

[20] van Olphen H. Dispersion and flocculation [A]. Newman A C D (Ed.). Chemistry of clays and clay minerals. mineralogical society monograph No. 6. Burnt Mill [M]. Harlow: Longman Scientific Technical, 1987. 203-224.

[21] Markgraf W, Horn R. Rheological-stiffness analysis of K-treated and $CaCO_3$-rich soils [J]. Plant Nutr. Soil Sci. 2006, 169 (3): 411-419.

[22] Dörthe H, Stephan P, Horn R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters[J]. Soil Till. Res., 2010, 111(1): 75.

[23] И·列乌特，李云龙，张介涛. 农业物理学[J]. 物理，1961，(1)：7-11.
И·Reut, Li Y L, Zhang J T. Agricultural physics[J]. Physics, 1961, (1): 7-11.

欢迎订阅 2013 年《中国土壤与肥料》（原《土壤肥料》）

《中国土壤与肥料》1964 年创刊，是农业部主管、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所和中国植物营养与肥料学会主办的全国性专业技术期刊，为中国科技核心期刊、全国中文核心期刊。属科技部“中国科技论文统计源期刊”以及《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》和《美国化学文摘》来源期刊，“中国期刊全文数据库”全文收录期刊。本刊以促进土肥科技发展、加快成果转化为宗旨。主要刊登土壤资源与利用、植物营养与施肥、农业微生物、农业水资源利用、分析测试、环境保护、生态农业等方面的新理论、新技术、新产品的试验研究成果与动态。办刊时间长、发行量大、信息丰富、实用性强，在广大读者中有广泛影响。读者对象为农业科研、教学、推广、环保与肥料生产、经营部门的科技、管理人员及农民技术员。

本刊国内外公开发行，国内标准刊号：CN11-5498/S，国际标准刊号：ISSN1673-6257。双月刊，大 16 开，110 页，彩色四封，彩色和黑白广告插页。每期定价 8.00 元，全年 48.00 元，全国各地邮局订阅，邮发代号 2-559。漏订者可与本刊编辑部联系。

欢迎登录本刊网站(http://chinatrfl.alljournal.net.cn)进行在线投稿、查阅稿件处理情况及了解本刊的更多信息。

本刊欢迎刊登有关土壤肥料的产品、加工机械和分析仪器等方面的广告。

地址：北京市海淀区中关村南大街 12 号
中国农科院农业资源与农业区划研究所
《中国土壤与肥料》编辑部　邮编：100081
电话：010-82108656　传真：010-82108656、82106225
E-mail：TRFL@caas.ac.cn