植物营养与肥料学报 2014,20(4):1012-1020
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0425

湿筛过程中分散液的质量对土壤团聚体稳定性的影响

徐爽,王益权*
(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】土壤团聚体是土壤结构的基本单元,决定着土壤在生态系统中的作用和功能。保持良好的结构状态和稳定的结构性能是确保土壤水、肥、气、热肥力因子协调的基本条件。现代土壤管理中大量使用的化肥无机盐以及灌溉水体富含的离子都会造成对团聚体的破坏,本文以富含有机质的黑土为研究对象,探索湿筛过程中分散溶液的质量对团聚体稳定性的影响。**【方法】**以氯化钠、氯化钙和氯化铝3种不同价态的阳离子溶液为介质,采用改进的萨维若夫(Саввинов)法进行湿筛,设置0(不加盐去离子水,CK)、0.1、0.3、0.5 mol/L 4个浓度水平,研究直径≥0.25 mm的土壤团聚体在不同阳离子盐溶液作用下的稳定性。**【结果】**不同盐溶液中黑土团聚体的稳定性差异很大。在氯化钠盐溶液中,黑土团聚体的盐破坏率($PAD_{0.25/w}$)均为正值,且随钠盐溶液浓度的增大而增加,在浓度为0.1、0.3和0.5 mol/L的氯化钠溶液中分别为0.21%、10.7%和14.4%。在氯化钙溶液和氯化铝溶液中,黑土$PAD_{0.25/w}$均为负值,氯化钙溶液中$PAD_{0.25/w}$的绝对值随着盐浓度的增大而减小,氯化铝溶液中$PAD_{0.25/w}$的绝对值均在51%以上。**【结论】**一价盐溶液加剧了0.25~1 mm黑土团聚体的分散,但能够保护直径1 mm以上的团聚体,而二价盐和三价盐溶液对团聚体的分散有明显的抑制和保护作用。

关键词:湿筛法;黑土;盐离子;团聚体稳定性
中图分类号:S152.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2014)04-1012-09

Effect of quality of dispersing solutions on soil aggregates stabilities during the wet-sieving test

XU Shuang, WANG Yi-quan*
(*Resource and Environment College, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi712100, China*)

Abstract:【Objectives】Soil aggregates are the basic units of soil structure. Sufficient chemical stability of soil aggregates is necessary for maintaining good soil moisture and fertility. Large amount of cations are brought into soil through fertilization and irrigation, which affect the aggregates stability to some extent. In this paper, the stability of aggregate in organic-rich black soil was determined in the three cation solutions. **【Methods】**Three kinds of cation solution, sodium chloride, chlorinated calcium chloride and aluminum chloride with four concentrations 0 mol/L (de-ionized water without salt, CK), 0.1 mol/L, 0.3 mol/L and 0.5 mol/L are set up as media, and the stability of soil aggregates (≥0.25 mm in size) was tested using an improved Savi Chizhov (Саввинов) method. **【Results】**The results show that the stabilities of soil aggregate ($PAD_{0.25/W}$ values) are quite different in different salt solution media. In sodium chloride solution, $PAD_{0.25/W}$ values are all positive, and the soil aggregate destruction rate is increased with the salt concentration, the $PAD_{0.25/W}$ values are 0.21%, 10.7% and 14.4% in 0.1, 0.3 and 0.5 mol/L of sodium chloride solution, respectively, showing the dispersion effect of the sodium salt to soil aggregates. In calcium chloride and aluminum chloride solutions, the $PAD_{0.25/w}$ values are negative, and the absolute value of $PAD_{0.25/w}$ is decreased with the increase of salt concentrations. Inside the aluminum chloride

收稿日期:2013-09-09 **接受日期:**2013-12-24
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,主要从事土壤物理和土壤改良研究。E-mail:xush0225@sina.com
* 通信作者 E-mail:soilphysics@nwsuaf.edu.cn

solutions, all the absolute $PAD_{0.25/w}$ values are higher than 51%. 【**Conclusions**】Monovalent salt solution exacerbates the dispersion of 0.25 -1 mm aggregates, protects the aggregates of more than 1 mm in diameter from dispersion. Divalent salt and trivalent salt show inhibition and protection to the dispersion of aggregates showing ability of strengthen soil aggregates.

Key words: wet-sieving test; cation; black soil; soil aggregate stability

团聚体稳定性是土壤质量的重要指标之一，它是指抵抗各种外力作用或外部环境变化，保持原有形态及功能的能力。团聚体稳定性受到土壤本身颗粒组成、矿物类型、胶结物质类型等的影响，也受环境变化、生物活动以及人为管理等诸多外部因素的影响。土壤有机碳（SOC）、生物体（植物根系、真菌菌丝和细菌等）、阳离子键桥、粘粒和无机氧化物及碳酸盐含量等作为胶结剂是左右团聚体稳定性的直接因素[1]。胶结剂数量与类型不同，对环境因素以及其它外加物质的反应不同，使得团聚体的稳定性差异很大。有机质是我国东北黑土地区土壤团聚体的主要胶结剂，也是制约团聚体稳定性的主要决定因素之一，其含量的降低会使直径较大的水稳性团聚体质量分数随之下降[2-3]。关于黑土团聚体稳定性已经有众多学者进行了卓有成效的研究，史奕等[4]研究了不同培肥模式和耕作制度对于黑土团聚体稳定性的影响；高鲁鹏等[5]对自然状态下土壤有机碳的递减率变化过程中团聚体的变化进行过研究；沈善敏[6]研究了黑土开垦后土壤养分与土壤团聚体稳定性的关系。Edwards 和 Bremner[7] 提出，直径大于 250 μm 的大团聚体是由粘粒-多价金属-有机质复合体所组成。Tiadall 和 Oades[1] 根据有机质年龄及变化情况以及对于团聚体稳定性的影响，将有机胶结剂分为瞬变性胶结剂、临时性胶结剂和持久性胶结剂 3 大类。国内外的研究文献集中体现为有机物作为黑土的主要胶结剂，其含量、状态和可矿化性对于团聚体稳定性的作用和影响。

不同价态的阳离子对土壤团聚体的形成和维持团聚体稳定性起着重要作用。粘土悬液是一个不稳定的憎水胶体体系，分散状态的粘土在电解质的作用下产生絮凝，电解质对引起粘土悬液絮凝的最低浓度（临界凝聚浓度）主要由离子的价态决定[8]。曾路生等[9]测定了不同等级的土壤团聚体中一价和二价盐基离子的浓度，发现离子在大于 0.25 mm 的大团聚体中的含量高于在微团聚体中的含量，而二价离子在微团聚体中的降低比一价离子更加明显。一方面说明大团聚体对离子具有一定的保蓄能力，另一方面说明一价离子增加和二价离子的淋失可能导致团聚体分散，使土壤质量下降。团聚体的形成实质是粘粒通过多价金属阳离子的连接而吸附极性有机分子的过程，高价离子使得颗粒间的连接增强，结构更加紧密，增大了团聚性[10]。可见团聚体的稳定性对于进入土壤系统中水的质量响应差别很大，除了溶液中离子价态和浓度的因素外，水质还决定着团聚颗粒的胀缩性、决定着团聚体内胶结剂的溶解性，水质不同其表面张力不同，水分对土壤孔隙中压缩气体的溢出与封闭程度不同，这些均会影响团聚体的稳定性。以往关于土壤团聚体水稳定性的研究[11-14]主要集中于耕作方式及土壤养分与土壤水稳性团聚组成的关系，未曾考虑可溶性盐溶液对土壤团聚体组成的影响。不同价态和不同浓度可溶性阳离子溶液对土壤团聚体组成的影响具有一定的差异性。通过分析在不同价态和不同浓度阳离子盐溶液中湿筛后的土壤团聚体组成，可以反映可溶性阳离子对土壤团聚体稳定性的作用和影响。此外，对团聚体稳定性研究过程基本上是在纯水环境中进行的筛分处理来说，这也不符合土壤稀溶液这个客观实际，尤其当今给土壤逐年投入大量的无机化学物质，需要研究不同胶结类型团聚体对于投入化学品的反应，这对于揭示农田土壤质量演变趋势具有极为重要的科学意义和实际价值。在现代农业背景下，在已有的土壤团聚体机械稳定性、水稳定性和生物学稳定性研究的基础上，进一步建立团聚体的化学稳定性[15]的概念和理论是学科发展和客观现实的迫切需求，本文在不同价态的阳离子溶液中分析了富含有机质的黑土的团聚体组成及其稳定性，旨在探求有机胶结剂对于溶液化学物质的响应以及对于团聚体质量的作用，揭示目前土壤团聚体稳定性研究中的溶液质量对团聚体影响的规律。

1　材料与方法

1.1　供试土壤

供试土壤采自吉林省中部的榆树市，属季风性半湿润气候区，年平均温度为 4℃，年均降水量 500～700 mm，雨热同期。榆树市属长白山山前低平原

区,洪积母质。采样地区地势较平坦,土壤肥沃,土壤类型为典型黑土(系统分类为简育湿润均腐土,*Hapli- Udic Isohumosols*),主要粘土矿物类型为蒙脱石。土壤有机质含量 30.6 g/kg,碱解氮 131.26 mg/kg、是速效磷 25.66 mg/kg、速效钾 119.37 mg/kg、pH 6.3 呈微酸性,土壤容重为 1.13 g/cm^3。该地区多年来实行玉米一年一熟连作种植制度。

1.2 样品采集及测定方法

于玉米收获期选取相邻的 3 块长期施用有机肥的玉米农田作为采样区(作为 3 个重复),在每个采样区域按照"S"型布置了 15 个采样点,分别采集耕层(0—20 cm)原状土壤样品和扰动样品。采集原状土样品过程中,先用木盒固定四周轮廓并用小铲子挖取,挖取后将木盒封口直接盛装,防止运输过程中被破坏,同时在采样点周围用环刀采集原状土样用以测定土壤容重。扰动土样在每个采样点周围直接挖取,在室内风干后用四分法混合均匀过筛,用于土壤有机质及碱解氮、速效磷和速效钾等养分的测定。土壤容重用环刀法测定;有机质用丘林法;碱解氮用碱解扩散法;速效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼蓝比色法测定;速效钾用 NH_4OAc 提取—火焰光度法测定[16]。

土壤团聚体稳定性测定采用改进的萨维若夫(Саввинов)法[15]进行湿筛。将采集的原状土样在自然风干过程中沿结构体自然裂隙掰成直径约1 cm 的小块,待完全风干后,将多点采集的土壤样品小心混合均匀,然后全部过 0.25 mm 筛。为了研究较大土壤团聚体在不同阳离子盐溶液作用下的稳定性,仅称取直径大于 0.25 mm 的土壤团聚体样品 50 g,放入 500 mL 三角瓶中,共称取 36 份,编号为 1#~36#。土壤中阳离子的价态对团聚体的组成及其稳定性影响很大,为此本研究以 3 种可溶性氯化物盐溶液作为湿筛的溶液,其中一价盐为氯化钠,二价盐为氯化钙,三价盐为氯化铝,盐溶液浓度分别设 0 mol/L(不加盐去离子水,CK)、0.1 mol/L、0.3 mol/L、0.5 mol/L 4 个水平,从备用的 1#~36#样品中随机抽取 3 份作为每个溶液的试验重复,36 份样品随机抽样的处理样品编号对照见表 1。

表 1 随机抽样处理样品编号对照表

Table 1 Sample numbers corresponding to treatments

盐溶液类型 Type of salt solution	盐溶液浓度 Solution concentration(mol/L)											
	0			0.1			0.3			0.5		
	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3
NaCl	24#	32#	5#	17#	34#	20#	7#	14#	19#	3#	36#	12#
$CaCl_2$	35#	9#	23#	6#	25#	8#	1#	33#	30#	21#	22#	27#
$AlCl_3$	2#	18#	15#	4#	29#	31#	16#	26#	11#	28#	13#	10#

注(Note):R—重复 Repeat

先取配置好的盐溶液各 300 mL,沿三角瓶壁缓慢注入以浸润土壤样品,以防止溶液浸润期间在结构体内封闭的空气爆破作用对团聚体的影响,基于有机质含量高的土壤容易湿润的特点,土壤样品浸泡时间为 1h;再将经过浸泡处理的土壤样品分别转入 1L 的沉降筒中,并分别补加溶液至 600 mL,将沉降筒嵌于带有摇手的旋转架内,拧紧沉降筒口塞的螺母密封,防止在旋转期间样品流出损失,匀速转动手柄(5 min,30 次/min),使样品受到在旋转期间来自盐溶液的冲击。将分散后的土壤样品完全再转移至被水淹埋的孔径分别为 5、3、2、1 及 0.25 mm 的一组套筛上,待沉降筒中悬液完全转入筛后,将套筛在水中上下晃动数次,再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,移入烘箱烘至恒重后称重,获得在不同盐溶液中湿筛后土壤团聚体的组成。

1.3 数据处理

为了评价团聚体的稳定性,对测定所获数据,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)以及团聚体破坏率(PAD 值)等指标[17-19]。团聚体的分型维数 D 采用杨培玲[20]推导的公式进行计算。

试验数据采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,邓肯法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 黑土水稳性团聚体的基本组成

水力学稳定性团聚体是土壤质量的重要指标，因为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。表 2 显示，黑土水稳性团聚体的组成随着团聚体直径的增大，其百分含量有明显减少趋势。直径≥0.25 mm 的水稳性团聚体含量仅占 20.0% 左右，其中 0.25 ～ 1 mm 团聚体含量占总量的 14.8%，成为黑土中优势水稳性团聚体，直径 ≥1 mm 的团聚体含量仅占总量的 5.24%，黑土团聚体的水稳性相对较差，77% 以上属于微团聚体。

表 2　土壤水稳定性团聚体组成（%）

Table 2　Distribution of water-stable aggregates

团聚体直径 Diameter of aggregate（mm）							
砂粒 Sand	≥5	3～5	2～3	1～2	0.25～1	<0.25	≥0.25
2.88 ±0.62	0.00 ±0.00	0.90 ±0.17	2.21 ±0.49	2.13 ±0.14	14.8 ±0.80	77.1 ±1.09	20.0 ±1.09

2.2 黑土团聚体组成与水质中盐分类型及溶液浓度的关系

不同浓度的氯化钠溶液和氯化钙溶液对土壤团聚体组成没有显著影响，而用氯化铝溶液湿筛 <0.25 mm 团聚体的含量显著（$P < 0.05$）降低，而 0.25 ～ 1 mm 的团聚体含量增加（见表 3）。

表 3　在不同盐溶液中湿筛后黑土团聚体的组成（%）

Table 3　Composition of soil aggregates sieving in different salt solutions

团聚体直径（mm） Diameter of aggregate	盐溶液类型 Type of salt solution									
	CK	NaCl			$CaCl_2$			$AlCl_3$		
	0	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5
≥5	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
3～5	0.90 a	1.50 a	1.87 a	1.00 a	1.11 a	1.65 a	1.09 a	0.92 a	1.10 a	2.15 a
2～3	2.21 a	2.37 a	1.78 a	2.16 a	2.15 a	2.72 a	2.39 a	2.22 a	3.12 a	2.74 a
1～2	2.13 a	2.60 a	2.32 a	2.87 a	2.59 a	2.89 a	2.40 a	3.12 a	3.75 a	3.25 a
0.25～1	14.8 a	13.5 a	11.9 a	11.1 a	19.0 a	15.6 a	16.7 a	24.2 a	24.6 a	22.5 a
<0.25	77.1 a	80.0 a	82.1 a	82.9 a	75.2 a	77.2 a	77.4 a	69.7 b	67.4 b	69.4 b

注（Note）：同行不同字母表示同一个盐溶液不同浓度间的团聚体含量差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a row are significant among different solution concentrations at 5% level.

评价土壤结构好坏的指标有许多，其中以直径 ≥0.25 mm 的团聚体作为指标来评价土壤结构特性好坏很早就被前苏联、东欧、印度以及我国学术界所广泛采用[21]。图 1 所示为分别在 3 种类型盐分、4 种浓度水平的盐溶液中经过湿筛后黑土直径 ≥ 0.25 mm 团聚体的含量，可以明显看出，黑土团聚体的组成和稳定性对不同价态和不同浓度的盐溶液的响应差异很大。相对于水分散处理而言，黑土团聚体稳定性对氯化钠溶液的反应是增加了分散性，且随氯化钠盐溶液浓度的增加团聚体的分散性在增大，≥0.25 mm 团聚体的含量在递减；但在氯化钙和氯化铝盐溶液中筛分处理，团聚体的分散性在显著减小，其中氯化钙的浓度对团聚体分散性影响不显著，而氯化铝对团聚体分散有很强的抑制作用，表现为≥0.25 mm 团聚体的含量在增加。

平均重量直径（MWD）和几何均重直径（GMD）也常常作为土壤团聚体状况的指标，其值越大表示土壤团聚度越高，团聚体稳定性就越强[12]。用不同浓度的氯化钠、氯化钙和氯化铝三种价态的盐溶液浸泡土壤后进行湿筛，获得了不同价态的可溶性阳

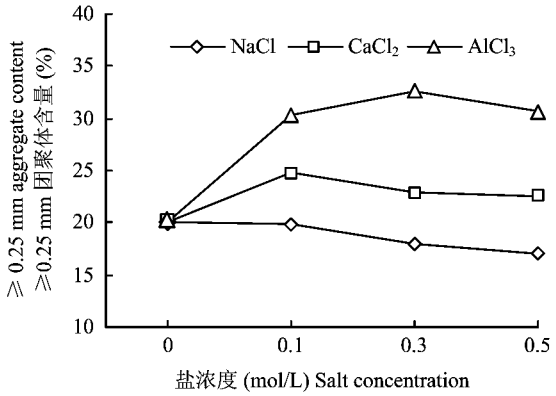

图1 不同盐溶液处理条件下≥0.25 mm稳定性团聚体

Fig.1 ≥0.25 mm aggregates stability under different salt concentrations

离子盐溶液处理后的土壤MWD和GMD值(见图2),能够较为直观地看出黑土团聚体的稳定性随着盐溶液浓度的增加而变化的趋势。

由图2A和2B可以看出,整体上土壤的MWD值和GMD值为一价盐<二价盐<三价盐。随着盐浓度的增大,一价盐处理的土壤MWD值和GMD值明显减小,而三价盐处理后的MWD值和GMD值则随着使用盐浓度的增大而增大。二价盐处理的土壤MWD值和GMD值介于一价盐和三价盐处理之间,图2A显示,当三种浓度的氯化钙溶液处理土壤的MWD值均高于纯水处理,0.1和0.3 mol/L氯化钙处理土壤的MWD值持续增大,而0.5 mol/L氯化钙溶液处理土壤的MWD值略小于0.1 mol/L处理,但

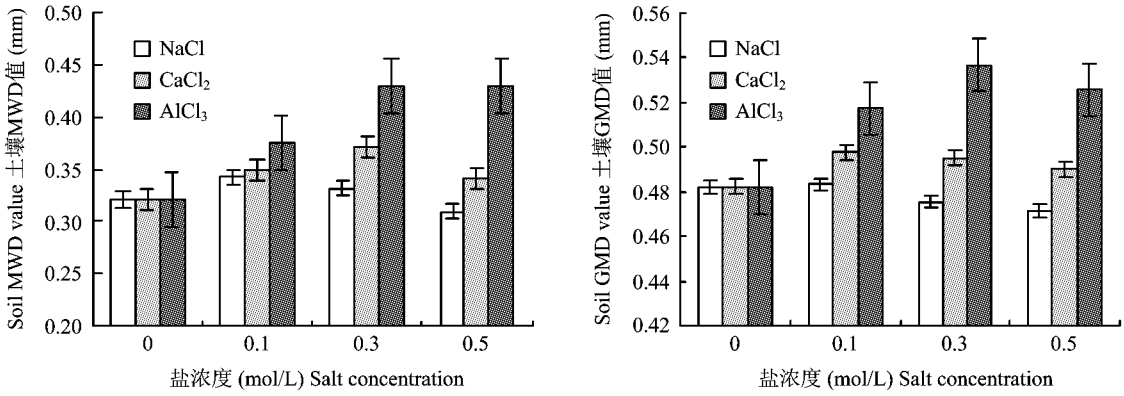

图2 不同盐溶液处理条件下湿筛处理黑土团聚体的平均重量直径(A)和几何均重直径(B)

Fig.2 MWD(A) and GMD(B) values of soil aggregates under different salt solution concentrations

仍高于纯水处理。而GMD值所表现的土壤团聚体随氯化钙溶液浓度的变化特征显示(图2B),土壤GMD值随着氯化钙浓度的增大,呈现与MWD值相似的轻微波动趋势。因为本试验选用的是经过干筛后的(0.25 mm以上的团聚体进行湿筛的),显然可以得出氯化钠加剧了团聚体的分散,而氯化钙和氯化铝高价盐溶液对土壤团聚体产生了明显的保护作用,避免了进一步分散为较小的团聚体或微团聚体。

上述分析一方面证明了土壤团聚体对不同盐分类型和不同浓度盐溶液的响应有很大的差异性,同时也证明在进行土壤团聚体分析时选定适宜的水质作为分散介质的重要性。清楚地说明以往选用纯水作为团聚体的分散介质,测定的水稳性团聚体结果偏小,测定条件与田间实际情况不很符合。

2.3 不同价态盐溶液湿筛处理后土壤团聚体的分型特征

Castrignano等[22]将分形理论应用于土壤团聚体评价的研究之中,提出土壤团聚体分形维数(D值)越大,则团聚体的分散度越大。当D接近2时,表明团聚体主要由数量很少的大团聚体组成,随着D值的增大,土壤中小级别的团聚体的数量随之增加。

由图3可以看出,三种价态阳离子盐溶液处理的土壤团聚体分型维数D值均在2.85以上,表明各处理土壤主要由中小团聚体组成,仅有少量的大团聚体,团聚体分散度很高,分散程度为一价盐>二价盐>三价盐。随着阳离子盐溶液浓度的增大,氯化钠处理的分型维数D值增大,氯化钙处理的分型维数呈现波动,氯化铝处理的分型维数在盐浓度为0.1 mol/L时剧烈减小,浓度为0.3 mol/L时继续减小,浓度为0.5 mol/L时略微增大,说明土壤团聚体随着氯化钠溶液浓度的增大,分散程度增加,而低浓度的氯化铝促进较大团聚体的形成,但当浓度过大时,也会起到分散土壤团聚体的作用,氯化钙溶液对团聚体的分散和团聚作用的效果介于两者之间,随着浓度有波动,表明在氯化钙溶液的作用下,土壤

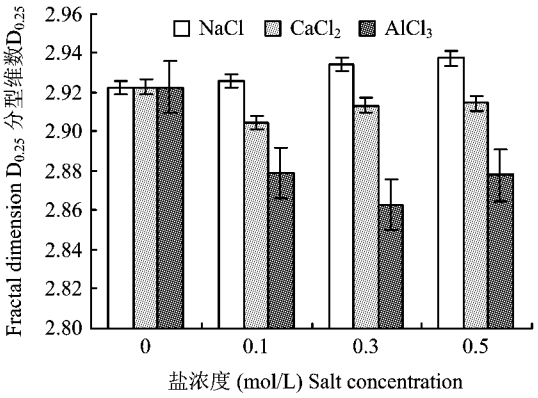

图 3　不同盐溶液处理下的土壤分型维数 $D_{0.25}$

Fig. 3　Soil fractal dimension $D_{0.25}$ under different salt solution concentrations

团聚体的分散和团聚作用可能同时发生。

2.4　黑土团聚体的盐破坏率

团聚体的破坏率(PAD)一般是分别以干筛和湿筛后所获得直径大于某一数值的团聚体的量为基础进行计算的，以表征团聚体的水力学稳定性。为了研究团聚体的盐稳定性，本研究提出以纯水为对照，以不同浓度盐溶液为处理，用“土壤团聚体盐破坏率($PAD_{x/w}$)”作指标[15]，表征盐分对土壤团聚稳定性能的作用。

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

式(1)中：W_w 表示在纯水湿筛后直径大于 X 毫米的土壤团聚体重量百分含量；W_x 表示盐溶液处理后大于 X 毫米的土壤团聚体重量百分含量；$PAD_{x/w}$ 为正值表示在盐溶液中土壤团聚性能降低(分散)，负值则表示在盐溶液中土壤团聚性能增加(保护)，$PAD_{x/w}$ 绝对值越大，表明作用越明显。

图 4 所示，氯化钠溶液处理的土壤 $PAD_{0.25/w}$ 在溶液浓度为 0.1 mol/L 的处理条件下仅为 0.22%，溶液浓度在 0.3 mol/L 和 0.5 mol/L 的处理条件下都为正值，绝对值为 10.7% 和 14.4%，说明直径 ≥0.25 mm 的黑土团粒结构在不同浓度的氯化钠溶液中有不同程度的分散。氯化钙溶液和氯化铝处理的土壤 $PAD_{0.25/w}$ 均为负值，氯化钙处理绝对值随着盐浓度的增大而减小，表明 ≥0.25 mm 的黑土团聚体具有抵抗氯化钙溶液分散的能力，且氯化钙溶液对该直径的团聚体具有一定的保护作用，而这种保护作用能力随着氯化钙溶液浓度的增大而降低；氯化铝处理的 $PAD_{0.25/w}$ 的绝对值均在 51% 以上，说明氯化铝溶液 ≥0.25 mm 的土壤团聚体的保护作用比氯化钙溶液更加明显。三种溶液各浓度处理的黑土 $PAD_{1/w}$ 和 $PAD_{2/w}$ 均为负值，说明经过盐溶液处理的 ≥1 mm 和 ≥2 mm 的黑土团聚体含量均高于纯水处理的含量，表明供试的三种溶液均加强了 ≥1 mm 和 ≥2 mm 的黑土团聚体的抵抗水力分散的能力，但其作用程度存在差异。溶液浓度也对黑土团聚体抗水力分散的能力影响明显，氯化钠溶液处理总体差异较小，≥2 mm 的黑土团聚体对 0.5 mol/L 的氯化钠溶液的响应能力减弱(−1.8%)，0.3 mol/L 的氯化钙溶液的 $PAD_{1/w}$ 和 $PAD_{2/w}$ 均对黑土团聚体的

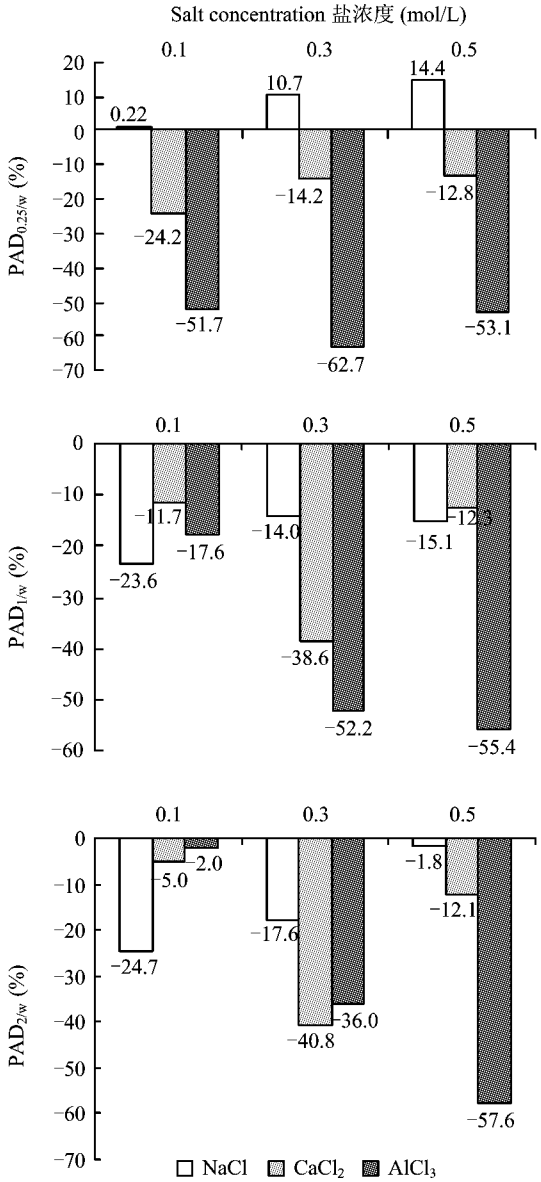

图 4　不同盐溶液处理下土壤 $PAD_{0.25/w}$、$PAD_{1/w}$、$PAD_{2/w}$ 值

Fig. 4　Soil $PAD_{0.25/w}$, $PAD_{1/w}$, $PAD_{2/w}$ value under different salt solution concentrations

抗水力分散能力均有较大影响,被水力破坏的 ≥1 mm 的团聚体可在 0.3 mol/L 的氯化钙溶液作用下恢复 38.6%,大于 2 mm 团聚体可恢复 40.8%。高浓度的氯化铝也能有效地增强黑土团聚体的抗水力分散的能力,但 0.1 mol/L 的氯化铝的影响相对较弱,0.5 mol/L 的氯化铝对大于 0.25 mm、≥1 mm 和 ≥2 mm 的黑土团聚体有很强的保护作用,PAD 的绝对值均达到 50% 以上,0.1 mol/L 和 0.3 mol/L 的氯化铝对较大团聚体的保护作用相对较弱。

3 讨论

供试土壤主要粘土矿物组成为蒙脱石,具有很强的膨胀性,马蕾等研究发现 NaCl 和 $CaCl_2$ 对蒙脱石悬浮液的膨胀有明显的抑制作用,而且 $CaCl_2$ 对蒙脱石膨胀的抑制作用明显强于 NaCl, $CaCl_2$ 浓度比 NaCl 少了 1 个数量级时即可达到相同的膨胀抑制效果,且电解质的加入使颗粒之间产生了团聚作用,改变了颗粒的粒径,从而在宏观上表现为蒙脱石悬浮液体积的减少[23]。对于土壤而言,抑制其膨胀性能够有效防止土壤团聚体分散,从本研究中 $PAD_{1/w}$和 $PAD_{2/w}$的结果可知,NaCl 和 $CaCl_2$ 溶液能够抑制黑土直径 1 mm 以上的大团聚体分散,其中盐溶液抑制蒙脱石的膨胀性应是重要因素。上述文献中未提及三价盐电解质对蒙脱石的作用,但从本文的结果分析,三价盐对蒙脱石矿物类土壤膨胀性的抑制作用应当更强于二价盐。

其次,根据 Emerson 粘团理论,土壤团聚体是由土壤腐殖质将胶体粘粒(或粘团)、粒径较大的粉砂粒、砂粒胶结在一起而形成。而 Emerson 粘团理论最新研究认为,粘团(或叠胶)就是硅铝酸盐粘土胶体颗粒在交换性阳离子和离子力的作用下形成大小在胶体范围的团聚体[24]。因此,交换性阳离子在土壤团聚体形成过程中的作用不容忽视。已有研究表明,当溶液中存在电解质时,胶体凝聚能力的大小取决于电解质解离出的阳离子的价数、同价离子的水化半径和电解质的浓度等。一般来说,由一价离子凝聚的土壤颗粒,它们的结合力是较弱的,易受振荡等机械作用而分散。但由三价离子凝聚的土壤颗粒,结合得较紧,即使强烈振荡或煮沸悬液也不易使其分散。二价离子结合的土壤颗粒介于其间[25]。本文用三种不同价态的盐溶液湿筛处理土壤之后,得到 ≥0.25 mm 团聚体的变化特征关系,虽然处理浓度不同,但其含量整体上始终为三价盐 >二价盐 >一价盐,这表明一价可溶性阳离子对≥0.25 mm 的团聚体具有分散作用,三价可溶性阳离子则可能对≥0.25 mm 的团聚体产生絮凝作用或再团聚体作用,而二价可溶性阳离子可能同时存在分散和絮凝作用,且两种作用均相对微弱。通过 $PAD_{x/w}$值分析表明,氯化钠溶液对 ≥0.25 mm 的土壤团聚体主要起分散作用,高浓度的氯化钠溶液对土壤团聚体的分散作用能力高于较低浓度的氯化钠溶液,而对 ≥1 mm和 ≥2 mm 的团聚体则有微弱的保护作用,≥2 mm的黑土团聚体对氯化钠溶液浓度变化的响应强于 ≥1 mm 的团聚体。表明氯化钠溶液能够使 ≥0.25 mm 的黑土团聚体在遭到水力破坏的同时进一步被分散,同时能够抑制直径 1 mm 以上的团聚体受到水力破坏,这说明氯化钠溶液主要破坏的是直径 0.25 ~ 1 mm 的黑土团聚体。氯化钙和氯化铝溶液湿筛的团聚体含量高于纯水湿筛的,氯化铝溶液能够更好地抑制大团聚体分散,而 0.3 mol/L 的氯化钙溶液对 ≥1 mm 和 ≥2 mm 的团聚体的保护作用比其他浓度的效果更明显。

4 结论

供试土壤 <0.25 mm 的水稳性团聚体含量接近 80%,剩余的较大团聚体含量仅 20%,说明土壤团聚体的水稳性不佳,土壤自身抵抗水力破坏的能力较弱。将湿筛介质由纯水换成不同价态和浓度的盐溶液后,土壤团聚体组成变化明显,发现盐溶液能够使团聚体进一步被分散,同时也能够抑制某些等级的团聚体分散,可将之视为盐溶液对团聚体的保护作用。一价可溶性阳离子盐溶液对大于 0.25 mm 的黑土团聚体具有进一步分散作用,但能够抑制 ≥1 mm 和 ≥2 mm 的团聚体分散,而随着溶液浓度增大,对 ≥2 mm 的团聚体的保护能力减弱。说明供试盐浓度条件下,氯化钠溶液主要破坏的是直径为 0.25 ~ 1 mm 的团聚体。二价和三价可溶性阳离子盐溶液能够抑制较大团聚体的分散,对团聚体起保护作用,三价盐比二价盐的保护作用更强,但浓度适宜的氯化钙溶液对 1 mm 以上的较大团聚体的保护能力更加稳定。以上结论表明黑土团聚体对各类盐溶液的响应不同,盐溶液对土壤团聚体的影响与土壤矿物类型、胶结物质类型以及盐溶液的种类和浓度均相关,而环境中的土壤液相是以稀溶液的形式存在的,以往的土壤团聚体稳定性研究中均用纯水作为湿筛介质,这不符合环境中土壤的实际情况,其科学性值得进一步商榷。

参 考 文 献：

[1] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33: 141-163.

[2] Rovira P, Vallejo R. Physical protection and biochemical quality of organic matter in Mediterranean calcareous forest soils: a density fractionation approach [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 245-261.

[3] Rillig C, Wright F, Eviner T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species[J]. Plant and Soil, 2002, 238: 325-333.

[4] 史奕，张璐，陈欣，等. 不同经营方式对黑土水稳性团聚体组成及微粒有机质积累分布的影响[J]. 中国生态农业学报，2005,13(2): 122-124.
Shi Y, Zhang L, Chen X *et al*. Effect of different management patterns on the fraction of water stable aggregates and accumulation and distribution of particulate organic matter in black soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(2): 122-124.

[5] 高鲁鹏，梁文举，姜勇，等. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I. 自然状态下土壤有机碳的积累[J]. 应用生态学报，2004, 15(5): 772-776.
Gao L P, Liang W J, Jiang Y *et al*. Dynamics of organic C in black soil of Northeast China, simulated by CENTURY model I. Accumulation of soil organic carbon under natural conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(5): 772-776.

[6] 沈善敏. 黑土开垦后土壤团聚体稳定性与土壤养分状况的关系[J]. 土壤通报，1981, (2): 32-34.
Shen S M. The relationship of black soil aggregate stability and soil nutrient status after reclamation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1981, (2): 32-34.

[7] Edwards A P, Bremner J M. Micro-aggregates in soils[J]. Soil Science, 1967, 18(1): 64-73.

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

[9] 曾路生，高岩，李俊良等. 寿光大棚土壤团聚体中交换性盐基离子组成与土壤团聚性关系[J]. 水土保持学报，2011, 25(5): 224-228, 233.
Zeng L S, Gao Y, Li J L *et al*. Relationship between the composition of exchangeable base cation in soil aggregate and soil glomeration of greenhouse in Shouguang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 224-228, 233.

[10] 王俊鹏. 黄河三角洲沉积物团聚体影响因素及其稳定性的研究[D]. 山东青岛：中国海洋大学硕士学位论文，2010.
Wang J P. A study of impact factors and stability of the sediment aggregates in yellow river delta [D]. Shandong Qingdao: Ms thesis of Ocean University of China, 2010

[11] 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]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2287-2291.

[12] 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]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007,21(2): 61-64, 77.

[13] 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): 125-128, 134.
Yuan D L, Zhang Y L, Tang S F *et al*. Effect of different irrigation methods on soil water-stable aggregates in protected field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 125-128,134.

[14] 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]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(1): 164-168.

[15] 徐爽，王益权，王浩，等. 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[J]. 植物营养与肥料学报，2012, 18(5): 1135-1143.
Xu S, Wang Y Q, Wang H *et al*. Effects of nitrogen fertilizer solution on stability of soil aggregates under different fertility levels[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012,18(5): 1135-1143.

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

[17] 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.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis of soil[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.

[18] 叶和才. 土壤物理学[M]. 北京：农业出版社,1983.
Ye H C. Soil physics[M]. Beijing: Agriculture Press, 1983.

[19] 姚贤良. 土壤结构的肥力意义[J]. 土壤学报，1965, 13(1): 15.
Yao X L. The importance of soil structure in fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 1965, 13(1): 15.

[20] 杨培岭，罗远培，石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报，1993, 38(20): 1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. The weight distribution of the particle size based analysis on soil fractal characteristics [J]. Chinese Science Bulletin,1993, 38(20): 1896-1899.

[21] 姚贤良. 土壤物理学[M]. 北京：农业出版社，1983.
Yao X L. Soil physics[M]. Beijing: Agriculture Press, 1983.

[22] Castrignano, Stelluti M. Fractal geometry and geostatistics for describing the field variability of soil aggregation[J]. Journal of

Agricultural Engineering Research, 1999, 73: 13-18.

[23] 马蕾, 彭昌盛, 范超, 等. 水化学性质对蒙脱石悬浮液膨胀性的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(增刊): 379-385.
Ma L, Peng C S, Fan C *et al*. The influence of hydrochemistry on the swelling of montmorillonite suspension[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(Suppl.): 379-385.

[24] Emerson W, Greenland J. Soil aggregates-formation and stability [A]. De Boodt M F, Hayes M H B, Herbillon A. Soil colloids and their associations in aggregates. NATO ASI series, series B: Physics[C]. New York: Plenum Press, 1991. 485-511.

[25] 熊毅. 土壤胶体[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Xiong Y. Soil colloids[M]. Beijing: Science Press, 1985.