

不同复垦模式对土壤团聚体及水溶性阳离子的影响

冯欢, 张俊岭, 张凤华

(石河子大学 农学院, 新疆 石河子 832003)

摘要:以新疆玛河流域冲积扇缘盐碱地为研究区,分析了盐碱弃耕地不同复垦模式对土壤团聚体组成及水溶性 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 分布的影响。结果表明:与弃耕地相比,采用单作、间作及轮作种植模式均可显著降低土壤 pH 值和电导率($p < 0.05$),土壤 pH 值分别较弃耕地降低了 10.7%, 9.7%, 10.6%, EC 相应降低了 19.2%, 71.0%, 84.1%;不同复垦模式 > 0.25 mm 粒径团聚体含量显著增加($p < 0.05$),单作、间作、轮作分别较弃耕地增加了 15.8%, 13.2% 和 15.6%,且显著高于其他粒径($p < 0.05$),土壤团聚体结构显著改善;不同复垦模式中水溶性阳离子含量主要分布于 < 0.25 mm 粒径的微团聚体中,在团聚体中表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$,间作和轮作均显著减少水溶性阳离子含量($p < 0.05$)。建议在盐碱弃耕地复垦过程中采用轮作或间作种植模式更有利于弃耕地植被恢复。

关键词:盐碱弃耕地;复垦模式;土壤团聚体;水溶性离子

中图分类号:S153.6; S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0094-09

Effects of Different Restoration Patterns on Distribution of Soil Aggregates and Water Soluble Cations of Abandoned Salinized Field

FENG Huan, ZHANG Junling, ZHANG Fenghua

(College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: The effects of restoration patterns on soil aggregates and aggregate-associated soil water soluble Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in abandoned salinized farmland were studied in the experimental field on the alluvial fan oasis of Manas River Basin. The results indicated that different restoration patterns in abandoned salinized fields significantly reduced the soil pH value and EC($p < 0.05$), the scales of pH value under monoculture, intercropping and crop rotation were 10.7%, 9.7%, 10.6% lower than that under abandoned salinized field, respectively, the values of EC under monoculture, intercropping and crop rotation were 19.2%, 71.0%, 84.1% lower than that under the abandoned salinized field, respectively; the different reclamation modes increased the contents of > 0.25 mm soil macroaggregate ($p < 0.05$), the contents of > 0.25 mm soil macroaggregate under the monoculture, intercropping and crop rotation were 15.8%, 13.2% and 15.6% higher than that under abandoned salinized field, respectively, and significantly higher than the other two sizes of aggregates ($p < 0.05$), the aggregate structure of the soil was significantly improved; water soluble cation contents of different restoration patterns were the highest in the size of < 0.25 mm aggregate, and content of cation decreased in the order: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Intercropping and rotation significantly reduced water soluble cation contents ($p < 0.05$), which implied that soil improvement effect under intercropping and rotation was significant. The intercropping and rotation are the preferred modes of vegetation restoration in saline soil.

Keywords: abandoned salinized field; restoration patterns; soil aggregate; water soluble cation

土壤团聚体作为土壤的基本结构单元,较其他土壤结构稳定,且其大小形状及稳定性都对土壤中水和空

气、土壤质地以及作物的生长造成影响^[1-2]。新疆有大量因次生盐渍化严重而弃耕的农田,自然恢复过程比较

缓慢,已经不能满足人们的需求,大量的弃耕农田被进行人工植被恢复。植被的恢复和重建是提高土壤质量和实现土壤基本功能的关键^[3],对加快生态系统恢复,增加土壤有机碳含量,促进土壤团聚体形成,提高大团聚体稳定性都有很重要的作用^[4-5]。

土壤盐分是盐碱土的一个重要属性。研究表明,间作对河套灌区盐碱地有轻微的控盐作用,并且不会促使次生盐渍化的发生^[6]。水旱轮作对 EC 值有降低作用,减轻土壤的次生盐渍化,缓解草莓连作障碍^[7]。盐胁迫对植物有渗透作用和离子效应^[8],会影响植物正常代谢。盐碱土中含有大量的水溶性盐类,对水溶性盐的分析是研究土壤盐碱化类型和程度的主要方法之一^[5]。 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 凝聚能力较强,具有较好的粘结性,能和土壤胶体进行紧密的结合,有利于团聚体的形成, Na^{+} 的凝聚能力最弱,是高强度的分散性离子,会直接促使土壤结构被破坏,土壤有机质暴露易降解,不利于团聚体的形成^[9],且由于盐的溶解度和迁移率等差异,盐离子在土壤剖面中的移动并不同步^[10]。本研究以新疆玛纳斯河流域盐渍化弃耕地作为研究对象,采用单作、轮作、间作 3 种植模式进行复垦,分析不同复垦模式对弃耕地土壤团聚体粒径组成及其盐阳离子分布的影响,明确不同复垦模式对弃耕地土壤质量的影响,以期为绿洲盐渍化弃耕地植被重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于玛纳斯河流域冲积平原,该区域地理处在东经 $85^{\circ}37.275'$,北纬 $44^{\circ}33.493'$ 。该地区为典型大陆性气候,远离海洋,干旱少雨,湿度小,蒸发量大,日照充足, $\geq 10^{\circ}C$ 的活动积温达到 $3\,570\sim 3\,729^{\circ}C$,年日照时数为 $2\,721\sim 2\,818\,h$,无霜期为 $168\sim 171\,d$,年平均降水量 $110\sim 200\,mm$,年平均蒸发量为 $1\,500\sim 2\,000\,mm$,强烈的蒸发加速了该地区土壤次生盐渍化弃耕现象的发生。该地区以荒漠植被为自然植被的主要植被,植物种类单一稀疏、群落结构简单是地表植被的主要特征,且盐碱化弃耕地土壤类型为灰漠土,土壤质地为中壤土。

1.2 试验设计及样品采集

试验点位于新疆北疆玛河流域冲积扇缘 147 团,之前因盐渍化严重而弃耕,自 2009 年起对样地进行不同模式的恢复重建,不同复垦模式有,Ⅰ:弃耕地(CK),作为恢复前的对照处理,面积为 $2\,hm^2$,植株密度为 $2.89\,万株/hm^2$;Ⅱ:单作棉田,对自然弃耕地进行翻耕人工播种、灌溉、种植棉花,面积为 $15\,hm^2$,种植年限为 5 a,种植密度为 $1.95\times 10^5\,株/hm^2$,整个作物生长期灌水 $8\sim 10$ 次,灌水方式为膜下滴灌,年灌水总量为 $4\,500\,m^3/hm^2$,棉花生长季节,施用氮肥($300\,kg/hm^2$)、磷肥($200\,kg/hm^2$)和钾肥($60\,kg/hm^2$);Ⅲ:间作模式,俄罗斯杨与小麦(棉花)间作种植,面积 $15\,hm^2$,种植年限为 5 a,种植密度为俄罗斯杨 $1.02\times 10^3\,株/hm^2$ +小麦 $4.80\times 10^6\,株/hm^2$,灌水方式为滴灌,年灌水总量为 $5\,250\,m^3/hm^2$,整个生长季节,施用氮肥($300\,kg/hm^2$)、磷肥($200\,kg/hm^2$)和钾肥($60\,kg/hm^2$);Ⅳ:轮作农田,种植小麦 3 a,期间轮作玉米,面积 $15\,hm^2$ 。

土壤样品采集:本试验于 2014 年 7 月中旬进行采样,每种种植模式按照 0—20,20—40,40—60 cm 分别挖剖面(30 cm 宽、100 cm 深),然后在不同土层采集大小一致的原状土样,装入方形塑料盒带回实验室;同时用自封袋采集各模式土样混合,混合土样采用“四分法”,保留 1 kg,每种模式按照同样的方法采取 3 个重复。将方形塑料盒中土样过 8 mm 的土筛,最后风干土样,以便保存进行土壤团聚体及其他稳定性分析,将自封袋土样样品带回实验室,置于通风、阴凉、干燥的室内风干,分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛孔以供测定。

1.3 测定项目及测定方法

土壤 pH 值及电导率采用 5:1 水土比浸提,pH 值计和电导率仪测定;土壤有机质用重铬酸钾法测定;碱解氮用碱解扩散法;速效磷用 $0.5\,mol/L$ 的 $NaHCO_3$ 法;全氮采用半微量开氏法;全磷采用钼锑抗比色法($HClO_4-H_2SO_4$ 法);用离子色谱法测定水溶性 $Na^{+}, k^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}$ 的含量;采用 SPSS 18 和 Excel 2016 软件进行统计分析。

表 1 弃耕地不同复垦模式土壤养分情况

| 土地类型 | 有机质/ ($g\cdot kg^{-1}$) | 全磷/ ($g\cdot kg^{-1}$) | 全氮/ ($g\cdot kg^{-1}$) | 速效磷/ ($mg\cdot kg^{-1}$) | 速效钾/ ($mg\cdot kg^{-1}$) | 碱解氮/ ($mg\cdot kg^{-1}$) |
|----------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 原始弃耕地(Ⅰ) | 10.53 | 0.72 | 0.45 | 2.87 | 385.80 | 9.04 |
| 单作农田(Ⅱ) | 13.10 | 0.79 | 0.52 | 18.18 | 320.89 | 31.94 |
| 间作农田(Ⅲ) | 10.57 | 0.74 | 0.47 | 12.57 | 310.26 | 14.15 |
| 轮作农田(Ⅳ) | 14.54 | 0.85 | 0.56 | 15.92 | 343.95 | 30.10 |

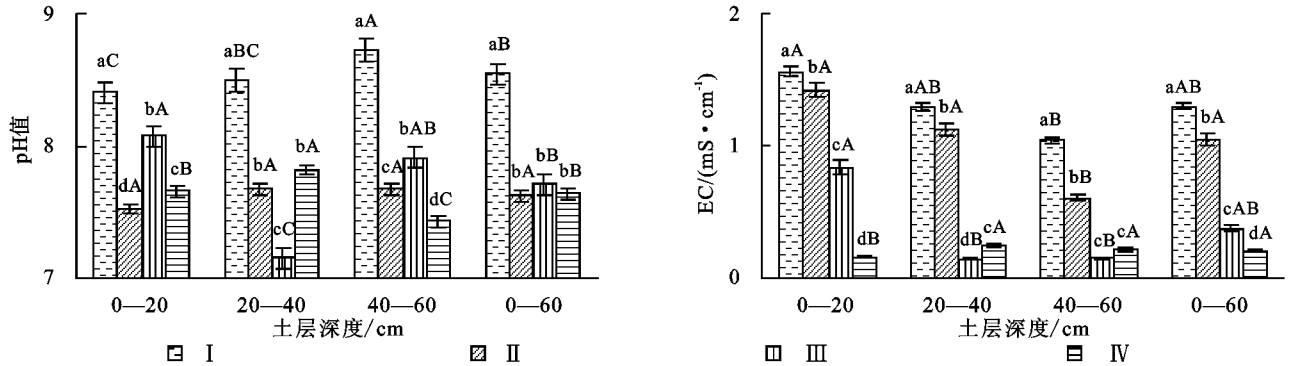
2 结果与分析

2.1 不同复垦模式对土壤 pH 值和 EC 值的影响

由图 1A 可见,在 0—60 cm 土层,单作、间作和轮作土壤 pH 值含量均显著低于弃耕地($p < 0.05$),分别较弃耕地降低 10.7%,9.7%,10.6%。弃耕地的 pH 值分布随着土层深度的增加而增大;0—20 cm 土层,单作 pH 值降低最为明显,为 7.5,较弃耕地降

低了 0.88;20—40 cm 土层,间作 pH 值最低,为 7.15,较弃耕地降低了 1.35;40—60 cm 土层,轮作 pH 值最低,为 7.43,较弃耕地降低了 1.29。

由图 1B 可见,在 0—60 cm 土层,不同复垦模式土壤 EC 值均不同程度降低,并且间作和轮作 EC 含量降低更为显著,分别降低了 71.0%,84.1%。在各个土层中,弃耕地、单作和间作土壤中 EC 含量随着土层深度增加而减少,轮作 EC 含量随着土层降低而增加。



注:不同大写字母表示在同一耕作方式不同土层间差异显著,不同小写字母表示同一土层不同耕作方式间差异显著($p < 0.05$)。

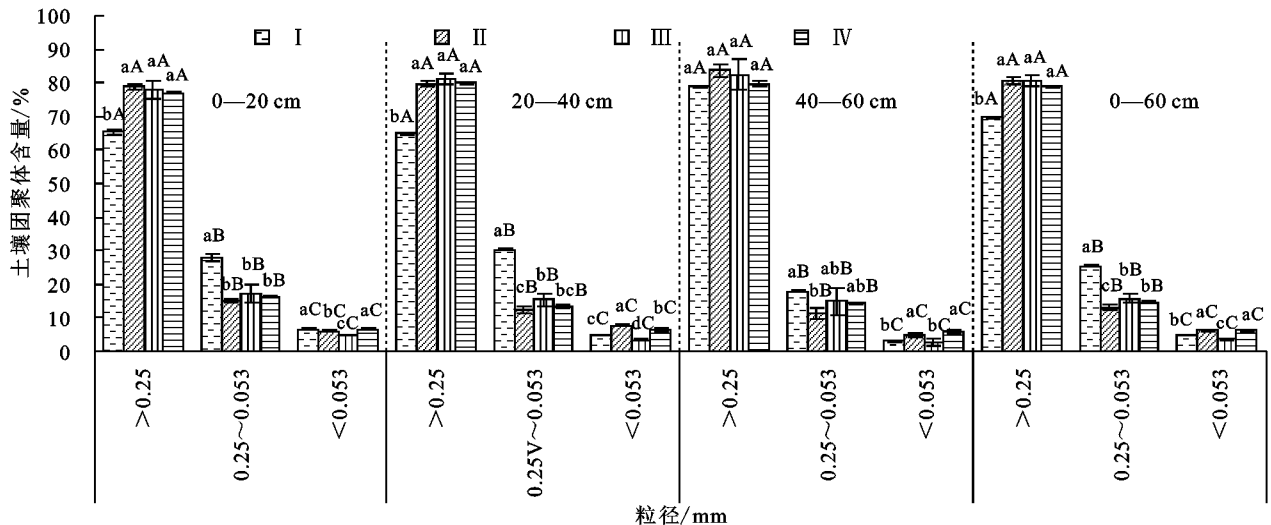
图 1 不同复垦模式土壤 pH 值及土壤 EC

2.2 不同复垦模式土壤团聚体的分布特征

不同复垦模式对土壤团聚体的组成、数量等都有一定的影响^[11]。由图 2 可见,在 0—60 cm 土层, > 0.25 mm 粒径各复垦模式间团聚体含量并无显著性差异($p > 0.05$),但均显著高于弃耕地($p < 0.05$); $0.25 \sim 0.053$ mm 粒径各复垦模式间有显著性差异($p > 0.05$),但均显著低于弃耕地($p < 0.05$); < 0.053 mm 粒径,单作和轮作土壤团聚体含量显著高于弃耕地($p < 0.05$),间作显著低于弃耕地($p < 0.05$)。弃耕地及各复垦模式 > 0.25 mm 粒径团聚体含量显著高于其他粒径($p < 0.05$),占总团聚体含量 64.85%~83.62%。在

各个土层中,弃耕地及各复垦模式 > 0.25 mm 粒径团聚体含量显著高于其他粒径($p < 0.05$)。

在各个土层中,弃耕地及各复垦模式团聚体含量均随着粒径的减小而减少。在 0—20 cm 及 20—40 cm 土层,各复垦模式 > 0.25 mm 粒径团聚体含量显著高于弃耕地($p < 0.05$), $0.25 \sim 0.053$ cm 粒径中,各复垦模式粒径团聚体含量显著低于弃耕地($p < 0.05$);在 40—60 cm 土层,弃耕地及各复垦模式 > 0.25 mm 粒径土壤团聚体含量没有显著性差异($p < 0.05$)。不同复垦模式对团聚体数量的影响随着土层深度的加深呈现出减弱的趋势。



注:不同大写字母表示在同一土层同一复垦模式不同粒径间差异显著,不同小写字母表示同一土层同一粒径不同复垦模式间差异显著($p < 0.05$),下同。

图 2 不同复垦模式土壤团聚体组成成分

2.3 不同复垦模式对土壤团聚体中盐基离子的影响

如图3所示,在0—60 cm土层,各个粒径团聚体中弃耕地 Na^+ 含量显著高于其他复垦模式 ($p < 0.05$),其含量为 $0.48 \sim 1.00 \text{ g/kg}$,且 $<0.053 \text{ mm}$ 粒径团聚体 Na^+ 含量最高,达到 0.89 g/kg ,而 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 最低,为 0.80 g/kg 。不同复垦模式各

粒径团聚体中 Na^+ 含量表现为弃耕地 $>$ 单作 $>$ 间作 $>$ 轮作,各复垦模式各粒径 Na^+ 含量为 $0.02 \sim 0.20 \text{ g/kg}$ 。在各个土层中,不同复垦模式及不同粒径中 Na^+ 含量均显著低于弃耕地 ($p < 0.05$),其中 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层 Na^+ 含量明显低于 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层。

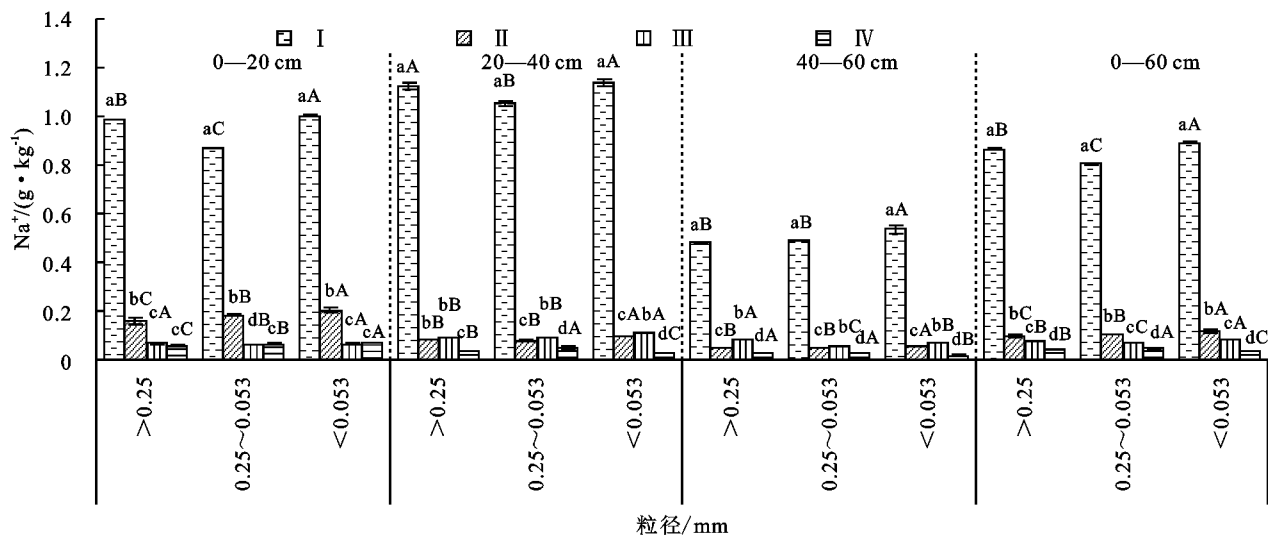


图3 不同复垦模式不同粒径团聚体中 Na^+ 的含量及分布

如图4所示,在0—60 cm土层,各个粒径不同复垦模式土壤团聚体中 K^+ 含量均呈现显著差异 ($p < 0.05$), $>0.25 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 粒径土壤团聚体 K^+ 含量均表现为单作 $>$ 弃耕地 $>$ 间作 $>$ 轮作; $<0.053 \text{ mm}$ 粒径土壤团聚体 K^+ 含量表现为弃耕地 $>$ 单作 $>$ 间作 $>$ 轮作;不同复垦模式各粒径土壤团聚体中的 K^+ 含量差异较显著 ($p < 0.05$),且随着粒径的减小而

增加。在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层中,各个粒径不同复垦模式 K^+ 含量大小之间存在显著性差异 ($p < 0.05$),主要表现为弃耕地 $>$ 单作 $>$ 间作 $>$ 轮作,且随着粒径的减小弃耕地及各复垦模式 K^+ 含量逐渐增加;在 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层中,各个粒径不同复垦模式 K^+ 含量差异显著 ($p < 0.05$),各复垦模式 $>0.25 \text{ mm}$ 粒径土壤团聚体 K^+ 含量显著低于其他粒径 ($p < 0.05$)。

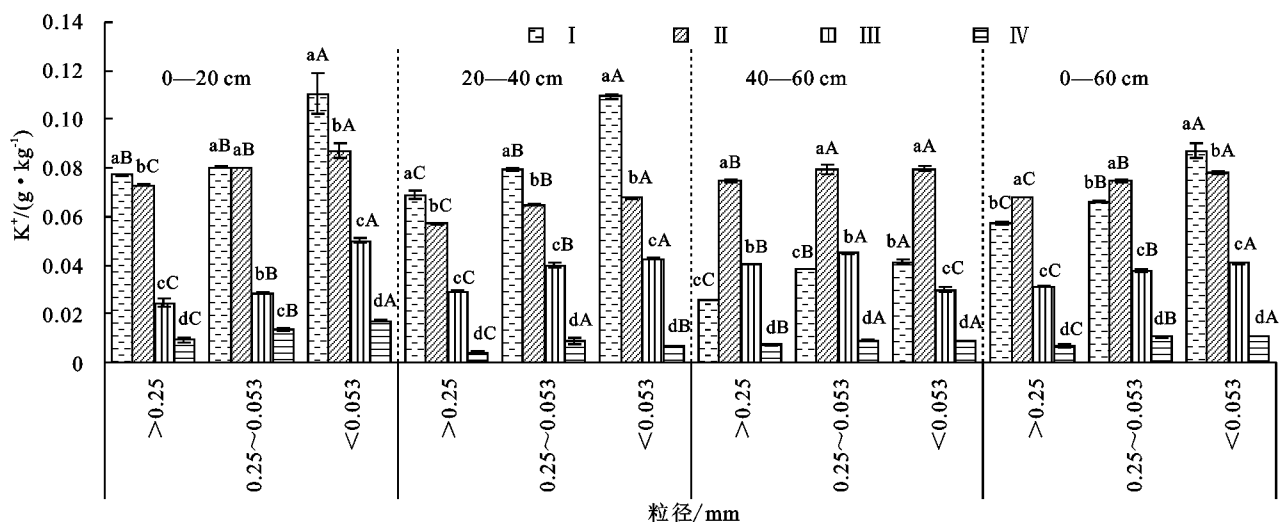


图4 不同复垦模式不同粒径团聚体中 K^+ 的含量及分布

从图5中可以看出,在0—60 cm土层,各复垦模式在各个粒径土壤团聚体中 Mg^{2+} 含量均表现为单作 $>$ 弃耕地 $>$ 轮作 $>$ 间作;各复垦模式 $>0.25 \text{ mm}$ 粒径 Mg^{2+} 含量均显著低于 $<0.53 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim$

0.053 mm 粒径土壤团聚体 Mg^{2+} 含量 ($p < 0.05$);弃耕地和单作 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 粒径土壤团聚体 Mg^{2+} 含量显著低于 $<0.53 \text{ mm}$ 粒径 ($p < 0.05$),间作和轮作 $<0.53 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 粒径土壤团聚体

Mg^{2+} 含量间无显著差异($p < 0.05$)。

在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,弃耕地和单作各粒径中 Mg^{2+} 含量显著高于间作和轮作。在 40—

60 cm 土层,单作在各个粒径中 Mg^{2+} 含量没有显著差异,各个粒径中单作 Mg^{2+} 含量均显著高于其他复垦模式。

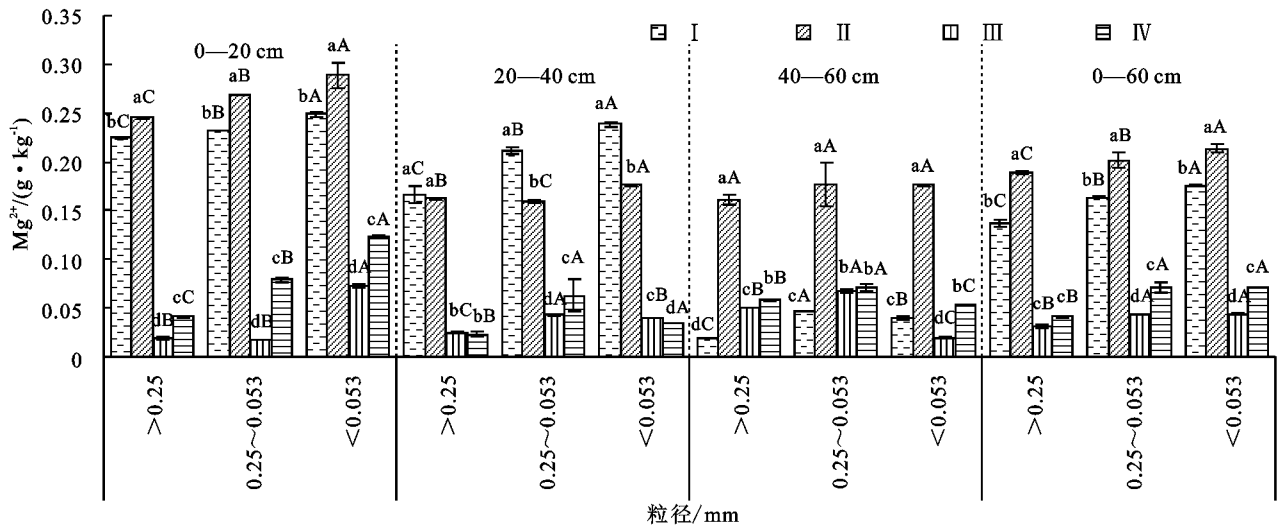


图5 不同复垦模式不同粒径团聚体中 Mg^{2+} 的含量及分布

如图 6 所示,在 0—60 cm 土层,各个粒径单作 Ca^{2+} 含量显著高于弃耕地($p < 0.05$),间作和轮作 Ca^{2+} 含量显著低于弃耕地($p < 0.05$);在 >0.25 mm 和 $0.25 \sim 0.053$ mm 粒径间作 Ca^{2+} 含量显著高于轮作($p < 0.05$);在 <0.053 mm 粒径轮作 Ca^{2+} 含量显著高于间作($p < 0.05$)。 >0.25 mm 粒径各复垦模式 Ca^{2+} 含量显著低于其他粒径($p < 0.05$);间作在

$0.25 \sim 0.053$ mm 粒径 Ca^{2+} 含量显著低于其他粒径($p < 0.05$);弃耕地、单作和轮作在 <0.053 mm 粒径 Ca^{2+} 含量显著低于其他粒径($p < 0.05$)。在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,各粒径中单作和轮作 Ca^{2+} 含量显著低于单作和弃耕地($p < 0.05$);在 40—60 cm 土层,单作 Ca^{2+} 含量显著高于其他复垦模式($p < 0.05$),弃耕地 Ca^{2+} 含量较上层土壤 Ca^{2+} 含量明显减少($p < 0.05$)。

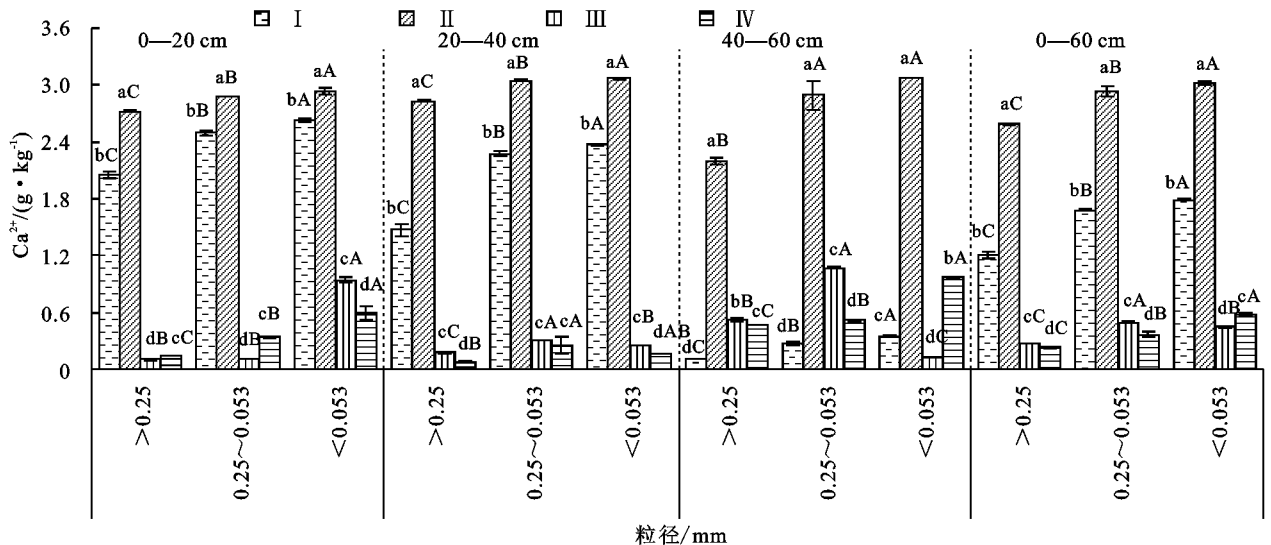


图6 不同复垦模式不同粒径团聚体中 Ca^{2+} 的含量及分布

3 讨论

不同粒级的团聚体在营养元素的保持、供应和转化能力等方面有着不同的作用^[12],一般认为土壤结构的好坏主要看土壤 >0.25 mm 团聚体的含量,其含量越高,土壤团聚性和结构越好。 <0.25 mm 的团聚体称为小团聚体,机械稳定性较差,这一级别团

聚体所占比重越高,表明土壤愈分散^[13-14]。本研究中,各复垦模式 >0.25 mm 粒径土壤团聚体含量较弃耕地显著增加,单作棉田、间作模式和轮作农田分别较弃耕地增加了 15.77%,13.18%和 15.55%, $0.25 \sim 0.053$ mm 粒径中各复垦模式团聚体显著低于弃耕地($p < 0.05$),单作、轮作和间作分别较弃耕地降低了 45.94%,41.97%和 38.80%,弃耕地及各复垦模

式 $<0.053\text{ mm}$ 粒径团聚体含量差异较小。说明弃耕地的不同复垦模式均可以改变土壤的团聚体比例,增加 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体含量,减少 $<0.25\text{ mm}$ 小团聚体含量,不同复垦模式均改变了土壤团聚结构,增强了团聚体稳定性,改善了土壤的结构。这可能是因为弃耕地复垦后人为水肥管理投入养分,作物残差进入农田归还有机质,加速团聚体形成。Six等^[15]在土壤大团聚体周转及土壤有机质变化的胚胎发育模型中认为,当新的植物残茬加入时,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。也有研究表明,短期玉米轮作对有机质及团聚体形成有良好的作用^[16]。大豆玉米轮作有利于促进团聚体的形成,大豆玉米间作也可激发形成良好团粒结构的潜在能力^[11]。豆科—禾本科轮作促进微团聚体的稳定以及大团聚体的形成^[17],与本文研究结果相似。

单作、间作、轮作中不同粒径团聚体 Na^+ 含量显著低于弃耕地,分别较弃耕地减少了87.62%,91.02%,95.12%,结果说明恢复耕作可以有效减少土壤中 Na^+ 的含量,随着恢复耕作 Na^+ 含量明显降低,因为 Na^+ 为一价阳离子,被吸附和凝聚的能力较弱,在土壤中比较活跃,易随着灌溉水被淋洗,耕作灌水作用减少土壤中 Na^+ 含量^[18]。不同复垦模式 Na^+ 含量主要集中于表层,说明 Na^+ 随着水分的蒸发上升至土壤表层,造成 Na^+ 在土壤表层富集。 K^+ 的交换能力比 Na^+ 强,易被土壤吸附,不易被水淋洗,所以恢复耕作后, K^+ 含量虽然减少但并不如 Na^+ 不迅速^[19]。 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 为二价离子,两种阳离子的化学性质、代换、吸附及凝聚力等性质相近,因此土壤中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的分布特征和变化趋势可能存在相似性^[10,18]。本研究不同复垦模式 Ca^{2+} 含量主要集中于 $<0.053\text{ mm}$ 和 $0.25\sim0.053\text{ mm}$ 两个粒径团聚体中,不同复垦模式 Ca^{2+} 含量在 $>0.25\text{ mm}$ 粒径中均显著低于其他粒径,说明 Ca^{2+} 主要集中于微团聚体中,这是由于小粒径团聚体比表面积较大,能够吸附较多的有机质,有利于有机—无机复合胶体的形成,而 Ca^{2+} 容易与土壤胶体紧密结合,所以在小团聚体中 Ca^{2+} 含量较多^[20]。

整体而言,不同复垦模式对盐分离子均有影响,单作可显著降低 Na^+ 含量,但会使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 含量增加,间作和轮作方式均显著减少盐阳离子含量,且间作和轮作各盐阳离子含量均显著低于单作,说明单作虽然能够减少土壤中的盐阳离子含量,但是

相较于轮作及间作盐分离子更易聚集。在植被的恢复过程中,我们采用轮作或间作的复垦模式更有利于盐碱地水溶性阳离子的减少,加快改善该区域盐分含量,为植被创造良好的生长环境。

4 结论

(1) 不同复垦模式(单作农田、轮作农田及间作模式处理)较弃耕地均显著增加了团聚体中 $>0.25\text{ mm}$ 粒径的团聚体数量,改善土壤的团聚体结构;弃耕地不同复垦模式均可显著降低土壤团聚体pH值和EC值,并且间作和轮作降低EC值的能力强于单作。

(2) 研究区不同复垦模式中各离子平均含量大小在土壤团聚体中表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$,且不同复垦模式各离子含量随着粒径减小而增加,盐阳离子主要集中于 $<0.053\text{ mm}$ 粒径团聚体中。

(3) 不同复垦模式对盐分离子均有影响。间作和轮作模式均可使各土壤盐离子含量显著降低,单作可显著降低 Na^+ 含量,但会使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 含量增加,且各离子含量显著高于间作和轮作。

参考文献:

- [1] Ekathryn B, Fabian A, Yvonne O, et al. Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011,42(12):2316-2324.
- [2] Mao R, Zhang X H, Meng H N. Effect of *Suaeda salsa*, on soil aggregate-associated organic carbon and nitrogen in Tidal Salt Marshes in the Liaohe Delta, China[J]. Wetlands, 2014,34(1):189-195.
- [3] Zhao D, Xu M, Liu G, et al. Quantification of soil aggregate microstructure on abandoned cropland during vegetative succession using synchrotron radiation-based micro-computed tomography[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 165:239-246.
- [4] 程曼,朱秋莲,刘雷,等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J]. 生态学报, 2013,33(9):2835-2844.
- [5] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报,2008,28(2):702-709.
- [6] 张作为. 盐渍化地区间作农田节水增产机理及优化灌溉制度研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [7] 赵海涛,李良俊,殷朝珍,等. 水生蔬菜轮作对大棚草莓连作土壤性质的影响[J]. 江苏农业学报,2014,30(2):289-295.
- [8] Adolf V I, Jacobsen S E, Shabala S. Salt tolerance mechanisms in quinoa(*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Environmental & Experimental Botany, 2013,92:43-54.

- [7] 周宇,史军,孙国武,等. 1873—2009 年上海气温日较差变化及其影响因素[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(1): 24-30.
- [8] 杨晓玲,丁文魁,殷玉春,等. 1961—2010 年武威市气温日较差变化趋势及影响因子分析[J]. 中国沙漠, 2014, 31(1): 225-232.
- [9] 刘强吉,武胜利. 新疆额尔齐斯河流域气温日较差变化特征及影响因子分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 351-356.
- [10] 郑建萌,任菊章,张万诚. 云南近百年来温度雨量的变化特征分析[J]. 灾害学, 2010, 25(3): 24-31.
- [11] 段旭,陶云. 云南近 50 年来的气候变化[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 243-250.
- [12] 罗燕,田永丽,戴敏,等. 云南近 50 年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2015, 37(6): 870-877.
- [13] 卜明,李爱国. 1960—2012 年云南省年际气温与降水量的区域性变化特征[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(8): 130-136.
- [14] 张万诚,郑建萌,马涛,等. 1961—2012 年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 710-722.
- [15] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等. 云南省 1958—2013 年极端气温时空变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 523-536.
- [16] 程清平,王平,徐强. 1960—2013 年云南地面温度时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 111-121.
- [17] 张雷,王杰,黄英,等. 1961—2010 年云南省基于 SPEI 的干旱变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 141-146.
- [18] 韩焕豪,崔远来,王树鹏,等. 云南省参考作物蒸发蒸腾量时空变化特征[J]. 节水灌溉, 2016(6): 182-186.
- [19] 曹言,王杰,张雷,等. 滇中地区极端降水事件的时空变化特征分析[J]. 人民长江, 2017, 48(21): 50-55.
- [20] 韩知明,贾克力,杨芳,等. 基于 Morlet 小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 160-166.
- [21] 曹言,王杰,黄英,等. 云南省气候干湿状况时空变化特征[J]. 水电能源科学, 2017, 35(8): 6-9.

~~~~~  
(上接第 99 页)

- [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.
- [10] Guo Q, Guo T, Ma Z, et al. Seasonal performance and spatial heterogeneity of soil salt ions in a semiarid orchard of northwest China[J]. Hortscience, 2014, 49(5): 653-661.
- [11] 张风华,王建军. 不同轮作模式对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 113-116.
- [12] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [14] 李爱宗. 耕作方式对土壤有机碳库和团聚体稳定性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2007.
- [15] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [16] 张旭辉,李恋卿,潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001(2): 16-19.
- [17] 李恋卿,潘根兴. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. 土壤通报, 2000, 31(5): 193-195.
- [18] 李向春,李文昊,韩冬梅,等. 绿洲区长期膜下滴灌棉田土壤盐分离子分布[J]. 节水灌溉, 2016(7): 65-69.
- [19] 刘淑慧. 松嫩平原苏打盐碱地滴灌土壤水盐调控机制与盐碱化草场恢复重建方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [20] 胡敏,向永生,张智,等. 恩施州耕地土壤 pH 近 30 年变化特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1289-1297.