

水稻种植对吉林省西部苏打盐碱土改良培肥效果

苑佰飞¹, 马玉涛¹, 包岩², 张晋京¹, 孙强³, 王立春³

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118;
2. 吉林农业科技学院农学院, 吉林 吉林 132101; 3. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130124)

摘要: 通过田间调查取样和室内分析, 研究了水稻种植(5~30 年)对吉林省西部苏打盐碱土的改良和培肥效果。结果表明: 与种稻前的荒地土壤相比, 种稻后土壤的 pH、全盐量、交换性钠、碱化度、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 <0.053 mm 粉黏粒含量显著降低, 而 SO_4^{2-} 、总有机碳、水溶性有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳、碱解氮和 2~0.25 mm 大团聚体含量显著增加; 同时, 有机碳组成中的烷基碳和烷氧碳含量增加, 而芳香碳和羰基碳含量降低, 脂族碳/芳香碳比值增加, 而烷基碳/烷氧碳和疏水碳/亲水碳比值降低; 随种稻年限的延长, 以上变化规律通常表现的更为明显。上述结果表明, 种稻不仅能够降低土壤碱性和盐分含量, 而且有助于提高土壤有机碳的含量和品质, 以及改善土壤结构性, 因此是改良和培肥苏打盐碱土的有效方式。

关键词: 种稻年限; 苏打盐碱土; 土壤可溶盐组成; 土壤有机碳; 土壤团聚体

中图分类号: S152.4; S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0320-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.047

Effect of Rice Cultivation on Ameliorating Soil Fertility of Soda Saline-Alkali Soil in Western Jilin Province

YUAN Baifei¹, MA Yutao¹, BAO Yan², ZHANG Jinjing¹, SUN Qiang³, WANG Lichun³

(1. Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Commodity Grain Bases of Jilin Province, College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;

2. College of Agricultural Sciences, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin, Jilin 132101;

3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124)

Abstract: The ameliorative effects of rice cultivation (5 ~ 30 years) on soda saline-alkali soil in western Jilin Province of northeast China were studied through field survey and laboratory analysis. The results showed that compared with the virgin soil before cultivating rice, the pH value and the contents of total salt, exchangeable sodium, alkalization degree, the contents of CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ and silt plus clay (<0.053 mm) fractions of soil decreased significantly after rice planting, while the contents of SO_4^{2-} , total organic carbon, water soluble organic carbon, humic acid carbon, fulvic acid carbon, alkali-hydrolyzable nitrogen and large aggregates (2 ~ 0.25 mm) in soil increased significantly. At the same time, the contents of alkyl carbon and alkoxy carbon in organic carbon increased whereas those of aromatic carbon and carbonyl carbon decreased in soil, resulting in an increase of the ratio of aliphatic carbon/aromatic carbon and a decrease of the ratios of alkyl carbon/alkoxy carbon and hydrophobic carbon/hydrophilic carbon. The above changes were usually more obvious with the extension of the rice planting years. The results indicated that rice planting could not only reduce soil alkalinity and salt content, but also increase the content and quality of soil organic carbon and improve soil structure. Therefore, rice planting was an effective way to ameliorate soda saline-alkali soil.

Keywords: rice planting years; soda saline-alkali soil; soil soluble salt composition; soil organic carbon; soil aggregates

收稿日期: 2018-12-05

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300608)

第一作者: 苑佰飞(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: 1633924744@qq.com

通信作者: 张晋京(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤化学研究。E-mail: zhangjinjing@126.com

王立春(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农田生态研究。E-mail: wlc1965@163.com

由于自然和人为因素的影响,世界人均耕地面积正呈现出日益减少的趋势^[1],如何有效地开发和利用后备耕地资源,已成为全球关注的重要问题。盐碱土是世界范围内广泛分布的土壤类型,目前全球盐碱地面积约为 $9.6 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[2],其中地处松嫩平原的盐碱土区又是世界三大盐碱土分布区之一,总面积约为 $3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3]。作为一种重要的后备耕地资源,苏打盐碱土的开发和利用一直受到国内外学者的普遍关注。

以往,关于苏打盐碱土的改良利用已经进行了大量研究,采取的措施主要包括物理^[4]、化学^[5]、生物^[6]和工程^[7]措施等等,其中种植水稻又被认为是改良苏打盐碱土最为有效的方式^[8]。已有研究^[8]表明,苏打盐碱土种稻不仅能够降低土壤盐碱含量,而且可以增加土壤有机质含量,从而形成有利于水稻生长的环境条件,即“淡化表层”^[5]。但目前关于不同种稻年限条件下,苏打盐碱土理化性质动态变化规律的研究少见报道。

吉林省西部是松嫩平原苏打盐碱土的主要分布区域,其中重度盐碱化土地已占到了该区域盐碱土总面积的 43.7%^[9]。本研究中,我们采集了吉林省西部 2 个不同区域内的典型苏打盐碱土,分析了种稻年限对土壤 pH、可溶盐总量及其组成、速效养分含量、腐殖质组成、有机碳含量及其化学组成的影响,探讨了种稻对苏打盐碱土的改良培肥效果,以期为“淡化表层”指标体系的进一步完善以及苏打盐碱土的合理开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土样于 2017 年 4 月采自吉林省西部的前郭县碱巴拉村和镇赉县好斯台屯,土壤类型为苏打盐碱土(草甸碱土)。在 2 个地点分别采集管理措施基本一致的不同种稻年限的土壤样品,其中在碱巴拉村采集了种稻 5, 10, 17, 20, 30 年土样(在种稻的前 1~2 年,每年配合施用硫酸铝进行土壤改良),在好斯台屯采集了种稻 5, 12, 25, 27 年的土样(在种稻的前 5~6 年,每年配合施用硫酸进行土壤改良),并以邻近的未开垦荒地作为对照。采样深度为表层 0—20 cm。为了进行统计分析,将每个种稻年限的田块人为划分成面积大致相等的 3 个小田块,在每个小田块内按对角线法采集 5 个样点的土样,然后混合作为 1 个样品。采集的新鲜土样,沿自然裂隙轻轻掰开,使之全部通过 10 mm 孔径筛,风干后将土样分成两部分,其中一部分用于土壤团聚体分析;其余部分进一步磨细过 2.0, 25 mm 筛,用于其他土壤性质的测定。

1.2 测定方法

土壤基本性质采用常规方法,其中 pH 采用电位法(土:水为 1:2.5),有机碳采用重铬酸钾容量(外

加热)法,水解性氮采用碱解扩散法,有效磷采用 NaHCO_3 法,速效钾采用乙酸铵提取法,可溶盐总量采用电导法,交换性钠离子采用乙酸铵—氢氧化铵交换—火焰光度法,阳离子交换量采用乙酸钠—火焰光度法, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 离子采用双指示剂滴定法, Cl^- 离子采用硝酸银滴定法, SO_4^{2-} 离子采用 EDTA 间接滴定法, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子采用 EDTA 络合滴定法, K^+ 、 Na^+ 离子采用火焰光度法^[10]测定。

土壤腐殖质组成采用腐殖质组成修改法^[11]测定;团聚体分级采用湿筛法,利用自动振荡筛将土样分为大团聚体($>2, 2 \sim 0.25 \text{ mm}$)、微团聚体($0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$)和粉黏粒组分($<0.053 \text{ mm}$)^[12];土样经 10% HF—HCl 混合液处理后,利用 Bruker AVANCE III 400 WB 型波谱仪测定其固态¹³C 交叉极化魔角自旋核磁共振(CPMAS NMR)波谱^[12]。

1.3 统计分析

数据统计采用 DPS 7.5 软件,利用单因素方差分析考察不同种稻年限对土壤性质的影响,最小显著差(LSD)法进行多重比较(显著性水平为 $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 种稻对苏打盐碱土的改良效果

由表 1 可知,种稻之前,土壤的 pH、全盐量、交换性钠、阳离子交换量和碱化度分别为 9.79~10.3, 0.37%~0.38%, 5.65~7.16 coml/kg, 14.8~15.9 coml/kg 和 38.1%~45.2%。一般来看,种稻 5 年时,上述指标即已显著降低,分别达到了 9.34~9.38, 0.12%~0.18%, 4.02~6.27 coml/kg, 14.7~15.4 coml/kg 和 26.2%~42.7%;之后,随着种稻年限的进一步延长,这些指标也逐渐趋于降低。

从土壤可溶盐组成(表 2)来看,种稻之前,阴离子以 SO_4^{2-} 离子为主(约占阴离子总量的 40.9%~47.1%),其次为 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子(两者之和约占阴离子总量的 42.4%~48.2%),而 Cl^- 离子含量最低(约占阴离子总量的 10.5%~10.9%);阳离子以 Na^+ 离子为主(约占阳离子总量的 58.3%~66.3%),其次为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子(两者分别约占阳离子总量的 16.0%~18.9%和 12.9%~15.9%),而 K^+ 离子含量最低(约占阳离子总量的 4.91%~6.82%)。种稻 5 年时, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 离子含量显著降低, SO_4^{2-} 和 K^+ 离子含量显著增加,而 Mg^{2+} 离子含量没有显著的变化;随着种稻年限的进一步延长, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 离子含量均趋于降低,而 SO_4^{2-} 离子含量趋于增加; Mg^{2+} 离子在两个地点的变化规律不尽相同,其中在镇赉县 Mg^{2+} 离子含量趋于增加,而在前郭县则趋于降低;一

般来看,种稻 25 年(镇赉县)和 20 年(前郭县)之后,各离子含量均已达到了稳定状态。上述可溶盐分离

子含量的变化,导致 $(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值随种稻年限的延长逐渐减小。

表 1 种稻年限对苏打盐碱土 pH、全盐量、交换性钠、阳离子交换量和碱化度的影响

采样点	年限/a	pH	全盐量/ %	交换性钠/ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	阳离子交换量/ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱化度/ %
镇赉县	0	9.79±0.13a	0.37±0.06a	7.16±0.03a	15.85±0.22a	45.20±0.53a
	5	9.38±0.14b	0.18±0.03b	6.27±0.23b	14.69±0.18c	42.66±1.64b
	12	8.20±0.07c	0.06±0.02c	4.41±0.10c	13.82±0.24d	31.90±0.18c
	25	8.15±0.06c	0.05±0.00c	3.66±0.07d	15.37±0.16b	23.84±0.67d
	27	8.25±0.01c	0.05±0.00c	2.95±0.01e	15.27±0.15b	19.35±0.25e
前郭县	0	10.26±0.01a	0.38±0.01a	5.65±0.01a	14.83±0.76a	38.13±2.01a
	5	9.34±0.19b	0.12±0.01b	4.02±0.09b	15.40±1.08a	26.19±1.46b
	10	9.13±0.14b	0.11±0.00b	4.14±0.35b	14.88±0.24a	27.81±2.68b
	20	8.43±0.07c	0.05±0.00c	2.78±0.12c	14.51±0.68a	19.20±1.57c
	30	8.42±0.01c	0.07±0.03c	1.99±0.41d	12.31±1.19b	16.09±1.83c

注:同列不同小写字母表示不同种稻年限间差异显著($P < 0.05$)。下同。

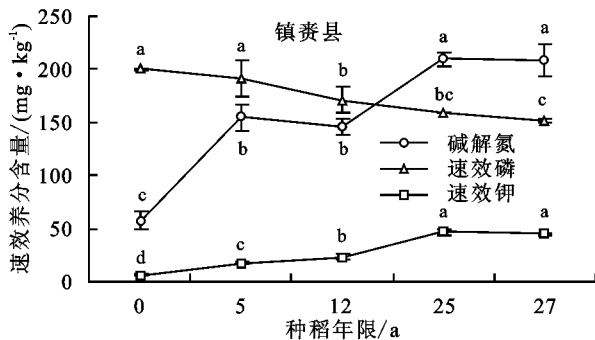
表 2 种稻年限对苏打盐碱土可溶盐组成的影响

采样点	年限/a	$\text{CO}_3^{2-}/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{HCO}_3^-/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{Cl}^-/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{SO}_4^{2-}/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{Ca}^{2+}/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{Mg}^{2+}/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{K}^+/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{Na}^+/$ ($\text{coml} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)/$ ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$)
镇赉县	0	0.29a	0.52a	0.20a	0.90c	0.25a	0.21b	0.09b	0.77a	0.74a
	5	0.13b	0.36b	0.11b	1.50b	0.11b	0.22b	0.11a	0.64b	0.31b
	12	0.00c	0.24c	0.07c	1.11c	0.08c	0.23ab	0.05c	0.52c	0.20c
	25	0.00c	0.15d	0.06c	1.83a	0.05d	0.22ab	0.05c	0.43d	0.08d
	27	0.00c	0.14d	0.08c	1.94a	0.04d	0.25a	0.05c	0.39e	0.07d
前郭县	0	0.26a	0.93a	0.27a	1.01c	0.26a	0.21ab	0.08b	1.08a	0.96a
	5	0.18b	0.51b	0.17b	1.47b	0.11b	0.23a	0.14a	0.69b	0.42b
	10	0c	0.50b	0.09b	1.31bc	0.11b	0.20ab	0.06c	0.63b	0.37b
	20	0c	0.16c	0.03c	1.86a	0.05c	0.17bc	0.02d	0.34c	0.09c
	30	0c	0.10c	0.03c	2.13a	0.05c	0.17c	0.03d	0.29c	0.05c

2.2 种稻对苏打盐碱土的培肥效果

2.2.1 种稻对苏打盐碱土速效养分含量的影响 由图 1 可知,与种稻前相比,种稻后土壤碱解氮和速效磷含量显著增加;而速效钾含量在 2 个地区土壤中的规律性不同,其中在镇赉县土壤中有所降低,而

在前郭县土壤中有所增加。随种稻年限延长,土壤速效磷含量趋于增加;碱解氮含量在镇赉县土壤中趋于增加,而在前郭县土壤中先增加后下降;速效钾含量在镇赉县土壤中趋于降低,而在前郭县土壤中则趋于增加。



注:不同小写字母表示不同种稻年限土壤速效养分含量差异显著($P < 0.05$)。

图 1 种稻年限对苏打盐碱土速效养分含量的影响

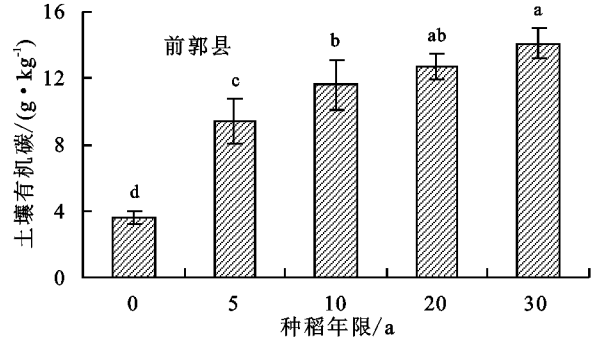
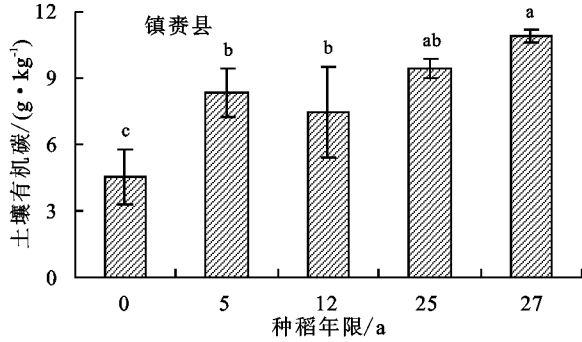
2.2.2 种稻对苏打盐碱土有机碳含量的影响 由图 2 可知,与种稻前相比,种稻 5 年时土壤有机碳含量显著增加,增加幅度约为 84.1%~163.9%;随种稻年限的进一步延长,有机碳含量也趋于增加,并

在种稻 25 年(镇赉县)和 20 年(前郭县)后达到稳定状态。

2.2.3 种稻对苏打盐碱土腐殖质组成的影响 由表 3 可知,与种稻前相比,种稻 5 年时土壤水溶性有机

碳、胡敏酸碳、富里酸碳和胡敏素碳的含量通常都显著增加,增加幅度分别约为 80.0%~92.3%,28.7%~

65.1%,176.3%~469.0%和 50.2%~365.0%;随种稻年限的进一步延长,上述各组分的含碳量也趋于增加。



注:不同小写字母表示不同种稻年限土壤有机碳含量差异显著($P < 0.05$)。

图 2 种稻年限对苏打盐碱土有机碳含量的影响

从胡敏酸碳/富里酸碳比值来看,种稻 5 年时该比值显著降低,下降幅度为 53.6%~70.0%;随种稻年限的延长,该比值也趋于降低,并在种稻 25 年(镇赉县)和 20 年(前郭县)后达到稳定状态,这说明种稻更有利于 FA 的形成;另一方面,从(胡敏酸碳+富里

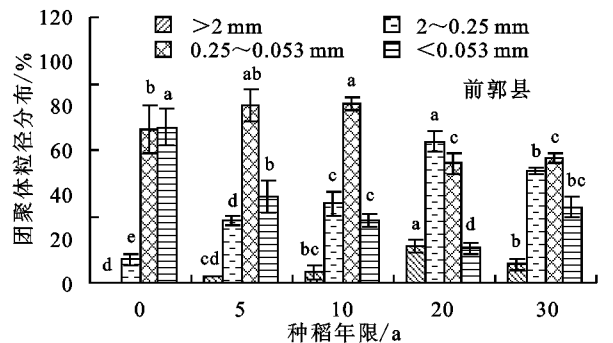
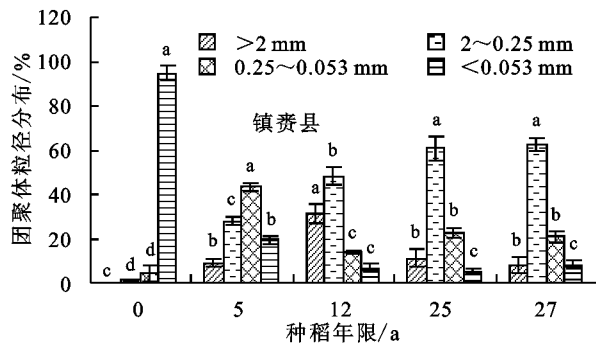
酸碳)/胡敏素碳比值来看,2 个地点的变化规律不尽相同,其中镇赉县土壤该比值随种稻年限延长逐渐增加,而前郭县土壤该比值总体呈下降趋势,这说明种稻在前者土壤中更有利于可提取腐殖质的形成,而在后者土壤中则更有利于不可提取腐殖质的形成。

表 3 种稻年限对苏打盐碱土腐殖质组成的影响

采样点	年限/ a	水溶性碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	胡敏酸碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	富里酸碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	胡敏素碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	胡敏酸碳/(胡敏酸碳+富里酸碳)/ 富里酸碳	胡敏素碳 胡敏素碳
镇赉县	0	0.26±0.08b	1.46±0.39b	0.29±0.08c	2.53±0.78b	5.07±1.00a	0.70±0.06c
	5	0.50±0.19a	2.41±0.42a	1.65±0.29b	3.80±1.06ab	1.52±0.48bc	1.11±0.22bc
	12	0.25±0.07b	2.63±0.37a	1.35±0.58b	3.24±1.41ab	2.19±0.85b	1.39±0.55ab
	25	0.37±0.07ab	2.67±0.07a	3.01±0.11a	3.40±0.51ab	0.89±0.05c	1.70±0.28a
	27	0.38±0.12ab	2.69±0.06a	3.06±0.14a	4.77±0.30a	0.88±0.06c	1.21±0.08abc
前郭县	0	0.25±0.05c	1.71±0.06d	0.38±0.06c	1.23±0.31b	4.55±0.79a	1.76±0.39a
	5	0.45±0.03b	2.20±0.07c	1.05±0.08b	5.72±1.48a	2.11±0.14b	0.60±0.18b
	10	0.52±0.03a	2.66±0.13b	1.01±0.17b	7.42±1.50a	2.71±0.63b	0.51±0.12b
	20	0.55±0.02a	3.29±0.07a	2.39±0.06a	6.46±0.80a	1.38±0.05c	0.89±0.11b
	30	0.56±0.02a	3.30±0.06a	2.49±0.10a	7.74±1.00a	1.33±0.04c	0.76±0.11b

2.2.4 种稻对苏打盐碱土团聚体组成的影响 由图 3 可知,种稻之前,土壤中没有>2 mm 大团聚体的存在;同时,2~0.25 mm 大团聚体的数量也很少,仅约占团聚体总量的 1.15%~6.99%;而<0.053 mm 粉黏粒组分所占比例较大,约占团聚体总量的 46.8%~94.6%。种稻 5 年时,土壤中>2,2~0.25 mm 大团聚体及 0.25~0.053 mm 微团聚体的比例明显增加,而<0.053 mm 粉

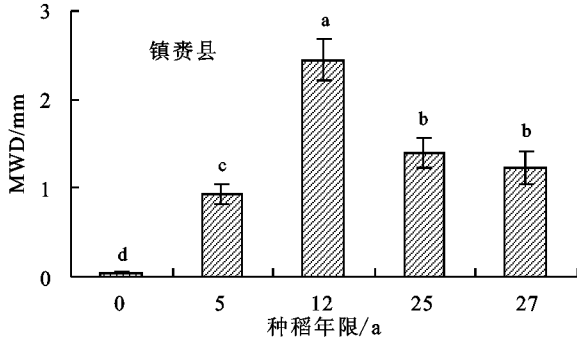
黏粒组分的比例显著降低;随种稻年限的进一步延长,镇赉县土壤中>2,2~0.25,0.25~0.053 mm 团聚体的比例分别在种稻的第 12,27,5 年时达到最大值,前郭县土壤中>2,2~0.25,0.25~0.053 mm 团聚体的比例分别在种稻的第 20,20,10 年时达到最大值,之后呈现降低趋势;另一方面,<0.053 mm 粉黏粒组分通常随种稻年限的延长而降低。



注:不同小写字母表示不同种稻年限土壤团聚体组成差异显著($P < 0.05$)。

图 3 种稻年限对苏打盐碱土团聚体组成的影响

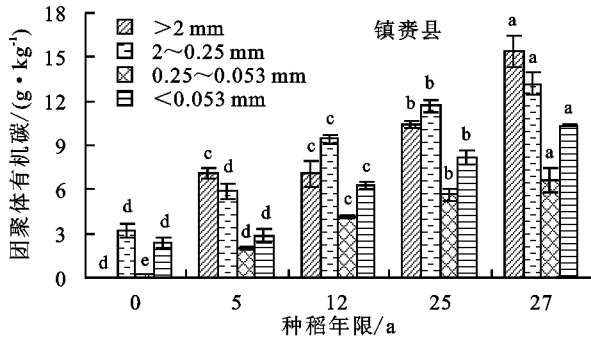
上述土壤各粒径团聚体数量的变化,导致种稻后团聚体的平均重量直径(MWD)比种稻前显著增



注:不同小写字母表示不同种稻年限土壤团聚体 MWD 差异显著($P < 0.05$)。

图 4 种稻年限对苏打盐碱土团聚体平均重量直径(MWD)的影响

2.2.5 种稻对苏打盐碱土团聚体有机碳含量的影响
总体来看,随种稻年限延长,土壤各粒径团聚体有机碳含量都呈现增加趋势(图 5),其中镇赉县土壤中



注:不同小写字母表示不同种稻年限土壤团聚体有机碳含量差异显著($P < 0.05$)。

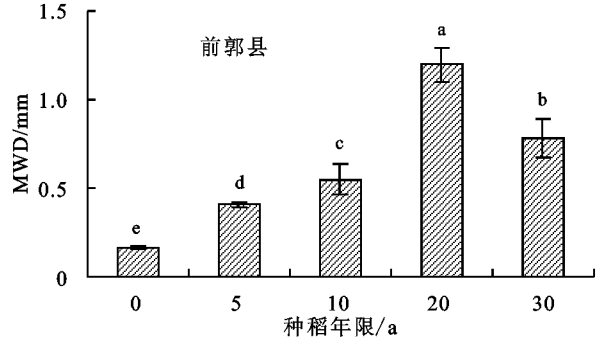
图 5 种稻年限对苏打盐碱土团聚体有机碳含量的影响

2.2.6 种稻对苏打盐碱土有机碳化学组成的影响
为了明确种稻对苏打盐碱土有机碳质量的影响,我们又进一步对镇赉县不同种稻年限土壤有机碳的化学组成进行了分析。从固态 ^{13}C CPMAS NMR 波谱(图 6)来看,苏打盐碱土中含有多种有机碳官能团,包括烷基碳(δ_c 0~50)、烷氧碳(δ_c 50~110)、芳香碳(δ_c 110~160)和羰基碳(δ_c 160~200),其中烷氧碳又可区分为甲氧基碳(δ_c 50~60)、碳水化合物碳(δ_c 60~95)和双烷氧碳(δ_c 95~110),芳香碳又可区分为芳基碳(δ_c 110~145)和酚基碳(δ_c 145~160)^[12]。

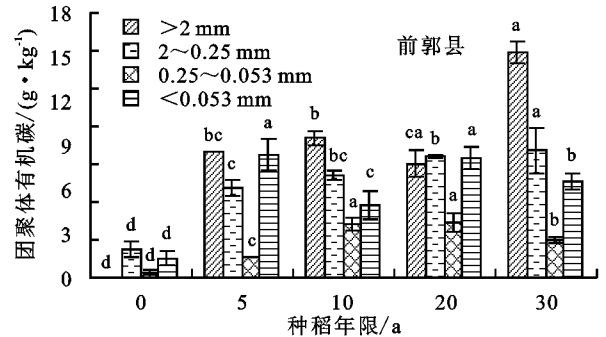
半定量分析结果(表 4)表明,随种稻年限的延长,烷基碳和烷氧碳含量趋于增加,而芳香碳和羰基碳含量趋于降低;烷氧碳中,甲氧基碳、碳水化合物碳和双烷氧碳含量通常都呈增加趋势;芳香碳中,芳基碳含量呈下降趋势,而酚基碳含量则呈增加趋势。

上述不同有机碳官能团的变化,导致脂族碳/芳香碳比值随种稻年限的延长而增加;相反,烷基碳/烷氧碳和疏水碳/亲水碳比值则随种稻年限的延长而降低(图 7)。另外,我们从烷基碳/烷氧碳、脂族碳/芳香碳和疏水碳/亲水碳比值的变化可以看到,烷基碳/烷氧碳和疏水碳/亲水碳比值在种稻 12 年时趋于稳

加,并在 12 年(镇赉县)和 20 年(前郭县)时达到最大值,之后则表现出下降的趋势(图 4)。



各粒径团聚体有机碳含量的增加趋势更为明显,而前郭县土壤在个别年限的团聚体有机碳含量则表现为下降的趋势。



定,而脂族碳/芳香碳比值在种稻 5 年时趋于稳定。

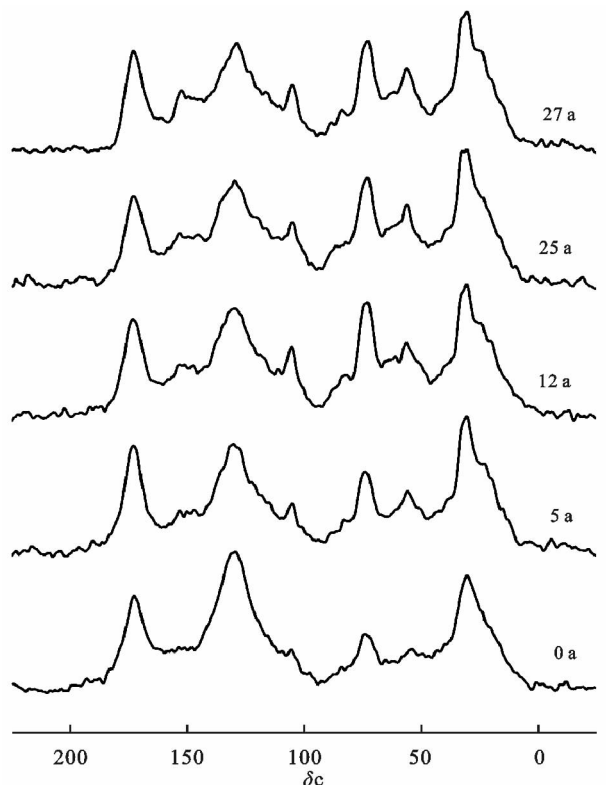


图 6 种稻年限对苏打盐碱土固态 ^{13}C NMR 波谱的影响

表4 种稻年限对苏打盐碱土有机碳官能团相对比例的影响

单位:%

年限/a	烷基碳	烷氧碳			总和	芳香碳			羧基碳
		甲氧基碳	碳水化合物	双烷氧碳		芳基碳	酚基碳	总和	
0	24.70	5.89	11.16	3.92	20.97	32.29	5.89	38.18	16.15
5	27.87	8.41	12.19	6.04	26.64	23.99	6.26	30.26	15.23
12	25.14	7.38	17.40	6.02	30.81	23.88	6.61	30.49	13.56
25	25.84	10.9	14.50	6.20	31.59	22.40	8.09	30.49	12.08
27	26.23	8.46	17.33	5.61	31.40	23.23	7.11	30.34	12.03

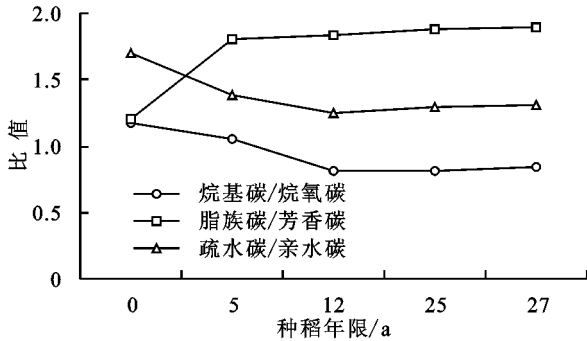


图7 种稻年限对苏打盐碱土烷基碳/烷氧碳、脂族碳/芳香碳和疏水碳/亲水碳的影响

3 讨论

本研究结果表明,与种稻前相比,种稻后土壤的pH、全盐量、交换性钠和碱化度均降低(表1),这与以往的研究^[8,13]结果是相似的。首先,种稻过程可以通过“泡田洗盐”除去土壤中的部分可溶性盐分^[8,14],同时水稻本身也有一定的吸附可溶性盐分的作用^[6];其次,种稻过程中产生的水稻根茬等作物残体,能在微生物作用下分解转化形成腐殖酸等有机酸类物质,具有降低土壤碱性的作用;此外,在种稻初期施入的硫酸或硫酸铝改良剂,也可在一定程度上起到降低土壤pH和碱化度的作用^[5,14]。随种稻年限的延长,前2种作用在苏打盐碱土改良中所占的比重逐渐增大;而硫酸或硫酸铝仅是在种稻开始的几年内,对快速形成有利于水稻生长的环境条件即“淡化表层”起着关键作用。值得注意的是,种稻不仅降低了土壤的可溶性盐分总量,而且还改变了可溶性盐分的离子组成,使得 $(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值随种稻年限延长逐渐减小,说明可溶性盐组成类型逐渐由苏打型转换成硫酸盐型, SO_4^{2-} 离子的含量逐渐增加可能与苏打盐碱土每年施用硫酸铵、硫酸钾等生理酸性肥料有关。

本研究结果表明,种稻明显增加了土壤碱解氮和速效磷的含量(图1),这与王巍巍等^[13]对吉林省前郭县不同种稻年限(1~20年)苏打盐碱水田的研究结果是一致的。一方面,种稻期间每年施入的氮、磷化肥能增加土壤中碱解氮和速效磷的含量;另一方面,水稻根茬等作物残体在微生物作用下的分解和转化过程,也有利于营养元素的释放,从而提高了土壤中有效养分的含量;此外,随种稻年限延长,土壤碱性降低的同时有机质含量提高,这有利于抑制氮素的挥发损失以及降低磷素的固定作用^[13],也能增加土壤中

碱解氮和速效磷的含量。但从速效钾含量来看,2个地点的变化趋势有所不同,从水稻来看,它是需钾量较高的作物,其生长过程中对钾的吸收利用使得土壤中速效钾含量有下降趋势^[15];而从钾元素来看,苏打盐碱土中的2:1型黏粒矿物对 K^+ 具有较好的固定作用,使其不易随水流失^[13],因此,速效钾含量的不同变化可能与2个地点钾的供需状况(即钾肥的施用量以及作物对钾的吸收利用情况)不同有关,当钾肥施用量超过作物的需钾量时,可能出现钾的积累;反之,则可能会导致钾的亏缺。

本试验中,随种稻年限延长,土壤有机碳及腐殖质组分碳的含量都趋于增加(表2),这是由于种稻过程对苏打盐碱土的改良作用能够提高作物产量,增加了土壤中水稻根茬的残留量,而水稻根茬本身的有机碳含量较高,同时稻田潜水层的存在也为有机物质的积累提供了必备的厌氧条件^[3],使得土壤有机碳逐渐积累^[16];随着土壤熟化程度的提高,土壤微生物数量和类群趋于增多^[6],水稻根茬经土壤微生物作用后部分转化为腐殖质^[17],进而提高了土壤腐殖质组分碳的含量;另一方面,本研究中,土壤胡敏酸碳/富里酸碳比值随种稻年限延长趋于降低,说明长期种稻更有利于富里酸的形成或者胡敏酸向富里酸的转化,从而降低了土壤的腐殖化程度。刘胜楠^[18]发现,土壤腐殖化程度随种稻年限延长趋于增加,这与我们的研究结果不同,其原因可能与腐殖质形成过程驱动机制的复杂性^[19]有关。

以往的研究^[20]指出,气候条件、植被生物量和有机胶结物质都是影响土壤团聚体稳定性的关键因素。从本研究结果(图3,图4)可以看到,苏打盐碱土开垦前主要以粉黏粒为主,同时也存在一定数量的微团聚体,但由于缺乏有机碳、水溶性碳和腐殖质碳等相应的胶结物质,加之盐碱土区气候干旱和植被覆盖度低,使得土壤中大团聚体(尤其是 $>2\text{ mm}$)的数量很少,导致团聚体稳定性较低,土壤结构性较差。开垦种稻之后,随着植被恢复以及土壤有机碳及其组分含量的增加,粉黏粒和微团聚体逐渐团聚形成更大的大团聚体,使得团聚体稳定性提高,土壤结构性变好。然而,值得注意的是,土壤团聚体稳定性在增加到一定年限(镇赉县增加到第12年,前郭县增加到第20年)之后反而下降了,这可能与化肥不合理施用导致的养分利用率较低有关。Zhang等^[12]的研究发现,

提高养分利用率能够显著增加土壤中 >2 mm 大团聚体的比例。土壤团聚体的形成有利于通过物理保护作用提高土壤中有机碳的稳定性^[21],这也是种稻后土壤有机碳含量增加的主要原因之一。

本研究发现,种稻改良使土壤有机碳的组成也发生了改变,即随种稻年限的延长土壤的脂族碳/芳香碳比值增加而烷基碳/烷氧碳和疏水碳/亲水碳比值降低,这说明种稻过程提高了土壤有机质的脂族化程度但降低了其分解程度和疏水化程度。一般认为,烷基碳/烷氧碳比值能够用来表征土壤有机碳的质量,该比值越低说明土壤有机碳的质量越好^[22]。因此,本研究结果表明,种稻在提高苏打盐碱土有机碳含量的同时也改善了其质量。另外,研究发现上述比值在种稻至一定年限时逐渐趋于稳定,因此可以采用达到稳定时的有机碳官能团比值作为苏打盐碱土熟化程度的表征指标,即烷基碳/烷氧碳、脂族碳/芳香碳和疏水碳/亲水碳比值分别达到 0.82,1.80,1.25 左右。

4 结论

(1)种稻后土壤的 pH、全盐量、交换性钠、碱化度、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 含量显著降低,而 SO_4^{2-} 含量显著增加。

(2)种稻后土壤中总有机碳、水溶性有机碳、胡敏酸碳和富里酸碳含量增加,同时 2~0.25 mm 大团聚体含量显著增加,而 <0.053 mm 粉黏粒含量显著降低。

(3)种稻后土壤的烷基碳和烷氧碳含量增加,而芳香碳和羰基碳含量降低,脂族碳/芳香碳增加而烷基碳/烷氧碳和疏水碳/亲水碳降低。

(4)种稻不仅能够降低土壤碱性和盐分含量,而且有助于提高土壤有机碳的含量和品质以及改善土壤结构性,是改良和培肥苏打盐碱土的有效方式。

参考文献:

[1] 杨秉珣,董廷旭.世界耕地面积变化态势及驱动因素分析[J].世界农业,2017(3):51-57,84.

[2] 林佳,宋戈,张莹.基于景观生态风险格局的盐碱地分区规划防治研究:以黑龙江省林甸县为例[J].生态学报,2018,38(15):5509-5518.

[3] 赵兰坡,冯君,王宇,等.松嫩平原盐碱地种稻开发的理论与技术问题[J].吉林农业大学学报,2012,34(3):237-241.

[4] Luo S S, Wang S J, Tian L, et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils [J]. Geoderma, 2018, 329: 108-117.

[5] 赵兰坡,王宇,冯君,等.松嫩平原盐碱地改良利用—理论与技术[M].北京:科学出版社,2013:115-186.

[6] 徐晓腾,赵兰坡.种稻法对苏打盐碱土改良贡献的研究[J].中国农学通报,2011,27(12):130-133.

[7] 李凯,窦森,张庆联,等.暗管排水技术及其在苏打盐碱土改良上的应用[J].吉林农业科学,2012,37(1):41-43.

[8] 张梅.吉林省西部苏打盐碱土种稻改良机理与生产关键技术研究[D].长春:吉林农业大学,2015.

[9] 许晓鸿,刘肃,赵英杰,等.吉林省西部不同环境因子对苏打盐碱地分布的影响[J].水土保持通报,2018,38(1):89-95.

[10] 鲁如坤.土壤农化分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:12-196.

[11] Zhang J J, Wang L B, Li C L. Humus characteristics after maize residues degradation in soil amended with different copper concentrations [J]. Plant, Soil and Environment, 2010, 56(3): 120-124.

[12] Zhang J J, Cao Z Y, Feng G Z, et al. Effects of integrated soil-crop system management on soil organic carbon characteristics in a Primosol in Northeast China [J]. Pedosphere, 2017, 27(5): 957-967.

[13] 王巍巍,魏春雁,张之鑫,等.不同种稻年限盐碱地水田表层土壤酶活性变化及其与土壤养分关系[J].东北农业科学,2016,41(4):43-48.

[14] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Extensive reclamation of saline-sodic soils with flue gas desulfurization gypsum on the Songnen Plain, Northeast China [J]. Geoderma, 2018, 321: 52-60.

[15] 迟美静,侯玮,孙莹,等.东北黑土区荒地开垦种稻后土壤养分及 pH 值的变化特征[J].土壤通报,2018,49(3):546-551.

[16] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124: 119-130.

[17] Tang H M, Xiao X P, Li C, et al. Impact of long-term fertilization practices on the soil aggregation and humic substances under double-cropped rice fields [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(11): 11034-11044.

[18] 刘胜楠.种稻对苏打盐碱土有机碳及微团聚体含量与组成的影响[D].长春:吉林农业大学,2016.

[19] 窦森,李艳,关松,等.腐殖物质特异性及其产生机制[J].土壤学报,2016,53(4):821-831.

[20] Li C L, Cao Z Y, Chang J J, et al. Elevational gradient affect functional fractions of soil organic carbon and aggregates stability in a Tibetan alpine meadow [J]. Catena, 2017, 156: 139-148.

[21] Guan S, An N, Zong N, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116: 224-236.

[22] He Y, Chen C R, Xu Z H, et al. Assessing management impacts on soil organic matter quality in subtropical Australian forests using physical and chemical fractionation as well as ^{13}C NMR spectroscopy [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41: 640-650.