

邱璇, 赵建宁, 李文亚, 等. 不同利用方式对小针茅荒漠草原土壤有机碳储量及其结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11):2137-2145.
QIU Xuan, ZHAO Jian-ning, LI Wen-ya, et al. Effects of different land use types on storage and structure of soil organic carbon in *Stipa klemenaii* steppe in Inner Mongolia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11):2137-2145.

不同利用方式对小针茅荒漠草原土壤有机碳储量及其结构的影响

邱璇^{1,2}, 赵建宁¹, 李文亚^{1,2}, 张乃芹³, 朱岩¹, 杨殿林^{1,2*}

(1.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866; 3.德州学院生态与园林建筑学院, 山东德州 253023)

摘要:在围封、3个放牧梯度[0.50羊单位·hm⁻²(G0.50)、0.94羊单位·hm⁻²(G0.94)、1.25羊单位·hm⁻²(G1.25)]和开垦5种处理条件下,对内蒙古小针茅荒漠草原土壤容重、土壤有机碳含量、有机碳密度和有机碳储量的影响开展野外监测试验,并利用核磁共振波谱法测定0~20 cm土层土壤有机碳结构。结果表明:同一土层,不同利用方式下,放牧区和开垦区与围封区相比,土壤有机碳含量、有机碳密度有降低的趋势,土壤容重有增加的趋势。随着放牧强度的增加,土壤有机碳含量、有机碳密度表现为逐渐降低的趋势。同一处理,随着土层的加深,小针茅荒漠草原土壤容重先降低后增加,而土壤有机碳含量和有机碳密度先增加后降低,在30~40 cm土层达到最大值。放牧和开垦与围封相比,土壤有机碳储量下降。其中,G1.25和开垦区的土壤有机碳储量显著(P<0.05)低于围封区。随着放牧强度的增加,土壤有机碳储量逐渐降低。不同利用方式和放牧强度下小针茅荒漠草原土壤有机碳化学组分没有发生变化,各组分的相对比例出现差异。其中,烷氧碳(34.86%~37.85%)、烷基碳(26.05%~33.87%)、芳香碳(10.60%~17.69%)和羧基碳(14.57%~16.90%)是土壤有机碳结构的主要组成成分。放牧区和开垦区与围封区相比,烷基碳和羧基碳的相对比例减小,烷氧碳和芳香碳的相对比例增加,随着放牧强度的增加,烷基碳的相对比例逐渐降低,烷氧碳相对比例逐渐增加。围封草原土壤腐殖化指数最大(表现为围封区>开垦区>G0.50>G0.94>G1.25),而芳香性最小(表现为G1.25>G0.94>开垦区>G0.50>围封区),说明围封区土壤有机碳更趋稳定,在土壤固碳方面有一定的意义。

关键词:有机碳结构; ¹³C-核磁共振; 利用方式; 小针茅荒漠草原

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)11-2137-09 doi:10.11654/jaes.2016-0348

Effects of different land use types on storage and structure of soil organic carbon in *Stipa klemenaii* steppe in Inner Mongolia

QIU Xuan^{1,2}, ZHAO Jian-ning¹, LI Wen-ya^{1,2}, ZHANG Nai-qin³, ZHU Yan¹, YANG Dian-lin^{1,2*}

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2.College of Horticulture, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 3.College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou 253023, China)

Abstract: The composition and structure of soil organic carbon (SOC) are complex and includes many functional components. In order to study the influence of different land use types on SOC storage and structural characteristics in *Stipa klemenaii* desert steppe of Inner Mongolia, field sampling, laboratory analysis and ¹³C Nuclear Magnetic Resonance (¹³C NMR) were employed to analyze the soil bulk density, SOC content, density and storage in soil depth of 0~100 cm, and the structure of SOC in soil depth of 0~20 cm. 5 different treatments were set up, including three grazing treatments [0.50 sheep·hm⁻²(G0.50), 0.94 sheep·hm⁻²(G0.94), 1.25 sheep·hm⁻²(G1.25)], one enclosure and one reclamation treatments. The enclosed area was fenced excluding livestock and human disturbance while the reclamation area planted maize

收稿日期:2016-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(31170435);“十二五”国家科技计划项目(2012BAD13B07)

作者简介:邱璇(1990—),女,山东青岛人,在读硕士。E-mail:qiuxuan2010@126.com

*通信作者:杨殿林 E-mail:yangdianlin@cass.cn

(Zea mays) as local general agricultural management. The results showed that, compared with the enclosed area, in the same soil layer, SOC content and density showed a decrease trend; soil bulk density showed an increase trend. With the increase of grazing intensity, SOC content and density reduces gradually. In the same treatment, the soil bulk density of *S. klemenaii* desert grassland firstly reduced then increased as the soil layer deepen, while the content of SOC and SOC density increased then decreased, and reached the maximum in 30–40 cm. Compared with the enclosed area, the SOC declines in the grazing and reclamation areas. In which, the SOC of the G1.25 and reclamation treatments were significantly ($P < 0.05$) lower than the enclosed area, besides, the SOC reduce gradually with the increase of grazing intensity. The influence of different land use types on *S. klemenaii* desert grassland SOC structure was mainly embodied on chemicals composition, meanwhile the chemicals of SOC component has not changed. Of which, silane oxygen carbon (34.86%–37.85%), alkyl carbon (26.05%–33.87%), aromatic carbon (10.60%–17.69%) and carbonyl carbon (14.57%–16.90%) are the main compositions of SOC structure. Compared with grazing and reclamation, the soil humification index of the enclosure grassland was the biggest, which performed as enclosed area > reclamation area > G0.50 > G0.94 > G1.25; however the aromatic degree of enclosure grassland was the smallest, characterized by G1.25 > G0.94 > reclamation area > G0.50 > enclosed area. Which demonstrated that the SOC in enclosed area was more stable, and had certain significance in terms of soil carbon sequestration.

Keywords: structure of soil organic carbon; ^{13}C -NMR; land use type; *Stipa klemenaii* desert steppe

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库,约为大气碳库的2倍,陆地植被碳库的2~4倍,土壤贡献于大气 CO_2 的年通量是燃烧化石燃料的10倍^[1],土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)的微小变化将会极大缓和或加速大气 CO_2 浓度的提高,进而改变全球碳循环^[2]。土壤有机碳也是土壤质量的核心,很大程度上影响着土壤结构的形成和稳定,起着缓解和调节与土壤退化有关的一系列过程,是土壤质量评价和土地可持续利用的重要指标^[3-4]。

人类活动对草原生态系统的影响日益严重,不同利用方式是导致草原土壤有机碳变化的主要途径^[5]。开垦和放牧是人类对草原的主要利用方式,而围封是当前我国退化草地恢复其质量和生态功能所采用的最广泛、且易操作的措施之一。但因草地类型、管理方式以及研究方法的不同,目前不同利用方式对土壤有机碳的研究结果还不尽一致。李春莉等^[6]和阿穆拉等^[7]对荒漠草原土壤有机碳的研究表明,与围封区相比,放牧降低了土壤有机碳含量。而刘楠等^[8]研究发现,内蒙古锡林河流域羊草典型草原有机碳含量放牧区高于围封未放牧地。耿元波等^[9]研究发现,贝加尔针茅草原开垦后,1 m土层内的土壤有机碳含量明显下降。围封可使草地生态系统碳储量显著增加^[9],但是碳蓄积效率会随着时间的进程逐渐下降,最终达到一个相对平衡状态^[10]。

长期以来,人们在土壤有机碳数量方面做了大量的工作,充分认识土壤有机碳的转化循环必须从土壤有机碳结构研究入手,对土壤有机碳进行结构表征对于研究土壤有机碳的变化至关重要^[11]。核磁共振技术(NMR)作为一种非破坏性的分析方法,在研究土壤

有机碳库的化学结构上优势明显^[12]。李国栋等^[13]在土壤有机质转化的研究中,采用 ^{13}C NMR技术,分析有机碳库的组成特征及其稳定性。郭素春等^[14]也利用固态 ^{13}C NMR技术分析了土壤和团聚体中有机质的分子结构特征。但是,对小针茅荒漠草原土壤有机碳化学结构的研究还未见报道。

小针茅荒漠草原是内蒙古草原的重要组成部分,占内蒙古温性荒漠草地面积的73.28%。与其他类型的草原相比,荒漠草原的自然环境更加恶劣,生态系统更加脆弱,对人为干扰也更为敏感。由于不合理的人为利用,草原退化严重。因此,本研究借助核磁共振技术判别土壤有机碳化学结构特点,分析土壤有机碳积累与有机碳化学结构特征之间的关系,对于科学地利用和保护草原资源具有重要的理论和实际意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古苏尼特右旗赛汗塔拉镇,中国农业科学院草原研究所荒漠草原试验站。地理坐标为 $42^{\circ}46'N$ 、 $112^{\circ}40'E$,海拔1079 m。属于中温带干旱性大陆性气候,年平均气温 3.9°C ,无霜期135 d,多年平均降雨量181.2 mm,蒸发量2800 mm。土壤类型为棕钙土,基本理化性质如表1。主要植物有:小针茅(*Stipa klemenaii*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、多根葱(*Allium polyrhizum*)、阿氏旋花(*Convolvulus ammannii*)、芸香草(*Haplophyllum dauricum*)等。试验布设于2010年7月,设置5个处理,分别为围封区、3个放牧梯度区[0.50羊单位· hm^{-2} (G0.50)、0.94羊单位· hm^{-2} (G0.94)、1.25羊单位· hm^{-2} (G1.25)]和开垦

区,每个小区面积 16 hm²,3 次重复。小区间用网围栏分隔,围封区无牲畜和人为干扰。开垦区种植玉米 (*Zea mays*),依当地常规管理。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil studied(0~20 cm)

pH 值	有机质 SOM/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	全磷 Total P/g·kg ⁻¹	C/N
8.59	13.58	0.76	0.25	10.30

1.2 试验样品采集

土壤样品采集时间为 2014 年 8 月。在每个小区沿对角线方向挖两个 1 m 深的土壤剖面,采样深度与国际上通行的土壤碳贮量计算深度一致。用环刀法,由下至上,每 10 cm 一层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90、90~100 cm),每层取 3 个容重样品,测定土壤容重。

在各个处理小区内按照“S”型取样法选取 20 个样点,每 10 cm 一层,取样深度为 1 m,用土钻分层采集土壤样品。土样自然风干,研磨过筛后用于土壤有机碳含量、有机碳密度的测定分析。在各个处理小区内按照“S”型取样法选取 20 个点,去除表面植被,取 0~20 cm 土层土壤混匀过筛,土壤样品于室内自然风干后研磨过筛,用于土壤有机碳结构的测定分析。

1.3 测定方法

土壤容重采用环刀法^[5]。土壤有机碳含量的测定采用水合热重铬酸钾氧化-比色法^[5]。

土壤样品在进行核磁共振分析前,先用 10%的氢氟酸(HF)进行预处理,除去土壤中的 Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 以提高信号与背景噪音的比例强度。主要参考 Mathers 等^[6]的方法并略有改动:称 5 g 土壤样品于 100 mL 离心管中,加 50 mL HF(体积分数 10%)溶液,振荡 1 h (25 °C, 100 r·min⁻¹),离心 15 min(3000 r·min⁻¹),弃上清液,残余物继续用 HF 溶液处理,共重复处理 8 次,振荡时间依次是:第 1~4 次 1 h,第 5~7 次 12 h,最后 1 次 24 h。处理后的残余物用蒸馏水洗至中性,方法如下:加 50 mL 蒸馏水,振荡 10 min,离心机上 3000 r·min⁻¹ 离心 10 min,去掉上清液,整个过程重复 5~6 次。残余物在烘箱中 40 °C 烘干,磨细过 60 目筛后置于塑封袋中待测。样品在 Bruker AV 400 MHz 型固体核磁共振仪上测定,采用交叉极化魔角自旋(CP MAS)技术,光谱频率为 100.63 MHz,魔角自旋频率为 6 kHz,接触时间为 2 ms,脉冲延迟时间为 0.5 s,采样时间为 0.01 s。各类型碳相对含量用该区间化学位移

积分面积的百分数表示,由机器自动给出。

土壤有机碳密度(Soil organic carbon density, SOCD)指单位面积一定深度土体中土壤有机碳质量,单位为 kgC·m^{-2[7]}。

某一土层 i 的有机碳密度计算公式为:

$$SOC_i = C_i \cdot \theta_i \cdot D_i \cdot (1 - \delta_i) / 100$$

式中: C_i 为第 i 层土壤有机碳的平均含量, g·kg⁻¹; θ_i 为第 i 层土壤容重, g·cm⁻³; D_i 为土壤厚度, cm; δ_i 为第 i 层中直径大于 2 mm 的石砾所占的百分比, %。

如果某一土体的剖面由 k 层组成,那么该剖面土壤有机碳密度 SOC_i(土壤有机碳储量)计算公式为:

$$SOC_i = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i \cdot \theta_i \cdot D_i \cdot (1 - \delta_i) / 100$$

评价有机碳结构特征的两个指标^[8]:

腐殖化指数=烷基碳/烷氧碳

芳香性=芳香碳/(烷基碳+烷氧碳+芳香碳)

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 对试验数据进行处理及相关性统计分析,不同处理间的差异显著性采用 One-Way ANOVA 检验。

2 结果与分析

2.1 不同利用方式下土壤容重变化

不同利用方式下小针茅荒漠草原土壤容重如图 1 所示。同一处理,随着土层的加深,土壤容重先降低后升高,且在 30~40 cm 土层土壤容重最小。同一土层,不同利用方式下,放牧区和开垦区与围封区相比,土壤容重有增加的趋势,随着放牧强度的增加,土壤容重逐渐增加,各处理间差异不显著。

2.2 不同利用方式下土壤有机碳含量变化

不同利用方式下小针茅荒漠草原土壤有机碳含量如图 2 所示。同一处理,随土层的加深,土壤有机碳含量呈现先增加后降低的趋势,在 30~40 cm 土层出现最大值。除 0~10 cm 土层,同一土层不同处理间,放牧区和开垦区与围封区相比,土壤有机碳含量有降低的趋势,且在 60~70 cm 和 70~80 cm 土层差异显著 (P<0.05),而这主要是土壤空间差异引起的。0~10 cm 土层,土壤有机碳含量开垦区>围封区>放牧区。随着放牧强度的增加有机碳含量逐渐降低。

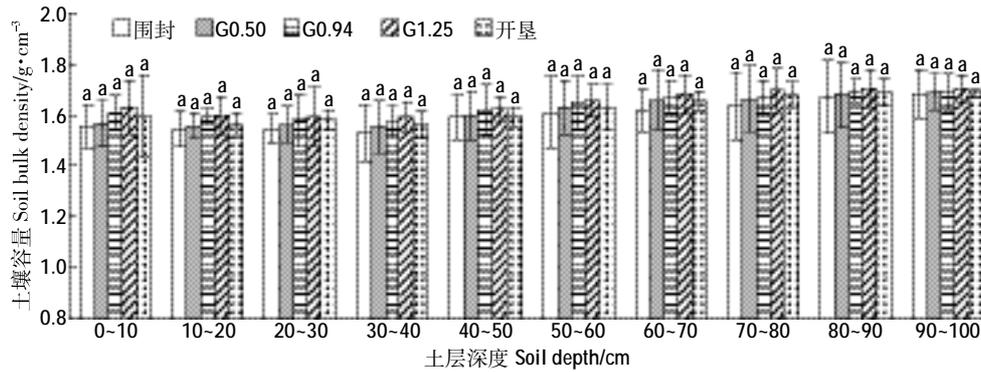
2.3 不同利用方式下草原土壤有机碳密度变化

不同利用方式下小针茅荒漠草原土壤有机碳密度如图 3 所示。土壤有机碳密度随土层深度变化的趋势与土壤有机碳含量变化趋势一致。同一处理,随土

层深度的增加,土壤有机碳密度呈现先增加后降低的趋势,在 30~40 cm 土层出现最大值。同一土层,不同处理间,放牧区和开垦区与围封区相比,土壤有机碳密度有降低的趋势。随着放牧强度的增加,土壤有机碳密度逐渐减小。除 10~20 cm 土层,同一土层,不同处理间,G1.25 处理的土壤有机碳密度最低。

2.4 不同利用方式草原土壤有机碳储量变化

不同利用方式下小针茅荒漠草原土壤有机碳储量如图 4 所示。具体表现为围封>G0.50>G0.94>开垦>G1.25。围封区的土壤有机碳储量为 9.30 kg·m⁻²,显著高于 G1.25 和开垦区(P<0.05),分别是 G0.50、G0.94、G1.25 和开垦区的 1.11、1.19、1.35、1.23 倍。G1.25 处



图中误差棒表示标准偏差,不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。下同

The error bars are SD. Different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05) among different treatments. The same below

图 1 不同利用方式下小针茅荒漠草原 0~100 cm 土层土壤容重

Figure 1 Soil bulk density in each soil layer of 0~100 cm under different land use types in *Stipa klemenaii* steppe

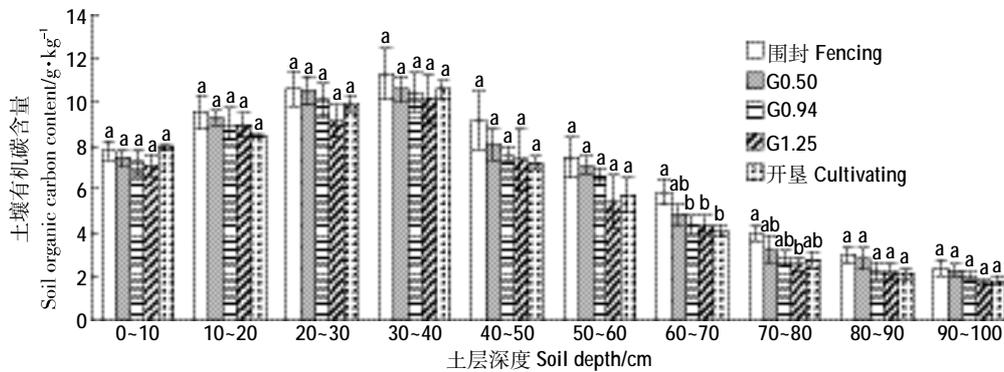


图 2 不同利用方式下小针茅荒漠草原 0~100 cm 土壤有机碳含量

Figure 2 Soil organic carbon content in each soil layer of 0~100 cm in *Stipa klemenzii* desert steppe under different land use types

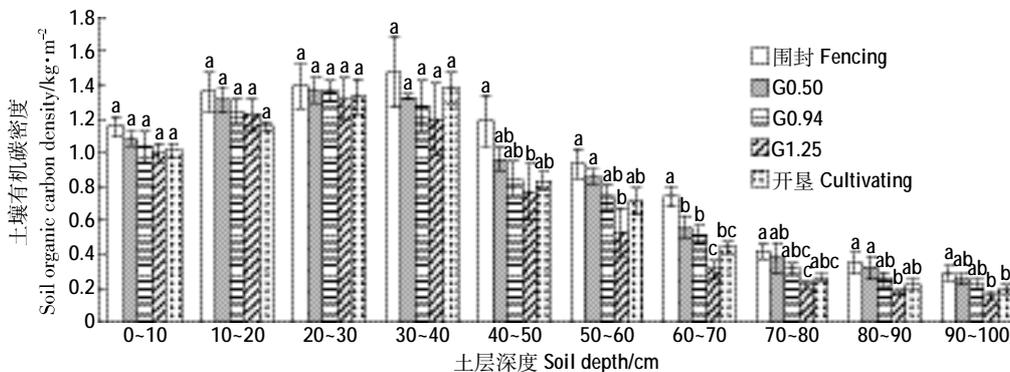


图 3 不同利用方式下小针茅荒漠草原 0~100 cm 剖面土壤有机碳密度

Figure 3 Soil organic carbon density in each soil layer of 0~100 cm in *Stipa klemenzii* desert steppe under different land use types

理的土壤有机碳储量最低,为 $6.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,与围封区相比,显著($P < 0.05$)下降了 25.99%。开垦区的土壤有机碳储量与围封区相比显著($P < 0.05$)下降了 18.88%。随着放牧强度的增加,土壤有机碳储量逐渐降低,说明开垦和过度放牧不利于土壤有机碳的积累。

2.5 不同利用方式下草原土壤有机碳组分结构特征

土壤有机碳固态 NMR 碳谱根据化学位移主要可划分为 4 个共振区域(图 5):烷基碳区(Alkyl C, $\delta = 0 \sim 45 \text{ ppm}$),主要来源于脂类、木栓质、蜡状质等;烷氧碳区(O-alkyl C, $\delta = 45 \sim 110 \text{ ppm}$),主要来自纤维素、半纤维素等碳水化合物,也有蛋白质和木质素侧链;芳香碳区(Aromatic C, $\delta = 110 \sim 160 \text{ ppm}$),主要来自木质素、角质、单宁素和不饱和烯烃等;羰基碳区(Carboxyl C, $\delta = 160 \sim 200 \text{ ppm}$),来自于氨基酸、脂肪酸、酰胺、酯的吸收^[16]。其中烷氧碳($\delta = 45 \sim 110 \text{ ppm}$)可进一步分为甲氧基/含氮烷基碳(Methoxyl+N-Alkyl-C, $\delta = 45 \sim 60 \text{ ppm}$)、含氧烷基碳(O-Alkyl-C, $\delta = 60 \sim 93 \text{ ppm}$)和乙缩醛碳(di-O-Alkyl-C, $\delta = 93 \sim 110 \text{ ppm}$);而芳香碳($\delta = 110 \sim 160 \text{ ppm}$)可进一步细分为芳基碳(Aryl-C, $\delta = 110 \sim 142 \text{ ppm}$)和酚基碳(Phenolic-C, $\delta = 142 \sim 160$

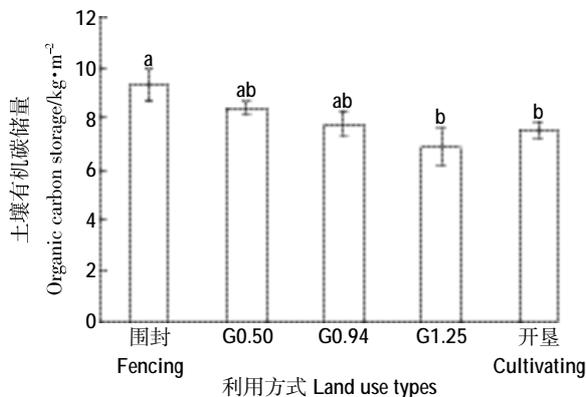


图 4 不同利用方式小针茅荒漠草原土壤 0~100 cm 有机碳储量
Figure 4 Soil organic carbon storage in 0~100 cm soil layer under different land use types

ppm)^[14,19]。图谱显示,烷基碳和烷氧碳是所有土壤样品的主要组成成分。不同利用方式下小针茅荒漠草原土壤有机碳的化学组成没有显著差异。

不同利用方式下小针茅荒漠草原土壤有机碳各组分相对含量如表 2 所示。土壤有机碳形态烷氧碳(34.86%~37.85%)比例最高,其次为烷基碳(26.05%~33.87%),再次为芳香碳(10.60%~17.69%)和羰基碳(14.57%~16.90%)。放牧区和开垦区与围封区相比,烷基碳和羰基碳的相对比例减小,烷氧碳和芳香碳的相对比例增加。随着放牧强度的增加,烷基碳的相对比例逐渐降低。烷氧碳中比例最大的含氧烷基碳与芳香碳中比例最大的芳基碳的变化趋势相同,具体表现为放牧区和开垦区高于围封区。随着放牧强度的增强,含氧烷基碳和芳基碳的相对比例逐渐增加。腐殖化指数(烷基碳/烷氧碳)表现为围封区>开垦区>G0.50>G0.94>G1.25。芳香性表现为G1.25>G0.94>开垦区>G0.50>围封区。

从图 6 可以看出,土壤有机碳含量与烷基碳和羰基碳呈正相关关系,与烷氧碳呈负相关关系(差异不显著),与芳香碳呈显著($P < 0.05$)负相关关系。烷基碳和烷氧碳在土壤有机碳中的比例最大,由此推断,烷

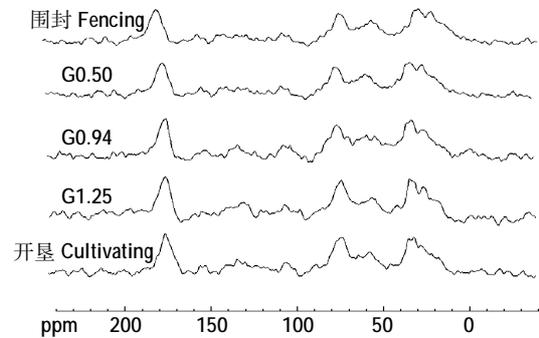


图 5 不同利用方式下土壤有机碳 ¹³C-NMR 图谱
Figure 5 ¹³C-NMR spectrogram of soil organic carbon under different land use types

表 2 不同利用方式下小针茅荒漠草原土壤有机碳各组分相对含量
Table 2 Proportions of the components of soil organic matter under different land use types

处理 Treatment	烷基碳 Alkyl-C/%	烷氧碳 O-Alkyl-C/%				合计 Total	芳香碳 Aromatic-C/%			羰基碳 Carbonyl-C/%	腐殖化指数 HI	芳香性 fa
		甲氧基+含氧烷基碳 Methoxyl+N-Alkyl-C	含氧烷基碳 O-Alkyl-C	乙缩醛碳 di-O-Alkyl-C	合计 Total		芳基碳 Aryl-C	酚基碳 Phenolic-C	合计 Total			
围封 Fencing	33.87	11.22	19.11	4.54	34.86	8.62	1.98	10.60	16.90	0.97	0.13	
G0.50	30.77	11.74	20.96	5.15	37.85	9.83	4.21	14.04	15.03	0.81	0.17	
G0.94	27.80	9.65	21.16	6.33	37.14	13.19	4.09	17.28	14.57	0.75	0.21	
G1.25	26.05	9.22	23.16	5.39	37.76	13.23	4.46	17.69	15.99	0.69	0.22	
开垦 Cultivating	31.12	10.45	20.05	5.23	35.73	10.92	4.39	15.31	14.91	0.87	0.19	

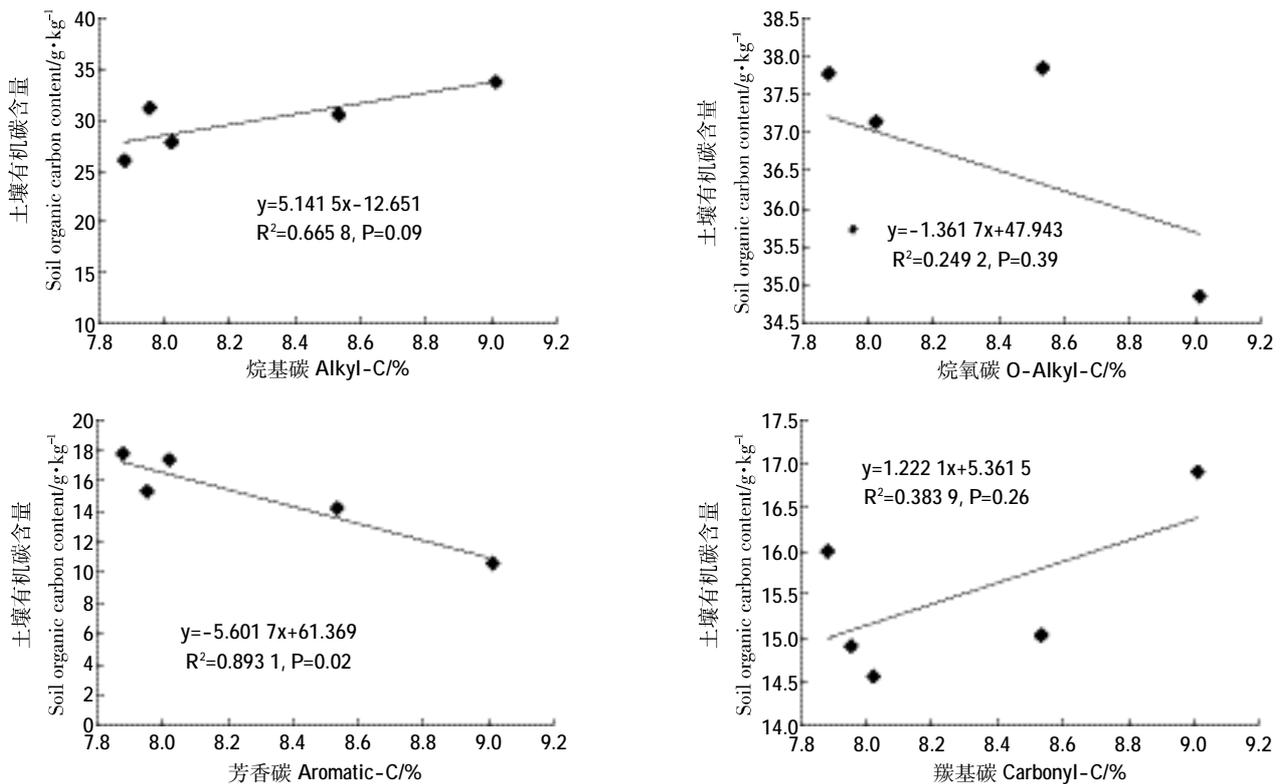


图6 土壤有机碳含量与有机碳各化学结构之间的相关性
Figure 6 The relationship between SOC and SOC chemical composition

基碳可能是土壤有机碳增加的主要贡献者。

3 讨论

3.1 不同利用方式对土壤有机碳储量的影响

草原不同的利用方式影响土壤有机碳的输入和输出,进而决定土壤有机碳储量的变化^[20]。放牧是草原利用的最主要形式之一,不合理的放牧是草原植被及土壤退化的主要原因。本研究结果显示,与围封区相比,放牧使小针茅荒漠草原土壤有机碳含量、有机碳密度和有机碳储量均有降低的趋势,且随着放牧强度的增加而逐渐降低。白高娃等^[21]对短花针茅荒漠草原的研究以及范月君等^[22]对三江源区高寒草甸的研究结果也表明放牧使土壤有机碳储量下降,与本研究结果相吻合。原因是放牧活动中家畜的践踏、采食活动不仅影响草地植被的固碳能力,减弱植被对土壤碳的输入过程,而且促进了土壤的呼吸作用^[23],加速了碳素从土壤向大气中释放。草地开垦对草地土壤有机碳含量影响强烈^[24],草地开垦破坏了原有的植被和土壤结构,一定程度上促进了土壤的呼吸作用^[4];另一方面,收获作物时大量地上部分被移走,极大减少了碳由凋落物向土壤的输入^[25]。研究指出^[26],草地开垦后会

使土壤碳素总量损失 30%~50%。本研究结果显示,草地开垦后各土层土壤有机碳含量、有机碳密度以及土壤有机碳储量都有不同程度的减少。开垦区与围封区相比,土壤有机碳储量显著($P < 0.05$)下降了 18.88%。耿元波等^[4]也研究发现,开垦不利于土壤有机碳的积累,与本研究结果相吻合。而围封有利于小针茅荒漠草原土壤有机碳的积累。李景刚等^[27]对内蒙古大针茅草原的研究,以及孙宗玖等^[28]对新疆蒿类荒漠草地土壤养分的研究,都得到了相似的结果。围封是一种可以通过自然力的作用使退化草地的植被与土壤得到恢复的有效措施^[22],但是碳蓄积效率不是无限增长的,研究表明^[9-10]围封期过长,不但不利于草地植物的正常生长和发育,反而使枯草抑制植物再生和幼苗的形成,不利于草地的繁殖更新。有机碳蓄积效率会随着时间的进程逐渐下降,最终会达到一个相对平衡状态。因此,草地围封一段时间后应进行适当利用,可使草地生态系统的能量流动和物质循环保持良性状态,进而保持草地生态系统平衡^[29]。

土壤有机碳垂直分布特征呈现一定的规律性,阿坝牧区草地^[30]以及贝加尔针茅草原^[31]土壤有机碳含量表现出从表层到底层同梯度依次递减的趋势。萨如拉^[32]

在典型草原土壤有机碳储量的研究中也指出,土壤有机碳含量随土层的加深而逐渐降低。而本研究结果表明,不同利用方式下,小针茅荒漠草原土壤有机碳含量、有机碳密度随着土层的加深,均表现为先增加后降低的趋势,在 30~40 cm 土层达到最大值。这一结论与很多研究结果不同。其原因是小针茅荒漠草原与其他草原类型相比,生态环境更加恶劣,风蚀严重,表层土壤极易受到侵蚀^[33],且小针茅荒漠草原降水少,加上地表覆盖度小,水分易蒸发散失^[34],为了维持地上部植物的生长,地下根系向下补偿性增生,相应脱落于土壤较深处的有机物质也增加,根系分解所产生的有机质相对集中在 30~40 cm 土层,由此形成了小针茅荒漠草原特殊的土壤有机碳分布特征。

3.2 不同利用方式对土壤有机碳组分的影响

土壤有机碳 71%~79% 是以碳水化合物、脂类、氨基化合物、酚类的结构形式存在的^[35]。杭子清等^[36]研究表明,互花米草盐沼土壤中有有机碳以芳香碳和烷氧碳为主,而 Mathers 等^[37]指出土壤有机碳中烷基碳所占比例最大。郭素春等^[14]研究表明,潮土土壤有机质以烷氧碳为主。本研究结果显示,小针茅荒漠草原土壤有机碳以烷氧碳和烷基碳为主,芳香碳、羧基碳的相对比例最小。以上不同研究中各种不同形态的有机碳所占比例差别较大,与土壤类型、植物种类以及水文气候等因素有关^[36]。Ussirs 等^[38]认为,烷基碳来自于木栓质、角质、蜡质等植物生物聚合物和微生物代谢产物,难以降解,较为稳定,而烷氧碳则相对易分解。因此,常用腐殖化指数(烷基碳/烷氧碳)作为土壤有机碳分解程度的评价指标,反映土壤有机碳库稳定性^[18,39]。腐殖化指数增加,有助于提高土壤有机碳的稳定性。本研究结果显示,围封区的腐殖化指数要高于放牧区和开垦区。原因可能是围封区凋落物的归还以及草原植被自身的固碳作用,大量有机碳进入土壤,提高了土壤微生物对烷氧碳的利用程度,而烷基碳相对富集,导致腐殖化指数增加,提高了土壤有机碳的稳定性。芳香碳也是难分解有机碳之一,能在土壤中选择性保留^[40],脂肪族碳的结构却相对简单,可以用芳香性[芳香碳/(烷基碳+烷氧碳+芳香碳)]表示土壤有机碳分子结构的复杂程度,比值越高反映物质中脂肪族侧链越少、芳香结构越多、缩合程度越高、分子结构越复杂^[35]。本研究中芳香性表现为 $G1.25 > G0.94 > 开垦区 > G0.50 > 围封区$,说明围封区的分子结构相对简单化。由此推断放牧和开垦会使有机碳相对趋于复杂化,围封区有机碳更趋稳定。

4 结论

(1)放牧区和开垦区与围封区相比,土壤有机碳含量、有机碳密度有降低的趋势,土壤容重有增加的趋势,但各处理间差异不显著。随着放牧强度的增加,土壤有机碳含量、有机碳密度均表现为逐渐降低的趋势,土壤容重有增加的趋势。

(2)不同利用方式对小针茅荒漠草原土壤有机碳储量影响显著,G1.25 和开垦区的土壤有机碳储量显著($P < 0.05$)低于围封区,随着放牧强度的增加,土壤有机碳储量也逐渐降低。说明开垦和过度放牧不利于土壤有机碳的积累。

(3)不同利用方式和放牧强度对小针茅荒漠草原土壤有机碳化学组分的影响主要在数量上,而有有机碳化学组分没有发生变化,其中烷氧碳(34.86%~37.85%)和烷基碳(26.05%~33.87%)是土壤有机碳的主要组分。放牧和开垦与围封相比,土壤腐殖化指数减小,随着放牧强度的增加,土壤腐殖化指数逐渐降低。这说明开垦和过度放牧使土壤有机碳稳定性降低,而围封休牧使土壤有机碳更趋稳定,在土壤固碳方面有一定的意义。

致谢:感谢中国农业科学院草原研究所那日苏研究员和王海博士在试验过程中提供的便利条件和给予的帮助。

参考文献:

- [1] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 2(3): 19-27.
SU Yong-zhong, ZHAO Ha-lin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. Journal of Desert Research, 2002, 2(3): 19-27.
- [2] 方精云,杨元合,马文红,等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学:生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
FANF Jing-yun, YANG Yuan-he, MA Wen-hong, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands[J]. Science China Life Sciences, 2010, 40(7): 566-576.
- [3] Baties N H. The total C and N in soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.
- [4] 耿元波,罗光强,袁国富,等. 农垦及放牧对温带半干旱草原土壤碳素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2518-2523.
GENG Yuan-bo, LUO Guang-qiang, YUAN Guo-fu, et al. Effects of cultivating and grazing on soil organic carbon and soil inorganic carbon in temperate semiarid grassland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(6): 2518-2523.
- [5] Mayer W B, Turner B L. Changes in land use and land cover: A global perspective[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994.

- [6] 李春莉, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同放牧压力下荒漠草原土壤有机碳特征及其与植被之间关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 134-138.
LI Chun-li, ZHAO Meng-li, HAN Guo-dong, et al. The characteristics of soil organic carbon and the relationships between soil organic carbon and vegetations in desert steppe under different grazing gradients[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(5): 134-138.
- [7] 阿穆拉, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 放牧强度对荒漠草原地区土壤有机碳及全氮含量的影响[J]. 中国草地学报, 2011, 33(3): 115-118.
Amula, ZHAO Meng-li, HAN Guo-dong, et al. Influences of grazing intensity on carbon and nitrogen contents in desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(3): 115-118.
- [8] 刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 11-14.
LIU Nan, ZHANG Ying-jun. Effects of grazing on soil organic carbon and total nitrogen in typical steppe[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(4): 11-14.
- [9] 闫玉春, 唐海萍, 辛晓平, 等. 围封对草地的影响研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5039-5046.
YAN Yu-chun, TANG Hai-ping, XIN Xiao-ping, et al. Advances in research on the effects of exlosure on grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5039-5046.
- [10] 贾宏涛, 蒋平安, 赵成义, 等. 围封年限对草地生态系统碳分配的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 33-36.
JIA Hong-tao, JIANG Ping-an, ZHAO Cheng-yi, et al. The influence of enclosing life on carbon distribution of grassland ecosystem[J]. Agricultural Research in the Arid Area, 2009, 27(1): 33-36.
- [11] 梁尧, 韩晓增, 丁雪丽. 东北黑土有机质组分与结构的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(6): 888-897.
LIANG Yao, HAN Xiao-zeng, DING Xue-li. Review of soil organic matter fractions and structure of black soil in Northeast China[J]. Soils, 2012, 44(6): 888-897.
- [12] 陈孟君, 王明光, 邱志郁. 塔塔加鞍部铁杉林及玉山箭竹之根圈与本体土壤低分子量有机酸含量和有机碳官能基之测定[J]. 土壤与环境, 1999, 2(2): 159-170.
CHEN Meng-jun, WANG Ming-guang, QIU Zhi-yu. Determination of low molecular weight dicarboxylic acids and organic functional groups in *Tsuga* and *Yushania* rhizosphere and bulk soils in the Saddle of Ta-Ta Chia[J]. Soil and Environment, 1999, 2(2): 159-170.
- [13] 李国栋, 刘国群, 庄舜尧, 等. 不同种植年限下雷竹林土壤的有机质转化[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 845-849.
LI Guo-dong, LIU Guo-qun, ZHUANG Shun-yao, et al. Changes of organic matter in soils planted Lei Bamboo with different years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 845-849.
- [14] 郭素春, 郁红艳, 朱雪竹, 等. 长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 922-930.
GUO Su-chun, YU Hong-yan, ZHU Xue-zhu, et al. Effect of long-term fertilization on molecular structure of organic carbon in soil aggregates in Fluvo-Aquic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 922-930.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] Mathers N J, Xu Z H, Berners-Price S J, et al. Hydrofluoric acid pretreatment for improving ^{13}C CPMAS NMR spectral quality of forest soils in South-east Queensland, Australia[J]. Australian Journal of Soil Research, 2002, 40(4): 665-674.
- [17] Namri M. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo[J]. Global and Planetary Change, 2002, 33(1): 77-93.
- [18] 李今今, 季宏兵. 土壤腐殖物质的固体 ^{13}C 核磁共振技术研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(10): 111-112, 115.
LI Jin-jin, JI Hong-bing. Study on solid state ^{13}C nuclear magnetic resonance technology of soil humic substances[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2015, 43(10): 111-112, 115.
- [19] Jiang P K, Xu Q F, Xu Z H, et al. Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *Phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 236(1): 30-36.
- [20] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 等. 不同干扰对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(2): 298-304, 311.
CHEN Fu-rong, CHENG Ji-min, LIU Wei, et al. Effects of disturbances on organic soil carbon in the typical grassland of Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(2): 298-304, 311.
- [21] 白高娃, 包翔. 不同放牧方式对半荒漠草原土壤理化性质的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2013, 28(3): 296-298.
BAI Gao-wa, BAO Xiang. Comparing soil physical and chemical properties of semi-desert different utilization pattern[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities, 2013, 28(3): 296-298.
- [22] 范月君, 侯向阳, 石红霄, 等. 封育与放牧对三江源区高寒草甸植物和土壤碳储量的影响[J]. 草原与草坪, 2012, 32(5): 41-46, 52.
FAN Yue-jun, HOU Xiang-yang, SHI Hong-xiao, et al. The response of carbon reserves of plants and soils to different grassland management on meadow of three headwater source regions[J]. Grassland and Turf, 2012, 32(5): 41-46, 52.
- [23] Zhao Y, Peth S, Horn R, et al. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland[J]. Ecological Modelling, 2007, 205(1/2): 241-254.
- [24] Post W M, Mann L K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation[J]. Soils and the Greenhouse Effect, 1990: 401-406.
- [25] Risser D G, Birney E C, Blocker H D, et al. The true prairie ecosystem[M]. Stroudsburg/Pennsylvania: Hutchinson Ross Publish Company, 1981.
- [26] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 300-302.
LI Ling-hao. Effects of land-use change on soil carbon storage in grassland ecosystems[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(4): 300-302.
- [27] 李景刚, 贾树海, 赵国平. 围栏封育对退化草原土壤性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(1): 280-282.
LI Jing-gang, JIA Shu-hai, ZHAO Guo-ping. Effect of fencing on soil

- characteristics of degraded pasture[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(1):280-282.
- [28] 孙宗玖, 安沙舟, 段娇娇. 围栏封育对新疆蒿类荒漠草地植被及土壤养分的影响[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(6):877-882.
SUN Zong-jiu, AN Sha-zhou, DUAN Jiao-jiao. Effect of enclosure on vegetation and soil nutrient of Sagebrush desert grassland in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(6):877-882.
- [29] 苏建红, 朱新萍, 王新军, 等. 长期围栏封育对亚高山草原土壤有机碳空间变异的影响[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(6):997-1002.
SU Jian-hong, ZHU Xin-ping, WANG Xin-jun, et al. Effects of long-term enclosure on spatial variation of soil organic carbon content in the Bayanbulak Subalpine steppe[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(6):997-1002.
- [30] 李涛. 阿坝牧区不同利用方式与程度草地土壤与植被碳储量研究[D]. 成都:四川农业大学, 2013.
LI Tao. Research on soil and vegetation carbon storage of grassland under different land use and degree in Aba pastoral areas[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [31] 李玉洁. 休牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和有机碳储量的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2013.
LI Yu-jie. Effects of rest grazing on plant diversity and organic carbon storage on *Stipa Baicalensis* steppe in Inner Mongolia[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013.
- [32] 萨如拉. 不同利用方式和放牧强度对典型草原植被-土壤系统碳储量的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.
Sarula. Effects of different utilization and grazing intensity on carbon storage of vegetation-soil system in typical steppe[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [33] 姚国征, 杨婷婷, 尚润阳, 等. 小针茅荒漠草原生长季表层土壤有机碳月动态及影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9):51-56.
YAO Guo-zheng, YANG Ting-ting, SHANG Run-yang, et al. The monthly dynamics of surface soil organic carbon of *Stipa klemenzii* desert steppe and the influencing factors[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(9):51-56.
- [34] Martens D A, Reedy T E, Lewis D T. Soil organic carbon content and composition of 130-year crop, pasture and forest land-use management[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(1):65-78.
- [35] 刘朋涛, 杨婷婷, 姚国征, 等. 不同放牧强度下荒漠草原碳密度的变化[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(7):157-162, 168.
LIU Peng-tao, YANG Ting-ting, YAO Guo-zheng, et al. Change of carbon density in desert steppe under different grazing intensities[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2014, 42(7):157-162, 168.
- [36] 杭子清, 王国祥, 刘金娥, 等. 互花米草盐沼土壤有机碳库组分及结构特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(15):4175-4182.
HANG Zi-qing, WANG Guo-xiang, LIU Jin-e, et al. Characterization of soil organic carbon fractions at *Spartina alterniflora* saltmarsh in North Jiangsu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15):4175-4182.
- [37] Mathers N J, Xu Z H. Solid-state ^{13}C NMR Spectroscopy characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia[J]. *Geoderma*, 2003, 114(1/2):19-31.
- [38] Ussiri D A N, Johnson C E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ^{13}C NMR spectroscopy and chemical methods[J]. *Geoderma*, 2003, 111:123-149.
- [39] Dou S, Zhang J J, Li K. Effect of organic matter applications on ^{13}C -NMR spectra of humic acids of soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(3):532-539.
- [40] Baldock J A, Oades J M, Waters A G, et al. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solidstate ^{13}C NMR spectroscopy[J]. *Biogeochemistry*, 1992, 16(1):1-42.