

DOI:10.11686/cyxb2024312

http://cyxb.magtech.com.cn

王玉霞, 杜灵通, 易志远, 等. 宁夏贺兰山东麓葡萄产区土壤有机碳库空间变异及影响因素. 草业学报, 2025, 34(7): 41—53.

WANG Yu-xia, DU Ling-tong, YI Zhi-yuan, *et al.* Spatial variation and factors influencing the soil organic carbon pool in grape-producing areas at the eastern foothills of Helan Mountain in Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(7): 41—53.

宁夏贺兰山东麓葡萄产区土壤有机碳库空间变异及影响因素

王玉霞^{1,2,3}, 杜灵通^{2,3*}, 易志远^{2,3}, 罗霄^{2,3}, 苏丽⁴, 乔成龙^{1,2,3}, 薛斌^{2,3}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业园区管理委员会, 宁夏 银川 750104)

摘要: 干旱荒漠草原区垦殖葡萄园不仅能推动经济发展, 而且具有增加生态系统碳汇的潜在价值。本研究以宁夏贺兰山东麓葡萄产区为对象, 基于2023年5—7月在0~100 cm土壤剖面每20 cm深度采集的土壤样品, 不仅测定土壤有机碳(SOC)含量和总碳含量, 还测定耕作干扰较强的表层土壤(0~40 cm)中SOC的活性、中性和惰性组分含量, 采用地理空间插值和单因素方差分析, 开展不同土壤类型区和典型葡萄园的SOC库特征研究及影响因素分析。结果表明: 1) 该产区0~100 cm剖面的SOC含量为3.0~11.1 g·kg⁻¹, 土壤养分缺乏, 平均SOC密度为52.85 t·hm⁻², 具有中等变异程度; 其中0~40 cm表层土壤的SOC富集系数大于1, 即表层土壤碳固持能力更强; 2) 受葡萄垦殖活动的碳输入影响, 整个葡萄产区表层0~40 cm的土壤总碳、SOC、活性SOC和惰性SOC含量呈西高东低的分布, 具有较强的空间异质性特点; 3) 产区土壤碳库稳定性较强, 不仅无机碳占总碳比例高达74.8%, 而且SOC中的惰性组分含量达50%, 土壤碳库活度较低; 4) 受制于土壤发育背景差异, 不同土壤类型对SOC特征的影响较大, 虽然风沙土的SOC密度高于灰钙土, 但风沙土的SOC含量低于灰钙土, 且风沙土的碳库活度也最大, 其SOC的稳定性较差。以上认识可为宁夏贺兰山东麓葡萄园生态系统碳汇核算提供科学依据。

关键词: 贺兰山东麓; 葡萄园; 垦殖活动; 土壤有机碳; 碳密度

Spatial variation and factors influencing the soil organic carbon pool in grape-producing areas at the eastern foothills of Helan Mountain in Ningxia

WANG Yu-xia^{1,2,3}, DU Ling-tong^{2,3*}, YI Zhi-yuan^{2,3}, LUO Xiao^{2,3}, SU Li⁴, QIAO Cheng-long^{1,2,3}, XUE Bin^{2,3}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Helan Mountain Eastern Foot Wine Industry Park Management Committee, Yinchuan 750104, China

Abstract: The cultivation of vineyards in arid desert grassland is not only of economic benefit, but also has a potential role in increasing the carbon sink capacity of the ecosystem. In this study, the grape-producing area on the eastern foothills of Helan Mountain in Ningxia was used as a study site. Soil samples were collected from soil layers at successive 20 cm depth increments in a 0—100 cm soil profile between May and July 2023, and the soil organic

收稿日期: 2024-08-08; 改回日期: 2024-09-30

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2022BEG02051, 2024BEG02009)资助。

作者简介: 王玉霞(1993—), 女, 甘肃甘谷人, 在读博士。E-mail: 1911340132@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: dult80@qq.com

carbon (SOC) content and the total carbon content were measured. In addition, the active, neutral, and inert SOC content were also measured in the upper soil layer (0–40 cm), which is intensely disturbed by cultivation. The characteristics of SOC pools were studied for different soil types in typical vineyards using a geospatial interpolation technique and one-way ANOVA and factors influencing their variability are discussed. It was found that: 1) SOC content in the 0–100 cm soil depth ranged from 3.0 to 11.1 g·kg⁻¹ in the grape-producing area, indicating a lack of soil fertility, with an average SOC density of 52.85 t·ha⁻¹ and moderate variability. The SOC enrichment coefficient in the upper soil layer (0–40 cm) was greater than 1, indicating a stronger carbon sequestration capacity in the upper soil layer. 2) The total carbon, SOC, active SOC, and inert SOC contents in the upper soil layer (0–40 cm) were higher in the west than in the east of the grape-producing area, which was impacted by organic carbon inputs from grape cultivation and thus has significant spatial heterogeneity. 3) The soil carbon pool in the grape-producing area was stable since inorganic carbon constituted 74.8% of the total carbon and inert SOC accounted for 50% of SOC, resulting in low activity of the soil carbon pool. 4) Due to the different soil development scenarios, characteristics of SOC varied significantly with soil type. Although sandy soil had a SOC density higher than a sierozem soil, its SOC content was lower; sandy soil had the highest SOC density and carbon pool activity resulting in lower SOC stability. These findings provide scientific data for the carbon sink accounting and inventory of vineyard ecosystems at the eastern foothills of the Helan Mountains in Ningxia.

Key words: east foothills of Helan Mountain; vineyards; reclamation activities; soil organic carbon; carbon density

面对全球气候变化和人类活动所带来的挑战,中国提出了碳达峰和碳中和的“双碳”目标^[1],增强生态系统的碳封存能力是减缓大气CO₂浓度增加的重要措施之一^[2]。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统中最大的碳库,其储量约为大气碳库的3.3倍^[3]。SOC由不同稳定性的碳组分构成,可根据分解难易程度和转化所需时间划分为活性、中性(缓效)和惰性有机碳。作为陆地上最重要且最活跃的SOC库之一,农田SOC对维持全球碳循环平衡、调节人类活动碳排放以及稳定农业生产都具有重要作用^[4–5]。我国农田SOC储量约占全球陆地SOC储量的8%~10%^[6],但区域变异性和不确定性大,特别是缺乏特殊垦殖背景下的农田生态系统碳汇潜力评估。葡萄(*Vitis vinifera*)是我国广泛种植的一种经济作物,葡萄园是一种典型的农田生态系统,相较于草地具有更强的固碳能力^[7]。近年来,中国酿酒葡萄种植面积的不断扩引起科学界对葡萄园生态系统碳储存功能的关注^[7–8]。已有研究表明,葡萄园生态系统平均碳储量为152 t·hm⁻²,其中约92.7%的碳储存在1 m以内的土层中^[9]。Brunori等^[10]发现意大利中部酿酒葡萄园生态系统每年的碳汇量为5.7~7.2 t·hm⁻²;基于梯度协方差或样地调查法都证实葡萄园土壤碳库具有重要的碳汇作用^[8,11]。

宁夏贺兰山东麓地理环境独特,气候优越,适宜酿酒葡萄生长,是中国酿酒葡萄的黄金产区^[12],截至2023年葡萄种植面积已达40133.33 hm²,占全国种植面积的35%,葡萄酒产业已成为当地重要的优势特色产业^[13]。作为宁夏的紫色名片和生态产业,葡萄园能够起到提高植被覆盖率、防风固沙和水土保持等作用,由于该区域葡萄园大多垦殖于碳储量本底很低的荒漠草原区,这种土地利用方式的转变必然会影响生态系统的碳库结构,故调查分析区域SOC库的空间变异及影响因素对评估其碳汇价值具有重要的科学意义。然而,现有研究主要聚焦于贺兰山东麓气象条件、土壤养分和水分条件等对葡萄产量与品质的影响^[14–16],鲜有学者开展葡萄园生态系统的碳库特征研究。此外,贺兰山东麓葡萄产区有砾石土、灰钙土和风沙土等多种不同土壤类型,不同土壤背景下种植葡萄园对土壤碳库结构产生何种影响也对碳汇评估和碳资产核算至关重要。为此,本研究在宁夏贺兰山东麓葡萄产区开展系统的SOC调查与分析,探讨不同土壤背景和小产区的SOC含量及储量特征,并讨论葡萄园垦殖对该区域SOC库的影响,以为宁夏葡萄产业碳汇核算提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏贺兰山东麓葡萄产区分布于山前洪积扇前缘,是贺兰山洪积扇与黄河冲积平原之间的狭长地带(图1),南北绵延约270 km、东西宽约30 km,产区面积2073.21 km²,地理坐标为37°43′—39°23′ N, 105°45′—106°47′ E。该区域位于西北干旱区、东部季风区和青藏高寒区的交汇地带,气候干燥,日照充分,年均降水量173~261 mm,全年日照时数2800~3049 h,年平均气温8.5℃,≥10℃的年有效积温为3300℃以上,平均无霜期160 d。区域本底土壤以灰钙土为主,由于贺兰山的洪积砾石沉积,在产区中北部形成砾石土壤,随着向东部黄河冲积平原区和南部风蚀区过渡,土壤类型由灰钙土过渡到风沙土。产区原始植被类型主要为温带荒漠草原,植被稀疏、土壤贫瘠,少量黄河冲积平原边缘区的葡萄园垦殖于原有农耕地之上。

1.2 试验设计与样品采集

在2023年5—7月葡萄生长旺季,通过Google Earth地图进行葡萄园采样点的布局与设计。1)根据葡萄产区的空间形态、土壤类型和葡萄种植现状,开展野外基础调查。从北到南选取金山、美贺、长城、立兰、西鸽、红寺堡、新慧彬7个典型葡萄园,将这7个葡萄园划分为中北部(金山、美贺、长城)、中部(立兰、新慧彬)、南部(西鸽、红寺堡)三个区域,涵盖砾石土(金山、美贺、长城葡萄园)、灰钙土(立兰、西鸽葡萄园)、风沙土(红寺堡、新慧彬葡萄园)3种土壤类型。这些葡萄园较为均匀地分布于产区之内,能代表不同小产区的特点。2)根据7个葡萄园的大小和形态特点,基于系统取样法的原则^[17],在金山、美贺、长城、立兰、新慧彬、西鸽和红寺堡葡萄园内,分别设置12、16、9、9、14、16和17个土壤样采集点,共计93个采样点,确保样品能够代表每个园区的土壤平均状态。3)每个采样点记录经纬度坐标等基础信息,土壤采样方法参考《农田土壤环境质量监测技术规范》相关规范^[18];每个采样点原则上在0~100 cm的土壤剖面,以每20 cm深度为一个采样层,采用“S”形随机5点混合方法采集土壤样品;对于砾石土壤和重钙积层的采样点(金山和美贺葡萄园),在无法挖掘剖面或使用深层土钻的情况下,仅采集0~40 cm的表层土壤样品,共采集325份,同时进行环刀取样。4)在砾石土区,每个采样点使用定容桶采集1 m³的砾石土样,并过2 mm土筛去除砾石,之后用定容桶测出粒径<2 mm的土壤体积(x),则砾石占比(δ)=(1.0- x)/1.0×100%。5)土壤样品带回实验室分拣植物枯落物等残体后,进行晾晒、研磨等预处理,测定土壤SOC和总碳含量,对耕作干扰较强的表层土壤(0~40 cm)样品,测定SOC的活性、中性和惰性组分含量。

1.3 土壤指标测定与计算

土壤有机碳含量采用重铬酸钾浓硫酸—外加热法测定^[19]。土壤全碳含量使用碳氮分析仪(vario MACRO cube,德国)测定^[20]。活性、中性和惰性SOC含量采用硫酸两步水解—重铬酸钾氧化滴定法测定^[21],具体步骤如



图1 研究区概况及采样葡萄园分布图

Fig. 1 Overview map of the study area and distribution of sampled vineyards

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3266号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2019)3266 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

下:1)称取0.5 g的过2 mm筛风干土样,加入离心管中,加入20 mL的 $2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$,密封水解30 min(105°C), $4500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心20 min后,将提取的上清液倒入待测瓶;残渣加20 mL去离子水清洗,后离心提取上清液再次转入待测瓶中,供活性SOC含量测定使用。2)将土壤残渣用去离子水清洗数次,并在 60°C 下烘干,然后加入2 mL的 $13 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$,室温振荡过夜,后加入去离子水将 H_2SO_4 稀释至 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 105°C 水解3 h,后续操作同上,所得上清液用于中性SOC含量的测定。3)剩余残渣用去离子水清洗数次后在 60°C 下烘干,研磨后使用重铬酸钾浓硫酸-外加热法测定惰性SOC含量。活性和中性SOC所提取的上清液使用总有机碳分析仪(vario TOC cube,德国耶拿)测定。土壤环刀样品置于电热恒温鼓风干燥箱(GZX-GF101-3-BS-II,上海跃进医疗器械有限公司)于 105°C 烘干至恒重后称其干重,计算土壤容重。

SOC密度、变异系数、SOC富集系数、SOC碳库活度和SOC敏感性指标的计算公式如下:

$$\text{SOC}_{\text{density}} = C \times \theta \times D \times (1 - \delta) \times 0.1 \quad (1)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{density}}$ 为SOC密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), C 为SOC平均含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), D 为土层厚度(cm), θ 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), δ 为直径 $>2 \text{ mm}$ 的砾石体积百分含量,0.1为单位转换系数。

$$cv = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

式中: cv (coefficient of variation)为变异系数, σ 为标准偏差, μ 为平均值。 $cv \geq 100\%$ 为高度变异, $10\% \leq cv < 100\%$ 为中等变异, $cv < 10\%$ 为弱变异^[22]。

SOC富集系数指某一层SOC含量与整个土壤剖面SOC平均含量的比值,SOC富集系数代表了土壤对SOC的保持能力与强度^[23]。土壤碳库活度指活性SOC与非活性SOC的比值^[24]。

$$L = LOC/NLOC \quad (3)$$

式中: L (lability of carbon pool)为碳库活度, LOC (labile organic carbon)为活性SOC含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), $NLOC$ (non labile organic carbon)为非活性SOC含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

敏感性指标是用来衡量某一指标对外部因素变化响应程度的指标,其数值越大,表明该指标对环境因素变化的敏感程度越高,SOC及其组分的敏感性指标计算公式如下^[25]:

$$S_i = \frac{(H_{i_{\max}} - H_{i_{\min}})}{H_{i_{\min}}} \quad (4)$$

式中: S 为有机碳含量敏感性指标, H 为土壤有机碳组分含量, i 分别代表活性或中性或惰性有机碳。

1.4 土壤养分等级划分

根据全国第二次土壤普查规定的土壤养分分级标准^[26]及相关文献^[27-28],基于土壤有机质含量将土壤养分划分为6级(表1)。本研究首先将贺兰山东麓葡萄产区测试的SOC含量换算为有机质含量(有机质含量=SOC含量 $\times 1.74$),然后再依据表1的标准划分土壤养分等级。

1.5 数据分析

采用Excel 2016软件进行数据汇总及制图,图表中数据为平均值 \pm 标准误,利用SPSS 27通过单因素方差分析和Duncan检验对变量间差异的显著性进行检验,用ArcGIS软件进行插值运算和空间绘图。

表1 土壤养分等级划分

Table 1 Gradation of soil nutrient level

项目 Items	土壤有机质含量 Soil organic matter content					
	$\leq 6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$6\sim 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$30\sim 40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$> 40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$
土壤养分等级 Soil nutrient level	VI	V	IV	III	II	I
养分丰富情况 Nutrient abundance situation	极度缺乏 Extremely lacking	缺乏 Lack	较缺乏 Relatively lacking	中等 Moderate	较丰富 Relatively rich	丰富 Rich

2 结果与分析

2.1 葡萄产区SOC含量及空间分布特征

宁夏贺兰山东麓葡萄产区的SOC平均含量为 $6.54 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤养分为IV级,养分较缺乏(表2)。其中美贺、金山、长城和立兰葡萄园的SOC含量高于产区的平均水平,新慧彬、西鸽和红寺堡葡萄园的SOC含量低于产区的平均水平,基本上表现出中北部高于南部的特点。所调查7个葡萄园的SOC含量均值对应的土壤养分等级为IV~VI级,等级跨幅较大,但大多数集中在IV级,土壤养分为缺乏到极度缺乏。各葡萄园内部不同采样点的SOC含量变异系数为21.6%~32.4%,均为中等变异程度,其中西鸽葡萄园的变异系数最大,其他葡萄园的变异系数均低于30%。

表2 宁夏贺兰山东麓葡萄产区土壤有机碳含量状况

Table 2 Soil organic carbon content status in grape vineyards at the eastern foothills of the Helan Mountains in Ningxia

葡萄园 Vineyards	SOC含量 SOC content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	养分等级 Nutrient level	SOC最大值 Maximum SOC content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大养分等级 Maximum nutrient level	SOC最小值 Minimum SOC content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最小养分等级 Minimum nutrient level	变异系数 CV (%)
金山 Jinshan	$10.54 \pm 0.68a$	IV	14.69	III	6.74	IV	22.3
美贺 Meihe	$11.11 \pm 0.71a$	IV	16.55	III	7.38	IV	25.4
长城 Changcheng	$7.28 \pm 0.60b$	IV	11.05	IV	4.93	V	24.8
新慧彬 Xinhuibin	$4.65 \pm 0.27c$	V	6.38	IV	2.92	VI	21.6
立兰 Lilan	$7.33 \pm 0.60b$	IV	10.26	IV	5.49	V	24.5
西鸽 Xige	$3.50 \pm 0.28cd$	V	5.75	IV	1.98	VI	32.4
红寺堡 Hongsibao	$3.00 \pm 0.20d$	VI	4.98	V	1.83	VI	27.1
全产区 Whole area	6.54	IV	9.95	IV	4.47	V	55.8

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon. 下同 The same below. CV: 变异系数 Coefficient of variation. 不同小写字母表示不同葡萄园之间SOC含量差异显著($P < 0.05$)。金山、美贺、长城、立兰、新慧彬、西鸽和红寺堡葡萄园的采样点个数分别为12、16、9、9、14、16和17,且数值均以“平均值±标准误差”表示。SOC含量是指0~100 cm土层的平均值。Different lowercase letters indicate significant differences of SOC content among different vineyards ($P < 0.05$). In the vineyards of Jinshan, Meihe, Changcheng, Lilan, Xinhuibin, Xige and Hongsibao, the number of sampling points were 12, 16, 9, 9, 14, 16 and 17, respectively, and the values are all expressed as “mean±standard error”. The SOC content is the average value of the 0–100 cm soil layer.

宁夏贺兰山东麓葡萄产区表层0~40 cm土壤总碳、SOC及其组分的空间插值见图2,土壤总碳、SOC、活性SOC和惰性SOC含量普遍呈西高东低的特点,但中性SOC含量与其他组分的分布规律相反。惰性SOC在南部和中部形成高值区,土壤总碳在西北部出现高值区,其他SOC组分分别在产区中西部形成高值区。SOC及其组分的空间分布特征与产区葡萄种植时限和土壤类型的变化有关,产区东北部土壤的平均砾石含量超过了30%,加之尚处于葡萄园新开发阶段,因此SOC含量低。在产区中部,土壤类型逐渐由砾石土过渡为灰钙土,土壤中砾石含量降低,且多为种植20年以上的成熟葡萄园,SOC含量升高,而产区南部分布有大量的风沙土,其SOC含量又出现下降。产区中北部西靠贺兰山,故产区中部出现SOC西高东低梯度变化,这与贺兰山的山前洪积扇土壤及植被带状发育特征密切相关,洪积扇中部分土壤由山麓冲、洪积作用搬运、堆积形成,原始发育于贺兰山山地森林,积累了更高的惰性SOC。

2.2 土壤碳的各组分特征

宁夏贺兰山东麓产区7个葡萄园在0~40 cm的土壤总碳含量平均为 $21.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总碳含量最高的葡萄园是长城,达到 $38.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次是美贺,为 $29.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,两者显著高于其他葡萄园。虽然,立兰和西鸽之间差异不显著,金山、新慧彬和红寺堡之间差异也不显著,但立兰和西鸽的总碳含量均显著高于金山、新慧彬和红寺堡3个葡萄园($P < 0.05$)。总碳中占比较大的是无机碳,长城的无机碳含量最高,达到了 $31.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其他葡萄园,这也是导致长城总碳最高的原因。虽然美贺与西鸽的无机碳含量差异不显著,但美贺却显著高于立兰、金山、

新慧彬和红寺堡,而金山、新慧彬和红寺堡之间的无机碳含量差异不显著。总SOC平均含量为 $5.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,占总碳含量比例较低,其中美贺、长城和立兰之间无显著性差异,金山、新慧彬、西鸽和红寺堡之间也无显著性差异,但前3个葡萄园显著高于后4个($P<0.05$)。以上结果可见,宁夏贺兰山东麓产区7个葡萄园间的无机碳差异决定了总碳的差异(图3)。

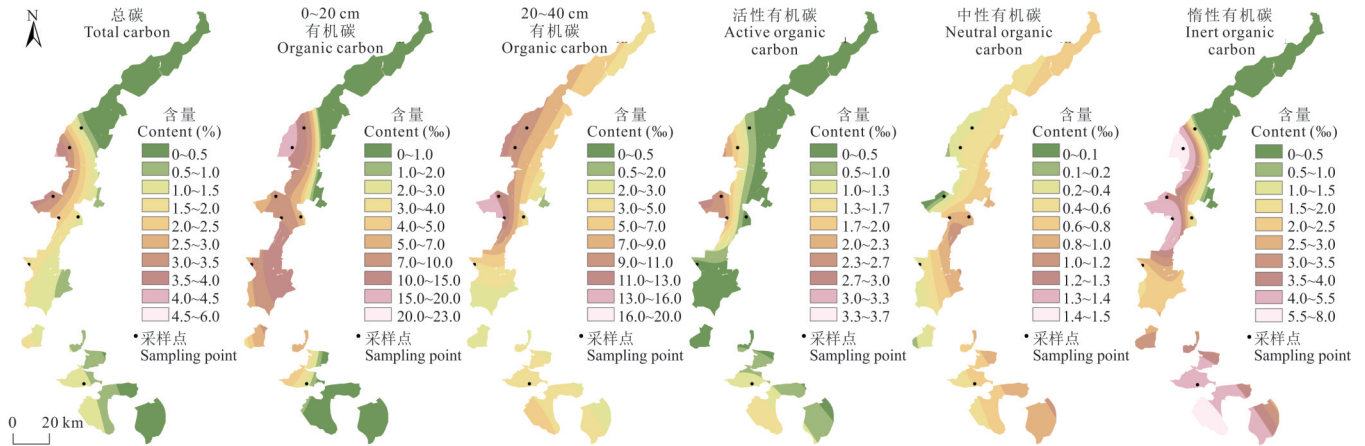


图2 贺兰山东麓葡萄产区土壤有机碳及组分含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil organic carbon and its components in grape producing areas at the eastern foot of Helan Mountain

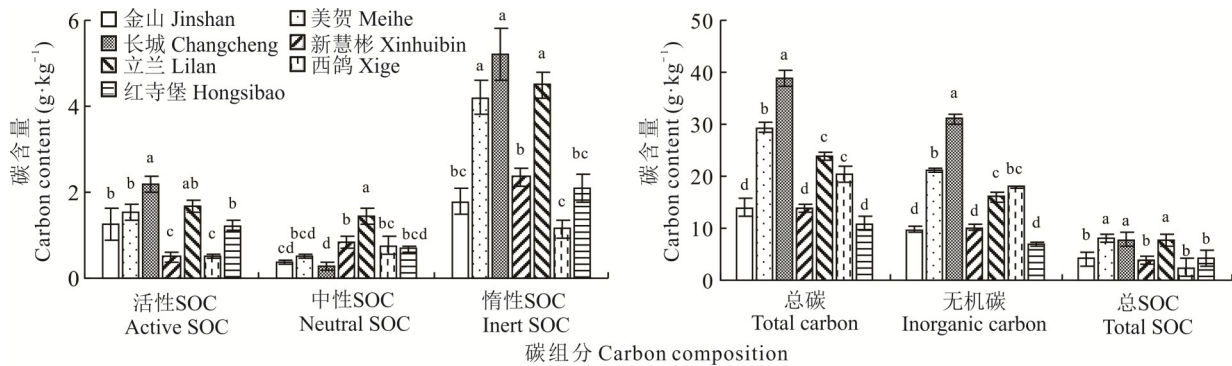


图3 不同葡萄园的土壤总碳及碳组分

Fig. 3 Soil total carbon and carbon components in different vineyards

总SOC指活性、中性与惰性SOC的总和;无机碳指总碳含量减去总SOC含量;不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。Total organic carbon refers to the sum of active organic carbon, neutral organic carbon and inert organic carbon. Inorganic carbon is the total carbon content minus the total organic carbon content. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level. The same below.

表层0~40 cm的活性、中性和惰性SOC平均含量分别为 1.3 、 0.7 和 $3.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,从单因素方差分析结果来看(图3),不同碳组分在各葡萄园间的差异不同。长城的活性SOC含量最高,并与立兰之间无显著性差异,但长城显著高于其他葡萄园($P<0.05$);虽然金山、美贺和红寺堡的活性SOC含量均无显著性差异,但均显著高于新慧彬和西鸽,而新慧彬与西鸽的活性SOC含量无显著性差异。立兰的中性SOC含量最高,且显著高于其他6个葡萄园,新慧彬的中性SOC含量显著高于金山和长城($P<0.05$),而新慧彬、红寺堡、西鸽和美贺之间无显著性差异,长城和金山之间也无显著性差异。对于惰性SOC而言,美贺、长城和立兰之间无显著性差异,但都显著高于其他4个葡萄园($P<0.05$),而新慧彬、红寺堡和金山之间无显著性差异,红寺堡、西鸽和金山之间也无显著性差异,但新慧彬显著高于西鸽($P<0.05$)。

2.3 SOC 含量随土层深度的变化及富集特征

除立兰葡萄园外,其他葡萄园对应土层的 SOC 含量总体呈由北到南逐渐递减趋势,这一规律在表层土壤中表现得尤为明显(图 4)。在 0~20 cm 和 20~40 cm 的表层土壤中,产区中北部金山、美贺和长城葡萄园的 SOC 含量显著高于产区南部西鸽和红寺堡($P < 0.05$)。产区中北部的 3 个葡萄园均为在贺兰山洪积扇砾石区垦殖的葡萄园,由于土壤砾石含量高,在垦殖初期采用了筛除砾石、施用有机肥并进行覆土翻耕的耕作模式,反而增加了 SOC 的含量;而产区南部的 2 个葡萄园为风沙土或灰钙土,垦殖施用有机肥相对较少,葡萄种植年限相对较短,故形成了产区南部 SOC 含量偏低的特点。然而,在 40~100 cm 的 3 个土层中,各葡萄园之间 SOC 含量的差异减小,且 SOC 含量随着土层加深而逐渐降低。其中,西鸽葡萄园深层土壤的 SOC 含量下降最迅速,并在 80~100 cm 土层降到最低,为 $1.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,除与红寺堡无显著性差异外,与其他葡萄园均出现显著差异($P < 0.05$)。这与西鸽葡萄园的葡萄种植时间有关,本研究采集的西鸽葡萄园是新垦殖的园区,葡萄多处于幼苗阶段,根系尚不发达,通过葡萄种植周转到土壤 40~100 cm 深度的 SOC 含量较少,故导致以上结果。

通过分析同一个葡萄园不同土层之间的 SOC 含量可以看出,除长城和立兰在 0~20 cm 与 20~40 cm 深度的 SOC 含量反常外,各葡萄园 SOC 含量随土层深度增加而呈递减趋势(图 5),这符合 SOC 随土壤深度变化的普遍规律。所有葡萄园 0~20 cm、20~40 cm 两个土层的 SOC 含量差异不显著,且大多数葡萄园 40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 这 3 个土层的 SOC 含量差异也不显著,这表明,0~40 cm 土层间和 40~100 cm 土层间的 SOC 含量差异均较小。虽然新慧彬和立兰在 40~60 cm 与 80~100 cm 的 SOC 含量存在显著差异($P < 0.05$),但 40~60 cm 与 60~80 cm,以及 60~80 cm 与 80~100 cm 的 SOC 含量差异均不显著。以上结果可以得出,宁夏贺兰山东麓葡萄园 0~40 cm 土层受每年埋土、施肥和耕作的扰动影响, SOC 属性较为一致,且普遍高于深层 SOC 含量;而 40~100 cm 土层受耕作干扰较少,其 SOC 含量变化主要由原始成土过程的积累及葡萄根系周转所致。

从不同土层的 SOC 富集系数来看(图 6),各葡萄园均表现出表层土壤的 SOC 富集系数较高,其中 0~20 cm 土层的 SOC 富集系数为 1.0~1.2,20~40 cm 土层的 SOC 富集系数平均值为 1.1。可知表层土壤对 SOC 的聚集性更强。这种明显的 SOC 表聚现象,一方面与葡萄生产过程中枯落物和毛细根系对表层土壤 SOC 的高输入有关,另一方面也与贺兰山东麓产区葡

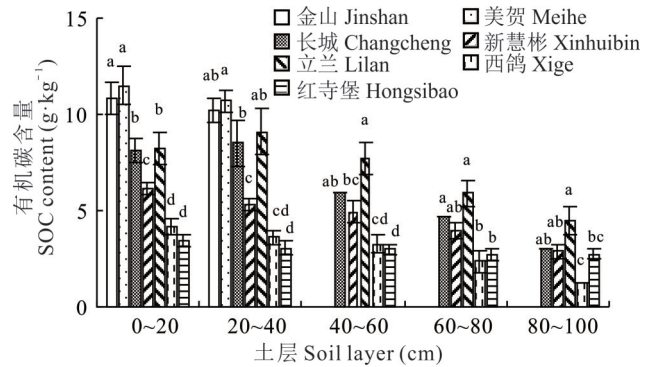


图 4 不同葡萄园在各土层的土壤有机碳含量

Fig. 4 Soil organic carbon content of different vineyards in all soil layers

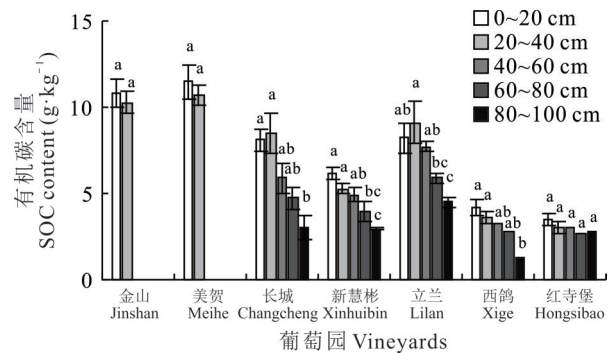


图 5 各葡萄园在不同土层的土壤有机碳含量对比

Fig. 5 Comparison of soil organic carbon content in different soil layers of different vineyards

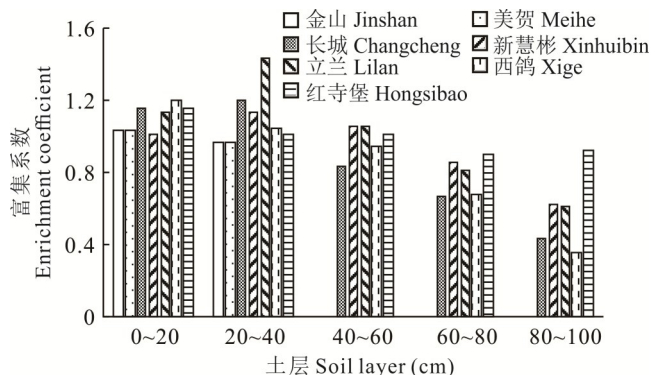


图 6 不同葡萄园各土层的土壤有机碳富集系数

Fig. 6 Soil organic carbon enrichment coefficient of different vineyards in all soil layers

萄垦殖初期人工施用有机肥有关。40~100 cm土层的SOC富集系数随土层深度增加而呈下降趋势,即土层深度越深,葡萄根系输入的SOC量越来越少,土壤中SOC的聚集程度也相应降低。其中,红寺堡葡萄园的SOC富集系数随深度变化最为缓慢,这与红寺堡地处产区最南端,且为风沙土的成土过程有关。

2.4 不同土壤类型的SOC差异及活度特征

除中性SOC外,总碳、无机碳、总SOC及其活性和惰性组分均表现出砾石土>灰钙土>风沙土的特点(图7)。砾石土的活性SOC、惰性SOC含量显著高于灰钙土和风沙土($P<0.05$),但在灰钙土和风沙土之间的差异均不显著。而砾石土的中性SOC含量显著低于灰钙土和风沙土($P<0.05$),但在灰钙土和风沙土之间的差异不显著。虽然3种土壤的总碳存在显著差异($P<0.05$),但砾石土和灰钙土之间的土壤无机碳含量差异不显著,且均显著高于风沙土,可见产区中北部的砾石土和产区中部的灰钙土之间具有一定的相似渊源,即砾石土的细粒部分依然为灰钙土,所以在无机碳成分上具有相似性。然而,砾石土的总SOC含量显著高于灰钙土和风沙土($P<0.05$),但砾石土的SOC密度最高,其次是风沙土。原因主要为砾石土区葡萄园多为近些年所垦殖,且在垦殖过程中进行了土壤砾石分筛、初始翻耕和施用有机肥,这种农业措施显著提高了砾石土区葡萄园的总SOC含量。

该葡萄产区的平均SOC密度为 $52.85 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图8)。通过分析不同葡萄园的碳库密度发现,金山葡萄园的SOC密度最高($76.45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),其次是新慧彬($64.50 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和立兰($64.11 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)葡萄园,西鸽葡萄园SOC密度最低,为 $31.02 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在不同土壤类型分析中,砾石土的土壤有机碳密度最高,为 $56.15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次是风沙土($53.17 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),即SOC的特征受土壤类型的影响显著。

从不同类型土壤的碳库活度来看(图9),砾石土的碳库活度最高,平均为0.48,且变化范围也最大,最高值达到了2.55,出现在金山葡萄园;灰钙土区的碳库活度最低,平均为0.34,且其变化范围也最小。但砾石土、灰钙土和风沙土碳库活度的差异均不显著,3类土壤的平均碳库活度为0.4。从不同葡萄园的碳库活度来看,金山的碳库活度最高(0.75),其次是红寺堡(0.56),金山碳库活度显著高于除红寺堡之外的所有葡萄园($P<0.05$),而红寺堡的碳库活度仅显著高于新慧彬,其他各葡萄园之间碳库活度无显著性差异。由此可见,虽然产区中北部砾石土的SOC含量较高,但其碳库活度也较大,即这一土壤类型区的SOC稳定性和持久性相对较差,也相对更容易流失。

2.5 宁夏贺兰山东麓葡萄产区SOC敏感性及其分配比例

贺兰山东麓葡萄产区SOC组分中,中性SOC含量对不同葡萄园或不同土壤类型变化的敏感性最高,可作为反映该产区土壤质量变化的良好指标(表3)。从土壤SOC组分分配比例来看,各葡萄园和不同土壤类型的惰性SOC分配比例最高,这也进一步说明该葡萄产区具有碳汇价值。在3种土壤类型中,砾石土壤区的活性SOC分配比例最高,再次说明了该土壤类型下土壤碳库活度较高;但砾石土壤区的惰性SOC分配比例也最高,这与该土

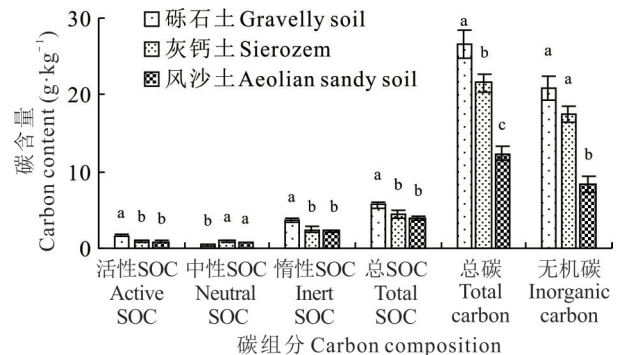


图7 不同土壤类型的碳组分及总碳含量

Fig. 7 Soil carbon components and total carbon content of different soil types

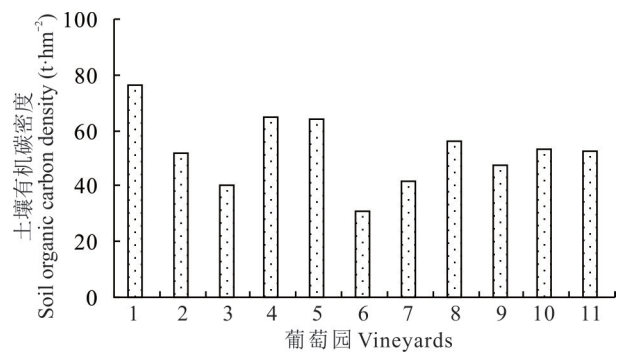


图8 土壤有机碳密度

Fig. 8 Soil organic carbon density

1: 金山 Jinshan; 2: 美贺 Meihe; 3: 长城 Changcheng; 4: 新慧彬 Xinhuibin; 5: 立兰 Lilan; 6: 西鸽 Xige; 7: 红寺堡 Hongsibao; 8: 砾石土 Gravelly soil; 9: 灰钙土 Sierozem; 10: 风沙土 Sandy soil; 11: 全产区均值 Average across whole area.

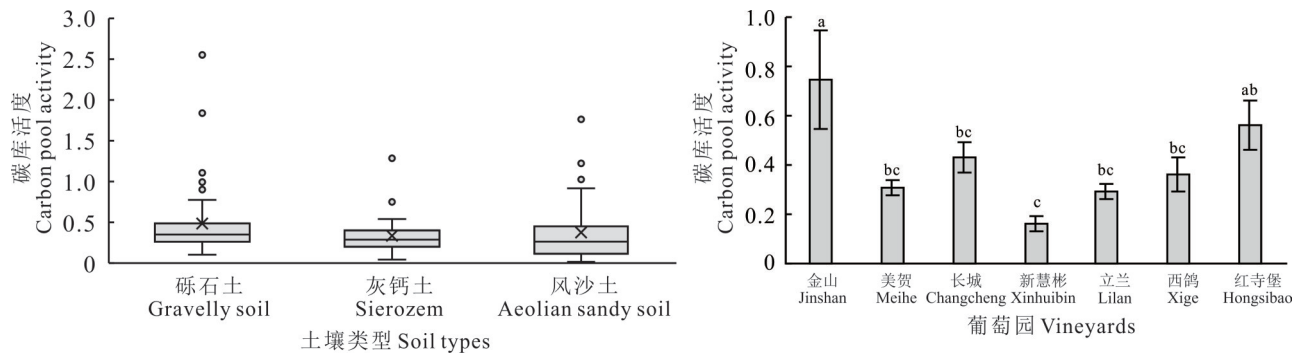


图 9 土壤碳库活度

Fig. 9 Lability of soil carbon pool

表 3 贺兰山东麓葡萄产区有机碳敏感性及其分配比例

Table 3 Soil organic carbon sensitivity and distribution ratio in grape producing areas at the eastern foothills of Helan Mountain

项目 Items	敏感性指标 Sensitivity index	SOC 及其组分敏感值 SOC and its component sensitive values				SOC 组分分配比例 Distribution ratio of SOC components (%)		
		SOC	活性 SOC Active SOC	中性 SOC Neutral SOC	惰性 SOC Inert SOC	活性 SOC Active SOC	中性 SOC Neutral SOC	惰性 SOC Inert SOC
葡萄园 Vineyards	金山 Jinshan	1.14	5.12	10.60	1.81	38.4	10.8	50.8
	美贺 Meihe	0.92	2.56	47.09	0.45	25.0	8.1	66.9
	长城 Changcheng	1.55	1.52	16.89	0.56	28.3	3.7	68.0
	新慧彬 Xinhuibin	0.57	16.81	49.84	0.87	21.5	19.6	58.9
	立兰 Lilan	1.10	1.20	2.36	0.28	12.1	25.9	62.0
	西鸽 Xige	0.76	12.59	25.14	9.11	21.4	29.6	49.1
	红寺堡 Hongsibao	0.66	6.80	5.21	5.05	29.6	16.4	53.9
	均值 Average value	0.96	6.66	22.45	2.59	25.2	14.0	60.8
土壤类型 Soil types	砾石土 Gravelly soil	1.21	3.06	24.86	0.94	29.0	6.5	64.5
	灰钙土 Sierozem	0.93	6.89	13.75	4.69	21.4	22.1	56.5
	风沙土 Aeolian sandy soil	0.61	11.81	27.52	2.96	21.3	20.9	57.8
	均值 Average value	0.92	7.25	22.04	2.86	24.4	15.5	60.1

壤类型的发育背景有关,砾石土主要分布于产区中北部贺兰山的山前洪积扇上,原始土壤发育于贺兰山山地森林, SOC 含量相对更高,之后受山麓的冲、洪积作用,与砾石混合搬运、堆积于山前,积累了更高的惰性有机碳。

3 讨论

3.1 干旱荒漠草原区垦殖葡萄园会增强生态系统碳汇

贺兰山东麓葡萄产区 0~20 cm 表层土壤的 SOC 为 3.5~11.5 g·kg⁻¹,明显低于中国近 30 年农田生态系统的 SOC 含量(16.7~86.5 g·kg⁻¹)^[29];葡萄园 0~100 cm 土层的 SOC 平均含量为 6.5 g·kg⁻¹,略高于该地区荒漠草原的平均 SOC 含量(5.3 g·kg⁻¹)^[30],可见贺兰山东麓葡萄产区土壤养分较为贫瘠,且严重受垦殖前荒漠草原的 SOC 本底制约。贺兰山东麓产区土壤以灰钙土和风沙土类型为主,产区北段为细粒土壤掺杂大量砾石而形成的砾石土,所有类型土壤在发育过程中积累的养分均较少,因而产区葡萄园垦殖之初土壤质量较差, SOC 含量水平偏低。王志秀^[30]得出贺兰山东麓荒漠草原 SOC 密度为 36.7 t·hm⁻²,而本研究得出贺兰山东麓葡萄产区平均 SOC 密度为 52.85 t·hm⁻²,显著高于区域性荒漠草原的对照值,可见葡萄垦殖在一定程度上增加了 SOC 密度和储量。

Zhang等^[7]调查发现红寺堡产区赤霞珠葡萄园的SOC密度为 $43.12\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,本研究得出的红寺堡小产区SOC密度与其较为接近,但其明显低于产区平均SOC密度,也低于荒漠草原的对照值,这与红寺堡位于产区最南端、远离贺兰山东麓,且土壤为更贫瘠的风沙土有关。然而,产区中部垦殖成熟的新慧彬和立兰葡萄园SOC密度相对较高,分别为 64.50 和 $64.11\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,可见,种植葡萄后土壤的有机碳蓄积会增高。一项意大利产区利用涡度相关技术监测碳通量的结果显示,葡萄园生态系统比其他农田的碳汇能力更强^[11],相对于干旱区其他农田生态系统,葡萄植株的高初级生产力使其能够更强地吸收、转化和固定大气 CO_2 ,因此,该生态系统可支撑干旱区的“碳中和”目标。

3.2 影响贺兰山东麓葡萄产区SOC累积的因素

贺兰山东麓葡萄产区SOC含量主要受控于两方面:一是土壤原始发育背景下的碳积累;二是垦殖期间的人为施肥和生态系统周转的碳输入。本研究发现产区北部的SOC含量明显高于南部,土壤总碳和总SOC含量也在不同土壤区存在差异,其中砾石土的SOC含量整体上高于风沙土和灰钙土,其原因与每种类型的土壤原始发育背景下的碳积累有关。产区中北部砾石土的细粒部分多发育于贺兰山地前缘或山地森林,在洪积扇形成过程中搬运积累至扇前,积累了较多的惰性有机碳;产区中部的灰钙土发育的气候背景更为干旱,SOC累积更少;产区南部风沙土的风蚀背景导致其有机质积累较少。其次,施有机肥会显著增加SOC含量及活性有机碳组分^[31]。据调查,产区中北部新垦殖的葡萄园每两年会施用一次羊粪等有机肥,最高 0.0667 hm^2 施用 10 m^3 羊粪。施用有机肥一方面直接促进了土壤中SOC和活性SOC含量^[32];另一方面当有机肥施入土壤后显著降低了土壤的容重,有机肥在分解过程中,微生物排泄的有机酸和多糖起到了胶结作用,诱导了大孔隙和大团聚体的形成,导致砾石土进一步增大孔隙度^[33],进而改善了土壤微环境,提高了土壤微生物活性,从而促进有机肥及植物残体向SOC和活性有机碳的转化^[34-35]。本研究中,各葡萄园和不同土壤类型下中性SOC敏感性最强,这主要是因为中性SOC中包含大量的颗粒有机碳。有研究认为颗粒有机碳对土壤耕作活动比较敏感,可作为评估不同农田管理措施对土壤质量影响的敏感指标^[36]。此外,干旱荒漠草原区的土壤形成过程导致明显的SOC垂直分异现象^[37]。已有研究表明,植物通过光合作用固定的碳大约有 $40\%\sim 50\%$ 被分配到地下,约有 $1/4$ 的碳通过根系生长释放到土壤环境中,而以草本为主的荒漠草原植物根系较浅,故加剧了土壤表层SOC的累积^[37]。当然,土壤物理化学环境和微生物活动强度等随土层深度变化也是引起SOC垂直分异的因素^[38-40]。

土壤活性有机碳溶解性高,易分解后被植物吸收,受外界条件影响大,在维持土壤碳库平衡和养分供应方面具有重要作用^[41],也是土壤微生物的主要能量来源,可作为评价土壤微生物分解和养分有效性的重要指标^[42]。土壤惰性有机碳性质稳定,不易被矿化分解,其含量高低可以反映SOC的固持能力^[43]。土壤活性有机碳占总有机碳的比例较活性有机碳含量本身更能反映SOC组成的变化,活性有机碳的分配比例可反映SOC的稳定性^[44]。当土壤中活性有机碳占总有机碳的比例增加时,土壤碳循环速度加快,有机质更容易被分解,进而降低了土壤有机碳库的稳定性^[45]。在我国西北典型的半干旱地区无机碳库存约为SOC库存的4倍^[46]。本研究中贺兰山东麓葡萄园土壤无机碳与土壤碳库的比例达到了 74.8% ,这与Huang等^[47]报道的高无机碳密度的土壤主要分布于干旱区的结果一致。产区中北部砾石土的活性SOC显著高于灰钙土和风沙土,这主要归因于中北部为新垦殖区化肥和有机肥的持续投入。而化肥中多为易降解碳组分,将其施用并归还于土壤,极大地增加了活性SOC含量^[48]。在土壤碳组分中,整个产区的惰性SOC含量最高,这主要与后期人为管理有关,也说明人为垦殖活动是导致该产区土壤碳组分产生差异的主要原因。Ding等^[49]的研究表明,施加有机肥可以使惰性SOC含量($10.5\%\sim 29.5\%$)显著高于活性SOC含量($5.6\%\sim 10.2\%$),通过有机肥不断输入增加了惰性SOC含量,本研究结果与上述报道类似。

作为一种垦殖年限大多在 $10\sim 20\text{ a}$ 的农田生态系统,人为垦殖干扰和葡萄的碳输入与周转是造成葡萄园垦殖后SOC变异的重要动力。本研究发现,葡萄园表层 $0\sim 40\text{ cm}$ 的土壤受农业垦殖活动影响显著,而 $40\sim 100\text{ cm}$ 的影响相对较小,这主要与葡萄园生产过程中施用大量的有机肥和每年的埋土过冬耕作模式有关。由于原始土壤贫瘠,贺兰山东麓葡萄园垦殖之初大多数会施用有机肥来提升土壤养分,从而显著提高 $0\sim 40\text{ cm}$ 的土壤有机

质含量。且这种耕作措施在产区中北部的新园区更为普遍,所以导致产区中北部表层土壤 SOC 明显高于南部。除上述因素外,葡萄种植年限也对 SOC 累积有影响,本调查中新垦殖的西鸽葡萄园土壤 SOC 明显低于其他园区,但其土壤无机碳含量却较高。葡萄因其生物量大、根系发达,相较于荒漠草原稀疏的草本植被,具有更强的碳周转能力,其每年通过枯落物向土壤输入的碳量也高于荒漠草原,这种碳的输入、周转和累积量会随着葡萄种植年限的增加而增多,前人也发现葡萄园的碳汇效应会随垦殖年限增长而逐渐显现^[28]。

4 结论

为揭示宁夏贺兰山东麓葡萄产区 SOC 库的空间变异及其影响因素,本研究通过野外土壤调查采样、室内试验和统计分析,对该区域 SOC 含量及相关属性指标进行了全面评估,主要得出如下结论:1)该研究区的 SOC 平均密度为 $52.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且 SOC 含量随土层深度增加而降低;其中 0~40 cm 表层的 SOC 富集系数大于 1,即表层碳固持能力更强。2)产区中北部的 SOC 含量明显高于产区南部,但产区西部表层土壤的总碳、活性 SOC 和惰性 SOC 含量明显高于产区东部;引起这种空间异质特征的原因为表层 SOC 主要受人为葡萄垦殖活动的碳输入影响,而深层 SOC 则主要受制于原始土壤发育背景和葡萄深根周转。3)在产区尺度上,惰性 SOC 组分平均含量约占 SOC 的 50%,即土壤碳库活度较低,稳定性较强。4)SOC 密度为砾石土最高,其次是风沙土,而 SOC 含量则是砾石土最高,其次是灰钙土,即 SOC 的特征受土壤类型的影响显著。综上所述,贺兰山东麓葡萄产区具有一定的碳汇价值,但受土壤发育背景和后期葡萄垦殖干扰的影响,其 SOC 库表现出显著的区域异质性。

参考文献 References:

- [1] Zeng N, Jiang K, Han P F, *et al.* The Chinese carbon-neutral goal: challenges and prospects. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(8): 1229–1238.
- [2] Zhou G S, Zhou M Z, Zhou L, *et al.* Prospect of research on the sink enhancement potential of terrestrial ecosystems in China. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(31): 3625–3632.
周广胜,周梦子,周莉,等. 中国陆地生态系统增汇潜力研究展望. *科学通报*, 2022, 67(31): 3625–3632.
- [3] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423–436.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [5] Guillaume T, Bragazza L, Levasseur C, *et al.* Long-term soil organic carbon dynamics in temperate cropland-grassland systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 305: 107184.
- [6] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, *et al.* Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2022, 52(4): 534–574.
杨元合,石岳,孙文娟,等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534–574.
- [7] Zhang L, Xue T T, Gao F F, *et al.* Carbon storage distribution characteristics of vineyard ecosystems in Hongsibu, Ningxia. *Plants*, 2021, 10(6): 1199.
- [8] Williams J N, Morandé J A, Vaghti M G, *et al.* Ecosystem services in vineyard landscapes: a focus on aboveground carbon storage and accumulation. *Carbon Balance and Management*, 2020, 15(1): 1–10.
- [9] Callesen T O, Gonzalez C V, Bastos Campos F, *et al.* Understanding carbon sequestration, allocation, and ecosystem storage in a grassed vineyard. *Geoderma Regional*, 2023, 34: e00674.
- [10] Brunori E, Farina R, Biasi R. Sustainable viticulture: The carbon-sink function of the vineyard agro-ecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 10–21.
- [11] Tezza L, Vendrame N, Pitacco A. Disentangling the carbon budget of a vineyard: the role of soil management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 272: 52–62.
- [12] Hu B, Lin L, Fang Y J, *et al.* Application of chitosan-lignosulfonate composite coating film in grape preservation and study on the difference in metabolites in fruit wine. *Coatings*, 2022, 12(4): 494.
- [13] Du H J, Zhao S W, Wei Y E, *et al.* Evaluation of the suitability of meteorological conditions for wine grapes at the eastern foot of Helan Mountains during the whole reproductive period. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, (2024-09-

- 11)[2024-11-16]. <https://doi.org/10.20176/j.cnki.nxdz.000038>.
- 杜宏娟, 赵斯文, 魏月娥, 等. 贺兰山东麓酿酒葡萄全生育期气象条件适宜度评价. 宁夏大学学报(自然科学版), (2024-09-11)[2024-11-16]. <https://doi.org/10.20176/j.cnki.nxdz.000038>.
- [14] Ma L W, Li J P, Han Y J, *et al.* Meteorological conditions and rating method of quality formation of ‘Cabernet Sauvignon’ grape in eastern foothills of Helan Mountain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(3): 453–466.
- 马力文, 李剑萍, 韩颖娟, 等. 贺兰山东麓‘赤霞珠’品质形成气象条件与评级方法研究. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 453–466.
- [15] Geng K Q, Zhang Y X, LYU D, *et al.* Effects of water stress on the sugar accumulation and organic acid changes in Cabernet Sauvignon grape berries. *Horticultural Science*, 2022, 49(3): 164–178.
- [16] Li Y S, Xiao J N, Yan Y F, *et al.* Multivariate analysis and optimization of the relationship between soil nutrients and berry quality of *Vitis vinifera* cv. cabernet franc vineyards in the eastern foothills of the Helan Mountains, China. *Horticulturae*, 2024, 10(1): 61.
- [17] Ren J Z. Research methods in pratacultural science. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- 任继周. 草业科学研究方法. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [18] Liu S Y, Zhan X H, Lin K F. Procedural regulations regarding the enviroment quality monitoring of soil, NY/T 395-2012. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- 刘素云, 战新华, 林匡飞. 农田土壤环境质量监测技术规范, NY/T 395-2012. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [19] Bao S D. Soil agrochemical analysis (The Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] LYU J L, Yan M J, Song B L, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in an oak forest and a black locust plantation in the Loess hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3385–3393.
- 吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 等. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(10): 3385–3393.
- [21] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma*, 2002, 107(1/2): 109–141.
- [22] Guo L J, Li Y, Li M, *et al.* Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in saline-alkaline field. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 277–285.
- 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 盐渍化农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性. 土壤学报, 2011, 48(2): 277–285.
- [23] Liu X M, Rao H L, Ding X X, *et al.* Effects of different mixed forest types on soil organic carbon and soil respiration in *Phyllostachys edulis* J. Houz forest. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, 27(1): 71–80.
- 刘鑫铭, 饶惠玲, 丁新新, 等. 不同混交类型对毛竹林土壤有机碳和土壤呼吸的影响. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 71–80.
- [24] Xie X, Lu Y H, Liao Y L, *et al.* Effects of returning *Astragalus sinicus* and rice straw to replace partial fertilizers on double season rice yield and soil labile organic carbon. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(18): 3585–3598.
- 谢雪, 鲁艳红, 廖育林, 等. 紫云英与稻草还田替代部分化肥对双季稻产量和土壤活性有机碳的影响. 中国农业科学, 2023, 56(18): 3585–3598.
- [25] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(2): 131–138.
- [26] National Soil Census Office. Provisional technical regulations for the second national soil census. Beijing: Agriculture Press, 1979.
- 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程. 北京: 农业出版社, 1979.
- [27] Yang F, Xu Y, Cui Y, *et al.* Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1047–1056.
- 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近30年中国农田耕层土壤有机质含量变化. 土壤学报, 2017, 54(5): 1047–1056.
- [28] Zhang Z R, Zhao Z M, Deng Z W, *et al.* Soil organic carbon stocks and spatial distribution characteristics of forest land in Meizhou city. *Forestry and Environmental Science*, 2022, 38(2): 153–158.
- 张中瑞, 赵志明, 邓智文, 等. 梅州市林地土壤有机碳储量及空间分布特征. 林业与环境科学, 2022, 38(2): 153–158.
- [29] Zhao M Y, Liu Y X, Zhang X Y. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9405–9416.

- 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展. 生态学报, 2022, 42(23): 9405—9416.
- [30] Wang Z X. Characteristics of soil organic carbon of grape land in different years in eastern piedmont of Helan Mountains. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
王志秀. 贺兰山东麓不同年限葡萄地土壤有机碳变化特征研究. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [31] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, *et al.* Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the north China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92(1): 21—33.
- [32] Li J, Wen Y C, Li X H, *et al.* Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the north China Plain. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 281—290.
- [33] Brar B S, Singh K, Dheri G S. Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 30—36.
- [34] Poirier V, Angers D A, Rochette P, *et al.* Initial soil organic carbon concentration influences the short-term retention of crop-residue carbon in the fine fraction of a heavy clay soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(5): 527—535.
- [35] Whalen J K, Gul S, Poirier V, *et al.* Transforming plant carbon into soil carbon: process-level controls on carbon sequestration. *Canadian Journal of Plant Science*, 2014, 94(6): 1065—1073.
- [36] Zhang S, Wang L C, Huang Z C, *et al.* Effects of conservation tillage on active soil organic carbon composition. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 226—231, 252.
张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应. 水土保持学报, 2015, 29(2): 226-231, 252.
- [37] Zhang M M, Liu T X, Duan L M, *et al.* Carbon isotope characteristics of atmosphere—leaf—litter—soil continuum in typical vegetation types of semi-arid sand dune and meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7663—7675.
张苗苗, 刘廷玺, 段利民, 等. 半干旱沙丘与草甸典型植被类型区大气—叶片—凋落物—土壤连续体碳同位素特征. 生态学报, 2022, 42(18): 7663—7675.
- [38] Gross C D, Harrison Z B. The case for digging deeper: soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world. *Soil Systems*, 2019, 3(2): 28.
- [39] Zhang Y A, Gao M, Yu C Y, *et al.* Soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities differ among biocrust types and soil layers in a degraded Karst ecosystem. *Catena*, 2022, 212: 106057.
- [40] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1): 167—176.
- [41] von Lütow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, *et al.* SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183—2207.
- [42] Cressey E L, Dungait J A J, Jones D L, *et al.* Soil microbial populations in deep floodplain soils are adapted to infrequent but regular carbon substrate addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122: 60—70.
- [43] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, *et al.* Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1—10.
- [44] Yang S Q, Tang F, Yang H, *et al.* Effects of peach tree planting patters on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in southern Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 290—303.
杨淑琪, 唐芬, 杨桦, 等. 滇南地区桃树种植模式对土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响. 生态学报, 2023, 43(1): 290—303.
- [45] Pang D, Cui M, Liu Y, *et al.* Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded karst ecosystems of southwest China. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 391—402.
- [46] Zhang F, Wang X J, Guo T W, *et al.* Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: implications of deep soils. *Catena*, 2015, 126: 68—74.
- [47] Huang Y, Song X, Wang Y, *et al.* Size distribution and vulnerability of the global soil inorganic carbon. *Science*, 2024, 384(6692): 233—239.
- [48] Zhang P, Chen X L, Wei T, *et al.* Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 65—72.
- [49] Ding X L, Han X Z, Liang Y, *et al.* Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 36—41.