

# 贺兰山东麓典型葡萄园土壤有机碳库组成及其活跃度

易志远<sup>1,2</sup>, 罗霄<sup>1,2</sup>, 王玉霞<sup>1,2</sup>, 苏丽<sup>3</sup>, 乔成龙<sup>1,2</sup>, 薛斌<sup>1,2</sup>, 杜灵通<sup>1,2</sup>

(1.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; 2.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; 3.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:** [目的] 研究贺兰山东麓典型葡萄园土壤有机碳库的组成及其活跃度, 量化该区域葡萄园生态系统潜在的固碳能力, 为挖掘葡萄园碳汇能力和核算碳汇价值提供科学依据。[方法] 以贺兰山东麓典型的新慧彬葡萄园为例, 开展园区尺度的土壤有机碳取样调查与分析, 研究土壤有机碳含量、密度和组分等特征。[结果] ①葡萄园0—100 cm剖面土壤有机碳平均含量为4.65 g/kg, 土壤有机碳密度为64.5 t/hm<sup>2</sup>, 虽然土壤有机质含量低, 养分匮乏, 但依然是葡萄园生态系统碳库的主要部分。②在垂直剖面上, 土壤有机碳含量随着土层加深而递减, 且0—40 cm表层和40—100 cm深层的土壤有机碳含量存在显著差异, 表层土壤的有机碳富集系数大于1, 对有机碳具有更强的固持能力。③土壤有机碳含量在园区范围内存在空间异质性, 其中表层土壤有机碳的空间异质性受制于不同田块间葡萄品种及施肥等垦殖活动差异, 而深层土壤有机碳的空间异质性主要受制于原始土壤的形成背景。④土壤有机碳活性、中性和惰性组分的比例约为1:2:5。惰性组分比例较高, 碳库活度较低, 稳定性较强。虽然惰性有机碳含量决定了总有机碳的高低, 但中性有机碳含量的变化亦会影响总有机碳和全碳含量。[结论] 贺兰山东麓葡萄园土壤碳库活度和有机碳含量水平较低。葡萄种植最终会增加土壤碳储量, 增强生态系统的碳汇能力。

**关键词:** 葡萄园; 土壤有机碳; 农田生态系统; 碳汇; 贺兰山东麓

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0390-09

中图分类号: S714.5

**文献参数:** 易志远, 罗霄, 王玉霞, 等. 贺兰山东麓典型葡萄园土壤有机碳库组成及其活跃度[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 390-398. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240625.001; Yi Zhiyuan, Luo Xiao, Wang Yuxia, et al. Composition and activity of soil organic carbon pool in typical vineyards on eastern foothills of Helan Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 390-398.

## Composition and Activity of Soil Organic Carbon Pool in Typical Vineyards on Eastern Foothills of Helan Mountains

Yi Zhiyuan<sup>1,2</sup>, Luo Xiao<sup>1,2</sup>, Wang Yuxia<sup>1,2</sup>, Su Li<sup>3</sup>, Qiao Chenglong<sup>1,2</sup>, Xue Bin<sup>1,2</sup>, Du Lingtong<sup>1,2</sup>

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest

China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Ningxia Helan Mountain Eastern Foothills Wine Industry Park Management Committee, Yinchuan, Ningxia 750104, China)

**Abstract:** [Objective] The composition and activity of soil organic carbon pools in typical vineyards in the eastern foothills of the Helan Mountains were analyzed, and the potential carbon sequestration capacity of the vineyard ecosystem in the region was quantified, in order provide a scientific basis for exploring the carbon sequestration capacity and calculating the carbon sequestration value of vineyards. [Methods] Soil organic carbon (SOC) was sampled and analysed at the park scale in a typical Xinhuibin vineyard in the eastern foothills of the Helan Mountains to study the characteristics of SOC content, density, and composition. [Results] ① The average SOC content in the 0—100 cm profile of the vineyard was 4.65 g/kg, and the SOC

收稿日期: 2024-02-01

修回日期: 2024-03-26

资助项目: 宁夏重点研发计划“宁夏贺兰山东麓葡萄酒园区碳资产核算及示范”(2022BEG02051)

第一作者: 易志远(1998—), 男(汉族), 湖北省咸宁市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤碳循环。Email: 847330948@qq.com。

通信作者: 杜灵通(1980—), 男(汉族), 宁夏回族自治区吴忠市人, 博士, 研究员, 主要从事生态系统碳水循环监测与模拟研究。Email: dult80@qq.com。

density was 64.5 t/hm<sup>2</sup>. Although the SOC content was low and nutrients were scarce, SOC was still the main component of the carbon pool in the vineyard ecosystem. ② The soil organic carbon content in the vertical profile decreased with the deepening of the soil layer, and there was a significant difference in the SOC content between the 0—40 cm surface layer and the 40—100 cm deep layer. The SOC enrichment coefficient of the surface soil was > 1, indicating a stronger ability to fix organic carbon. ③ There was spatial heterogeneity in SOC content within the park; the spatial heterogeneity of surface soil organic carbon was constrained by differences in grape varieties and fertilisation among different fields. In contrast the spatial heterogeneity of deep soil organic carbon was mainly constrained by the formation background of the original soil. ④ The ratio of soil organic carbon activity and neutral and inert components was approximately 1 : 2 : 5, with a high proportion of inert components and low carbon pool activity, indicating strong stability. Although the content of inert organic carbon determined the level of total organic carbon, changes in the content of neutral organic carbon can also affect the content of total organic carbon and total carbon. [Conclusion] The soil carbon pool activity and SOC content of vineyards at the eastern foot of the Helan Mountains are low. Grape planting will eventually increase soil carbon storage and enhance the carbon sink capacity of the ecosystem.

**Keywords: vineyards; soil organic carbon (SOC); farmland ecosystem; carbon sink; eastern foothills of Helan Mountains**

20世纪50年代以来,全球气候变暖中50%以上是由人类活动影响造成<sup>[1]</sup>。已有研究表明,1880—2012年全球平均温度上升了0.85℃<sup>[2]</sup>,主要是由CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O等为主的温室气体过度排放所致,其中CO<sub>2</sub>的贡献最大<sup>[3]</sup>。已有研究表明,除了海洋和地质碳库以外,土壤碳库是全球第三大碳库<sup>[4]</sup>,全球土壤中储存的有机碳含量大约为3 300 Pg,是大气碳库储量的4~5倍<sup>[5]</sup>,土壤中的碳含量约占陆地生态系统的67%。在当前全球变暖趋势难以逆转的情况下,要实现碳达峰和碳中和目标,一方面要全社会推进碳减排,包括使用清洁能源代替传统高污染、高能耗的能源,在工业生产过程中实现碳减排目标<sup>[6]</sup>;另一方面则是碳封存,通过植树造林,改善地表覆盖状况,提高土壤的碳汇能力,增加生态系统的碳汇功能。这些生态固碳措施能够吸收和抵消掉人类生产、生活的碳排放量,使人类碳排放和生态系统碳吸收进入一个相对平衡的状态,即实现碳中和目标。因此,挖掘不同生态系统的碳汇潜力,增强各生态系统的碳汇能力是实现碳中和的重要路径。

宁夏贺兰山东麓因其独特的地理区位和优越的气候条件,成为中国乃至世界上重要的酿酒葡萄产区之一,截至2022年,贺兰山东麓的葡萄种植面积已达38 867 hm<sup>2</sup>,约占全国的四分之一,并且葡萄垦殖面积还在逐年增加<sup>[7]</sup>。葡萄园是农田生态系统下的次级生态系统,具有增加地表植被覆盖、防风固沙和保持水土等生态价值。此外,果园生态系统有机质的分解速率低,有机碳在土壤中的保持时间长,拥有更大

的碳汇效应<sup>[8]</sup>。宁夏贺兰山东麓葡萄产区,大面积的葡萄园垦殖于山前洪积扇的荒漠草原上,其原始地类为碳汇能力较弱的荒漠草原生态系统,在这一人为垦殖活动背景下,葡萄园生态系统是否增强了区域的碳汇能力,是否影响了土壤及生态系统的碳固存格局,是当前宁夏贺兰山东麓葡萄产区亟需解答的科学问题。为此,本研究以贺兰山东麓典型葡萄园为例,开展园区尺度的土壤有机碳取样调查与分析,研究典型葡萄园土壤有机碳库组成及其活跃度,以期量化该区域葡萄园生态系统潜在的固碳能力,为挖掘葡萄园碳汇能力和核算碳汇价值提供科学依据。

## 1 研究区概况、试验与方法

### 1.1 研究区概况

新慧彬葡萄园位于贺兰山东麓葡萄产区的永宁小产区,贺兰山东麓葡萄园在开垦之前主要为荒漠草原,属于中温带干旱大陆性气候,年日照时间长,光照充足,全年平均温度为5~9℃,气温的日较差和年较差较大,主要土壤类型为灰钙土和风沙土,土壤有机质含量少,肥力水平低下,因为地处宁夏平原,所以地貌类型以平原为主,地势起伏和缓,坡度较小,蒸发强烈,年蒸发量在1 600 mm以上,但年平均降水只有200 mm左右,且集中于夏秋两季<sup>[9]</sup>。在年降水量少且分布不均匀的气候条件下,葡萄园生产主要依靠灌溉供应所需水分。园区在葡萄藤之间布设滴水管,定期对葡萄藤根部土壤进行滴水,尽可能减少水分蒸发,节约灌溉用水量。葡萄园采用冬季埋土耕作模式,每年10月葡萄果实收获后,将葡萄的1 a生枝条

剪断并挂在支架上自然晾干,葡萄主干下部分则埋入土壤,防止葡萄植株冻伤,第二年 4 月份温度回升后,重新将葡萄枝干挖掘出土,这种耕作模式对园区表层土壤具有一定的扰动作用。葡萄园在种植初期实施了萌芽肥,往后每年在葡萄的生长季节施少量的有机肥。

## 1.2 试验设计与土样分析

土壤样品采集于 2023 年 4—5 月进行,野外工作前在 Google Earth 地图上进行园区采样点的布局与设计,根据园区的地形、交通和葡萄种植情况选择合适的采样点,在良好的天气进行土壤样品采集。本研究共设计了 14 个采样点,采样点尽可能均匀覆盖整个园区,在土壤样品采集的同时记录采样深度和样点经纬度等信息。利用土钻在采样点以 20 cm 一层土样的方式进行土壤样品的采集,在地表以下 1 m 深的土层中采集 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 共 5 层土壤样品,各土层取 200~300 g 左右土壤样品装进塑封袋并封装,避免土壤被污染。同时挖掘土壤剖面取环刀样,用环刀取土样后,将土样连同环刀一并放置于塑封袋后进行封装并带回实验室,土壤环刀样品称鲜重后用烘箱在 105 °C 烘干至恒重,称取土壤干重用以计算土壤含水率和容重。各分层土样在通风阴凉处晾干,挑检出葡萄藤根系和杂草根系等杂物,取 100 g 左右土样进行研磨过筛,最后进行土壤有机碳和碳组分等相关检测,不同土层和不同组分的有机碳随机进行 2 个重复检测。土壤全碳含量采用碳氮分析仪法<sup>[10]</sup>进行测定,有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[11]</sup>,活性、中性和惰性有机碳组分采用硫酸水解提取法测定。

## 1.3 研究方法

1.3.1 土壤有机碳密度计算 土壤有机碳密度是指单位面积、一定深度范围内土壤中的有机碳含量多少,计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$\text{SOC}_{\text{density}} = C \times \theta \times D \times (1 - \delta) / 100 \quad (1)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{density}}$ 为土壤有机碳密度; $C$ 为土壤有机碳的平均含量(g/kg); $D$ 为土层厚度(cm); $\theta$ 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $\delta$ 为直径>2 mm 的砾石含量(体积百分比)。

1.3.2 土壤碳库活度与有机碳富集系数 土壤碳库活度是指活性有机碳与非活性有机碳的比值<sup>[13]</sup>。

$$L = \text{LOC} / \text{NLOC} \quad (2)$$

式中: $L$ 为碳库活度;LOC 为活性有机碳含量(g/kg);NLOC 为非活性有机碳含量(g/kg)。

有机碳富集系数指某一土层的有机碳含量与全

土壤剖面有机碳平均含量的比值<sup>[14]</sup>,可以指征该土层对有机碳保持的能力,某一土层的有机碳富集系数越大,说明该土层对土壤有机碳的固持能力越强。

1.3.3 有机碳组分分类 按照土壤有机碳中活性物质分解周期的不同,可将其划分为活性、中性和惰性有机碳。活性有机碳是指土壤中有效性最高,对植物生长发育的养分供应起最直接作用,但稳定性较差,容易被土壤微生物分解利用有机碳部分<sup>[15]</sup>,常被用作衡量土壤碳库变化情况的指标,主要包括可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)和易氧化有机碳(ROC)等<sup>[16]</sup>。

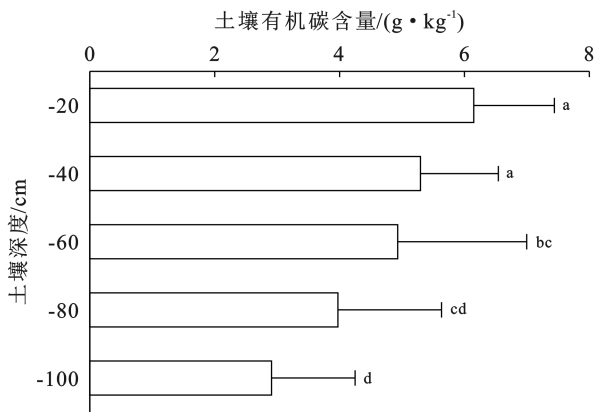
惰性有机碳是指理化性质稳定、难以被土壤微生物分解和利用的有机碳部分,其周转时间长,对土地利用变化的响应微弱<sup>[17]</sup>,主要包括重组有机碳(HOC)和矿物结合态有机碳(MAOC),土壤固持的惰性有机碳含量的高低对减少土壤碳排放、缓解全球变暖具有重要指示意义<sup>[18]</sup>。中性有机碳是指处于活性和惰性之间的具有中等周转时间的有机碳组分,主要包括轻组有机碳(LFOC)和颗粒有机碳(POC)<sup>[19]</sup>。

1.3.4 数据统计与分析 使用 SPSS 27, Origin 2022 和 Excel 2021 等软件对土壤有机碳数据进行统计分析和制图,使用 ArcGIS 软件和 Spline 样条函数插值算法进行葡萄园不同深度和不同组分有机碳含量的空间变化分析,研究园区尺度的土壤有机碳空间分异特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量变化特征

2.1.1 垂直富集特征 对新慧彬葡萄园 14 个采样点、每个采样点 5 层的土壤有机碳含量数据进行统计分析,可以看出土壤有机碳含量随深度增加而递减,且不同层位之间存在一定的差异(图 1)。葡萄园 14 个采样点的 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土壤有机碳含量的平均值分别为 6.15, 5.30, 4.93, 3.97, 2.91 g/kg。其中 0—40 cm 深度的 2 个土层的有机碳含量显著高于 40—100 cm 深度的 3 个土层的有机碳含量,说明新慧彬葡萄园每年翻耕、埋土和施肥等耕作扰动,给表层土壤(40 cm 以内)输入了葡萄枯落物和有机肥等有机质,导致表层土壤有机碳含量高于深层未扰动的土壤(图 2)。但在深层土壤内,不同深度的土层间也存在差异,其中 40—60 cm 的土壤有机碳含量显著高于 80—100 cm 的土壤,这说明所在区域原始土壤在发育中,形成了土壤有机碳含量随深度递减的规律,导致 80—100 cm 的土壤有机碳含量最低。



注:不同小写字母表明土层间有机碳含量差异显著( $p < 0.05$ )。

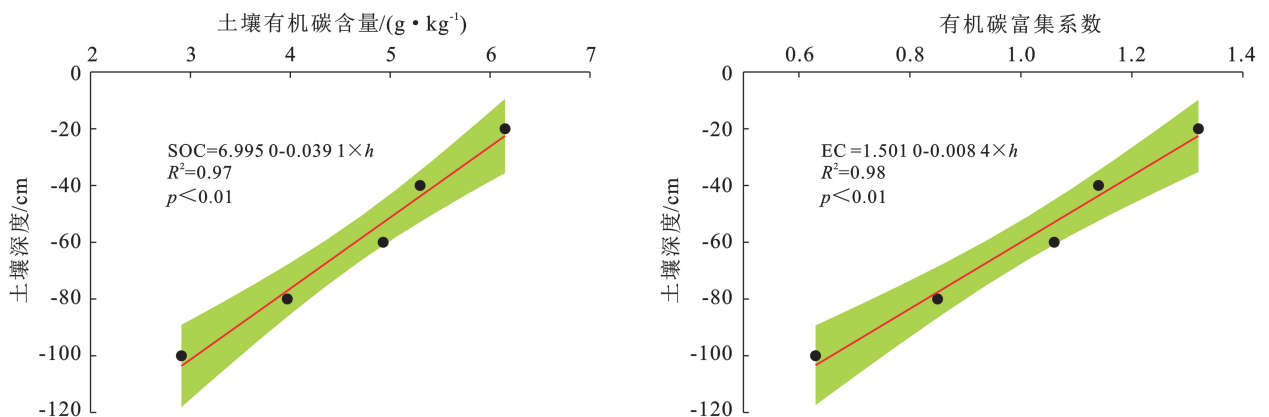
图1 不同深度土层的土壤有机碳含量及差异分析

Fig.1 Organic carbon content of different soil layers and their variance analysis

从新慧彬葡萄园70个土壤有机碳样本的统计特征来看,园区内0—100 cm土壤剖面土壤有机碳含量最小值为0.95 g/kg,最大值为8.68 g/kg,均值为4.65 g/kg,依据平均土壤容重1.387 g/cm<sup>3</sup>,计算得到该园区的土壤有机碳密度为6.45 kg/m<sup>2</sup>,即每hm<sup>2</sup>土壤碳储量为64.5 t。从同一深度土壤有机碳含量的变异程度来看,0—20 cm和20—40 cm土壤有机碳含量在同一层内的变异系数分别为21%和24%,相对较小;而40—60,60—80,80—100 cm土壤有机碳含量在同一层内的变异系数分别为42%,42%和46%,相对较大。按照有机质含量为土壤有机碳乘以系数1.724进行换算<sup>[20]</sup>,根据全国第二次土壤普查土壤养分级别划分标准<sup>[21]</sup>,新慧彬葡萄园

0—20 cm深度土壤有机质含量最高,为4级土壤养分标准,20—80 cm的3个深度土壤有机质含量为5级土壤养分标准,而80—100 cm深度土壤有机质含量最低,为6级土壤养分标准,对应土壤养分级别为缺乏到极度缺乏,可见该葡萄园整体的土壤有机质含量都处于较低的水平,且土壤养分存在随深度增加而变少的趋势。

新慧彬葡萄园土壤有机碳含量随土层深度表现出显著的线性递减关系(图2)。模型拟合的结果显示,表层0 cm处的土壤有机碳含量为6.995 0 g/kg,随着土层深度的增加,土壤有机碳含量以每10 cm降低0.391 0 g/kg的速率在显著下降。由于土壤有机碳含量随土层深度的线性递减规律,导致有机碳富集系数也随土层深度表现出显著的线性递减关系,模型结果显示,表层0 cm处的土壤有机碳富集系数为1.501 0,随着土层深度的增加,土壤有机碳富集系数以每10 cm降低0.084 0的速率在显著下降。土壤有机碳含量和土壤有机碳富集系数随土层深度的下降速率都很大,这导致从地表0 cm向下到达1 m的土层深度处,其土壤有机碳含量和土壤有机碳富集系数均下降了超过一半的量。从各层土壤有机碳富集系数的数值来看,0—60 cm的3个土层的有机碳富集系数均大于1,说明地表以下60 cm深度范围内的土层对有机碳的保持能力较强,该葡萄园的土壤有机碳含量主要集中于这一深度的土层以内;60—100 cm的2层土层的有机碳富集系数小于1,说明该葡萄园超过60 cm深度的土层对有机碳的保持能力较弱,土壤有机碳含量在深层土壤中显著减少。



注:图中变量SOC为土壤有机碳含量;变量EC为土壤有机碳富集系数;变量h为土层深度。

图2 土壤有机碳含量、富集系数随深度变化规律

Fig.2 Changes in soil organic carbon content and enrichment coefficient with depth

2.1.2 空间分布特征 从不同层位土壤有机碳含量空间分布来看(图3),其0—20 cm和20—40 cm表层土壤有机碳含量的空间分布较为一致,为西高东低的特点,且高低值分布的空间格局较为相似,因为表

层土壤受每年的葡萄埋土耕作影响显著,其土壤有机碳的空间分异主要决定于田块间的不同葡萄种植品种固碳周转、根据种植品种需求的施肥灌溉和耕作措施等。60—80 cm和80—100 cm深层土壤有机碳含

量空间分布也较为一致,表现出南北低而中部高的特点,这两层土壤基本上不受葡萄园耕作干扰,所以有机碳含量与区域土壤本底形成过程以及葡萄根系长

期稳定周转有关。40—60 cm 层的土壤有机碳含量空间分布在整个园区较为均一,空间异质性不大,是表层扰动土壤和深层本底土壤的过渡带。

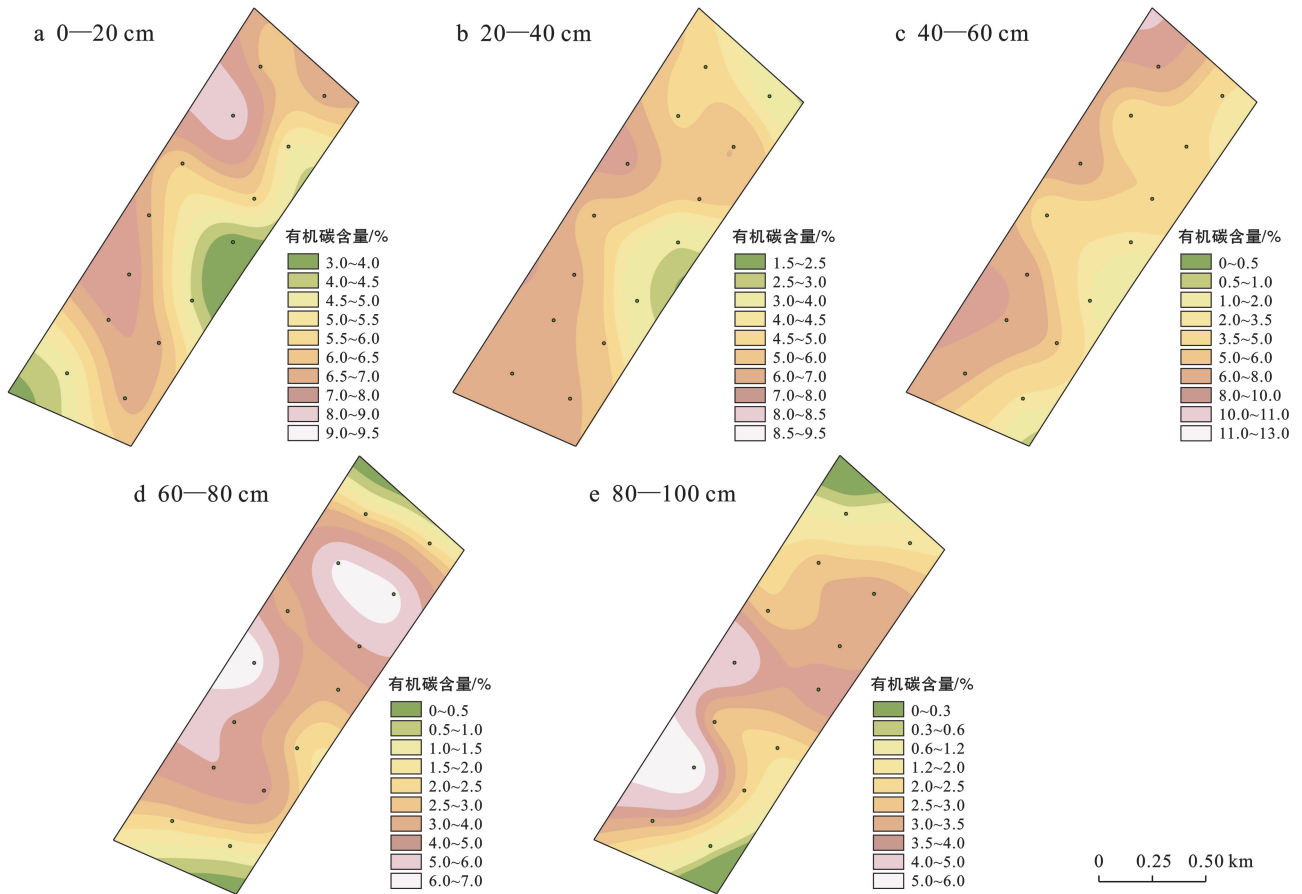


图 3 新慧彬葡萄园不同深度土壤有机碳空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil organic carbon at different depths in Xinhuibin vineyard

为了探究 0—40 cm 表层扰动土壤碳累积和稳定性特征,研究测试了 0—40 cm 表层土壤混合样的总碳含量和活性、中性与惰性有机碳组分(图 4)。受葡萄生产活动有机碳输入和原始土壤无机碳背景的共同影响,新慧彬葡萄园的土壤总碳含量表现出南部低而中、北部高的特点,且其高低值的形态边界与葡萄园的种植田块有极强的空间相似性。从有机碳的组分特征来看,活性、中性和惰性有机碳的空间差异较大,其中活性有机碳在园区的中东部和南部形成两个高值区,这几块田块的土壤有机碳稳定性较差,释放活动大;中性有机碳则表现出从南到北逐渐梯度增高的变化趋势;惰性有机碳在中东部形成一个低值凹陷和东北部出现一个高值中心,这两个田块的稳定有机碳也存在差异,但其他区域惰性有机碳则表现得较为均一,没有形成显著的变化梯度,整个新慧彬葡萄园有机碳的稳定性在空间上差异不是很大(图 4)。

## 2.2 土壤碳组分特征及相关性

葡萄园耕作层的土壤有机碳组分及其稳定性特

征,对评价该生态系统土壤固碳潜力至关重要,本研究测试了新慧彬葡萄园 14 个土壤采样点 0—40 cm 混匀土壤样品的总碳、活性、中性和惰性组分含量。结果表明,新慧彬葡萄园耕作层的平均全碳含量为 13.90 g/kg,其中活性、中性和惰性有机碳的平均含量分别为 0.47,0.95,2.34 g/kg,扣除不同组分的有机碳含量,该葡萄园的土壤无机碳含量为 10.14 g/kg,占全碳含量的 73%,约为有机碳含量的 2.7 倍,可见葡萄园生态系统的土壤总碳储量也是以无机碳为主,但无机碳相对有机碳来说更为稳定,而有机碳虽然占总碳比例较小,但其更多地参与到了葡萄园生态系统的地气碳循环过程中。

从有机碳的 3 个组分占比来看,新慧彬葡萄园的活性、中性和惰性有机碳分别占土壤有机碳总量的 12.5%,25.2% 和 62.3%,活性、中性和惰性有机碳含量的比值约为 1 : 2 : 5,可见土壤有机碳中,以较为稳定的惰性成分为主,稳定性较差的活性组分占比较小。此外,基于活性有机碳与非活性有机碳含量

计算新慧彬葡萄园的土壤碳库活性,14 个土壤采样点的平均土壤碳库活性为 0.15,碳库活性较低,表明碳库较为稳定。但不同样点之间的土壤活性波动较大,14 个土壤采样点的碳库活性在 0.02~0.36 之间,即葡萄园的土壤碳库稳定性在园区尺度的空间上表现出了极强的空间异质性。土壤不同类型碳组分之间的相关性见表 1。各有机碳组分之间的独立性较高,有机碳活性、中性和惰性组分之间不存在

相关性( $p>0.05$ ),有机碳各组分与无机碳也不存在相关性( $p>0.05$ )。只有无机碳与全碳、惰性有机碳和总有机碳之间具有极显著正相关关系,相关系数为 0.77( $p<0.01$ ),说明新慧彬葡萄园无机碳含量决定了总碳含量的高低,惰性有机碳决定了总有机碳的高低,同时,中性有机碳含量的变化也会影响总有机碳和全碳的高低,二者之间具有显著正相关关系( $p<0.05$ )。

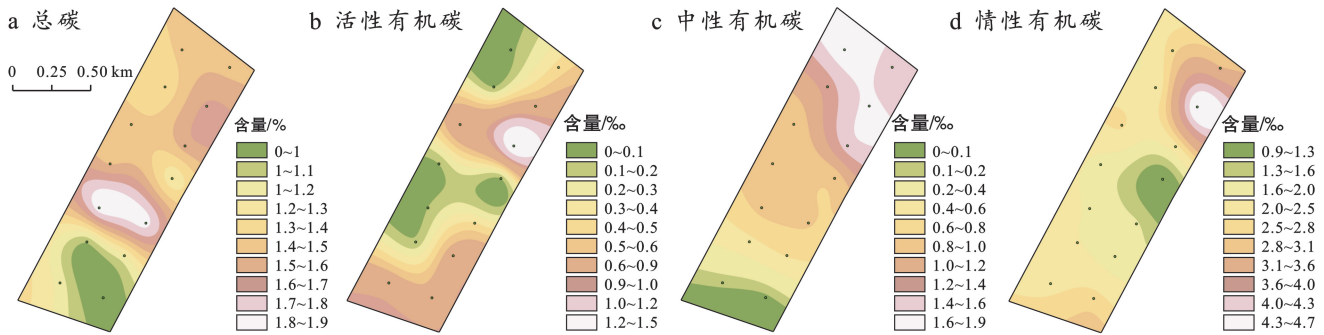


图 4 新慧彬葡萄园不同碳组分含量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of different carbon component contents in Xinhuibin vineyard

表 1 新慧彬葡萄园不同碳组分间的相关性

Table 1 Correlation between different carbon components in Xinhuibin vineyard

项目	活性有机碳	中性有机碳	惰性有机碳	总有机碳	无机碳	全碳
活性有机碳		-0.28	0.38	0.47	-0.42	-0.18
中性有机碳	ns		0.35	0.58	0.34	0.54
惰性有机碳	ns	ns		0.85	-0.50	-0.48
总有机碳	ns	*	**		-0.24	0.23
无机碳	ns	ns	ns	ns		0.77
全碳	ns	*	ns	ns	**	

注: \*, \*\* 分别表示相关性达到显著水平( $p<0.05$ )和极显著水平( $p<0.01$ ); ns 表示相关性不显著( $p>0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 葡萄园生态系统土壤有机碳密度对比

中国近 30 年来农田 0—5 cm 土壤有机碳含量平均值为 16.7~86.5 g/kg<sup>[22]</sup>,而本研究得出新慧彬葡萄园的平均土壤有机碳含量为 4.65 g/kg,可见贺兰山东麓葡萄园生态系统的土壤有机碳含量明显低于中国农田生态系统的平均值,其原因是贺兰山东麓葡萄产区的土壤主要发育于贺兰山洪积扇上,该区域属于温带大陆性气候,发育的土壤类型以灰钙土为主,大多数土壤还夹杂了大量洪积砾石,在这种干旱气候条件下,原始自然地表植被覆盖低,生产力弱,土壤腐殖质含量少且分解速度较快,所以土壤有机碳含量整体较低<sup>[23]</sup>。Zhang Liang 等<sup>[24]</sup>报道的宁夏红寺堡产区葡萄园土壤碳密度为 43.12 t/hm<sup>2</sup>,而本研究中新慧彬葡萄园土壤有机碳密度为 64.5 t/hm<sup>2</sup>,略高于前人报道,其原因为新慧彬葡萄园位于宁夏永宁产区,园区有超过 25 a 的种植期,而红寺堡产区的种植年限普遍

偏短,其中 Zhang Liang 等<sup>[24]</sup>研究的赤霞珠只种植了 7 a。而王志秀<sup>[25]</sup>研究发现,贺兰山东麓荒漠草原区垦殖的葡萄园,土壤有机碳密度会随着生物碳周转的积累和碳库输入量的增加而逐渐升高,并超过对照荒漠草原的土壤有机碳密度,其碳汇效应也随之显现。已有涡度相关通量观测结果表明,葡萄园生态系统的年碳汇量高于小麦、玉米等作物,也高于草地、稀树草原等植被类型,甚至一些针叶、落叶阔叶林等,虽然这一结果被质疑有所高估<sup>[26]</sup>,但普遍共识为葡萄是一种木质藤本植物,比大多数农作物具有更高的生物量和更强的光合作用能力,也能固持更多的大气 CO<sub>2</sub>。

### 3.2 生态系统碳输入和耕作活动加剧了土壤有机碳的表层富集

本研究发现葡萄园土壤有机碳含量具有明显的垂直分异现象,且在 0—40 cm 表层有明显富集现象,并出现了较强的空间异质性。土壤有机碳垂直分异的主要原因与其形成过程中的生物作用有关,表层土壤的植物根系活动和微生物活动带来的碳输入会高

于深层土壤,促进了土壤发育阶段的有机碳垂直分异。表层土壤有机碳主要来源于地表凋落物和位于表层的细根,而深层土壤有机碳则主要来源于根系脱落物和根系的分泌物<sup>[27]</sup>。凋落物和根系的地上地下分配、埋藏深度等会影响土壤有机碳的含量和组分变化,植被根系分泌的初级和次级代谢物<sup>[28]</sup>,其含量会受到植物种类、生长阶段、土壤微生物及其代谢的影响而出现梯度变化,进而影响土壤有机碳含量的垂直分异<sup>[29]</sup>。土壤微生物群落受可利用碳随土层加深而减少的影响,其丰度也随之降低<sup>[30]</sup>,进而减少了土壤有机碳的微生物残体碳源供给。

人为农业垦殖干扰也是影响土壤有机碳表层富集的重要方面,葡萄园表层土壤受垦殖活动影响显著,葡萄收获期埋土带来的普遍的翻耕和生长期施有机肥主要集中于 0—40 cm 的表层土壤,杂草和葡萄枝叶等凋落物等生态系统碳输入也主要集中于表层。凋落物的聚集腐败为土壤微生物营造了更好的环境,其分解为土壤输入了各种有机质<sup>[31-32]</sup>,这些生态过程都有利于土壤表层有机碳的积累,但深层土壤受人类活动扰动较小,其有机碳含量受生态系统碳输入影响较小。可见,原生荒漠草原被垦殖为葡萄园后,葡萄叶等枯落物的增加和人为施肥、翻耕等活动加强了该生态系统的碳输入强度,加剧了土壤有机碳的表层富集,导致表层土壤(0—40 cm)与深层土壤(40—100 cm)间的有机碳含量分异进一步加大。

### 3.3 葡萄园土壤碳库平衡与管理

在土壤碳库中,无机碳是土壤碳库的主要组成部分,约占了土壤碳库含量的 70% 左右<sup>[33]</sup>,黄土高原是中国北方土壤无机碳含量较高的地区,无机碳含量可达到全碳含量的 77.8%<sup>[34]</sup>,本研究发新慧彬葡萄园的无机碳占土壤碳库含量的 73%,与已有研究结果一致。新慧彬葡萄园土壤有机碳含量和活性有机碳含量均偏低,在自然条件下,活性和惰性有机碳之间区分的界线并不清晰,当外界条件和土壤环境发生变化,活性有机碳和惰性有机碳之间也可互相转化。为提高土壤碳库储量,就要增加土壤惰性有机碳组分,让稳定性碳库的储量增加,从而减少土壤有机碳的排放速率。另外,活性有机碳参与土壤矿化作用,矿化作用促使活性有机碳分解,虽然释放了 CO<sub>2</sub> 但又能促进土壤养分形成,所以土壤碳库中又要保证有足够的活性有机碳,才能保证土壤肥力,使植被生长发育不受养分限制,这对整个土壤碳库的良性循环具有重要意义。从葡萄园生态系统碳循环角度来看,当每年生态系统输入的有机质总量与土壤矿化消耗的有机质总量相当时,生态系统与大气间的碳循环达到平衡

态,这时土壤碳库储量达到峰值且不再增加,通常达到这种平衡需要几十年到上百年时间<sup>[35]</sup>。所以,为了增强葡萄园生态系统的碳汇能力,需要监测其碳输入与输出量的大小,并通过适当的农艺措施或生态系统管理来提高固碳潜力。

## 4 结论

(1) 研究区土壤有机碳度为 64.5 t/hm<sup>2</sup>,土壤有机质含量低,养分匮乏,属于缺乏土壤有机碳的土壤类别。园区土壤有机碳含量随着土层深度加深而显著减少,从地表到地下 100 cm 深度,土壤有机碳含量降低了一半以上;0—60 cm 土壤的有机碳富集系数大于 1,对有机碳的固持能力更强,土壤有机碳储量主要集中于这一深度的土层以内。

(2) 土壤有机碳在园区尺度空间上的变异程度较大,其中表层空间变异受葡萄垦殖活动影响较大,而深层空间变异主要受制于原始土壤形成的背景差异,人为垦殖活动和外界环境因素等对土壤有机碳的影响随着土层加深而减少。

(3) 研究区土壤碳库整体活度较低,稳定性较强,其中惰性有机碳含量决定了总有机碳的高低。

(4) 相较于贺兰山东麓的荒漠草原,葡萄种植最终会增加土壤碳储量,增强生态系统的碳汇能力。

未来通过开展相同葡萄品种在不同种植区域以及不同葡萄品种在同一种植区域对区域土壤有机碳影响的研究,将有助于精细化描述不同园区和葡萄品种之间的碳汇能力大小,另外通过结合涡度相关系统等,定量监测葡萄园生态系统碳周转过程和精细化描述碳输入输出,对刻画葡萄园生态系统碳循环规律也至关重要。

### 参考文献 (References)

- [1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.  
Qin Dahe, Stocker T. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.  
Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [3] Li Bengang, Gasser T, Ciais P, et al. The contribution

- of China's emissions to global climate forcing [J]. *Nature*, 2016, 531(7594):357-361.
- [4] 张国,曹志平,胡婵娟.土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J].*应用生态学报*, 2011, 22(7): 1921-1930.
- Zhang Guo, Cao Zhiping, Hu Chanjuan. Soil organic carbon fractionation methods and their applications in farmland ecosystem research: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7):1921-1930.
- [5] German D P, Chacon S S, Allison S D. Substrate concentration and enzyme allocation can affect rates of microbial decomposition [J]. *Ecology*, 2011, 92(7):1471-1480.
- [6] 吴红梅,田一鸣,杨昕怡.碳达峰、碳中和目标下中国企业碳减排实施进展及对策建议[J].*环境保护*, 2023, 51(24):50-55.
- Wu Hongmei, Tian Yiming, Yang Xinyi. Carbon emission reduction in Chinese enterprises under the target of carbon peaking and carbon neutrality: Progress and policy recommendations [J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(24):50-55.
- [7] 王静,张晓煜,张磊,等.越冬期埋土防寒层厚度对贺兰山东麓葡萄园土壤温度的影响[J].*中国农业气象*, 2022, 43(8):633-643.
- Wang Jing, Zhang Xiaoyu, Zhang Lei, et al. Effects of the thickness of buried soil for cold prevention on the vineyard soil temperature during the overwintering period at the eastern foot of Helan Mountain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(8):633-643.
- [8] 杨剑锋,杨小妮,王俊花,等.黄土高原成龄苹果园生态系统 CO<sub>2</sub> 通量特征[J].*环境科学*, 2018, 39(5):2339-2350.
- Yang Jianfeng, Yang Xiaoni, Wang Junhua, et al. Characteristics of CO<sub>2</sub> flux in a mature apple (*Malus domestica*) orchard ecosystem on the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5):2339-2350.
- [9] 李红英,段晓凤,旭花,等.贺兰山东西两麓酿酒葡萄越冬覆盖防寒措施效果对比[J].*中国农业气象*, 2022, 43(7): 575-586.
- Li Hongying, Duan Xiaofeng, Xu Hua, et al. Comparison on effect between two anti-freezing measures taken for wine grape overwintering in the east and west foothills of Helan Mountain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(7):575-586.
- [10] 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[J].*生态学报*, 2017, 37(10):3385-3393.
- Lv Jinlin, Yan Meijie, Song Bianlan, 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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10):3385-3393.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physical and Chemical Analysis* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978.
- [12] 徐艳,张凤荣,段增强,等.区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J].*土壤通报*, 2005, 36(6):836-839.
- Xu Yan, Zhang Fengrong, Duan Zengqiang, et al. Calculation method for density and storage of soil organic carbon [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6):836-839.
- [13] 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[J].*中国农业科学*, 2023, 56(18):3585-3598.
- Xie Xue, Lu Yanhong, Liao Yulin, et al. Effects of returning Chinese milk vetch and rice straw to replace partial fertilizers on double season rice yield and soil labile organic carbon [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(18):3585-3598.
- [14] 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[J].*应用与环境生物学报*, 2021, 27(1):71-80.
- Liu Xinming, Rao Huiling, Ding Xinxin, et al. Effects of different mixed forest types on soil organic carbon and soil respiration in *Phyllostachys edulis* J. Houz forest [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(1):71-80.
- [15] 路文涛,贾志宽,张鹏,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J].*农业环境科学学报*, 2011, 30(3):522-528.
- Lu Wentao, Jia Zhikuan, Zhang Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30(3):522-528.
- [16] Song Yanyu, Song Changchun, Yang Guisheng, et al. Changes in labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after marshland reclamation and restoration in the Sanjiang Plain in Northeast China [J]. *Environmental Management*, 2012, 50(3):418-426.
- [17] 陈宗定,许春雪,安子怡,等.土壤碳赋存形态及分析方法研究进展[J].*岩矿测试*, 2019, 38(2):233-244.
- Chen Zongding, Xu Chunxue, An Ziyi, et al. Research progress on fraction and analysis methods of soil carbon [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(2):233-244.
- [18] Zougagh M. Direct determination of total carbonate salts in soil samples by continuous-flow piezoelectric detection [J]. *Talanta*, 2004:29-35.
- [19] 严洁,于小娟,唐明,等.造林对乌海露天煤矿复垦地土壤养分和碳库的影响[J].*林业科学研究*, 2021, 34(4):



- 66-73.  
Yan Jie, Yu Xiaojuan, Tang Ming, et al. Effects of afforestation on soil nutrient and carbon sequestration in reclaimed area of opencast coal mine, Wuhai, Inner Mongolia [J]. *Forest Research*, 2021,34(4):66-73.
- [20] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020,53(2):317-331.  
Zhang Weili, Kolbe H, Zhang Renlian. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020,53(2):317-331.
- [21] 中国土壤调查办公室. 全国第二次土壤普查养分分级标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979.  
China Soil Survey Office. Nutrient Classification Standard of the Second National Soil Survey [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1979
- [22] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. *生态学报*, 2022,42(23):9405-9416.  
Zhao Mingyue, Liu Yuanxin, Zhang Xueyan. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (23): 9405-9416.
- [23] 吴霞, 蔡进军, 王长军, 等. 银川平原农田土壤细菌群落结构与驱动因子分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(10): 126-134.  
Wu Xia, Cai Jinjun, Wang Changjun, et al. Bacterial community structure and its driving factors in farmland soil of Yinchuan Plain [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023,37(10):126-134.
- [24] Zhang Liang, Xue Tingting, Gao Feifei, et al. Carbon storage distribution characteristics of vineyard ecosystems in Hongsibu, Ningxia [J]. *Plants*, 2021,10(6):1199.
- [25] 王志贺. 贺兰山东麓不同年限葡萄地土壤有机碳变化特征研究[D]. 宁夏 银川: 宁夏大学, 2019.  
Wang Zhixiu. Characteristics of soil organic carbon of grape land in different years in eastern piedmont of Helan Mountains [D]. Yinchuan, Ningxia: Ningxia University, 2019.
- [26] Marras S, Masia S, Duce P, et al. Carbon footprint assessment on a mature vineyard [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,214/215:350-356.
- [27] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000,10(2):423-436.
- [28] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物—土壤—微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014,38(3):298-310.  
Wu Linkun, Lin Xiangmin, Lin Wenxiong. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014,38(3):298-310.
- [29] 张登晓, 介红彬, 张文静, 等. 生物质炭对土壤保水性和作物抗干旱能力的影响研究进展[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2023,21(6):144-150.  
Zhang Dengxiao, Jie Hongbin, Zhang Wenjing, et al. Effect of biochar amendment on soil water retention and crop drought resistance: A review [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023,21(6):144-150.
- [30] 王晶晶, 樊伟, 崔珺, 等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落特征的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(24):8361-8373.  
Wang Jingjing, Fan Wei, Cui Jun, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community characteristics in a subtropical evergreen broadleaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(24):8361-8373.
- [31] 王亚娟, 陈云明, 孙亚荣, 等. 宁南黄土丘陵区侵蚀沟不同部位植物多样性与土壤养分[J]. *水土保持研究*, 2023,30(5):99-105.  
Wang Yajuan, Chen Yunming, Sun Yarong, et al. Plant diversity and soil nutrients in different parts of erosion gully in loess hilly region of South Ningxia [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(5):99-105.
- [32] 常涛, 李珊, 李以康, 等. 混播人工草地建植初期对黑土滩植被和土壤的恢复效果[J]. *草地学报*, 2023,31(5):1546-1555.  
Chang Tao, Li Shan, Li Yikang, et al. Restoration effects of mixed sowing artificial grassland on vegetation and soil of black soil land at the initial planting stage [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023,31(5):1546-1555.
- [33] 于伟家, 李雪松, 陈竹君, 等. 氮肥对不同无机碳含量土壤二氧化碳释放的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8):2493-2500.  
Yu Weijia, Li Xuesong, Chen Zhujun, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on carbon dioxide emissions from soils with different inorganic carbon contents [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018,29(8):2493-2500.
- [34] 涂夏明, 曹军骥, 韩永明, 等. 黄土高原表土有机碳和无机碳的空间分布及碳储量[J]. *干旱区资源与环境*, 2012,26(2):114-118.  
Tu Xiaming, Cao Junji, Han Yongming, et al. Storage and spatial distribution of organic and inorganic carbon in the topsoil of Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012,26(2):114-118.
- [35] Scotti R, d'Ascoli R, Gonzalez Caceres M, et al. Combined use of compost and wood scraps to increase carbon stock and improve soil quality in intensive farming systems [J]. *European Journal of Soil Science*, 2015,66(3):463-475.