

贺兰山东麓酿酒葡萄园生态系统 碳储量及分配特征

王雪飞,王悦娟,魏玉清,马婷婷,周超凡,马海军

(北方民族大学生物科学与工程学院,宁夏 银川 750021)

摘要:为阐明贺兰山东麓酿酒葡萄园生态系统碳储量特征,以银川市永宁县玉泉葡萄园为研究对象,通过测算葡萄不同物候期的地上植被碳储量、土壤碳储量和土壤呼吸速率等指标,分析葡萄园生态系统碳储量的时空变化特征。结果表明:(1)葡萄植株碳储量随植株生长而逐渐增加,在浆果采收期各器官碳储量表现为根($2.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>多年生枝($2.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>果($1.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>叶($0.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)>一年生枝($0.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);1 m 深度土壤碳储量随土层加深而逐渐下降,土壤有机碳储量主要集中在0~20 cm 土层。葡萄植株地上部碳储量随生育进程的推进而显著增加,土壤碳储量无显著变化,葡萄园植被碳储量主要集中于多年生部分,多年生根和多年生枝的碳储量占比分别为39.28%和32.76%。(2)土壤呼吸速率(0~10 cm 土层)均值为 $1.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,浆果生长期的土壤呼吸速率最大;土壤温度和湿度是影响土壤呼吸速率的主要因素,对土壤呼吸速率变化的解释率分别为90.9%和41.2%;土壤呼吸速率与土壤0~10 cm 土层的温度和湿度均呈显著的正相关关系。(3)葡萄园生态系统酿酒葡萄品种‘霞多丽’在 $7500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的种植密度下,当年总碳储量为 $49.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,各组分碳储量表现为土壤($42.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占比84.85%)>植株($7.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占比14.15%)>杂草($0.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占比0.54%)>修剪凋落物($0.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占比0.46%)。贺兰山东麓酿酒葡萄园生态系统在葡萄生长季能将固定的碳主要储存于土壤层和植株多年生木质部分,有较强的碳汇能力。

关键词:酿酒葡萄园;生态系统;碳储量;分配特征;贺兰山东麓

中图分类号:S663.1;S181 文献标志码:A

Carbon storage and distribution in the ecosystem of grape vineyards at the eastern foot of the Helan Mountains

WANG Xuefei, WANG Yuejuan, WEI Yuqing, MA Tingting, ZHOU Chaofan, MA Haijun
(College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To clarify the carbon storage characteristics of the ecological system in vineyards at the eastern foot of the Helan Mountains, this study focused on the Yuquanying Vineyard in Yongning County, Yinchuan City. By measuring and calculating the carbon storage of aboveground vegetation, soil carbon storage, and soil respiration across different phenological periods, the temporal and spatial variations of carbon storage in the vineyard ecosystem were analyzed. The results showed that: (1) The carbon storage in grape plants gradually increased as the plants grow, with the carbon storage in different organs during the berry harvesting period ranked as follows: roots ($2.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > perennial branches ($2.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > fruit ($1.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > leaves ($0.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > one-year-old branches ($0.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). The soil carbon storage in 1 m soil depth gradually decreased with increasing soil depth, and it was mainly concentrated in 0~20 cm soil depth. The above-ground carbon storage of grape plants significantly increased with the growth process, while the soil carbon storage remained unchanged. The carbon storage of grapevine vegetation was mainly concentrated in the perennial parts, with carbon storage proportions of 39.28% for pe-

收稿日期:2024-05-01

修回日期:2024-08-04

基金项目:北方民族大学中央高校基本科研业务费专项基金(FWNX16);北方民族大学研究生创新项目(YCXZ4143);宁夏回族自治区科技创新领军人才项目(2022GKLRX07)

作者简介:王雪飞(2000-),女,河南焦作人,硕士研究生,研究方向为生态学。E-mail:15537209031@163.com

通信作者:魏玉清(1969-),男,宁夏同心人,教授,主要从事植物逆境生理生态学研究。E-mail:weiyuqing@126.com

ennial roots and 32.76% for perennial branches. (2) The mean soil respiration rate (0~10 cm soil layer) was $1.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, with the highest soil respiration rate during the berry growth period. Soil temperature and humidity were the main factors influencing soil respiration rate, explaining 90.9% and 41.2% of the variability, respectively. Soil respiration rate was significantly positively correlated with soil temperature and soil humidity at a depth of 0~10 cm. (3) In the grapevine ecosystem, 'Chardonnay' wine grape variety was $49.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ with a planting density of $7\ 500 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$, with the carbon storage of each component in the following order: soil layer $42.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (account for 84.85%) > plants $7.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (account for 14.15%) > weeds $0.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (account for 0.54%) > trimmer $0.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (account for 0.46%). The ecological system in the vineyards at the eastern foot of the Helan Mountains stored the fixed carbon mainly in the soil layer and the perennial woody parts of the plants during the grape growing season, showing strong carbon sequestration capacity.

Keywords: wine vineyard; ecosystem; carbon storage; distribution characteristics; the eastern foot of Helan Mountain

当前气候变化问题日益突出,减少温室气体排放、增强生态系统碳汇功能是应对全球变暖的主要措施^[1]。陆地生态系统碳循环是当前研究的热点领域,而酿酒葡萄园生态系统是农业生态系统的重要组成部分,其多年生的地上部木质结构和特殊的土地管理措施能够储存更多的有机碳,碳汇功能不可忽视^[2]。在该生态系统中,农作物能够以光合作用的方式固定大气中的 CO_2 ,也能够以土壤为媒介向大气释放 CO_2 ,农田碳循环过程复杂,主要归结于自然因素和人类活动的影响。酿酒葡萄园作为农田生态系统的重要组成部分,广泛分布于欧洲、亚洲、北美洲和南半球的不同地区,集中连片栽培的葡萄园具有重要的生态价值^[3]。作为多年生植物,葡萄植株较高大乔木矮小,且易受到管理制度(施肥、耕作、灌溉等)的影响,其碳循环过程较为复杂^[4]。随着生态学研究的深入,如何直观地揭示葡萄园生态系统碳循环规律和碳汇功能已成为葡萄生态学领域关注的热点问题。

贺兰山东麓是我国酿酒葡萄的主要产区,其独特的地理位置和气候环境造就了该区域葡萄成熟度高、糖分及风味物质积累快等品质特性,目前该区域已成为世界公认的优质酿酒葡萄种植区^[5]。本研究以玉泉营葡萄园为研究对象,通过定量分析葡萄园植被层和土壤层碳储量变化特征,揭示在整个生长季内葡萄园的碳源/汇特征,以期为贺兰山东麓葡萄园生态系统碳汇估算提供基础数据和理论支持,同时为我国的葡萄园生态系统提供必要的基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贺兰山东麓宁夏银川市永宁县宁夏农垦局玉泉营葡萄基地($38^{\circ}16.195'N$, $106^{\circ}16.512'E$),

海拔 1 010~1 118 m。贺兰山东麓位于黄河冲积平原与贺兰山冲积扇间,该地区日照充沛,热量丰富,被认为是世界上生产高端品质酿酒葡萄的黄金地带之一^[5]。其中玉泉营葡萄基地位于银川引黄灌区中部,东临黄河,西靠贺兰山。该区域为温带半干旱气候,气候干燥少雨,日照时间长,年平均气温为 8.9°C ,年降水量为 150~200 mm,日照时数为 3 029.6 h,阳光充足,土壤类型以风沙土为主,昼夜温差较大,优质葡萄种植面积为 $1\ 467 \text{ hm}^2$ 。

1.2 样地与取样方法

2022 年 4 月在宁夏农垦集团玉泉营葡萄基地选取 9 年生、种植密度为 $7\ 500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的‘霞多丽’葡萄品种进行调查,设置 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的标准样地,对每个样地内所种植葡萄进行每木尺检,于不同物候期选取 3 株标准木进行测定。植株样品采用破坏性的取样方法,地下根系采用全根提取法,每次均挖掘直径为 0.5 m、深度为 1 m 的圆形土坑进行采样,在每个标准样地内设置 3 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的样方用于收集修剪枝条及杂草。在每个标准样地中分别进行 S 形设点土壤取样,采用直径为 50 mm 的土钻对 0~20、20~40、40~60、60~100 cm 共 4 个深度的土壤进行取样,同层土壤进行混合。同时每个样地内按照行间、株间和样地边缘 3 个位置选取固定点进行土壤呼吸的测定。植株取样、土壤取样及土壤呼吸的测定在出土期、萌芽期、新梢生长期、开花坐果期、浆果生长期、浆果采收期共 6 个物候期进行。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 葡萄植株生物量与含碳率测定 收获标准木后,在现场将每株标准木分为一年生枝、多年生枝、根、叶、果等不同组分,带回实验室烘干至恒重,计算各样地植被生物量。取适量烘干样品于高速万能粉碎机中粉碎,将粉碎的样品过 0.15 mm 筛后

装入标记好的密封袋,采用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法^[6]进行含碳率测定。

1.3.2 修剪物及杂草生物量与含碳率测定 将植株样品带回实验室烘干至恒重,以标准样地内修剪枝条及杂草的生物量换算出整个葡萄园在物候期内修剪枝条及杂草的生物量。将修剪枝条和杂草样品烘干粉碎后,过 0.15 mm 筛,装入标记好的密封袋,植物样品中含碳率用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法^[6]测定。

1.3.3 碳储量的测定与计算 碳储量即各器官生物量与其对应含碳率的乘积。葡萄植株碳储量为不同器官碳储量之和;凋落物与修剪物碳储量为数次收集碳储量之和;年有机碳固定量为生长期各组分年净生产量与含碳率的乘积;葡萄植株、修剪物、杂草和土壤碳储量之和为葡萄园生态系统的总碳储量。土壤层碳储量的计算公式为:

$$S_d = \sum_{i=1}^d D_i C_i H_i$$

式中, S_d 表示深度为 d 的土层内单位面积的土壤碳储量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); D_i 表示第 i 土层的总碳储量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 表示第 i 土层的碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); H_i 表示第 i 土层的深度(cm)^[7]。

1.3.4 土壤呼吸速率测定 于葡萄生长季的各物候期,采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统进行土壤呼吸速率测定^[8]。在标准样地中按照葡萄植株株间、行间和样地边缘 3 个地点选择固定点,每个位置两个固定点,放置 PVC 环,每个 PVC 环内径 20 cm、高 10 cm,将其一端削尖插入土壤,深度为 6 cm。PVC 环于测定的前一天安置于土壤中,以降低对环境的干扰,并清除环内存活的植物体。测定时间为 9:00—11:00,此时间段测定的土壤呼吸速

率被认为可以代表日平均值。同时利用仪器自带的温度和湿度传感器对各测定位置土表下 0~10 cm 土层处的土壤温度(T)和湿度(SWC)进行测定。

1.4 数据处理与分析

数据均采用平均值±标准误差表示,采用 Excel 2010 和 GraphPad Prism 5.0 对原始数据进行分析 and 单因素方差分析,采用 Origin 2021 对土壤温度、土壤湿度与土壤呼吸进行拟合并制图。

2 结果与分析

2.1 葡萄园生态系统地上植被层碳储量特征

2.1.1 不同物候期葡萄植株各器官生物量 葡萄植株生长期各器官的生物量如表 1 所示,葡萄植株的生物量在各物候期不同器官间均有差异。不同物候期,随葡萄植株的生长,叶、果、多年生枝、一年生枝和根的生物量均有所增长,且叶、果及一年生枝的生物量增长速度较快;而多年生木质部分的多年生枝、根的生物量则增长速度较慢。在葡萄植株的生长过程中,不同器官生物量表现为根>多年生枝>果>叶>一年生枝。此外,在葡萄植株的各个物候期,叶、果和一年生枝的生物量总体而言均显著低于多年生枝及地下根部($P<0.05$)。

2.1.2 不同物候期葡萄植株各器官含碳率 葡萄植株含碳率时空分布如表 2 所示,随着葡萄的生育进程推进,各器官的含碳率均呈增长趋势,同一物候期下不同器官间含碳率存在不同程度差异。在未生长果实前,多年生部分的根和多年生枝的含碳率较高,而开花坐果期后果的含碳率最大,尤其在浆果采收期果的含碳率达到最大值,显著高于其他器官。在整个生长期,不同器官的含碳率均值表现为果>多年生枝>根>一年生枝>叶。

表 1 不同物候期葡萄植株各器官生物量/($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)

Table 1 Biomass of grape organs in different phenological periods/($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)

物候期 Phenological period	果 Fruit	叶 Leaf	一年生枝 Annual branch	多年生枝 Perennial branch	根 Root
出土期 Excavation period	-	-	27.33±2.75c	517.33±12.54b	663.33±13.67a
萌芽期 Germination period	-	7.33±1.32d	41.00±3.27c	519.33±13.54b	668.67±13.33a
新梢生长期 New shoot growth period	-	33.67±4.63c	45.33±4.56c	548.67±18.33b	674.67±14.67a
开花坐果期 Flowering and fruit setting period	7.67±1.23e	84.00±6.78d	105.00±6.75c	571.33±15.67b	697.00±20.33a
浆果生长期 Berry growth period	93.00±9.67e	170.33±12.43c	139.33±12.67d	619.67±17.33b	703.33±19.45a
浆果采收期 Berry harvesting period	345.75±19.33c	205.47±16.87d	185.73±12.33e	629.67±18.67b	715.67±10.56a

注:同行不同小写字母表示同一物候期不同器官间差异显著($P<0.05$);“-”表示该时期无果实或叶片。下同。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different organs ($P<0.05$), and “-” means that there is no fruit or leaf in this period. The same below.

2.1.3 不同物候期葡萄植株各器官碳储量 葡萄植株生长期各器官的碳储量如表 3 所示,随着葡萄植株的生长,不同器官的碳储量均呈增长趋势,果的碳储量在浆果采收期达到最高;而在同时期的不同器官中,碳储量存在一定差异,浆果采收期各器官碳储量表现为根>多年生枝>果>叶>一年生枝。综上可知,在未生长果实前,根和多年生枝的碳储量较高,在浆果采收期果实碳储量明显升高,但有机碳仍大量储存于多年生木质部分中。

由表 4 可知,葡萄园生态系统中植被各组分间碳储量有较大差异。其中多年生部分根和多年生枝的碳储量在整个生态系统中占主导地位,分别占总碳储量的 31.79% 和 28.34%;其次为果、叶和一年生枝,由于浆果采收期果实生物量较大,其碳储量在生态系统中占有较大比例;杂草与修剪凋落物的碳储量占比较小,显著小于生态系统其他组分碳储量,仅分别占葡萄园生态系统总生物量的 3.58% 和 3.05%。这说明多年生部分是植被层碳储量的主要来源。

表 2 不同物候期葡萄植株各器官含碳率/(g·kg⁻¹)

Table 2 Carbon content of grape organs in different phenological periods

物候期 Phenological period	果 Fruit	叶 Leaf	一年生枝 Annual branch	多年生枝 Perennial branch	根 Root
出土期 Excavation period	-	-	424.67±8.43b	444.65±2.65a	442.00±2.23a
萌芽期 Germination period	-	417.32±7.11d	424.00±5.12c	446.20±2.19a	443.00±4.40b
新梢生长期 New shoot growth period	-	420.45±7.67d	428.20±4.83c	449.34±3.36a	445.10±4.78b
开花坐果期 Flowering and fruit setting period	478.78±13.67a	420.35±11.51e	428.25±8.90d	451.67±4.45b	445.79±3.20c
浆果生长期 Berry growth period	481.54±9.42a	421.34±7.11c	430.90±6.52c	452.61±12.65b	445.34±4.56b
浆果采收期 Berry harvesting period	484.43±14.2a	422.23±8.34e	433.09±12.1d	453.20±9.43b	446.94±5.64c
平均值 Average	481.58±12.43a	420.27±5.76e	428.18±9.32d	448.47±7.82b	444.53±6.12c

表 3 不同物候期葡萄植株各器官碳储量及分布特征/(t·hm⁻²)

Table 3 Carbon storage and distribution of grape organs in different phenological periods

物候期 Phenological period	果 Fruit	叶 Leaf	一年生枝 Annual branch	多年生枝 Perennial branch	根 Root
出土期 Excavation period	-	-	0.09±0.01c	1.72±0.06b	2.19±0.07a
萌芽期 Germination period	-	0.02±0.01d	0.13±0.01c	1.72±0.01b	2.22±0.02a
新梢生长期 New shoot growth period	-	0.11±0.02d	0.15±0.02c	1.85±0.09b	2.25±0.07a
开花坐果期 Flowering and fruit setting period	0.03±0.01e	0.26±0.01d	0.34±0.02c	1.94±0.07b	2.33±0.04a
浆果生长期 Berry growth period	0.34±0.01d	0.54±0.03b	0.45±0.02c	2.10±0.04a	2.35±0.01a
浆果采收期 Berry harvesting period	1.26±0.07b	0.65±0.01c	0.60±0.01c	2.14±0.01a	2.40±0.04a
平均值 Average	0.54±0.03c	0.3±0.03d	0.29±0.01d	1.91±0.03b	2.29±0.02a

表 4 葡萄园植被层各组分碳储量估算

Table 4 Estimation of carbon storage in aboveground part of vineyard

组分 Component	碳储量/(t·hm ⁻²) Carbon storage	占比/% Percent
果 Fruit	1.26	16.69
叶 Leaf	0.65	8.60
一年生枝 Annual branch	0.60	7.95
多年生枝 Perennial branch	2.14	28.34
根 Root	2.40	31.79
杂草 Weed	0.27	3.58
修剪及凋落物 Timmer	0.23	3.05
合计 Total	7.55	100.00

2.2 葡萄园生态系统土壤层碳储量

如表 5 所示,不同物候期土壤层碳储量均在 0~20 cm 土层所占比例最大,因此最高的土壤有机碳水平和土壤碳储量集中出现在 0~20 cm 土层。随着土壤深度的增加,土壤容重、土壤含水量及土壤 pH 值逐渐增加,有机碳含量和土壤碳储量逐渐减小,各土层出土期碳储量所占比例依次为 33.47%、25.79%、21.08%、19.66%,萌芽期依次为 33.40%、27.02%、20.61%、18.97%,新梢生长期依次为 35.17%、26.56%、24.46%、13.81%,开花坐果期依次

为33.05%、28.59%、20.26%、18.10%，浆果生长期依次为32.15%、28.07%、20.51%、19.27%，浆果采收期依次为32.35%、29.07%、20.51%、18.67%。

2.3 葡萄园生态系统土壤呼吸变化特征

葡萄园生态系统不同物候期土壤呼吸速率变化如图1A所示,土壤呼吸速率随物候期的变化呈单峰曲线,全生育期内土壤呼吸平均值为 $1.76 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。出土期气温较低,土壤呼吸速率最小($0.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),随着气温和地温的升高,土壤呼吸速率不断提高,曲线平稳升高,在浆果生长期达到最大($2.95 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),级差为 $2.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,此后开始逐渐下降。相较于浆果生长期,出土期、萌芽期、新梢生长期、开花坐果期及浆果采收期的土壤呼吸速率分别下降84.75%、

66.17%、43.20%、28.78%和15.15%。将不同物候期测定的土壤呼吸速率与同时期测定的0~10 cm土层的土壤温度进行拟合,两者呈显著的指数关系(图1B)。土壤呼吸速率与同时测定的0~10 cm土层的土壤湿度进行拟合,如图1C所示,不同物候期的土壤呼吸速率与其对应土壤湿度间呈显著的正相关关系。

2.4 葡萄园生态系统碳储量

葡萄园生态系统的碳输入主要来源于植被层和土壤层,不同物候期各组分的碳储量如表6所示。随着葡萄植株的生长,植被碳储量均逐渐增加,土壤碳储量呈先上升后下降的趋势,但土壤碳储量仍占葡萄园生态系统碳储量的较大比例。植被碳储量在萌芽期、新梢生长期、开花坐果期、浆果生长期

表5 葡萄园生态系统不同物候期土壤层碳储量

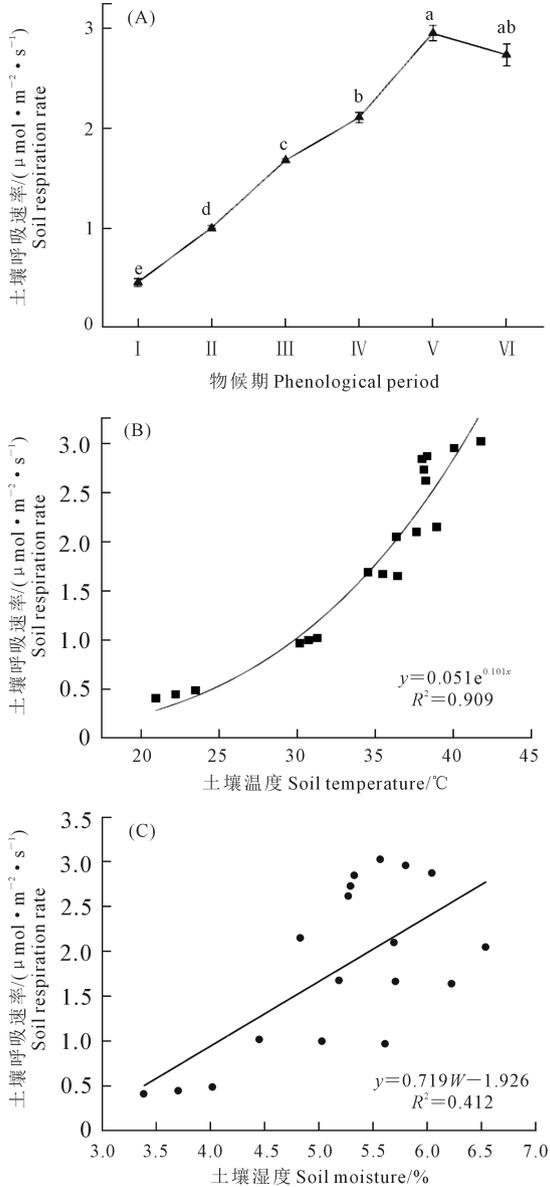
Table 5 Soil carbon storage in vineyard ecosystems in different phenological periods

物候期 Phenological period	土层深度 Soil layer /cm	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量 Water content /%	pH	含碳率 Carbon content /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳储量 Carbon storage /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	碳储量比例 Proportion /%
出土期 Excavation period	0~20	1.08±0.04Bb	2.76±0.56Ec	7.15±0.14Eb	5.69±0.64ABa	13.43±2.47Ba	33.47
	20~40	1.20±0.03Aab	4.13±0.24Eb	7.50±0.14Ca	4.31±0.52Bb	10.35±2.37Bb	25.79
	40~60	1.26±0.04Ba	4.79±0.35Ea	7.83±0.09Ca	3.36±0.24Ac	8.46±1.50ABc	21.08
	60~100	1.32±0.05Aa	4.79±0.46Da	7.87±0.11Ca	3.11±0.56Ad	7.89±1.24ABd	19.66
萌芽期 Germination period	0~20	1.20±0.03ABb	8.08±0.51Ac	7.82±0.14Ba	5.40±0.89Ba	14.03±2.31ABa	33.40
	20~40	1.31±0.05Aab	8.18±0.23Bc	7.80±0.03Bb	4.33±0.37Bb	11.35±1.90Bb	27.02
	40~60	1.32±0.05ABab	8.53±0.34Bb	8.01±0.14Aa	3.28±0.56Ac	8.66±2.62ABc	20.61
	60~100	1.38±0.03Aa	8.89±0.45Ba	7.66±0.16Dc	2.97±0.67Bd	7.97±1.29ABd	18.97
新梢生长期 New shoot growth period	0~20	1.20±0.24ABd	7.30±0.26Bd	7.82±0.21Ad	5.78±0.97ABa	15.03±1.47Aa	35.17
	20~40	1.29±0.34Ac	8.57±0.19Ac	7.93±0.12Ab	4.33±0.98Bb	11.35±2.47Bb	26.56
	40~60	1.32±0.0ABb	8.93±0.56Ab	7.86±0.15Bc	3.83±0.94Ac	9.46±1.50ABc	24.46
	60~100	1.37±0.04Aa	9.35±0.27Aa	8.06±0.16Da	3.32±0.70Ad	8.89±3.20ABd	13.81
开花坐果期 Flowering and fruit setting period	0~20	1.21±0.24Ab	6.34±0.53Dd	7.36±0.16Cd	5.89±0.68Aa	15.43±1.27Aa	33.05
	20~40	1.30±0.34ABab	6.53±0.68Dc	7.74±0.24Bc	4.94±0.29Ab	13.35±2.36Ab	28.59
	40~60	1.37±0.54Aa	7.89±0.26Cb	7.85±0.19Bb	3.45±0.56Ac	9.46±1.24Ac	20.26
	60~100	1.37±0.06Aa	8.92±0.71Ba	8.07±0.23Ba	3.08±0.79Ad	8.45±1.20Ad	18.10
浆果生长期 Berry growth period	0~20	1.20±0.04Ab	6.70±0.42Cc	7.26±0.14Dd	5.70±0.74ABa	14.83±1.27ABa	32.15
	20~40	1.28±0.45Aab	6.80±0.35Cc	7.34±0.24Dc	4.80±0.94Ab	12.95±2.17Ab	28.07
	40~60	1.37±0.04Aa	7.80±0.62Db	7.55±0.23Db	3.45±0.44Ac	9.46±1.56Ac	20.51
	60~100	1.38±0.05ABa	8.10±0.38Ca	8.17±0.25Aa	3.22±0.55Ad	8.89±2.20Ad	19.27
浆果采收期 Berry harvesting period	0~20	1.21±0.05Ad	6.70±0.42Cc	7.36±0.14Cd	5.67±0.64ABa	14.93±1.27ABa	32.35
	20~40	1.28±0.25Ac	6.80±0.35Cc	7.44±0.14Cc	4.82±0.94Ab	10.05±2.17Ab	29.07
	40~60	1.32±0.04Ab	7.80±0.62Db	7.55±0.23Db	3.34±0.54Ac	9.56±1.56Ac	20.51
	60~100	1.38±0.06ABa	8.10±0.38Ca	8.07±0.26Ba	3.34±0.55Ad	7.75±2.20Ad	18.67

注:不同小写字母表示同一时期不同土层深度间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一土层深度不同时期间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different soil layers in the same period ($P<0.05$). Different capital letters indicate significant differences between different periods in the same soil layer ($P<0.05$).

及浆果采收期分别较出土期增加 2.25%、9.00%、22.50%、44.50% 和 76.25%；而土壤碳储量各时期相对于出土期分别增加 4.68%、11.46%、16.35%、14.95% 和 5.38%，在开花坐果期土壤碳储量最大。各物候期的葡萄园生态系统碳储量相较于出土期分别增加 4.46%、11.24%、16.90%、17.63% 和 11.81%，呈



注:图 A 中, I ~ VI 依次代表出土期、萌芽期、新梢生长期、开花坐果期、浆果生长期和浆果采收期;不同小写字母表示不同时期差异显著 ($P < 0.05$)。图 C 公式中 W 代表土壤湿度。

Note: In figure A, I ~ VI represents the excavation period, germination period, new shoot growth period, flowering and fruit setting period, berry growth period and berry harvesting period. Different lowercase letters indicate significant differences between different periods ($P < 0.05$). W in figure C represents soil moisture.

图 1 葡萄园生态系统土壤呼吸变化特征

Fig.1 Characteristics of soil respiration changes in vineyard ecosystems

先上升后下降的趋势,在浆果生长期最大,与土壤碳储量变化趋势一致。由此可知,土壤碳储量是葡萄园生态系统碳储量的主要贡献者,在浆果生长期生态系统的碳储量最大,生态系统全生长季碳储量增加 $5.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

葡萄园生态系统在浆果采收期各组分碳储量及其占比如表 7 所示,葡萄园生态系统的碳储量主要分布于 4 个部分,分别为葡萄植株、修剪及凋落物、杂草和土壤。由表 7 可知,葡萄园生态系统总的碳储量为 $49.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,具体分布表现为土壤 ($42.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 葡萄植株 ($7.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 杂草 ($0.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 修剪及凋落物 ($0.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。其中,各组分所占比例分别为 84.85%、14.15%、0.54% 和 0.46%,与各组分的生物量占比表现基本一致。葡萄园生态系统土壤和植株碳储量之和为 $49.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占整个生态系统总碳储量的 99.00%,可见葡萄园生态系统碳储量主要集中在土壤和植株两个部分;修剪物和杂草的碳储量较少,占总碳储量的比例仅为 1.00%。

如表 7 所示,葡萄园生态系统的年固定碳量为 $5.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,折算成 CO_2 相当于同化 $20.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中整个物候期(出土期~浆果采收期)植株的年固定碳量为 $3.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,折算成 CO_2 相当于同化 $11.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,包括整个生长期叶、果的固定碳量,及一年生枝、多年生枝和根在出土期和浆果采收期碳储量之差,所固定碳量为各组分中最大。修剪及凋落物和杂草的年固定碳量较少,分别为 $0.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,折算成 CO_2 量分别为 $0.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。土壤层的年固定碳量为出土期与浆果采收期的土壤碳储量差值 ($2.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),折算成 CO_2 相当于同化 $7.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。各层次的年固定碳量表现为植株 > 土壤 > 杂草 > 修剪及凋落物。

表 6 不同物候期生态系统碳储量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 6 Ecosystem carbon storage in different phenological periods

物候期 Phenological period	植被 Plant	土壤 Soil	合计 Total
出土期 Excavation period	4.00	40.13	44.13
萌芽期 Germination period	4.09	42.01	46.10
新梢生长期 New shoot growth period	4.36	44.73	49.09
开花坐果期 Flowering and fruit setting period	4.90	44.69	49.59
浆果生长期 Berry growth period	5.78	44.13	49.91
浆果采收期 Berry harvesting period	7.05	42.29	49.34

表7 葡萄园生态系统各组分年有机碳固定量

Table 7 Annual carbon sequestration in vineyard ecosystems

组分 Component	年固定碳量 Annual fixed carbon /(t·hm ⁻²)	折算 CO ₂ 量 Converted carbon dioxide /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	年固定碳量占比 Percent of annual fixed carbon/%	碳储量 Carbon storage /(t·hm ⁻²)	碳储量占比 Percent of carbon storage/%
植株 Plant	3.05	11.19	56.7	7.05	14.15
修剪及凋落物 Trimmer	0.23	0.84	4.0	0.23	0.46
杂草 Weed	0.27	0.99	4.7	0.27	0.54
土壤 Soil	2.16	7.93	37.8	42.29	84.85
总计 Total	5.71	20.96	100.0	49.84	100.00

3 讨论

3.1 地上植被层碳储量是葡萄园生态系统碳汇主要来源,且主要集中于多年生木质部分

本研究通过对葡萄植株及样地其他植被生物量及碳储量的测算发现,地上植被层碳储量主要集中在葡萄植株的木质部位,且大部分储存于多年生木质部中(包括多年生枝和根)。葡萄作为多年生藤本作物,拥有永久性的木质结构,可以将碳长期封存在木质组织中。与土壤碳储量相比,葡萄植株木质部分的碳储量更集中、更容易测量,还可以更直观地观测随着时间、管理措施和气候等因素的变化。Marques 等^[9]通过在美国加州北部的有机葡萄园的试验,测得多年生葡萄木本生物量中总碳储量为 6.8 t·hm⁻²。

葡萄园生态系统的碳储量及各组分的分配比例与森林和其他果园生态系统相比存在较大差异。本研究表明,在葡萄园生态系统中植被层碳储量仅占整个生态系统的 14.15%,低于莲雾果园生态系统,显著低于森林生态系统植被层碳储量的分配比,这主要源于不同植被之间生物量的差别^[10-11]。本研究中,碳多储存于多年生枝和根的部分。Zhang 等^[12]对我国红寺堡葡萄园的研究也发现,不同品种、不同部位的碳储量不同,葡萄藤内部大部分碳储存在多年生器官中,包括多年生枝和根。国内外学者对其他类型果园的植被碳储量及其在器官中的占比也进行了研究。Sofa 等^[13]探究了橄榄树和桃树的碳储量分配情况发现,不同树龄之间分配比例不同,幼嫩果园的生态系统碳储量主要集中在多年生的枝和根中,而成龄果园的生态系统碳储量主要分配在一年生的叶片、果实中。郭雪艳等^[14]通过对上海的桃园和桔园生态系统碳储量的分配分析发现,植被碳储量主要集中在枝和根中;柑橘生态系统的碳储量分配表现为根系>树枝>果实>叶>树干。由此可见,不同植被类型、不同树龄均会对碳储量及其分布产生影响。

3.2 葡萄园土壤层碳储量随着葡萄物候期和土层深度的变化呈现显著差异

土壤层是葡萄园生态系统有机碳储存的重要场所,本研究发现,在葡萄新梢生长期和开花坐果期时土壤表层的碳储量较大,其他物候期和其他土层碳储量较小。植被是土壤有机碳的重要来源,由于大量植被碳的输入,表层土壤有机质含量高于底层土壤^[15]。在葡萄新梢生长期和开花坐果期,由于气温和地温上升,植物光合能力增强,植被盖度、多样性和植物生物量增大^[16];而土壤微生物活性随温度增加,导致土壤有机质矿化速率加快,含碳有机物以 CO₂形式返回大气;在葡萄生长的这两个物候期进行农业产品投放,可减缓有机碳的氧化分解速率,使土壤有机物积累大于释放,促进碳循环,最终增强碳汇能力和碳储量^[11,13]。陈心桐等^[17]关于中国森林、草地、灌丛和荒漠生态系统中土壤有机碳含量及其影响因素的研究发现,气候、土壤和植被均可对土壤碳储量产生不同程度影响,其中植被的影响率可达 55%。本研究中,土壤碳储量的差异发生在葡萄的不同物候期,表现为不同物候期及不同土壤深度的土壤碳储量不同。

目前有关葡萄园碳储量的研究大多集中在土壤碳储量水平上,土壤碳有利于改善土壤结构,增强微生物活性和土壤肥力^[18]。研究表明,合理的耕作方式可以增加葡萄园土壤有机碳含量,从而改善土壤结构和土壤理化性质,降低土壤侵蚀速率,增加土壤碳汇能力^[19]。在地中海葡萄园对地表土壤管理 5 a 后发现,覆盖物土壤有机碳相较于传统耕作增加 5.6%^[20]。在西班牙中部的葡萄园采用不同耕作管理方式的研究发现,与传统耕作方式相比,植被覆盖处理的土壤有机碳含量增加 1.2%,种植短柄草和自然覆盖处理的土壤碳储量分别提高 1.62 t·hm⁻²和 3.18 t·hm⁻²,土壤侵蚀量也显著降低^[21],充分说明覆盖作物能提高土壤有机碳含量,有效改善土壤环境。

3.3 葡萄园土壤呼吸速率随葡萄物候期的变化呈单峰曲线,主要受土壤温度影响

土壤呼吸受植物根系和微生物代谢活动的影响,在陆地生态系统的碳循环过程中起主要作用,也是土壤碳进入大气环境中的重要过程,此过程受多种因素影响^[17]。土壤温度和湿度是影响土壤呼吸的重要因子,不同物候期和季节土壤温度和湿度的变化均会引起土壤呼吸的显著波动^[22]。可能是土壤温度上升后,土壤微生物代谢加快,相关酶活性增强,从而使土壤呼吸速率提高^[23]。也有研究指出,土壤呼吸不会随着土壤温度的变化无限制变化,温度过高会影响微生物活性,致使土壤呼吸不增反降^[24]。土壤温度敏感系数是温度与陆地生态系统的碳循环过程相互作用相互影响的重要指数^[25]。李建等^[26]研究发现,武夷山 4 种林地土壤呼吸的日变化趋势与土壤温度和气温相同,同时土壤呼吸速率表现出明显的季节变化规律。田艳领^[27]在秸秆还田下施肥量对土壤呼吸影响的研究中也发现,不同处理的土壤呼吸速率均与土壤温度呈显著的指数关系。本研究分析表明,土壤温度与土壤呼吸呈显著的指数关系,土壤温度可以解释土壤呼吸变化的 90.9% (图 1),与前人研究结果一致。

水分是陆地生态系统中生命活动重要的限制因子,一定阈值内,土壤呼吸会随着湿度的增加而增加,土壤湿度过高会影响土壤中氧气的扩散,降低微生物活性,导致土壤呼吸速率降低^[28];而细胞外酶和可溶性碳底物的扩散必须发生在土壤的液相内,土壤湿度低于阈值会通过影响对基质可用性的利用间接影响土壤微生物活性,导致土壤呼吸减弱^[29]。Hernández-Montes 等^[30]研究发现,土壤含水量和葡萄树物候均可通过影响根部的水分供应和碳水化合物供应来调节土壤呼吸。在干旱和半干旱陆地生态系统中,土壤湿度是影响土壤呼吸的重要因素^[31-32]。本研究中,土壤呼吸速率变化趋势与土壤温度和湿度变化趋势基本一致,土壤湿度对土壤呼吸的解释率为 41.2% (图 1),而土壤温度对土壤呼吸的解释率高于土壤湿度,这与唐夫凯等^[33]对不同植被类型土壤呼吸的研究结果一致。土壤湿度对土壤呼吸的解释率低于土壤温度,可能是因为土壤湿度与土壤呼吸速率的关系较复杂,且研究地区为半干旱地区,土壤湿度变幅较小,在长期半干旱条件下,部分碳受干旱环境的影响被抑制未释放造成,故土壤湿度并非是土壤呼吸速率最主要的影响因子^[34]。

3.4 葡萄园生态系统在生长季有较强的碳汇能力

本研究结果表明,葡萄园生态系统能将有机碳大量储存于土壤和多年生木质部分,有较强的碳汇能力。陆地农业生态系统碳平衡主要受不同的土地利用方式影响。对北京郊区京白梨果园生态系统的研究发现,该生态系统当年碳固定强度为 $2.898 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,碳排放强度为 $0.375 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,系统碳效率为 7.73,碳汇能力较强,且林下植被有较强的碳吸收能力,说明人工林具备可观的碳储量和碳汇能力^[7]。还有研究表明,与传统耕作相比,减少耕作逆转了农田生态系统“碳源”的特征,表现为碳汇,果园生态系统碳排放强度低于农田模式的平均水平^[35-36]。在京白梨生态系统中,果园灌溉水源为地下水,灌溉耗电的碳排放量较大,造成了较大的碳支出^[7]。本研究表明,土壤呼吸和生产资料投放释放碳量为碳源,其中生产资料碳排放中,灌溉排放量最大,这与前人研究结果一致^[37]。在不同耕作措施对伊犁河谷夏大豆农田土壤碳排放影响的研究中,不同措施下生态系统净碳吸收量均为正值,但灌溉用电的碳排量仍处于最大值,可见减排用电是生态系统实现正碳平衡的关键^[38]。也有研究发现,化肥是生产资料投放中的最大碳排放量,这可能是生态系统不同,其管理方式和措施不同所致^[39]。不同作物在各物候期所表现的碳源碳汇能力不同,但减少生产资料投放、节能和减少土壤扰动、提高土壤有机碳含量、增加植被生物量均为促进生态系统趋于正碳平衡的主要措施。

4 结 论

本研究条件下,酿酒葡萄品种‘霞多丽’植株地上部碳储量随生育进程的推进而显著增加,而土壤碳储量无显著变化,葡萄园植被碳储量主要集中于多年生木质部分,多年生根和多年生枝的碳储量占比分别为 39.28% 和 32.76%。土壤呼吸速率在葡萄的不同物候期呈先上升后下降的趋势,在浆果生长期最大,土壤温度和湿度是影响土壤呼吸速率的主要因素,对土壤呼吸速率变化的解释率分别为 90.9% 和 41.2%。在 $7500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的种植密度下,葡萄园生态系统年总碳储量为 $49.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,各组分碳储量表现为土壤 ($42.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占比 84.85%) > 植株 ($7.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占比 14.15%) > 杂草 ($0.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占比 0.54%) > 修剪及凋落物 ($0.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占比 0.46%)。综上可知,贺兰山东麓酿酒葡萄园生态系统在葡萄生长季能将固定的碳主要储存于土壤层和植株多年生木质部分,有较强的碳汇能力。

参考文献:

- [1] 孙成权, 高峰, 曲建升. 全球气候变化的新认识——IPCC 第三次气候变化评价报告概览[J]. 自然杂志, 2002, 24(2): 114-122.
- SUN C Q, GAO F, QU J S. Latest knowledge on global climate change [J]. Chinese Journal of Nature, 2002, 24(2): 114-122.
- [2] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] HERRMANN T R W, BACH T, IMKAMP F, et al. The international organisation of vine and wine and the Australian wine sector[J]. Wine & Viticulture Journal, 2014, 12(5): 377-380.
- [4] 马婷. 敦煌葡萄农田生态系统土壤呼吸动态与碳平衡特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- MA T. Soil Respiration dynamics and carbon balance characteristic of vineyard agroecosystem in Dunhuang[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [5] 王彦杰. 宁夏贺兰山东麓葡萄产业带发展现状及对策[J]. 南方农业, 2023, 17(20): 189-191.
- WANG Y J. The current development status and countermeasures of the grape industry belt in the Eastern Foothills of Helan, Ningxia[J]. South China Agriculture, 2023, 17(20): 189-191.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [7] 杨自立, 顾慈阳, 高同雨. 京郊京白梨果园生产系统碳源/汇特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 144-149.
- YANG Z L, GU C Y, GAO T Y. Carbon source/sink of the production system of *Pyrus ussuriensis* Maxim.cv. Jingbaili orchard in Beijing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(10): 144-149.
- [8] 孟阳阳, 刘冰, 康建军. 不同水肥措施对甜高粱农田土壤呼吸和硝化-反硝化作用的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(6): 67-76.
- MENG Y Y, LIU B, KANG J J. Effects of different irrigation and fertilizer application on soil respiration and nitrification-denitrification in sweet sorghum farmland[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(6): 67-76.
- [9] MARQUES F J M, PEDROSO V, TRINDADE H, et al. Impact of vineyard cover cropping on carbon dioxide and nitrous oxide emissions in Portugal [J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(1): 105-111.
- [10] 赵牧秋, 史云峰. 三亚地区莲雾果园生态系统碳储量及其分布特征[J]. 广东农业科学, 2014, 41(12): 171-174.
- ZHAO M Q, SHI Y F. Carbon storage and distribution of *Syzygium samarangense* orchard ecosystem in Sanya [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(12): 171-174.
- [11] 侯芳, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山典型森林生态系统碳储量及其分配特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1825-1835.
- HOU F, WANG K Q, SONG Y L, et al. Carbon storage and distribution in typical forest ecosystems in subalpine of middle Yunnan Province [J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, 27(10): 1825-1835.
- [12] ZHANG L, XUE T T, GAO F F, et al. Carbon storage distribution characteristics of vineyard ecosystems in Hongsibu, Ningxia [J]. Plants (Basel, Switzerland), 2021, 10(6): 1199.
- [13] SOFO A, NUZZO V, PALESE A M, et al. Net CO₂ storage in Mediterranean olive and peach orchards[J]. Scientia Horticulturae, 2005, 107(1): 17-24.
- [14] 郭雪艳, 蔡婷, 段秀文, 等. 上海主要经果林生态系统碳储量及其分布格局[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2881-2885.
- GUO X Y, CAI T, DUAN X W, et al. Carbon storage and distribution pattern in main economic fruit forest ecosystems in Shanghai, East China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 2881-2885.
- [15] HUANG W G, KUZYAKOV Y, NIU S L, et al. Drivers of microbially and plant-derived carbon in topsoil and subsoil[J]. Global Change Biology, 2023, 29(22): 6188-6200.
- [16] ZHANG L, WANG Z L, XUE T T, et al. Progress in studies of carbon source/sink and emission reduction strategies in vineyard ecosystem[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44: 179-191.
- [17] 陈心桐, 徐天乐, 李雪静, 等. 中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1133-1140.
- CHEN X T, XU T L, LI X J, et al. Soil organic carbon concentrations and the influencing factors in natural ecosystems of northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(4): 1133-1140.
- [18] LUDWIG B, GEISSELER D, MICHEL K, et al. Effects of fertilization and soil management on crop yields and carbon stabilization in soils: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31: 361-372.
- [19] CHAN K Y, CONYERS M K, LI G D, et al. Soil carbon dynamics under different cropping and pasture management in temperate Australia: Results of three long-term experiments [J]. Soil Research, 2011, 49(4): 320-328.
- [20] NOVARA A, MINACAPILLI M, SANTORO A, et al. Real cover crops contribution to soil organic carbon sequestration in sloping vineyard [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 300-306.
- [21] GARCÍA-DÍAZ A, MARQUÉS M J, SASTRE B, et al. Labile and stable soil organic carbon and physical improvements using groundcovers in vineyards from central Spain [J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 387-397.
- [22] 王忠武, 宋晓辉, 王悦骅, 等. 模拟降水对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(1): 111-116.
- WANG Z W, SONG X H, WANG Y H, et al. Effects of simulated precipitation on soil respiration of *Stipa breviflora* desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(1): 111-116.
- [23] 脱云飞, 沈方圆, 杨翠萍, 等. 滇中高原降雨对不同地类土壤磷素、有机质和 pH 变化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 942-950.
- TUO Y F, SHEN F Y, YANG C P, et al. Effects of rainfall on phosphorus, organic matter and pH in different land use types in middle Yunnan Plateau [J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(5): 942-950.
- [24] 付皓宇, 井长青, 郭文章, 等. 准噶尔盆地荒漠灌丛草地土壤呼吸变化及其对土壤温、湿度的响应[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1677-1684.
- FU H Y, JING C Q, GUO W Z, et al. Changes of soil respiration in

- desert shrub grassland and its response to soil temperature and humidity in Junggar Basin[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(6): 1677-1684.
- [25] 鲍芳, 周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 713-726.
- BAO F, ZHOU G S. Review of research advances in soil respiration of grassland in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 713-726.
- [26] 李键, 刘鑫铭, 姚成硕, 等. 武夷山国家公园不同林地土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3588-3602.
- LI J, LIU X M, YAO C S, et al. Dynamic change of soil respiration and its effecting factors in different forest lands of Wuyishan National Park[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3588-3602.
- [27] 田艳领. 秸秆还田下施磷量对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- TIAN Y L. The effect of phosphorus application rate on soil respiration and temperature sensitivity under straw returning to the field[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [28] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [29] ZHANG Z S, DONG X J, XU B X, et al. Soil respiration sensitivities to water and temperature in a revegetated desert[J]. *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences*, 2015, 120(4): 773-787.
- [30] HERNÁNDEZ-MONTES E, ESCALONA J M, TOMÁS M, et al. Influence of water availability and grapevine phenological stage on the spatial variation in soil respiration[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2017, 23(2): 273-279.
- [31] 李文, 曹文侠, 刘皓栋, 等. 不同放牧管理模式对高寒草甸草原土壤呼吸特征的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(10): 22-32.
- LI W, CAO W X, LIU H D, et al. Analysis of soil respiration under different grazing management patterns in the alpine meadow-steppe of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(10): 22-32.
- [32] 郑甲佳. 中国陆地生态系统土壤呼吸及温度敏感性的空间变异特征和影响因素[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- ZHENG J J. Spatial variability characteristics and influencing factors of soil respiration and temperature sensitivity in terrestrial ecosystems in China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [33] 唐夫凯, 崔明, 卢琦, 等. 喀斯特峡谷不同植被类型土壤的呼吸及其温度敏感性[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 61-68.
- TANG F K, CUI M, LU Q, et al. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different vegetation types in typical karst gorge area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1): 61-68.
- [34] 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[J]. *中国科学(生命科学)*, 2022, 52(4): 534-574.
- 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[J]. *Science in China (Series C)*, 2022, 52(4): 534-574.
- [35] 卢小宏, 黄晶, 史磊刚, 等. 北京市主要农作模式的碳效益分析[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 48-53.
- LU X H, HUANG J, SHI L G, et al. Analysis on carbon efficiency of the main cropping systems in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2): 48-53.
- [36] 王玉英, 胡春胜, 董文旭, 等. 华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 651-657.
- WANG Y Y, HU C S, DONG W X, et al. Carbon neutralization potential and carbon sequestration efforts in a wheat-maize rotation system in the North China plain[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2022, 30(4): 651-657.
- [37] 史磊刚, 范士超, 孔凡磊, 等. 华北平原主要作物生产的碳效率研究初报[J]. *作物学报*, 2011, 37(8): 1485-1490.
- SHI L G, FAN S C, KONG F L, et al. Preliminary study on the carbon efficiency of main crops production in North China plain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1485-1490.
- [38] 安崇霄, 张永杰, 杜孝敬, 等. 不同耕作措施对伊犁河谷夏大豆农田土壤碳排放、碳平衡及经济效益的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 812-821.
- AN C X, ZHANG Y J, DU X J, et al. Effects of different tillage measures on soil carbon emission, carbon balance and economic benefits of summer soybean cropland in Ili River Valley[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3): 812-821.
- [39] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, (4): 240-247.
- ZHANG H H, YAN C R, ZHANG Y Q, et al. Effect of no tillage on carbon sequestration and carbon balance in farming ecosystem in dryland area of northern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, (4): 240-247.