

不同轮作模式对土壤团聚体有机碳与电导率的调控效应

张华东¹ 曹红霞^{1,2} 郑博宇¹ 刘林桃¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学旱区农业新疆研究院, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 合理的轮作模式是提升土壤结构稳定性与维持土壤养分的有效措施。为探究河西走廊地区不同轮作模式对不同粒径团聚体土壤团聚体稳定性、有机碳与可溶性盐分(以电导率表征)分布规律的影响,本研究选取该地区3种典型长期轮作模式:2 a 玉米 + 1 a 茴香轮作(ZZF)、1 a 葵花 + 1 a 茴香轮作(SF)与2 a 甜瓜 + 2 a 茴香轮作(CCFF),以荒地(WL)作为对照,测定了0~40 cm 土层不同粒径(大于2.00 mm、0.25~2.00 mm及0~0.25 mm)团聚体的有机碳(SOC)含量与电导率(EC)。结果表明:轮作模式显著提高粒径大于2.00 mm 团聚体比例($P < 0.05$),CCFF 轮作模式下土壤平均质量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)最高。0~20 cm 土层,轮作模式下粒径0.25~2.00 mm 与0~0.25 mm 团聚体的SOC含量显著高于WL($P < 0.05$),且轮作模式可以降低该土层土壤各粒径团聚体的EC。该土层粒径0.25~2.00 mm 团聚体SOC含量分别与粒径0.25~2.00 mm、0~0.25 mm 团聚体EC呈显著负相关关系(R^2 分别为0.68、0.65)。20~40 cm 土层,轮作模式下粒径大于2.00 mm 与0~0.25 mm 团聚体SOC含量显著高于WL($P < 0.05$),ZZF与SF轮作模式较WL显著提高土壤各粒径团聚体EC,CCFF轮作模式显著降低土壤各粒径团聚体EC,该土层各粒径团聚体SOC含量与EC呈显著正相关关系($P < 0.05$)。研究结果表明,长期的轮作模式显著影响了土壤有机碳与电导率在不同粒径团聚体中的分布规律,且这种调控效应因土层深度而异,CCFF轮作模式对促进土壤大团聚体比例提升与团聚体EC降低的效果最佳。

关键词: 轮作模式; 土壤团聚体; 有机碳; 电导率; 可持续农业

中图分类号: S152.3; S152.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)19-0375-09 **OSID:** 

Regulatory Effects of Different Rotation Patterns on Soil Aggregate Organic Carbon and Electrical Conductivity

Zhang Huadong¹ Cao Hongxia^{1,2} Zheng Boyu¹ Liu Lintao¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Xinjiang Research Institute of Agriculture in Arid Areas, Northwest A&F University, Urumqi 830091, China)

Abstract: Crop rotation is an important management strategy for improving soil structure and sustaining soil fertility. The long-term rotation patterns influences on soil aggregate stability and distribution of soil organic carbon (SOC) and soluble salts represented by electrical conductivity (EC), among aggregate-size fractions in the Hexi Corridor of Northwestern China were investigated. Three typical long-term rotation patterns were examined: 2-year maize + 1-year fennel (ZZF), 1-year sunflower + 1-year fennel (SF), and 2-year melon + 2-year fennel (CCFF), with fallow land (WL) as the control. Soil samples were collected from the 0~40 cm profile, and SOC content and EC were determined in three aggregate fractions (particle size $r > 2.00$ mm, $r = 0.25 \sim 2.00$ mm, and $r < 0.25$ mm). Crop rotation significantly increased the proportion of $r > 2.00$ mm aggregates ($P < 0.05$), with CCFF showing the highest mean weight diameter and geometric mean diameter. In the 0~20 cm layer, SOC content in the 0.25~2.00 mm and $r < 0.25$ mm fractions was significantly higher under rotation than that under WL, whereas EC was lower in all aggregate fractions. SOC content in the 0.25~2.00 mm fraction was negatively

收稿日期: 2026-03-31 修回日期: 2026-05-10
基金项目: 旱区农业新疆研究院农业科技创新专项(XJHQNY-2025-3)和国家重点研发计划项目(2022YFD1900401)
作者简介: 张华东(1999—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhd15155861918@163.com
通信作者: 曹红霞(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: nschx225@nwfau.edu.cn

correlated with EC in the 0.25 ~ 2.00 mm and $r < 0.25$ mm fractions ($R^2 = 0.68$ and $R^2 = 0.65$, respectively). In the 20 ~ 40 cm layer, SOC content in the $r > 2.00$ mm and $r < 0.25$ mm fractions was significantly higher under rotation than that under WL. Relatively to WL, ZZF and SF increased EC in all aggregate fractions, whereas CCFF reduced EC. In this layer, SOC content was positively correlated with EC across aggregate fractions ($P < 0.05$). Overall, long-term crop rotation reshaped the distribution of SOC content and EC among aggregate fractions in a depth-dependent manner. Of the three systems, CCFF showed the greatest potential to improve aggregate structure and reduce salt accumulation as indicated by lower EC.

Key words: rotation patterns; soil aggregates; organic carbon; electrical conductivity; sustainable agriculture

0 引言

土壤的结构稳定性与养分含量直接关系到农业的可持续发展与生态安全^[1]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其粒径分布是评价土壤肥力的重要指标之一^[2]。不同粒径团聚体通过物理与化学作用在土壤有机碳固存过程中作用不同:大团聚体(大于 0.25 mm)通常与新鲜有机质的输入和快速周转相关^[3],而小团聚体(0 ~ 0.25 mm)则对有机碳有更强的物理保护作用,更有利于有机碳的长期固存^[4]。Xie 等^[5]的研究表明,盐分在团聚体中的分布差异也会影响土壤结构,结构较差土壤中大于 0.25 mm 团聚体的盐度显著高于 0 ~ 0.25 mm 团聚体部分。同时,土壤团聚体结构通过影响土壤孔隙网络与水分运移过程进而影响盐分在土壤不同土层间的迁移与分布规律^[6],同时,较高的土壤盐分对土壤结构有较强的破坏作用^[7]。因此,从团聚体尺度探究有机碳与盐分的分布关系,对于理解土壤碳固存和盐渍化防控机制具有重要意义。

河西走廊地区是典型的寒旱区绿洲农业带,作为我国西北地区重要的粮食生产与灌溉农业集中区,其生态地位与农业生产价值突出^[8]。然而,该地区气候干旱、蒸发强烈,农业生产高度依赖大田灌溉,加之长期高强度耕作与不合理的水肥管理,容易造成土壤有机质损耗增加与次生盐渍化风险上升,制约农业可持续发展^[9]。在此背景下,推行合理的作物轮作模式被认为是改善土壤结构、提升土壤肥力并增强农业系统韧性的关键措施^[4]。不同作物因根系构型、凋落物与根系分泌物组成及耕作管理差异,对土壤团聚体形成与稳定、有机碳积累以及盐分迁移过程影响不同^[10]。

尽管轮作模式对土壤整体理化性质的影响已被广泛研究,但在寒旱区这一脆弱生态背景下,长期不同轮作模式如何影响土壤团聚体组成,并调控有机碳与盐分在不同粒径团聚体中的分布规律,仍有待进一步阐明。许多研究表明,作物多样化轮作可提

升土壤有机碳,同时可以调节土壤 pH 值^[11]。但这些研究多从土壤整体角度出发,而对其如何影响土壤内部理化过程尚不明晰,即轮作制度如何通过影响团聚体组成与调控有机碳、盐分在不同粒径团聚体的分布仍不明晰,限制了我们制定以改善土壤结构为目标、从团聚体尺度协同实现固碳与盐分调控的轮作策略。因此,明确不同轮作模式下土壤有机碳和盐分在不同粒径团聚体中的分布特征与差异,是揭示轮作制度影响土壤功能深层机制的核心环节。

长期以来,基于长期定位试验探究灌溉^[12]、施肥^[13]、土地利用方式^[14]等因素对土壤理化性质影响的研究为探究农业措施对土壤健康的影响机制提供了重要理论基础。然而现实中的农田管理并非严格遵循科研设定的方案,而是深受农户经验、经济效益与当地生产习惯影响,导致同一地区农田土壤性质呈现显著空间异质性。因此,大多数研究聚焦于长期定位试验的特定模式,对由农民实际管理所自然形成的土壤状态缺乏系统性研究。基于此,本研究以甘肃省民勤县农民生产实践中 3 种典型轮作制度的农田土壤为研究对象,通过分析各粒径团聚体中的有机碳含量与电导率,阐明长期不同轮作制度对 0 ~ 40 cm 耕作层土壤团聚体粒径分布的影响;探究长期不同轮作制度下有机碳与可溶性盐分(以电导率表征)在不同粒径团聚体中的分布规律;明确不同粒径团聚体中有机碳与电导率间的内在关系。为构建适应区域特色的土壤健康管理模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究地区在甘肃省民勤县(38°05' ~ 39°06'N, 103°02' ~ 104°02'E)。该区地处河西走廊东北部,为典型的温带大陆性干旱气候。年均降水量约 110 mm,而年均蒸发量 2 644 mm。年均气温为 7.8℃。采样区域地势平坦,土壤类型以灌漠土为

主。该地区农业完全依赖灌溉,河渠水是主要灌溉水源。当地已推行多种作物轮作模式以维持农业可持续发展。

1.2 试验设计与土壤样品采集

于 2025 年 8 月,选择当地具有代表性轮作制度的区域进行采样:2 a 玉米 + 1 a 茴香轮作(ZZFF),已种植 20 a;1 a 葵花 + 1 a 茴香轮作(SF),已种植 12 a;2 a 甜瓜 + 2 a 茴香轮作(CCFF),已种植 12 a;选取临近荒地(WL)作为对照。所有作物灌溉方式均为覆膜沟灌,各典型区域随机选取 5 个采样点,分别采集每个区域 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 两个土层的土样。样品采集后,去除可见的植物残体和石块,在室内经过自然干燥后分成两份,其中一份用于测定土壤总有机碳(TSOC),另一份用于土壤团聚体分离及其他理化性质分析。

1.3 土壤理化性质及团聚体含量测定

采用干筛法测定土壤团聚体组成,为了更准确计算土壤分形维数(D)及其他团聚体参数指标,选择孔径分别为 5、3、2、1、0.5、0.25、0.075 mm 共 7 级筛网,称取 500 g 土壤,在机械振荡器上振荡 2 min,分离后,称取 7 个筛网的质量并计算各粒径级别的团聚体质量百分比,同时,将土壤分成 3 个粒径团聚体:大于 2.00 mm、0.25 ~ 2.00 mm 与 0 ~ 0.25 mm,然后分别测定 3 个粒径团聚体的有机碳质量分数(SOC)和土壤电导率(EC)。采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定其有机碳含量,用电导率仪(DDS-11A 型,上海大普仪器有限公司)测定上清液电导率,记为 EC。

1.4 团聚体指标计算

土壤团聚体稳定性指标:粒径大于 0.25 mm 的土壤团聚体所占的百分比 WSA、土壤平均质量直径 MWD、几何平均直径 GMD 计算公式为^[15]

$$W_{SA} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \tag{1}$$

$$M_{WD} = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i W_i \tag{2}$$

$$G_{MD} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \tag{3}$$

式中 $M_{r>0.25}$ ——粒径大于 0.25 mm 团聚体的累积质量,g
 $\bar{R}_i$ ——某粒级的平均直径,mm
 M_T ——土壤中不同粒径团聚体质量之和,g
 W_i ——第 i 级粒径的团聚体质量百分比,%

平均重量比表面积(MWSSA, cm^2/g)表征土壤团聚体的分散性,计算公式为^[16]

$$M_{WSSA} = \sum_{i=1}^n \frac{6W_i}{\rho_i \bar{R}_i} \tag{4}$$

式中 ρ_i ——土壤颗粒密度,取 2.65 g/cm^3
分形维数 D 的计算公式为^[16]

$$\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{R}_i}{\bar{R}_{\max}} \right)^{3-D} \tag{5}$$

式中 $M(r < \bar{R}_i)$ ——土壤粒径小于 $\bar{R}_i$ 的团聚体累积质量,g
 $\bar{R}_{\max}$ ——最大粒径的团聚体平均直径,mm

1.5 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2024 进行数据整理。使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析及方差膨胀因子检验,并采用 Duncan 法进行多重比较,使用 Origin 2021Pro 软件作图与冗余分析。

2 结果与分析

2.1 轮作模式对土壤团聚体组成的影响

图 1(注:不同小写字母代表不同处理之间差异显著($P < 0.05$),下同)展示轮作模式对 0 ~ 40 cm 土层土壤团聚体组成的影响。0 ~ 20 cm 土层,与 WL 相比, SF 与 CCFF 轮作模式下的粒径大于 2.00 mm 团聚体比例分别增加 17.34% 与 26.01% ($P < 0.05$),同时,粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体比例分

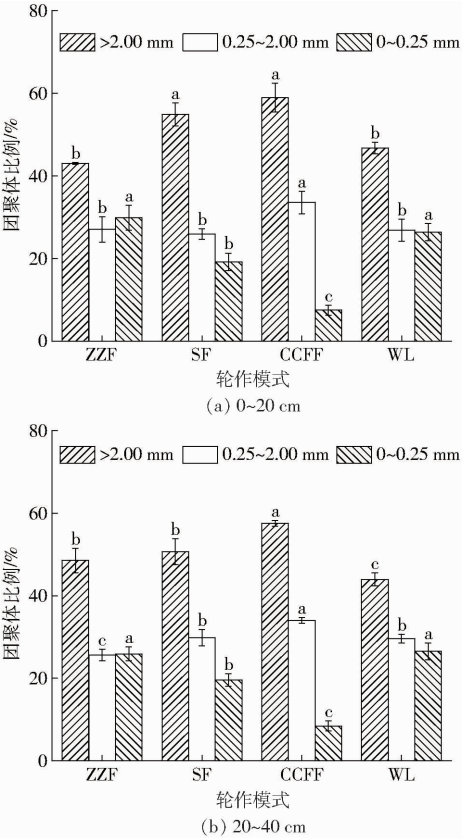


图 1 不同轮作模式下土壤团聚体组成
Fig. 1 Soil aggregate composition under different crop rotation systems

别降低 27.37% 与 71.58% ($P < 0.05$),ZZF 轮作模式下土壤团聚体组成与 WL 无显著差异 ($P > 0.05$)。SF 与 CCFF 轮作模式下粒径大于 2.00 mm 团聚体比例分别较 ZZF 增加 27.53% 与 36.95% ($P < 0.05$),同时,CCFF 轮作模式下粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体比例分别较 ZZF 与 SF 增加 23.98% 与 29.35% ($P < 0.05$),土壤粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体比例在 CCFF 轮作模式下最高 (33.55%),显著高于其他模式 ($P < 0.05$)。20 ~ 40 cm 土层,不同轮作模式下粒径大于 2.00 mm 团聚体比例较 WL 显著提高 ($P < 0.05$),同时,CCFF 轮作模式下粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体比例分别较 ZZF 与 SF 增加 32.86% 与 14.15% ($P < 0.05$)。由此可见,不同轮作模式可以影响土壤团聚体粒径分布,且 CCFF 轮作模式下提升土壤粒径大于 0.25 mm 团聚体效果更显著。

不同轮作模式下土壤团聚体性能指标如表 1 所示,轮作模式对 0 ~ 20 cm 与 20 ~ 40 cm 土层土壤团聚指标有显著的影响。SF 与 CCFF 轮作模式显著提高 MWD、GMD 与 WSA ($P < 0.05$),且 CCFF 在 3 种模式下该指标最高,CCFF 轮作模式显著降低 MWSSA 与 D ($P < 0.05$)。0 ~ 20 cm 土层,CCFF 轮作模式下的 MWD 分别较 ZZF 与 SF 轮作模式提高 34.78% 与 12.73%,GMD 提高 105.86% 与 42.68%。SF 与 ZZF 轮作模式下的 MWSSA 较 WL 无显著差异 ($P > 0.05$)。20 ~ 40 cm 土层,CCFF 轮作模式下的 MWD 分别较 ZZF 与 SF 轮作模式提高 14.95% 与 9.97%,GMD 提高 64.46% 与 36.90%。ZZF 轮作模式下 MWSSA 与 WL 无显著差异,SF 与 CCFF 轮作模式下 MWSSA 较 ZZF 分别降低 28.45% 与 59.17%。

表 1 不同轮作模式下土壤团聚体性能指标

Tab.1 Soil aggregate parameters under different crop rotation systems

深度/cm	参数	ZZF	SF	CCFF	WL
0 ~ 20	MWD/mm	2.043 ^c	2.442 ^b	2.753 ^a	2.165 ^c
	GMD/mm	0.867 ^c	1.251 ^b	1.785 ^a	0.945 ^c
	WSA/%	70.108 ^c	80.836 ^b	92.502 ^a	73.615 ^c
	MWSSA/(cm ² ·g ⁻¹)	894.198 ^a	673.087 ^a	335.816 ^b	922.249 ^a
	D	2.530 ^a	2.467 ^a	2.206 ^b	2.564 ^a
	TSOC/(g·kg ⁻¹)	4.628 ^a	4.809 ^a	4.071 ^a	1.864 ^b
20 ~ 40	MWD/mm	2.248 ^b	2.350 ^b	2.584 ^a	1.960 ^c
	GMD/mm	1.002 ^c	1.204 ^b	1.648 ^a	0.853 ^c
	WSA/%	74.127 ^c	80.459 ^b	91.578 ^a	73.507 ^c
	MWSSA/(cm ² ·g ⁻¹)	860.263 ^a	615.541 ^b	351.208 ^c	1 046.623 ^a
	D	2.548 ^a	2.430 ^a	2.160 ^b	2.584 ^a
	TSOC/(g·kg ⁻¹)	4.261 ^b	6.073 ^a	3.552 ^c	1.061 ^d

2.2 不同粒径团聚体的有机碳含量差异

如图 2 所示,与 WL 相比,轮作制度均提升了不同粒径团聚体中 SOC 的含量,其中 0 ~ 20 cm 土层粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 SOC 含量提升幅度最高 (311.11% ~ 368.89%),20 ~ 40 cm 土层粒径大于 2.00 mm 团聚体 SOC 含量提升幅度最高 (363.64% ~ 672.73%)。

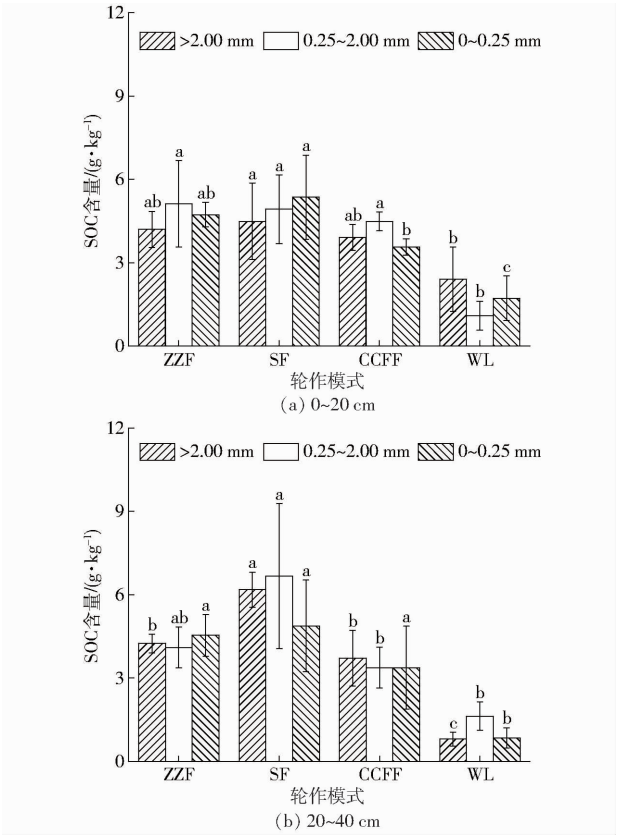


图 2 不同轮作模式下土壤团聚体 SOC 含量

Fig.2 Soil aggregate SOC content under different crop rotation models

0 ~ 20 cm 土层,轮作模式下粒径 0.25 ~ 2.00 mm 与 0 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 显著高于 WL ($P < 0.05$)。不同轮作模式间粒径大于 2.00 mm 与 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 SOC 含量无显著差异 ($P > 0.05$),SF 轮作模式粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 含量较 CCFF 轮作模式高 50.34% ($P < 0.05$),ZZF、SF 与 CCFF 轮作模式的 TSOC 含量分别较 WL 提高 148.29%、158.05% 与 118.44% ($P < 0.05$),但 3 种轮作模式间土壤 TSOC 含量无显著差异 ($P > 0.05$),见表 1。

20 ~ 40 cm 土层,不同轮作模式下粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 含量无显著差异 ($P > 0.05$),粒径大于 2.00 mm 与 0 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 含量显著高于 WL ($P < 0.05$)。SF 轮作模式下粒径大于 2.00 mm 团聚体 SOC 含量最高,分别较 ZZF 与 CCFF 增加 45.71% 与 66.67% ($P < 0.05$),SF 轮作

模式下粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 SOC 含量分别较 CCFF 与 WL 提高 97.84% 与 310.45% ($P < 0.05$),不同轮作模式下粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 含量无显著性差异 ($P > 0.05$)。SF 轮作模式下土壤 TSOC 含量显著高于 ZZF 与 CCFF 轮作模式,分别较 ZZF 与 CCFF 增加 42.53% 与 70.96% ($P < 0.05$)。

综上,对于 0 ~ 20 cm 土层,轮作模式主要影响粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 含量;对于 20 ~ 40 cm 土层,不同轮作模式间主要影响粒径大于 2.00 mm 与 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 SOC 含量。

2.3 不同粒径团聚体的电导率差异

如图 3 所示,不同土层下不同粒径团聚体的 EC 受轮作模式的影响不同。总体而言,轮作模式较 WL 可以显著降低 0 ~ 20 cm 土层各粒径团聚体 EC,对于 20 ~ 40 cm 土层,不同轮作模式对各粒径团聚体 EC 的影响不同。具体而言,0 ~ 20 cm 土层,ZZF、SF 与 CCFF 轮作模式下粒径大于 2.00 mm 团聚体 EC 分别较 WL 降低 1.12%、28.94% 与 69.09%;粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 EC 分别较 WL 降低 40.84%、24.77% 与 59.88%;粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 EC 分别较 WL 降低 44.76%、24.52% 与 69.01%,CCFF 轮作模式下 EC 降幅最大。20 ~ 40 cm 土层,ZZF 与 SF 轮作模式下各粒径团聚体 EC 处于较高水平(981 ~ 1 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$),且显著高于 CCFF 轮作模式与 WL;CCFF 轮作模式各粒径团聚体 EC 最低,且显著低于 WL。由此可见,轮作模式均可以显著降低 0 ~ 20 cm 土壤各粒径团聚体 EC。对于 20 ~ 40 cm 土层,ZZF 与 SF 轮作模式较 WL 显著提高土壤各粒径团聚体 EC;CCFF 轮作模式显著降低土壤各粒径团聚体 EC。

2.4 土壤团聚体、有机碳含量与电导率的相关性分析和冗余分析

土壤团聚体指标、各粒径团聚体 SOC 含量与 EC 相关性如表 2 所示,整体而言,粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体比例与土壤粒径大于 2.00 mm、0.25 ~ 2.00 mm 与 0 ~ 0.25 mm 团聚体 EC 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),MWD 与 GMD、WSA 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),与 MWSSA、 D 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。0 ~ 20 cm 土层,粒径大于 2.00 mm 团聚体比例与粒径大于 2.00 mm 团聚体 EC 呈极显著负相关 ($R^2 = 0.89$),粒径大于 2.00 mm 团聚体 EC 与 MWD、GMD、WSA 呈极显著正相关 (R^2 分别为 0.91、0.94、0.93),与 MWSSA、 D 呈极显著正相关 (R^2 分别为 0.82、0.84),TSOC 分别与粒径 0.25 ~ 2.00 mm 和 0 ~ 0.25 mm 团聚体 EC 呈显

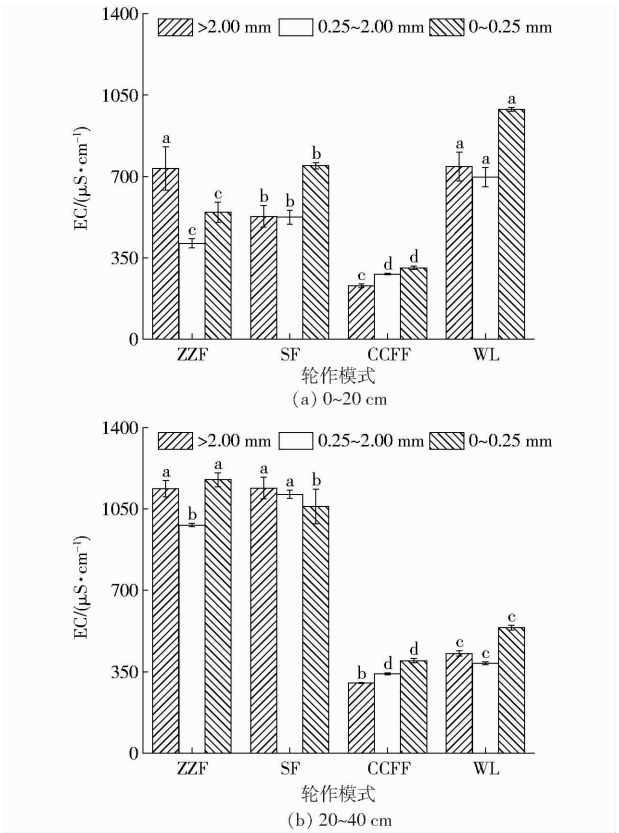


图3 不同轮作模式下土壤团聚体 EC
Fig.3 Soil aggregate EC under different crop rotation models

著负相关 (R^2 分别为 0.65、0.58),粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 SOC 含量分别和粒径 0.25 ~ 2.00 mm、0 ~ 0.25 mm 团聚体 EC 呈显著负相关 (R^2 分别为 0.68、0.65)。20 ~ 40 cm 土层,MWD 和粒径大于 2.00 mm 团聚体 SOC 呈显著正相关 ($R^2 = 0.60$),TSOC 分别与粒径大于 2.00 mm、0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 EC 呈极显著正相关 (R^2 分别为 0.73、0.80),与粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 EC 呈显著正相关 ($R^2 = 0.67$),同时,该土层各粒径团聚体 SOC 含量与 EC 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

为进一步从多变量角度考察团聚体结构指标与各粒径团聚体 SOC 含量和 EC 的关系,本文选取经共线性筛选后的代表性结构变量(T2 和 MWD)进行 RDA 分析,该分析主要作为辅助支持,用于揭示结构指标与 SOC 含量、EC 之间潜在的耦合方向,冗余分析的结果如图 4 所示,在进行冗余分析之前,对解释变量 T2 与 MWD 进行了共线性诊断。结果表明,0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层解释变量的方差膨胀因子分别为 1.552 和 1.251,均小于 5,说明变量间共线性不强,可用于后续 RDA 分析。冗余分析结果显示,0 ~ 20 cm 土层中,RDA1 和 RDA2 的累计贡献率分别达 93.59% 和 6.41%。EC 相关变量主要分布于 RDA1 正向,T2 和 MWD 主要分布于 RDA1 负向,T1_{SOC}、T2_{SOC}与 MWD 向量方向较接近。20 ~ 40 cm 土层

表 2 土壤团聚体各指标与 SOC 含量、EC 相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of soil aggregate parameters with SOC content and EC

深度/cm		T1	T2	T3	MWD	GMD	WSA	MWSSA	D	TSOC	T1 _{EC}	T2 _{EC}	T3 _{EC}	T1 _{SOC}	T2 _{SOC}	T3 _{SOC}
0 ~ 20	T1	1														
	T2	0.40	1													
	T3	-0.92 **	-0.72 **	1												
	MWD	0.97 **	0.60 *	-0.98 **	1											
	GMD	0.92 **	0.70 *	-0.99 **	0.98 **	1										
	WSA	0.92 **	0.72 **	-1.00 **	0.98 **	0.99 **	1									
	MWSSA	-0.81 **	-0.77 **	0.94 **	-0.92 **	-0.95 **	-0.94 **	1								
	D	-0.77 **	-0.80 **	0.92 **	-0.89 **	-0.95 **	-0.92 **	0.96 **	1							
	TSOC	0.24	0.13	-0.23	0.23	0.25	0.23	-0.35	-0.269	1						
	T1 _{EC}	-0.89 **	-0.61 *	0.93 **	-0.91 **	-0.94 **	-0.93 **	0.82 **	0.84 **	-0.309	1					
	T2 _{EC}	-0.45	-0.63 *	0.61 *	-0.56	-0.66 *	-0.61 *	0.69 *	0.74 **	-0.65 *	0.71 *	1				
	T3 _{EC}	-0.45	-0.64 *	0.61 *	-0.56	-0.66 *	-0.61 *	0.66 *	0.73 **	-0.58 *	0.71 **	0.99 **	1			
	T1 _{SOC}	0.28	0.13	-0.26	0.28	0.29	0.26	-0.41	-0.30	0.84 **	-0.322	-0.52	-0.41	1		
20 ~ 40	T2 _{SOC}	0.19	0.22	-0.24	0.22	0.25	0.24	-0.34	-0.29	0.92 **	-0.265	-0.68 *	-0.65 *	0.58	1	
	T3 _{SOC}	0.08	-0.10	-0.02	0.02	0.02	0.02	-0.05	-0.02	0.84 **	-0.12	-0.41	-0.37	0.50	0.86 **	1
	T1	1														
	T2	0.50	1													
	T3	-0.93 **	-0.79 **	1												
	MWD	0.98 **	0.45	-0.89 **	1											
	GMD	0.97 **	0.69 *	-0.99 **	0.94 **	1										
	WSA	0.93 **	0.79 **	-1.00 **	0.89 **	0.99 **	1									
	MWSSA	-0.94 **	-0.64 *	0.95 **	-0.95 **	-0.97 **	-0.95 **	1								
	D	-0.86 **	-0.74 **	0.93 **	-0.82 **	-0.94 **	-0.93 **	0.91 **	1							
	TSOC	0.41	-0.12	-0.24	0.56	0.32	0.24	-0.48	-0.18	1						
	T1 _{EC}	-0.22	-0.70 *	0.45	-0.05	-0.35	-0.45	0.18	0.41	0.73 **	1					
	T2 _{EC}	-0.13	-0.60 *	0.35	0.04	-0.25	-0.35	0.07	0.32	0.80 **	0.99 **	1				
	T3 _{EC}	-0.26	-0.76 **	0.51	-0.09	-0.39	-0.51	0.23	0.46	0.67 *	0.99 **	0.97 **	1			
	T1 _{SOC}	0.44	-0.1	-0.29	0.60 *	0.37	0.29	-0.55	-0.20	0.97 **	0.70 *	0.76 **	0.62 *	1		
	T2 _{SOC}	0.25	-0.15	-0.11	0.38	0.18	0.11	-0.32	-0.07	0.86 **	0.66 *	0.70 *	0.61 *	0.72 **	1	
	T3 _{SOC}	0.36	-0.11	-0.21	0.49	0.30	0.21	-0.42	-0.30	0.78 **	0.63 *	0.68 *	0.58 *	0.74 **	0.52	1

注:T1 为粒径大于 2.00 mm 团聚体比例;T2 为粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体比例;T3 为粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体比例;T1_{EC}为粒径大于 2.00 mm 团聚体 EC;T2_{EC}为粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 EC;T3_{EC}为粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 EC;T1_{SOC}为粒径大于 2.00 mm 团聚体 SOC 含量;T2_{SOC}为粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体 SOC 含量;T3_{SOC}为粒径 0 ~ 0.25 mm 团聚体 SOC 含量,* 表示影响显著,** 表示影响极显著。

中,RDA1 和 RDA2 的累计贡献率分别达 78.27% 和 21.73%,MWD 与各粒径团聚体 SOC 含量向量整体方向较一致,T2 与各粒径团聚体 EC 向量方向相反,进一步表明不同土层中团聚体结构与 SOC 含量、EC 之间可能存在不同的耦合关系。

3 讨论

3.1 轮作模式对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体的组成与分布特征在土壤养分保持和抗侵蚀性等方面具有关键作用,土壤团聚体的组成受植被类型、土壤类型等多种因素的影响^[17]。土壤中粒径大于 0.25 mm 团聚体的比例越高,土壤抗蚀能力越强,结构越稳定^[18]。本研究表明,轮作模式可以提升粒径大于 0.25 mm 团聚体的比例,增加土壤团聚体的稳定性。这是由于轮作模式中多元且

持续的有机质输入:一方面,作物密集根系通过机械缠绕土壤颗粒以及根系分泌多糖等有机化合物促进粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体的形成与稳定^[19];另一方面,轮作模式有利于促进土壤微生物 α 多样性和 β 多样性的提升从而提高团聚体的稳定性^[20]。0 ~ 20 cm 土层是作物凋落物与根际作用最集中的土层,粒径大于 0.25 mm 的土壤团聚体对耕作制度与外源有机碳的输入更敏感^[21]。相较于 WL,轮作模式主要增加有机碳的输入与作物根际作用过程,从而促进新团聚体的形成与稳定性的增强。本研究表明,在 CCFF 轮作模式下,土壤中粒径大于 0.25 mm 团聚体的比例提升更显著,这可能因为新团聚体的形成需要经历一定的周转周期,根系的持续生长会驱动团聚体的动态更替,即旧团聚体破碎与新团聚体形成的过程,该周转过程通常需要 41 ~ 168 d^[22],

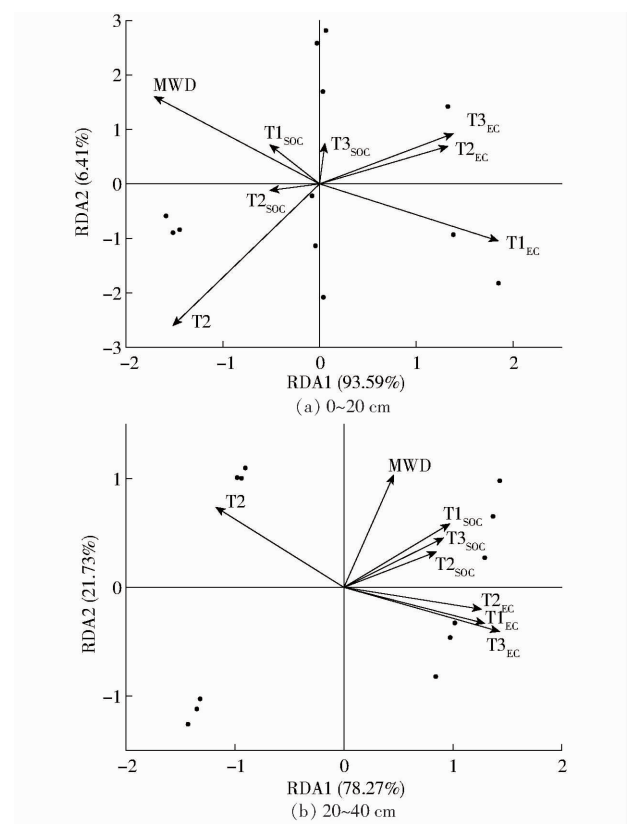


图 4 不同粒径团聚体有机碳含量和电导率与粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量及 MWD 的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of organic carbon and conductivity in aggregates of different particle sizes in relation to content of 0.25 ~ 2.00 mm aggregates and MWD

连续两年采用相同作物轮作更替的模式有利于根际瞬时胶结剂持续供应,从而促进新团聚体的形成,并维持大团聚体结构稳定性^[1]。因此,优化轮作制度可通过协调持续的根系输入与微生物活动,有效驱动土壤团聚体的良性周转与稳定,从而提升土壤结构的抗侵蚀能力和养分固持功能。

3.2 轮作对不同土层团聚体 SOC 含量和 EC 分布的调控特征

团聚体 SOC 含量和 EC 的分布特征反映了轮作对土壤有机碳与可溶性盐分再分布的综合影响。本研究表明,轮作制度对 0 ~ 40 cm 土层土壤团聚体 SOC 含量与 EC 的调控效果不同:0 ~ 20 cm 土层中,轮作制度会促进团聚体 SOC 积累并降低团聚体 EC;20 ~ 40 cm 土层中,不同轮作模式的 SOC 含量和 EC 的响应不同,这表明不同土层中“碳输入—结构重组—盐分迁移”过程存在明显差异。0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量的增加主要可能与地表耕作活动、浅层根系分泌物输入及活跃的根际过程有关^[23]。0 ~ 20 cm 土层是耕作扰动、灌溉补给和外源有机质输入最集中的区域,新输入的外源有机碳更容易参与团聚体的重组过程,并优先分配到对外源碳输入敏

感的 0.25 ~ 2.00 mm、0 ~ 0.25 mm 粒径级团聚体中^[24]。同时,稳定性增强后的团聚体内部形成的物理保护空间可有效减缓有机碳矿化,从而促进 SOC 在团聚体中的积累^[25]。由此可见,表层土壤中土壤结构的改善对 SOC 的保护效用更明显。在可溶性盐分方面,轮作制度普遍降低了 0 ~ 20 cm 土层各粒径团聚体 EC,说明轮作制度对该土层的结构改善与表层降盐效用具有较强一致性^[5]。寒旱区农田土壤盐分迁移受灌溉、蒸发及孔隙结构共同控制^[26]。覆膜灌溉可减少表层无效蒸发并增强水分向下入渗,抑制盐分在表层聚集作用效果^[27]。轮作提高团聚体稳定性并改善孔隙连通性的同时,水分更易携带可溶性盐分向下迁移,同时较稳定的表层团聚体结构也有助于减弱蒸发引起的盐分向表层聚集^[28]。因此,表层轮作处理中 SOC 含量增加与 EC 降低同步出现,反映了轮作对表层土壤“增碳—稳构—降盐”的综合改良效应。

20 ~ 40 cm 土层土壤中,SOC 含量和 EC 关系的变化说明其过程机制与表层不同。20 ~ 40 cm 土层 SOC 含量增加,更多可能与根系向下延伸及溶解性有机碳随水分下移后的再分配有关^[4];与此同时,该层又是灌溉条件下盐分向下迁移后的潜在累积层^[28]。若表层可溶性有机碳和可溶性盐分在灌溉过程中共同下移,则深层土壤中 SOC 含量增加可能伴随盐分同步富集,因此 SOC 含量与 EC 关系异于表层^[29]。本文中 ZZF 和 SF 处理在深层表现出较高 EC,而 CCFF 则表现为较低 EC,说明不同轮作模式在深层水盐再分布上的调控效果存在显著差异,由此可见,CCFF 轮作模式更有利于减轻 20 ~ 40 cm 土层盐分累积风险。

3.3 团聚体结构调控下 SOC 含量-EC 关系的土层分异机制

本研究发现,在不同土层中,团聚体有机碳 (SOC) 含量与电导率 (EC) 的关系不同,这表明轮作对碳盐关系的影响并非单一因子作用结果,而是团聚体结构变化、孔隙环境调节以及水盐运移过程共同作用的综合体现。换言之,轮作对 SOC 含量或 EC 的影响更可能是间接的:首先改变团聚体组成与稳定性,进而通过孔隙连续性影响水分和盐分迁移,最终形成不同土层中 SOC 含量与 EC 关系的差异。这种差异可能与不同土层的碳-盐相互作用机制有关^[6]。在 0 ~ 20 cm 耕作层,较高的 SOC 含量增强了微生物活性并促进了根系生长。活跃的作物根系可持续吸收有机质矿化释放的无机离子,从而降低土壤盐分。同时,SOC 作为关键胶结物质促进大团聚体形成,团聚体内部的有机-矿物复合体也可对盐

分离产生物理封存作用,共同导致 SOC 含量与 EC 呈负相关^[6]。在 20 ~ 40 cm 土层,土壤受人为扰动较少,灌溉使表层溶解性有机碳(DOC)与可溶性盐离子共同向下迁移,使得该层 SOC 的积累常伴随盐分的同步富集,因此二者呈正相关^[8]。值得关注的是,Xie 等^[5]的研究指出,SOC 含量与 K^+ 、 Mg^{2+} 含量呈显著正相关,而与 Na^+ 含量呈显著负相关。由此可知,轮作制度可能更有利于 K^+ 与 Mg^{2+} 的向下迁移,但其具体机制仍有待进一步研究。RDA 结果表明,MWD 与各粒径团聚体 SOC 向量整体方向较为一致,而粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体与各粒径团聚体 EC 方向相反,由此推断,深层团聚体稳定性增强可能更有利于 SOC 积累,而粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体比例增加则可能有助于降低盐分累积风险。综上,合理的轮作制度不仅能通过增强表层碳汇功能来降低盐分,还可能通过影响碳-盐共迁移过程调节深层盐分分布,从而为干旱盐碱区土壤的定向改良提供科学依据。

需要指出的是,本文研究样地来源于民勤绿洲农户长期生产实践,不同轮作样地持续年限存在一定差异(20 a、12 a)。但各样地均已持续 12 a 以上,能够在一定程度上表征长期管理条件下形成的土壤状态。已有研究表明,土壤 SOC 对长期管理措施的响应在前期较为显著,而在约 9 a 后与持续时间的相关性减

弱^[30],提示 SOC 变化在一定年限后可能趋于相对稳定。因此,本研究不同轮作模式间具有一定比较基础。本文结果主要反映不同长期管理状态下土壤结构及碳盐分布的综合差异,而对其相关过程机制的解释仍需结合长期同步定位试验进一步验证。

4 结 论

(1)轮作处理提高了大团聚体比例和团聚体稳定性。其中,CCFF 轮作模式在促进团聚体稳定和优化结构方面表现相对较好,可为民勤绿洲盐渍化农田的轮作制度提供参考。

(2)轮作对团聚体 SOC 含量和 EC 的影响具有明显的土层差异。0 ~ 20 cm 土层中,轮作处理总体表现为促进团聚体 SOC 积累并降低团聚体 EC,说明表层土壤对轮作的响应主要表现为增碳与降盐并行,而对于 20 ~ 40 cm 土层,CCFF 轮作可以降低团聚体的电导率,而 ZZF 与 SF 轮作模式会提高团聚体电导率。

(3)轮作对土壤有机碳与可溶性盐的影响主要通过改变团聚体组成和稳定性,0 ~ 20 cm 土层结构的改善与团聚体电导率的降低相关,20 ~ 40 cm 土层团聚体稳定性增强更有利于有机碳积累;粒径 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体比例增加可能有助于降低盐分累积风险。

参 考 文 献

[1] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: a review[J]. Geoderma, 2018, 314: 122 – 137.

[2] Iheshiulo E M A, Larney F J, Hernandez-Ramirez G, et al. Do diversified crop rotations influence soil physical health? A meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 233: 105781.

[3] Liu W X, Wei Y X, Li R C, et al. Improving soil aggregates stability and soil organic carbon sequestration by no-till and legume-based crop rotations in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2022, 847: 157518.

[4] Zheng F, Liu X, Ding W, et al. Positive effects of crop rotation on soil aggregation and associated organic carbon are mainly controlled by climate and initial soil carbon content: a meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 355: 108600.

[5] Xie Wenjun, Chen Qingfeng, Wu Lanfang, et al. Coastal saline soil aggregate formation and salt distribution are affected by straw and nitrogen application: a 4-year field study[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 198: 104535.

[6] Kramer I, Mau Y. Review: modeling the effects of salinity and sodicity in agricultural systems[J]. Water Resources Research, 2023, 59: e2023WR034750.

[7] 刘洪光,李智杰,李玲,等. 粉垄深松深耕改善南疆重度盐碱土理化性质和棉花产量及其后效[J]. 农业工程学报, 2024, 40(13): 45 – 57.

Liu Hongguang, Li Zhijie, Li Ling, et al. Effects of deep vertical rotary tillage depth on the improvement of soil physicochemical properties and cotton yield in the current year and the following year in severe saline land in Southern Xinjiang of China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(13): 45 – 57. (in Chinese)

[8] Wang Z H, Chen R, Li W H, et al. Mulched drip irrigation: a promising practice for sustainable agriculture in China's arid region[J]. npj Sustainable Agriculture, 2024, 2(1): 17.

[9] Zhang L, Jia X, Zhao Y, et al. Spatio-temporal inversion of surface soil organic matter in the Hexi Corridor based on remote sensing data and multiple model integration[J]. Catena, 2025, 261: 109563.

[10] Niu H J, Zhang H J, Wan S M, et al. Effects of cropping patterns on the distribution, carbon contents, and nitrogen contents of aeolian sand soil aggregates in Northwest China[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 1498.

[11] Liu B, Ahnemann H, Arlotti D, et al. Impact of diversified cropping systems and fertilization strategies on soil microbial abundance and functional potentials for nitrogen cycling[J]. Science of the Total Environment, 2024, 932: 172954.

[12] 张华东,周少梁,李侨,等.不同灌溉方式下旱区枣树根区土壤颗粒组成和孔隙特征[J].农业工程学报,2024,40(24): 98 – 105.
Zhang Huadong, Zhou Shaoliang, Li Qiao, et al. Soil particle composition and pore characteristics in the root zone of date palm in the dry zone under different irrigation methods[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(24): 98 – 105. (in Chinese)

[13] 秦金鑫,吴茂林,王昕悦,等.氮肥配施牛粪对干旱区棉田土壤团聚体及其微生物残体氮的影响[J].土壤,2025,57(5): 1034 – 1042.
Qin Jinxin, Wu Maolin, Wang Xinyue, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on soil aggregates and their microbial residue nitrogen in cotton field of arid area[J]. Soils, 2025, 57(5): 1034 – 1042. (in Chinese)

[14] 傅梓奇,吴绍安,刘阳,等.春陵水流域不同土地利用类型土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的研究[J].土壤通报, 2025,56(6):1610 – 1621.
Fu Ziqi, Wu Shaoan, Liu Yang, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric characteristics of different land use types in the Chonglingshui basin[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(6): 1610 – 1621. (in Chinese)

[15] 原野,高媛,赵艺芳,等.黄土丘陵区露天煤矿复垦土壤熟化过程中团聚体碳氮演变特征[J].农业工程学报,2022, 38(11):72 – 80.
Yuan Ye, Gao Yuan, Zhao Yifang, et al. Succession of soil aggregate associated carbon and nitrogen amid the reclaimed mine soils pedogenic process in an opencast coal mine within the loess hilly region[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 72 – 80. (in Chinese)

[16] 魏霞,贺燕,魏宁,等.祁连山区主要植被类型下土壤团聚体变化特征[J].农业工程学报,2020,36(2):148 – 155.
Wei Xia, He Yan, Wei Ning, et al. Variation characteristics of soil aggregates under main vegetation types in Qilian Mountainous areas[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 148 – 155. (in Chinese)

[17] Hu W, Cichota R, Beare M, et al. Soil structural vulnerability: critical review and conceptual development[J]. Geoderma, 2023, 430: 116346.

[18] 张忠学,尹致皓,余佩哲,等.黑土区坡耕地水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响[J].农业机械学报,2024,55(1): 282 – 293.
Zhang Zhongxue, Yin Zhihao, Yu Peizhe, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil physical and chemical properties in slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 282 – 293. (in Chinese)

[19] Yang Y, He C, Huang L, et al. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on glomalin-related soil protein and soil aggregate stability: a meta-analysis[J]. PLoS One, 2017, 12: e0182264.

[20] Singh B K, Quince C, Macdonald C A, et al. Loss of microbial diversity in soils is coincident with reductions in some specialized functions[J]. The ISME Journal, 2014, 8(12): 2248 – 2257.

[21] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality: a critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105 – 125.

[22] Wang X, Yin L, Dijkstra F A, et al. Rhizosphere priming is tightly associated with root-driven aggregate turnover[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 149: 107964.

[23] 薛里,张忠学,齐智娟,等.节水灌溉下生物炭与有机肥添加对黑土区稻田净碳排放的影响[J].农业机械学报,2024, 55(9):382 – 390,441.
Xue Li, Zhang Zhongxue, Qi Zhijuan, et al. Effects of biochar and organic fertilizer addition on net carbon emission of paddy field in black soil area under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 382 – 390,441. (in Chinese)

[24] Six J, Bossuyt h, Degryze S, et al. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7 – 31.

[25] Wiesmeier M, Steffens M, Mueller C W, et al. Aggregate stability and physical protection of soil organic carbon in semi-arid steppe soils[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(1): 22 – 31.

[26] Zhang M M, Dong B D, Qiao Y Z, et al. Effects of sub-soil plastic film mulch on soil water and salt content and water utilization by winter wheat under different soil salinities[J]. Field Crops Research, 2018, 225: 130 – 140.

[27] Zhang Z, Hu H C, Tian F Q, et al. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China [J]. Journal of Arid Environments, 2014, 104: 23 – 33.

[28] Liu H G, Li M S, Zheng X R, et al. Surface salinization of soil under mulched drip irrigation[J]. Water, 2020, 12(11): 3031.

[29] Si Y T, Xiong L, Chen Y M, et al. Contribution of the vertical movement of dissolved organic carbon to carbon allocation in two distinct soil types under *Castanopsis fargesii* Franch. and *C. carlesii* (Hemsl.) Hayata forests[J]. Annals of Forest Science, 2018, 75(3): 79.

[30] Chen Z, Du Z, Zhang Z, et al. Dynamic changes in soil organic carbon induced by long-term compost application under a wheat-maize double cropping system in North China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 913: 169407.