

网络出版时间:2026-06-25

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260625.1054.002

耕作模式对砂姜黑土理化性质和冬小麦产量的影响

于梦娇^{1,2}, 靳海洋², 闫雅倩^{1,2}, 宋晓朋³, 程红建², 王家瑞²,
宋航², 方保停², 贺德先¹, 李向东², 杨习文¹

(1. 河南农业大学农学院, 河南郑州 450046; 2. 河南省农业科学院小麦研究所, 河南郑州 450002;

3. 驻马店市农业科学院, 河南驻马店 463000)

摘要:为探明不同耕作模式对砂姜黑土土壤质量和小麦产量的影响, 设置旋耕两遍(T1)、翻耕+旋耕两遍(T2)、翻耕+旋耕两遍+镇压(T3)、翻耕+驱动耙1遍+镇压(T4)4种耕作模式处理, 分析不同耕作模式对土壤物理性状、养分转化酶活性、有机质与速效养分含量以及小麦产量的调控效应。结果表明, 与T1处理相比, T3、T4处理显著增加越冬期0~10 cm土壤容重, 降低越冬期10~30 cm土壤容重; T4处理显著增加越冬期20~30 cm和成熟期0~10 cm土壤含水量、贮水量; T4处理显著增加20~40 cm土壤纤维二糖水解酶和0~40 cm土壤 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性, 增加20~40 cm土壤无机氮含量和0~20 cm土壤速效磷含量; T4处理显著增加拔节期单株次生根数、开花期和成熟期干物质积累量、穗数和籽粒产量, 产量增幅为11.62%, 经济效益增加2 071.26元·hm⁻²。综上所述, 翻耕+驱动耙1遍+镇压的耕作模式有利于改善砂姜黑土理化性质与酶活性, 提高小麦产量, 可作为区域小麦高效生产适宜的耕作模式。

关键词:小麦; 耕作模式; 土壤; 有机质; 容重; 酶活性; 产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)08-1120-10

Effects of Tillage Patterns on the Physicochemical Properties of Lime Concretion Black Soil and the Yield of Winter Wheat

Yu Mengjiao^{1,2}, Jin Haiyang², Yan Yaqian^{1,2}, Song Xiaopeng³, Cheng Hongjian²,
Wang Jiarui², Song Hang², Fang Baoting², He Dexian¹, Li Xiangdong², Yang Xiwen¹

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China; 3. Zhumadian Academy of Agricultural Sciences, Zhumadian, Henan 463000, China)

Abstract: To investigate the impact of different tillage patterns on the soil quality and wheat yield in lime concretion black soil, four tillage treatments were set up: twice rotary tillage(T1), plowing + twice rotary tillage(T2), plowing + twice rotary tillage + rolling(T3), and plowing + one pass with a driven cultivator + rolling(T4). The effects of these treatments on soil physical properties, nutrient conversion enzyme activity, organic matter, available nutrient content, and wheat yield were analyzed. Results showed that compared to T1, T3 and T4 significantly increased the bulk density of 0–10 cm soil during the overwintering period and reduced the bulk density of 10–30 cm soil. T4 significantly increased soil moisture and water storage in the 20–30 cm layer during the overwintering period and the 0–10 cm layer during the maturity period. T4 also significantly enhanced the activity of cello-

收稿日期: 2026-01-30

修回日期: 2026-02-10

基金项目: 河南省重点研发专项(251111110900); 河南省重大科技专项(231100110200); 河南省现代农业产业技术体系建设专项(HARS-22-01-G5); 河南省科协青年人才托举工程项目(2025HYTP073); 河南省农业科学院基本科研业务费专项(2026ZC02); 河南省农业科学院科技创新团队项目

第一作者 E-mail: 1402281328@qq.com(于梦娇); jinhaiyang321@163.com(靳海洋)

通讯作者 E-mail: yangxiwen@henau.edu.cn(杨习文); hnlxd@126.com(李向东)

biose hydrolase in the 20–40 cm soil layer and β -1,4-N-acetylglucosaminidase in the 0–40 cm soil layer, increased inorganic nitrogen content in the 20–40 cm soil layer, and elevated available phosphorus content in the 0–20 cm soil layer. T4 significantly increased the number of secondary roots per plant during the jointing stage, dry matter accumulation at the flowering and maturity stages, spike number, and grain yield, with a yield increase of 11.62% and an economic benefit gain of 2,071.26 yuan $\cdot$ hm $^{-2}$. In summary, the tillage pattern of plowing + one pass with a driven cultivator + rolling is effective in improving the physicochemical properties and enzyme activity of lime concretion black soil, enhancing wheat yield, and can serve as a suitable tillage mode for high-efficiency wheat production in the region.

Keywords: Wheat; Tillage pattern; Soil; Organic matter; Bulk density; Enzyme activity; Yield

砂姜黑土广泛分布于黄淮南部粮食主产区^[1]。该类土壤质地黏重,黏土矿物以 2:1 型膨胀性蒙脱石为主,遇水易膨胀黏结,失水则易龟裂僵硬,导致耕作难度较大^[2]。耕作整地是优化土壤结构、为小麦生长奠定基础的关键环节,合理的耕作模式能够调节土壤松紧度,改善其理化性状与养分供应能力,从而促进小麦根系与冠层生长,进而影响产量形成。

耕作措施能够改变土壤结构、调控水分保蓄能力,进而影响土壤养分转化和作物生产。不同耕作模式对土壤扰动程度不同,因而对土壤理化性质的影响也有所不同^[3-4]。目前,生产中常见的耕作方式主要包括旋耕、翻耕等。旋耕作为当前普遍的耕作方式,可使土壤疏松、地表平整^[5]。但长期旋耕易导致犁底层上移,使 15~30 cm 土层容重增高,不仅阻碍作物根系下扎,也会削弱土壤对水分和养分的保蓄能力^[6-7]。特别是在秸秆还田条件下,单一的旋耕可能造成耕层土壤过于疏松、孔隙过大,影响播种时种子与土壤接触紧实度,进而降低出苗质量,制约作物后期生长^[8]。相较于旋耕,翻耕是打破犁底层的有效手段。前人研究表明,翻耕可降低土壤容重,增强作物水分吸收,提高土壤酶活性,促进小麦干物质积累,从而增加作物产量^[9-12]。然而在质地黏重的砂姜黑土农田,翻耕后土块不易粉碎,土壤与种子难以紧密贴合,常导致作物出苗和生长不良^[13]。镇压是解决耕层土壤过松的重要措施^[14],能增强小麦根系与土壤的结合度,促进根系对土壤水分与养分的吸收^[15-16]。近年来,驱动耙(立式旋耕)的应用范围逐渐增大,其作业转速更高、碎土深度更深,碎土效果优于传统旋耕^[17]。

目前,关于砂姜黑土耕作调控效应的研究多集中于旋耕、翻耕等传统耕作方式的组合,而结合

镇压、驱动耙等新型整地方式的耕作模式研究数据不足,特别是新型耕作模式对砂姜黑土耕层质量和小麦群体特征的影响研究未见报道。鉴于此,本研究针对砂姜黑土农田土壤物理、化学和生物学性质及小麦高产稳产需求,设置旋耕、翻耕+旋耕、翻耕+旋耕+镇压、翻耕+驱动耙+镇压等 4 种不同耕作模式,探究不同耕作模式对砂姜黑土耕层质量和小麦群体特征的调控效应,以为黄淮砂姜黑土区小麦丰产增效生产提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2023 年 10 月至 2024 年 6 月在河南省遂平县常庄镇高标准农田示范区(33°10'N, 114°6'E)进行。试验田土壤类型为砂姜黑土,试验开始前 0~20 cm 土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为 12.33 g $\cdot$ kg $^{-1}$ 、0.83 g $\cdot$ kg $^{-1}$ 、0.35 g $\cdot$ kg $^{-1}$ 和 16.76 g $\cdot$ kg $^{-1}$,pH 值 5.53。前茬作物玉米机械收获后秸秆粉碎覆盖地表,在小麦播种前进行相应耕作机械作业。小麦生育期降水量见图 1。

1.2 试验设计

试验共设置 4 个耕作模式:旋耕 2 遍(T1)、翻耕+旋耕 2 遍(T2)、翻耕+旋耕 2 遍+镇压(T3)、翻耕+驱动耙 1 遍+镇压(T4)。旋耕深度约 15 cm;翻耕使用液压翻转犁(1LFT-440,河北冀农农具有限公司),耕作深度约 35 cm;驱动耙使用动力驱动耙(1BQ-3.0,河北冀农农具有限公司),耕作深度约 20 cm。试验采用大区设计,每个处理 3 次重复,小区面积 300 m 2 (12 m $\times$ 25 m)。2023 年 10 月 30 日耕作,除耕作处理外,各小区其他田间管理一致。耕作后种肥随播种施入

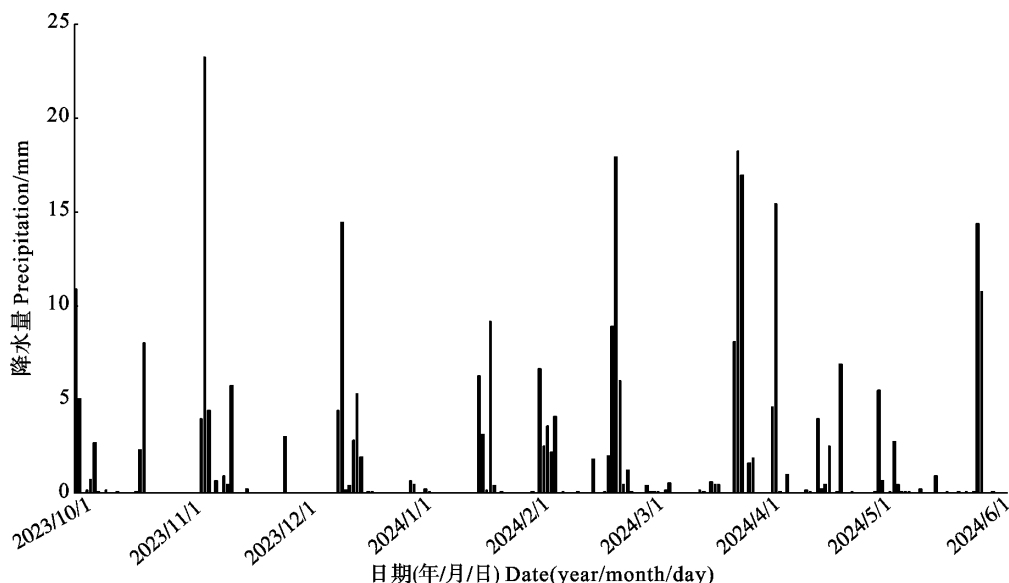


图1 2023—2024年冬小麦生育期逐日降水量

Fig. 1 Daily precipitation during the winter wheat growing period in 2023—2024

田中,底肥为24—11—5复合肥, N 、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为180、82.5和37.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦品种为驻麦126(国审麦20230135),播种量250 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距20 cm。拔节期追施尿素(46% N),施 N 量为69 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。分别于2024年3月11日和4月22日采用喷灌方式各灌水60 mm。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤容重、含水量与贮水量测定

在小麦越冬期和成熟期,使用容重钻(XDB030301,北京新地标土壤设备有限公司)取0~10、10~20和20~30 cm土层样品,内嵌环刀容积为100 cm^3 ,烘干测定土壤容重、含水量,计算贮水量。

1.3.2 土壤酶活性与养分含量测定

在小麦成熟期,用五点取样法采集行间0~20 cm、20~40 cm土层样品,测定土壤养分转化酶活性及有机质、无机氮、速效磷和速效钾含量。土壤养分转化酶活性采用微孔板荧光法测定,分别为 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CBH)、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和磷酸酶(Phos),5种酶的底物分别为4-MUB- β -D-葡萄糖苷、4-MUB-纤维二糖苷、4-MUB- β -D-乙酰氨基葡萄糖苷、L-亮氨酸-7-酰胺基-4-甲基香豆素和4-甲基伞形酮酰-磷酸酯^[18]。有机质含量采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定^[19];无机氮采用1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提,用流动分析仪测定硝态氮和铵态

氮含量,二者之和作为无机氮含量;速效磷含量采用0.5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠溶液浸提-钼锑抗比色法测定^[19],速效钾含量采用1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵溶液浸提-火焰光度法测定^[19]。

1.3.3 小麦单株次生根数测定

在小麦越冬期、拔节期和开花期,挖取33 cm单行小麦植株,随机调查10株,平均计算单株次生根数。

1.3.4 小麦干物质积累量测定

在小麦越冬期、拔节期、开花期和成熟期,挖取33 cm单行小麦植株,从茎基部去除根系,于105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青25 min,随后75 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,称量干物质重,计算单位面积干物质积累量。

1.3.5 籽粒产量及其构成因素测定

在小麦成熟期,每个小区调查1 m双行穗数,随机取20穗调查穗粒数,收获5 m^2 样方进行脱粒晒干称重计算籽粒产量,并调查千粒重。

1.4 数据处理

用Excel 2010和Origin 2021进行数据处理和作图,采用DPS 19.05对数据进行统计分析,多重比较采用LSD法。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式对土壤容重、含水量和贮水量的影响

2.1.1 不同耕作模式对土壤容重的影响

由表1可知,与T1处理相比,在0~10 cm

土层, T3、T4 处理越冬期土壤容重显著增加,增幅分别为 13.70%和 13.13%,T2 处理变化未达显著水平;T2、T3、T4 处理成熟期土壤容重显著增加,增幅分别为 27.73%、33.28%和 28.66%。在 10~20 cm 土层,与 T1 处理相比,T2、T3、T4 处理越冬期土壤容重显著降低,降幅分别为 12.06%、13.48%和 13.48%;T2、T3 处理成

熟期容重与 T1 处理差异未达显著水平,T4 处理显著降低了成熟期土壤容重,降幅为 7.09%。在 20~30 cm 土层,与 T1 处理相比,T2 处理越冬期、成熟期土壤容重略有降低;T3 处理显著降低越冬期土壤容重,但成熟期变化未达显著水平;越冬期和成熟期以 T4 处理最低,与 T1 处理差异均显著,降幅分别为 18.00%和 6.19%。

表 1 不同耕作模式对土壤容重的影响
Table 1 Effects of different tillage patterns on soil bulk density g · cm⁻³

取样时期 Sampling time	处理 Treatment	土层 Soil layer/cm		
		0~10	10~20	20~30
越冬期 Over-wintering	T1	0.93±0.06c	1.41±0.08a	1.53±0.04a
	T2	0.96±0.03bc	1.23±0.07b	1.46±0.06ab
	T3	1.06±0.04ab	1.22±0.11b	1.31±0.13bc
	T4	1.09±0.08a	1.27±0.06b	1.25±0.13c
成熟期 Maturity	T1	1.17±0.02b	1.65±0.03a	1.65±0.03a
	T2	1.49±0.03a	1.56±0.04ab	1.59±0.03ab
	T3	1.55±0.03a	1.61±0.04ab	1.60±0.04ab
	T4	1.50±0.01a	1.54±0.05b	1.54±0.02b

同列数据后不同字母表示同一时期不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下表同。
Different letters following the values within the same columns indicate significant differences among treatments at the same growth stages($P<0.05$). The same in tables 2-4.

2.1.2 不同耕作模式对土壤含水量的影响

由表 2 可知,在 0~10 cm 土层,与 T1 处理相比,T2 处理显著降低了越冬期土壤含水量,降幅为 9.88%;两个时期的土壤含水量均以 T4 处理最高,成熟期差异显著,较 T1 提高 14.47%。在 10~20 cm 土层,与 T1 处理相比,T2 处理显著降低了越冬

期土壤含水量,成熟期土壤含水量变化不显著;T3 和 T4 处理越冬期、成熟期土壤含水量与 T1 处理相比差异均未达到显著水平。在 20~30 cm 土层,与 T1 处理相比,T4 处理显著增加越冬期土壤含水量,增幅为 23.67%;T2、T3 处理对两个时期土壤含水量、T4 处理对成熟期土壤含水量影响均不显著。

表 2 不同耕作模式对土壤含水量的影响
Table 2 Effects of different tillage patterns on soil moisture %

取样时期 Sampling time	处理 Treatment	土层 Soil layer/cm		
		0~10	10~20	20~30
越冬期 Over-wintering	T1	17.00±0.58a	20.94±0.71ab	19.29±1.14b
	T2	15.33±0.65b	19.33±0.31c	21.20±1.45ab
	T3	16.62±0.85ab	19.78±0.79bc	21.97±1.52ab
	T4	17.51±0.56a	21.73±0.95a	23.86±1.49a
成熟期 Maturity	T1	9.92±0.23b	9.77±0.04ab	9.20±1.19ab
	T2	9.81±0.74b	8.85±1.03b	7.06±1.23b
	T3	10.37±0.19ab	8.34±0.02b	7.93±0.35ab
	T4	11.35±0.41a	10.65±0.56a	10.19±0.40a

2.1.3 不同耕作模式对土壤贮水量的影响

由表 3 可知,在 0~10 cm 土层,与 T1 处理相比,T2 处理显著降低了越冬期土壤贮水量,降幅为 13.94%,但成熟期土壤贮水量与 T1 处理差异不显著;T3 处理对越冬期和成熟期的土壤贮水量影响不显著;T4 处理的越冬期土壤贮水量与 T1 差异不显著,成熟期土壤贮水量较 T1 处理显著增加 47.81%。在 10~20 cm 土层,与 T1 处理相比,T2、T3 处理显著降低了越冬期土壤贮水量,降幅分别为 13.40%和 14.38%,但对成熟期土壤贮水量影响不显著;T4 处理下两个时期土壤贮水量与 T1 处理差异均未达显著水平。在 20~30 cm 土层,与 T1 处理相比,T2、T3 处理对越冬期土壤贮水量影响不明显,但显著降低了成熟期的土壤贮水量,降幅分别为 23.19%和 7.71%;T4 处理显著增加了越冬期土壤贮水量,增幅为 9.95%,但成熟期土壤贮水量与 T1 处理差异未达显著水平。从 0~30 cm 总体来看,T2 处理的成熟期土壤总贮水量较 T1 处理显著降低,降幅

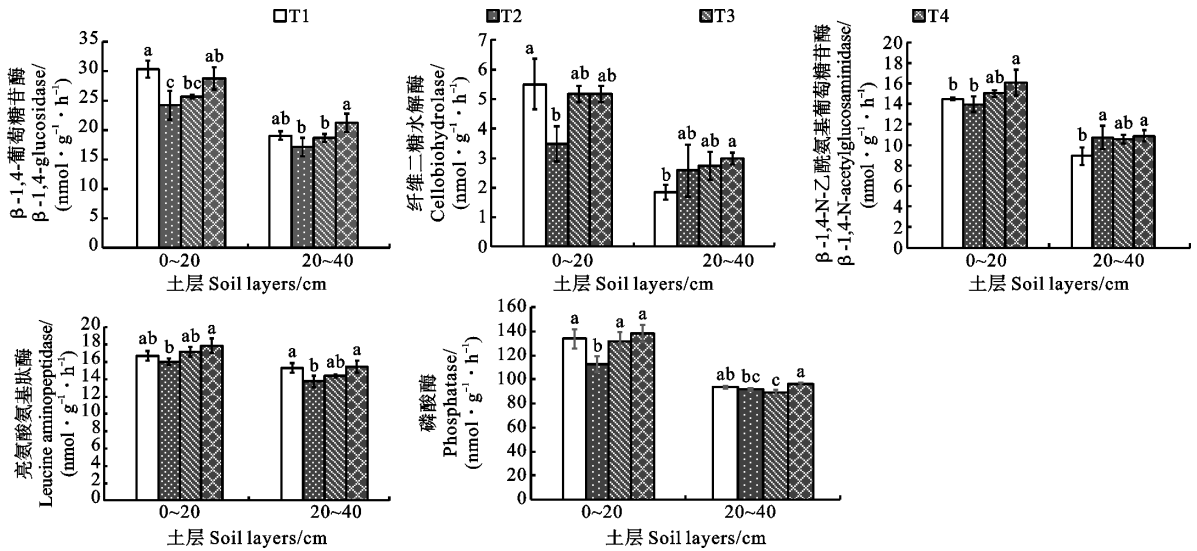
为 11.19%,T3 处理的越冬期和成熟期土壤总贮水量与 T1 差异均未达显著水平;T4 处理显著增加越冬期、成熟期土壤总贮水量,增幅分别为 5.12%、7.51%。

2.2 不同耕作模式对土壤养分转化酶活性的影响

由图 2 可知,与 T1 处理相比,在 0~20 cm 土层,T2、T3 处理显著降低 β -1,4-葡萄糖苷酶活性,降幅为 19.99%、15.21%;T4 处理提高了土壤 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性,增幅为 11.02%;T2 处理显著降低土壤磷酸酶活性,降幅为 15.78%。在 20~40 cm 土层,T2 处理显著降低土壤纤维二糖水解酶和亮氨酸氨基肽酶活性,降幅分别为 36.79%和 10.04%;T2、T4 处理显著提高土壤 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性,增幅为 20.24%、21.83%;T3 处理显著降低土壤磷酸酶活性,降幅为 5.19%。除此之外,不同土层中其余处理对不同种酶活性的影响均不显著。这说明,不同耕作模式对土壤酶活性的影响存在差异,同时在不同土层表现有异。

表 3 不同耕作模式对土壤贮水量的影响

Table 3 Effects of different tillage patterns on soil water storage		mm			
取样时期 Sampling time	处理 Treatment	土层 Soil layer/cm			
		0~10	10~20	20~30	0~30
越冬期 Over-wintering	T1	19.65±1.09a	73.32±1.08a	109.77±6.46b	202.74±6.96b
	T2	16.91±0.54b	63.64±3.38b	115.43±3.05ab	195.98±5.03b
	T3	19.71±1.68a	62.77±3.60b	114.92±4.42ab	197.40±0.52b
	T4	20.67±1.40a	71.77±2.36a	120.69±2.04a	213.13±2.70a
成熟期 Maturity	T1	11.86±1.48b	35.77±0.54ab	53.03±2.04ab	100.66±1.11b
	T2	15.63±2.55ab	33.04±0.83b	40.73±1.19c	89.40±2.91c
	T3	17.00±2.15ab	35.25±2.03ab	48.94±1.51b	101.20±1.63b
	T4	17.53±0.53a	36.40±0.56a	54.23±2.01a	108.22±2.04a



图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different letters indicate significant differences among different treatments($P<0.05$). The same in figures 3~5.

图 2 不同耕作模式对土壤养分转化酶的影响

Fig. 2 Effects of different tillage patterns on soil nutrient transformation enzymes

2.3 不同耕作模式对有机质含量和速效养分的影响

由图 3 可知,与 T1 处理相比,T2 处理下 0~20 cm 土层的有机质含量显著降低,降幅为 12.91%,20~40 cm 土层的有机质含量变化未达显著水平;T3、T4 处理对两个土层的有机质含量均无显著影响。T2、T3 处理对两个土层无机氮含量影响均不明显;T4 处理下 0~20 cm 土层无机氮含量与 T1 处理差异不显著,但 20~40 cm 土层无机氮含量显著提高,增幅为 38.58%。T4 处理较 T1 处理显著提高了 0~20 cm 土层的速效磷含量,增幅为 14.31%,其余处理与 T1 差异处理均不显著。T2 和 T3 处理分别显著降低了 0~20 cm 和 20~40 cm 土层速效钾含量,降幅分别为 22.92%和

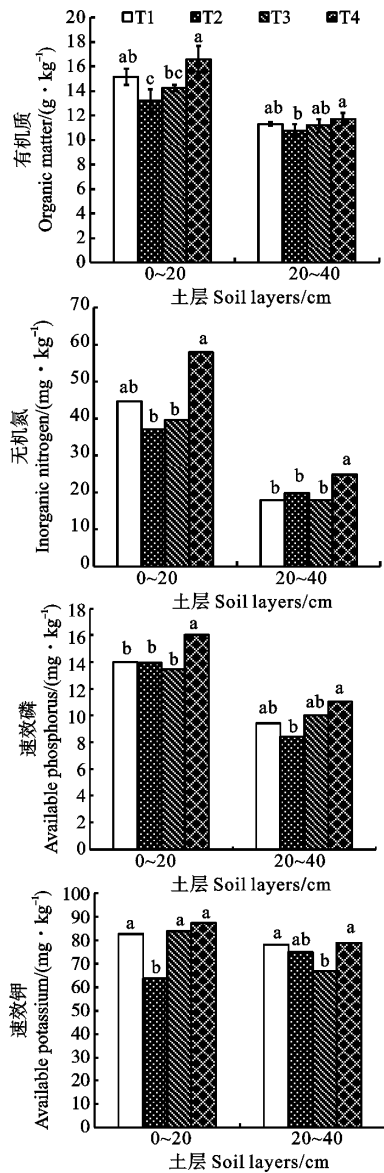


图 3 不同耕作模式对有机质含量和速效养分的影响
Fig. 3 Effects of different tillage patterns on organic matter and available nutrient levels

14.30%,其余处理影响均不显著。
2.4 不同耕作模式对小麦次生根数和干物质积累量的影响

2.4.1 不同耕作模式对小麦单株次生根数的影响

小麦单株次生根数随生育期的推进逐渐增加,在开花期达到最大值(图 4)。与 T1 处理相比,T2 处理显著降低了越冬期单株次生根数,但拔节期、开花期单株次生根数与 T1 处理差异未达显著水平;T3 处理越冬期、拔节期、开花期的单株次生根数与 T1 处理差异均未达显著水平;T4 处理下各时期单株次生根数均最多,拔节期较 T1 处理显著增加 24.25%。总体来看,T4 处理下小麦根系生长发育较好。

2.4.2 不同耕作模式对小麦干物质积累量的影响

由图 5 可知,与 T1 处理相比,T2 处理下越冬期、拔节期和开花期小麦干物质积累量均显著降低,但成熟期变化不显著;T3 处理下越冬期干物质积累量显著降低,拔节期、开花期和成熟期与 T1 处理差异均不显著;T4 处理下越冬期干物质积累量与其他处理差异不显著,开花期、成熟期小

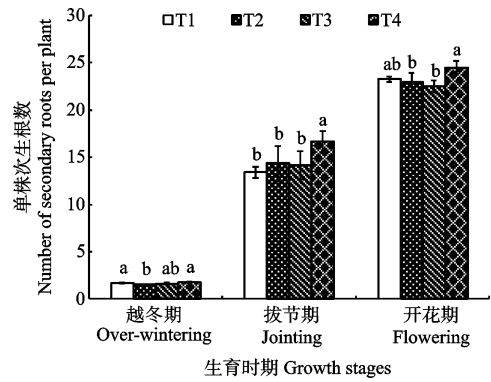


图 4 不同耕作模式对小麦单株次生根数的影响
Fig. 4 Effects of different tillage patterns on the number of secondary roots per plant of wheat

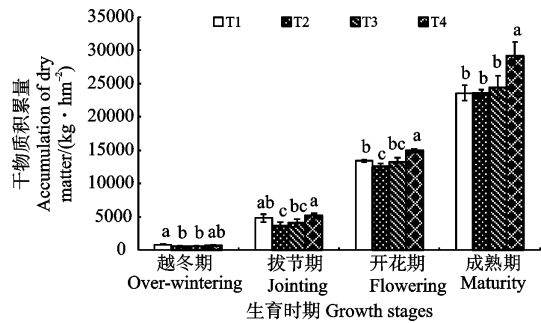


图 5 不同耕作模式对小麦干物质积累量的影响
Fig. 5 Effects of different tillage patterns on dry matter accumulation in wheat

麦干物质积累量较 T1 处理均显著增加,增幅分别为 11.61%和 23.71%。由此可见,T4 处理对小麦干物质积累有明显的促进作用。

2.5 不同耕作模式对小麦产量及其构成因素的影响

由表 4 可知,不同耕作模式下小麦籽粒产量表现为 T4>T3>T1>T2,仅 T4 处理与 T1 处理差异显著,且增产 11.62%。从产量构成看,T4 处理的穗数和穗粒数均高于其他处理,其中穗数差异显著;T2、T3、T4 处理的千粒重较 T1 处理有不同程度下降,说明穗数增加是 T4 增产的主

要原因。

2.6 不同耕作模式对经济效益的比较

由表 5 可知,与 T1 处理相比,T2 处理耕作投入增加 600 元·hm⁻²,经济产出减少 270.14 元·hm⁻²,经济效益减少 870.14 元·hm⁻²;T3 处理耕作投入增加 750 元·hm⁻²,经济产出增加 90.04 元·hm⁻²,经济效益减少 659.96 元·hm⁻²;T4 处理耕作投入增加 450 元·hm⁻²,经济产出增加 2 521.26 元·hm⁻²,经济效益增加 2 071.26 元·hm⁻²。总体来看,T4 处理下小麦生产可获得较高的经济效益。

表 4 不同耕作模式对小麦产量的影响

Table 4 Effects of different tillage patterns on wheat yield

处理 Treatment	穗数 Spikes/(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grains perspike	千粒重 1 000-grain weight/g	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)
T1	655.63±31.25b	39.19±0.97ab	54.93±1.63a	9 042.02±448.14b
T2	629.10±26.26b	38.41±1.83b	51.58±3.16ab	8 929.46±193.75b
T3	640.47±33.61b	40.59±1.36ab	48.23±2.06b	9 079.54±193.75b
T4	731.43±25.89a	41.35±1.78a	48.14±1.50b	10 092.54±394.69a

表 5 不同耕作模式下经济效益的比较

Table 5 Comparison of economic benefits under different tillage patterns

处理 Treatment	耕作投入 Tillage input/(yuan·hm ⁻²)	经济产出 Economic output/(yuan·hm ⁻²)	经济效益增加值 Increased value of economic benefits/ (yuan·hm ⁻²)
T1	750	21 700.85	—
T2	1 350	21 430.71	-870.14
T3	1 500	21 790.89	-659.96
T4	1 200	24 222.11	2 071.26

3 讨论

3.1 耕作模式对土壤容重的影响

土壤容重是评价土壤结构和保水能力的重要标志之一,其变化通常与土壤扰动程度相关,扰动越大,容重往往越低,反之则越高^[20-21]。适度降低土壤容重可有效增加土壤孔隙度,从而改善土壤透气性,增强渗水与蓄水能力,并提升养分供应与保持能力^[22-23]。这样的土壤环境可以为作物根系提供更加充足的氧气,促进其健康生长,同时提高水分和养分的利用效率,最终有利于作物产量的提升,并为农业可持续发展奠定基础。研究表明,耕作措施对 0~20 cm 土层容重影响较大,对 20~30 cm 土层影响较小,随着土壤深度的增加容重增加^[24]。这与本研究结果一致,可能与小麦根系主要集中分布在约 20 cm 左右的土层有关。翻耕

能够改善深层紧实土壤的结构,调节至适宜作物生长的疏松状态,增强土壤结构和养分供应能力,减少根系下扎的机械阻力^[25]。本试验结果显示,翻耕+驱动耙 1 遍+镇压土壤容重有所下降,这是因为翻耕+驱动耙的结合改善了土壤结构,从而降低土壤容重。而镇压则有助于压实土壤表层,减少水分蒸发,提高蓄水能力。

3.2 耕作模式对土壤养分转化酶的影响

土壤酶是衡量土壤肥力的关键指标之一,能够反映土壤生物化学过程的强度与方向。研究表明,耕作模式对土壤酶活性有着显著的影响^[26]。β-1,4-葡萄糖苷酶能够将纤维二糖水解成葡萄糖分子,纤维二糖水解酶主要水解纤维素,从而释放出纤维素二糖,β-1,4-葡萄糖苷酶和纤维二糖水解酶被认为是土壤中碳动力学的关键控制者,是碳矿化的重要指标酶,因此通常用于指示土壤中

不稳定碳的掺入速率^[27]。本研究中,在 0~20 cm 土层中旋耕 2 遍和翻耕+驱动耙 1 遍+镇压下 β -1,4-葡萄糖苷酶和纤维二糖水解酶活性较高,可能原因是旋耕 2 遍通过增强土壤通气性和改善结构促进了微生物活动与碳源供应;翻耕+驱动耙 1 遍+镇压则通过进一步增加土壤表面积、改善通气与水分渗透,同样刺激了微生物活性和碳源输入。翻耕+驱动耙 1 遍+镇压的 20~40 cm 土层中酶活性较高,这可能因为该处理有助于形成稳定的团聚体,疏松下层土壤,促进根系生长,从而增加了深层土壤的碳输入,这与 Roldan 等^[28]结果一致。 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶参与土壤氮循环,磷酸酶参与土壤磷循环。本试验中, β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶和磷酸酶整体上均在翻耕+驱动耙 1 遍+镇压下的酶活性最高,这可能翻耕改善土壤物理结构、驱动耙平整土地并促进根系发育、镇压增强表土紧实度,三者共同改善了土壤结构并提升了微生物活性^[29]。研究表明,这 5 种酶都随着土层加深而呈现降低趋势,0~20 cm 的土壤酶活性显著高于 20~40 cm 土壤酶活性^[30]。本研究结果与其一致,这可能与土壤养分随深度递减、微生物活性降低、酶分泌减少有关。

3.3 耕作模式对有机质和速效养分的影响

土壤养分含量是评价土壤肥力的核心指标,直接影响作物生长发育^[31]。合理的耕作模式,能促进土壤养分的吸收与利用,从而提高作物产量^[32]。土壤有机质是土壤的重要组成部分,研究表明,0~20 cm 土层内的有机质含量高于 20~40 cm 土层内的有机质含量^[33]。本试验研究结果与其一致。另外,本试验研究还表明在翻耕+驱动耙 1 遍+镇压下的养分含量整体上较高,这主要是因为翻耕和驱动耙可以将作物残体等有机质混入土中,增加土壤有机质的输入。而镇压有助于将有机质保留在表层,减少损失。研究表明,土壤速效养分含量是衡量土壤肥力水平的关键指标^[34]。翻耕已被证明能显著提高 20~40 cm 土层的速效养分含量。本研究表明,同一时期在不同耕作下 20~40 cm 土层内有效磷含量低于 0~20 cm 土层内的速效磷含量。这与徐海等^[35]研究结果一致。翻耕+驱动耙 1 遍+镇压下速效磷含量最高,这可能由于翻耕与驱动耙的结合提高了土壤均匀性和结构稳定性,配合镇压促进了养分循环,从而有效提高了速效磷含量。王玉玲

等^[36]研究表明,“深松—翻耕”、“翻耕—翻耕—深松”的模式可以提高土壤速效养分含量。本研究进一步证实翻耕,尤其是结合驱动耙与镇压,能显著提高土壤速效养分含量。

3.4 耕作模式对小麦产量及其构成因素和经济效益的影响

不同耕作模式通过调节土壤物理结构、养分供应与微生物活性,从而影响小麦产量及其构成因素^[37]。本研究表明,不同耕作模式下小麦产量总体表现为翻耕+驱动耙 1 遍+镇压>翻耕+旋耕 2 遍+镇压>旋耕 2 遍>翻耕+旋耕 2 遍,其中翻耕+驱动耙 1 遍+镇压的籽粒产量显著高于旋耕 2 遍,增幅为 11.61%。从产量构成来看,翻耕+驱动耙 1 遍+镇压增加了穗数和穗粒数,但千粒重显著降低,表明 T4 处理通过促进穗部发育弥补了粒重的下降,从而实现总体增产。穗数的增加可能因为翻耕+驱动耙 1 遍+镇压降低土壤容重、改善孔隙结构,这与谢迎新等^[38]研究结果一致。与此同时,翻耕+驱动耙 1 遍+镇压中的镇压在促进分蘖成穗、提高播种质量的同时,也能适度增加表层土壤紧实度,限制生长后期根系对深层养分的吸收;同时,由于穗数的增多加剧了植株之间的资源竞争,可能导致每个籽粒获得的灌浆物质相应减少,最终导致千粒重下降,这与张书良等^[15]研究结果一致。因此,翻耕+驱动耙 1 遍+镇压通过优化土壤环境与群体结构,以穗数与穗粒数的显著增加有效弥补了千粒重下降带来的不足,从而实现了籽粒产量的显著提升。不同耕作模式下经济效益的差异源于直接生产成本和最终产出两个核心变量的不同^[39-40]。本试验研究结果表明,翻耕+驱动耙 1 遍+镇压的耕作投入虽然较旋耕 2 遍增加 450 元·hm⁻²,但最终经济效益增加 2 071.26 元·hm⁻²,表明翻耕+驱动耙 1 遍+镇压的耕作模式具有良好的经济可行性。耕作措施对土壤理化性质及作物生产的影响通常具有显著的累积性与长期性^[41],本试验结果证实翻耕+驱动耙 1 遍+镇压可改善砂姜黑土理化性质、促进小麦增产增效,不同耕作模式和隔年轮耕制下的生产稳定性、生态效应及经济效益有待进一步研究。

4 结论

在试验条件下,翻耕+驱动耙 1 遍+镇压的耕作模式可增加表土层土壤容重、降低深土层土

壤容重,增加土壤水分保蓄能力、碳氮磷转化相关酶活性和氮磷养分供应,增加拔节期单株次生根数、开花期和成熟期干物质积累量、穗数和籽粒产量,经济效益增加 2 071.26 元·hm⁻²,可作为区域小麦高效生产适宜的耕作模式。

参考文献:

- [1] 赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018,51(13):2489.
Zhao Y L, Liu W L, Cheng S X, *et al.* Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018,51(13):2489.
- [2] 王玥凯,郭自春,张中彬,等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019,56(6):1370.
Wang Y K, Guo Z C, Zhang Z B, *et al.* Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil (vertisol) [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (6):1370.
- [3] 钱泳其,熊鹏,王玥凯,等. 不同耕作方式对砂姜黑土孔隙结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2024,61(1):52.
Qian Y Q, Xiong P, Wang Y K, *et al.* Effect of tillage practices on soil pore structure characteristics in Shajiang black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024,61(1):52.
- [4] Estevam R F H, Peixoto D S, De Melo Filho J F, *et al.* Soil properties sensitive to degradation caused by increasing intensity of conventional tillage [J]. *Soil Research*, 2021,59(8): 819.
- [5] Li J W, Chen L, Zhang C Z, *et al.* Combining rotary and deep tillage increases crop yields by improving the soil physical structure and accumulating organic carbon of subsoil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2024,244:106252.
- [6] 夏昊,王广帅,谢坤,等. 不同耕作方式配合秸秆还田对潮土孔隙结构特征的影响[J/OL]. 土壤学报, 2026. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20260106.1321.002>.
Xia H, Wang G S, Xie K, *et al.* Effects of different tillage practices combined with straw returning on pore structure characteristics of alluvial soil [J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20260106.1321.002>.
- [7] 程思贤,刘卫玲,靳英杰,等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018,26(9):1355.
Cheng S X, Liu W L, Jin Y J, *et al.* Effects of subsoiling depth on topsoil properties, crop yield and water use efficiency in lime concretion black soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018,26(9):1355.
- [8] Cui X J, Wang Z W, Zhuang T F, *et al.* Improving wheat seedling quality through deep ploughing and soil compaction at sowing in lime concretion black soil [J]. *PLoS One*, 2023, 18 (7):e0288459.
- [9] 孟庆阳,王永华,靳海洋,等. 耕作方式与秸秆还田对砂姜黑土土壤酶活性及冬小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016,36 (3):341.
Meng Q Y, Wang Y H, Jin H Y, *et al.* Effect of tillage and straw returning on soil enzyme activity and yield of winter wheat in lime concretion black soil [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016,36(3):341.
- [10] 刘淑梅,孙武,张瑜,等. 小麦季不同耕作方式对砂姜黑土玉米农田土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 玉米科学, 2018,26(1):103.
Liu S M, Sun W, Zhang Y, *et al.* Effects of wheat tillage managements on soil microbial characters and soil enzyme activities in summer maize season in Shajiang black soil [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018,26(1):103.
- [11] 刘卫玲,程思贤,吴健,等. 深松(耕)时期与方式对砂姜黑土耕层改良及其冬小麦物质积累和养分吸收的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020,54(3):392.
Liu W L, Cheng S X, Wu J, *et al.* Effects of time and pattern of deep tillage (subsoiling) on topsoil improvement, biomass accumulation and nutrient absorption of winter wheat in lime concretion black soil [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020,54(3):392.
- [12] Liu D H, Tian B X, Zhang M Q, *et al.* Meta-analysis of the effects of different tillage methods on wheat yields under various conditions in China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2025,248:106449.
- [13] 隋鹏祥,罗洋,李瑞平,等. 长期耕作对农田黑土几丁质降解菌群及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2023,60(6):1799.
Sui P X, Luo Y, Li R P, *et al.* Effects of long-term different tillage practices on chitin degrading microbial communities and chitinase activity in farmland black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023,60(6):1799.
- [14] Lu Q, Zhao J H, Liu L J, *et al.* Design and experiment of a soil-covering and pressing device for planters [J]. *Agriculture*, 2024,14(7):1040.
- [15] Cui X J, Wang Z W, Zhuang T F, *et al.* Improving wheat seedling quality through deep ploughing and soil compaction at sowing in lime concretion black soil [J]. *PLoS One*, 2023, 18(7):e0288459.
- [16] Van Noordwijk M, Schoonderbeek D, Kooistra M J. Root-soil contact of field-grown winter wheat [J]. *Geoderma*, 1993,56 (1-4):277.
- [17] 董成,尚书旗,王东伟,等. 基于有限元分析的动力驱动耙的设计与试验[J]. 农机化研究, 2024,46(11):74.
Dong C, Shang S Q, Wang D W, *et al.* Design and test of power driven rake based on finite element analysis [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024,46(11): 74.
- [18] 范森珍,尹昌,范分良,等. 长期不同施肥对红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015,26(3):833.
Fan M Z, Yin C, Fan F L, *et al.* Effects of different long-term fertilization on the activities of enzymes related to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in a red soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015,26(3):833.
- [19] 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.
- [20] Ozlu E, Arriaga F J. Temporal variations in soil aggregate reformation behaviors after disturbance by tillage [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2024,88(2):434.
- [21] Isaak M, Azawi A, Turkey T. Influence of various tillage systems and tillage speed on some soil physical properties [J]. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 2024, 20 (1):37.

- [22] Amanor Y J, Hanly J A, Calvelo-Pereira R, et al. Changes to soil profile carbon and nutrient distribution following pasture renewal with full inversion tillage [J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2025, 68(6): 1481.
- [23] Seyedsadr S, Šipek V, Jačka L, et al. Biochar considerably increases the easily available water and nutrient content in low-organic soils amended with compost and manure [J]. *Chemosphere*, 2022, 293: 133586.
- [24] 龙潜, 董士刚, 朱长伟, 等. 不同耕作模式对小麦-玉米轮作下潮土养分和作物产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 167.
Long Q, Dong S G, Zhu C W, et al. Effects of different tillage modes on soil nutrient and crop yield under wheat-maize rotation system in the fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 167.
- [25] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 78.
Zhang R F, Yang H S, Gao J L, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 78.
- [26] 郭书亚, 尚赏, 汤其宁, 等. 不同轮耕方式与生物炭对土壤酶活性、土壤养分及小麦和玉米产量的影响[J]. *作物杂志*, 2022(3): 211.
Guo S Y, Shang S, Tang Q N, et al. Effects of different rotation tillage methods and biochar on soil enzyme activity, soil nutrients and yield of wheat and maize [J]. *Crops*, 2022(3): 211.
- [27] 温美娟, 杨思存, 王成宝, 等. 不同耕作和秸秆还田方式对灰钙土土壤理化性状、酶活性及玉米产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(3): 903.
Wen M J, Yang S C, Wang C B, et al. Effects of different tillage and straw returning on soil physicochemical properties, enzyme activities in sierozem, and maize yield [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(3): 903.
- [28] Roldán A, Salinasgarcía J R, Alguacil M M, et al. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions [J]. *Geoderma*, 2005, 129(3-4): 178.
- [29] Pandey D, Agrawal M, Bohra J S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 51.
- [30] Wen L S, Peng Y, Zhou Y R, et al. Effects of conservation tillage on soil enzyme activities of global cultivated land: A meta-analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118904.
- [31] 赵刚, 吴会军, 张永清, 等. 豫西长期不同耕作下土壤肥力质量评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 1.
Zhao G, Wu H J, Zhang Y Q, et al. Evaluation of soil fertility quality under long-term different tillage measures in western Henan [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(6): 1.
- [32] 吴金芝, 汪洪涛, 侯园泉, 等. 提升雨养夏玉米-冬小麦两熟体系生产力和土壤硝态氮累积的最优耕作模式[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(4): 614.
Wu J Z, Wang H T, Hou Y Q, et al. Optimum tillage pattern with high crop productivity and soil nitrate-N accumulation in rain-fed summer maize and winter wheat double cropping system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(4): 614.
- [33] 朱长伟, 孟威威, 石柯, 等. 不同轮耕模式下小麦各生育时期土壤养分及酶活性变化特征[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(21): 4237.
Zhu C W, Meng W W, Shi K, et al. The characteristics of soil nutrients and soil enzyme activities during wheat growth stage under different tillage patterns [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(21): 4237.
- [34] 顾克军, 张传辉, 顾东祥, 等. 短期不同秸秆还田与耕作方式对土壤养分与稻麦周年产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(6): 1408.
Gu K J, Zhang C H, Gu D X, et al. Effects of different straw returning and tillage methods on annual yield and soil nutrients under rice-wheat rotation system in short-term [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(6): 1408.
- [35] 徐海, 王益权, 刘军, 等. 关中旱地小麦生育期土壤速效养分时空变异特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 62.
Xu H, Wang Y Q, Liu J, et al. The spatio-temporal variability of soil available nutrients in the Guanzhong plain [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 62.
- [36] 王玉玲, 李军, 柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬麦玉米轮作土壤生产性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 107.
Wang Y L, Li J, Bai W X. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in Loess Platform region of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 107.
- [37] Li J W, Chen L, Zhang C Z, et al. Combining rotary and deep tillage increases crop yields by improving the soil physical structure and accumulating organic carbon of subsoil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 244: 106252.
- [38] 谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 167.
Xie Y X, Jin H Y, Meng Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 167.
- [39] 张晓平, 李文凤, 梁爱珍, 等. 中层黑土不同耕作方式下玉米和大豆产量及经济效益分析[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 858.
Zhang X P, Li W F, Liang A Z, et al. Yield and profitability of corn and soybean under different tillage in the black soils of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 858.
- [40] 刘世平, 陈后庆, 陈文林, 等. 不同耕作方式与秸秆还田周年生产力的综合评价[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 82.
Liu S P, Chen H Q, Chen W L, et al. Comprehensive evaluation of tillage and straw returning on yearly productivity [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(4): 82.
- [41] Bienes R, Marques M J, Sastre B, et al. Tracking changes on soil structure and organic carbon sequestration after 30 years of different tillage and management practices [J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): 291.