麦类作物学报 2026,46(9):1241－1251
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.12

网络出版时间:2026-09-10
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260910.1515.005

耕作与秸秆还田方式对土壤养分、微生物及小麦-玉米产量的影响

赵立尚[1],张小美[2],李易涵[2],江海松[1],杨天聪[2],
苗任重[1],段剑钊[2],冯 伟[2],张海燕[2],李 晓[3]

(1.驻马店市农业科学院,河南驻马店 463000; 2.河南农业大学/国家小麦工程技术研究中心,河南郑州 450002;
3.河南农业大学理学院, 河南郑州, 450002)

摘 要:为明确不同耕作与秸秆还田方式对土壤养分、微生物和作物产量的影响,在黄淮海冬小麦-玉米轮作条件下,设置浅旋耕＋无秸秆还田(SN)、浅旋耕＋秸秆还田(SR)、浅旋耕＋秸秆生物炭还田(SC)、深耕＋无秸秆还田(DN)、深耕＋秸秆还田(DR)、深耕＋秸秆生物炭还田(DC)6个处理,比较不同耕作措施及秸秆还田方式对土壤养分状况、酶活性和细菌数量的影响,并对小麦和玉米干物质积累量及产量进行了分析。结果表明,与SN处理相比,深耕＋秸秆还田或秸秆生物炭还田均可有效提高0～40 cm土层的全氮、速效氮、全磷、速效磷及速效钾等养分含量;其他处理显著提高了土壤中蔗糖酶、磷酸酶和脲酶等酶的活性,说明秸秆还田与深耕及其协同作用有利于提高土壤生物活性和养分循环效率。耕作方式与秸秆还田显著影响土壤微生物丰度,与SN相比,其他处理均增加了土壤中细菌、真菌和放线菌的数量。深耕配合秸秆还田或秸秆生物炭还田提高了冬小麦和夏玉米干物质积累量和产量。因此,深耕、秸秆还田与秸秆生物炭还田有利于提高土壤肥力,促进小麦-玉米干物质积累和增产。

关键词:耕作;秸秆还田;生物炭;产量;微生物;土壤养分
中图分类号:S512.1; S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1241-11

Effects of Tillage and Straw Incorporation Practices on Soil Nutrients, Microbial Communities and Wheat-Maize Yield

Zhao Lishang[1], Zhang Xiaomei[2], Li Yihan[2], Jiang Haisong[1], Yang Tiancong[2], Miao Renzhong[1], Duan Jianzhao[2], Feng Wei[2], Zhang Haiyan[2], Li Xiao[3]

(1. Zhumadian Academy of Agricultural Sciences, Zhumadian, Henan 463000, China; 2. Henan Agricultural University/National Wheat Engineering Technology Research Center, Zhengzhou, Henan 450002, China; 3. School of Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: To clarify the effects of different tillage and straw return practices on soil nutrients, microorganisms and crop yield, six treatments were conducted under the field soil conditions of the Huang-Huai-Hai winter wheat-maize rotation system: shallow rotary tillage without straw return(SN), shallow rotary tillage with straw return(SR), shallow rotary tillage with biochar application(SC), deep tillage without straw return(DN), deep tillage with straw return(DR), and deep tillage with biochar application(DC). The study compared the effects of different tillage practices and straw return methods on soil nutrient status, enzyme activity, and bacterial abundance, as well as on dry matter accumulation and yield components of wheat and maize. The results showed that under deep plowing conditions, combining straw incorporation or straw biochar incorporation effectively increased nutrient

收稿日期:2026-03-06 修回日期:2026-04-09
基金项目:中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室资助项目(AMF202602);河南省科技攻关项目(242102111084)
第一作者 E-mail:lishang158@163.com(赵立尚)
通讯作者 E-mail:lixiao-1112@126.com(李 晓)

contents in the 0—40 cm soil layer, including total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, and available potassium. Compared with the SN treatment, the other treatments significantly increased soil enzyme activity, particularly sucrase, phosphatase, and urease, indicating that the effect of straw return, tillage measures and their incorporation are beneficial for enhancing soil biological activity and nutrient cycling efficiency. Tillage practices and straw return significantly influenced soil microbial abundance. Compared with SN, all other treatments increased the populations of bacteria, fungi and actinomycetes. At the same time, deep plowing combined with straw return or straw biochar application promoted dry matter accumulation in winter wheat and summer maize, thereby increasing crop yields. Therefore, deep plowing, straw return, and straw biochar application are beneficial for improving soil fertility and increasing dry matter and yield of wheat and maize.

Keywords: Tillage; Straw return; Biochar; Yield; Microorganisms; Soil nutrients

土壤是农田生态系统中物质循环与能量转换的关键载体,其质量显著影响作物生产力和生态系统稳定性[1]。通过合理农田管理措施提升土壤肥力、增强碳汇功能并稳定作物产量,是实现农业高质量发展的重要途径。

耕作措施是改善土壤耕层质量和提高作物生产力的有效途径[2-3]。适宜的耕作方式对土壤理化性质具有重要调节作用,可改善土壤结构状况,提升土壤保水能力,并促进土壤肥力的提高[4-5]。秸秆还田可促进土壤有机碳积累与养分循环,但是在分解过程中可能会产生激发效应,加速土壤有机碳的矿化[6]。相较之下,将秸秆转化为生物炭后还田,其稳定的芳香结构有利于增强土壤碳库稳定性,改善土壤阳离子交换能力,提高速效磷、速效钾等养分的有效性,进而提高土壤生产能力[7]。合理的耕作措施与秸秆还田方式对土壤养分循环及其空间分布具有显著调节作用,可在一定程度上改善土壤肥力与质量,促进作物的生长及产量形成[8-9]。

土壤微生物与土壤酶是促进土壤养分转化与循环、有机质分解及微生物活性的核心生物因子[10-11]。研究表明,耕作措施可通过改变土壤通气性与扰动强度影响微生物群落结构及土壤酶活性,秸秆及生物炭输入可为微生物提供碳源与栖息空间,调控其类群的丰度与多样性;旋耕、秸秆不还田处理相比于深松、秸秆还田处理的土壤酶活性下降三分之一[12]。蔗糖酶、脲酶、磷酸酶等活性是反映碳、氮、磷循环强度的重要指标,其变化可作为土壤肥力变化的重要生物学表征[13]。研究表明,免耕处理下 0～40 cm 土层的蔗糖酶活性高于旋耕处理[14]。也有研究表明,旋耕对不同土层酶活性的影响存在差异,使 0～20 cm 土层的酶活性增加,而 20～40 cm 土层的酶活性下降[15-16]。免耕结合秸秆还田较旋耕处理能显著提升 0～10 cm 土层的蔗糖酶和纤维素酶等与碳循环相关的土壤酶活性[17]。合理耕作措施与秸秆还田可优化土壤生态环境、提升土壤肥力[18]。然而,现有研究对不同耕作深度与秸秆还田、生物炭还田在周年轮作体系中的协同作用机制仍缺乏系统解析。

干物质积累量是作物生长发育的重要表征指标,对产量形成具有决定性作用,其形成主要依赖于土壤养分供给能力及源、库关系协调程度[19]。深松、翻耕等耕作方式相较于免耕和旋耕,可缓解耕层板结,促进根系下扎,提高养分与水分利用效率,显著提升小麦、玉米等作物的干物质积累量[20-21]。秸秆还田能够改善土壤环境,提高土壤还原性物质含量,调节土壤酸碱度,提高冬小麦干物质积累量、花前干物质转运效率、籽粒含氮量及氮素利用效率,对产量及其构成因素形成具有促进作用[22-24]。也有研究发现,该措施会降低小麦千粒重,但有助于增加穗数,显著提高小麦的穗粒数、穗长[25-26]。因此,不同耕作方式与秸秆还田方式是否在冬小麦-夏玉米周年轮作体系中产生叠加或交互效应,仍有待进一步验证。

本研究以黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作模式为研究对象,设立不同耕作和秸秆还田方式相结合的两年定位试验,分析不同耕作措施及秸秆还田方式对土壤酶活性、土壤微生物、土壤养分及周年小麦和玉米干物质积累量和产量的影响,为农业生产中实现提高土壤质量和农作物产量的共赢目标提供参考依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2021 年 10 月—2023 年 6 月在河南省新乡市原阳县福宁集镇(35°6′N,113°56′E)进行。该地区年均无霜期 233 d,年均降水量 566.2 mm,年均气温 14.4 ℃,土壤类型为潮土,试验前耕层土壤含有机质 7.37 g·kg^{-1}、速效氮 45.72 mg·kg^{-1}、速效磷 9.14 mg·kg^{-1}、全氮 0.68 g·kg^{-1}、全磷 617.55 mg·kg^{-1}、全钾 13.51 g·kg^{-1}。

1.2　试验设计

于 2021 年 10 月开始,选用冬小麦品种鑫华麦 818 和夏玉米品种郑单 958,采用双因素随机区组设计,包括浅旋耕(S)和深耕(D)2 种耕作方式,以及不还田(N)、直接还田(R)和生物炭还田(C)3 种秸秆还田类型,共 6 个处理,3 次重复,小区面积 21 m^2(3 m×7 m)。小区采用水泥池,地面与大田持平,池深 1.5 m,底部与大田连通。秸秆直接还田指前茬收获后将秸秆粉碎至小于 5 cm 并均匀撒于土壤表面,施用量为各小区上季秸秆产量;生物炭还田指移除地上秸秆后撒施秸秆生物炭 2.25 t·hm^{-2}。冬小麦和夏玉米施肥量一致,均施用纯氮(尿素)240 kg·hm^{-2}、纯磷(过磷酸钙)120 kg·hm^{-2} 和纯钾(氯化钾)90 kg·hm^{-2}。氮肥基追比 5∶5,冬小麦基肥(50%氮和全部磷、钾肥)在播前均匀施入,与还田的秸秆或生物炭旋耕入土,拔节期追肥;玉米基肥在出苗后 7～14 d 施用,大喇叭口期追肥,均采用沟施方式。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　干物质积累量测定

在小麦孕穗期、开花期、灌浆中期及成熟期,每小区选取 20 株代表性植株,重复 3 次;玉米在拔节期、大喇叭口期、吐丝期、乳熟期及成熟期,每小区选取 3 株代表性植株,重复 3 次。将植株按茎、叶、穗等器官分离,在 105 ℃烘箱中杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,计算干物质积累量。

1.3.2　产量测定

在作物成熟期,小麦每小区选取 5 m^2 样点,测定穗数、千粒重和产量;玉米则选取生长均匀的 3 行,每行长 5 m,测定每行穗数、穗粒数、百粒重和产量。

1.3.3　土壤样品采集与测定

自 2021 年 6 月起,每季作物播种前和收获后,每个小区采用五点法取 0～20 cm 和 20～40 cm 土壤样品各 200 g。各小区土样按土层混合,去除残枝、根系、杂草和石砾后过 2 mm 筛。一半样品自然风干后,用于测定全磷、全钾、速效钾等基础养分含量[15];另一半样品置于有冰袋的保温箱带回实验室,并保存在－80 ℃冰箱中,用于土壤酶活性及微生物数量测定,其中,土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶的活性分别采用苯酚钠－次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、紫外分光光度法、磷酸苯二钠比色法测定;采用平板计数法测定土壤微生物群体数量,细菌采用牛肉胨培养基平板计数法,真菌采用马丁氏培养基平板计数法,放线菌采用高氏 1 号培养基计数法。

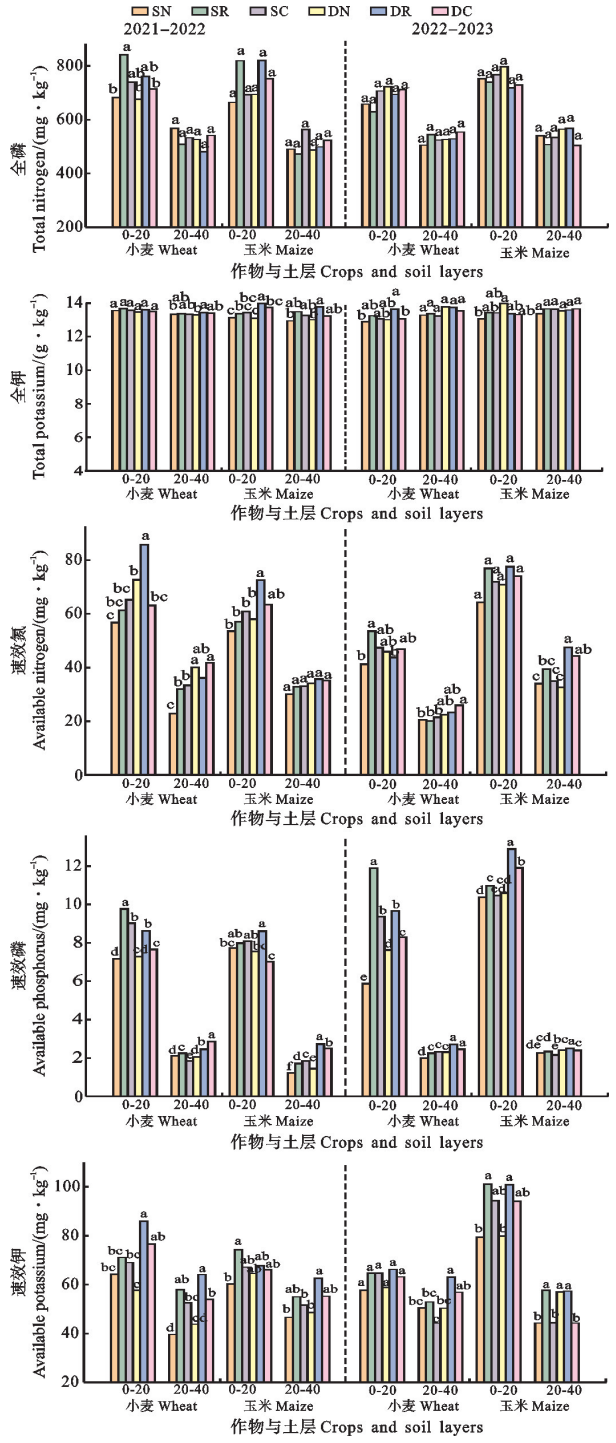
1.4　数据统计分析

土壤酶活性和微生物数量仅为 2022－2023 小麦季和 2023 年玉米季数据。利用 Excel 2019 和 Origin 2022 对试验数据进行处理与作图,并利用 SPSS 进行方差分析,用 Duncan 法进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　耕作与秸秆还田方式对土壤养分含量的影响

由图 1 可知,不同耕作与秸秆还田方式对小麦-玉米轮作系统土壤养分含量有显著影响。与 SN 处理相比,SR 处理在 2021—2022 年度小麦季 0～20 cm 土层全磷含量显著增加,增幅 23.22%,SC、DN、DR、DC 处理的增幅分别为 8.42%、－0.82%、11.62%、4.75%;在 2022 和 2023 年玉米季、2022—2023 年度小麦季,各处理间 0～20 cm 和 20～40 cm 土层的全磷含量差异均不显著。就土壤全钾而言,DR 较 SN 处理在 2022 年玉米季 0～20 cm 和 20～40 cm 土层、2022—2023 年度小麦季 0～20 cm 土层显著增加,增幅分别为 6.47%、6.34%、5.90%,其余处理间差异均不显著。就土壤速效氮而言,与 SN 处理相比,2021－2022 年小麦季 0～20 cm 土层 DN 和 DR 处理、20～40 cm 土层 SR、SC、DN、DR 和 DC 处理均显著升高,增幅分别为 28.13%、51.18%、39.97%、45.97%、75.26%、58.23%和 82.75%;2022 年玉米季 0～20 cm 土层 DR 处理显著增加(35.43%),20～40 cm 土层各处理差异均不显著;2022－2023 年小麦季 0～20 cm 土层 SR 处理和 20～40 cm 土层 DC 处理显著增加,增幅 29.96%、26.20%;2023 年玉米季 0～20 cm 土层各处理间差异均不显著,20～40 cm 土层 DR 和 DC 处理显著增加,增幅分别为 39.46%和 30.29%;其余处理与 SN 处理差异均不显著。



SN：浅旋耕＋无秸秆还田；SR：浅旋耕＋秸秆还田；SC：浅旋耕＋生物炭还田；DN：深耕＋无秸秆还田；DR：深耕＋秸秆还田；DC：深耕＋生物炭还田。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。

SN: Shallow rotary tillage＋straw return; SR: Shallow rotary tillage＋straw return; SC: Shallow rotary tillage＋biochar return; DN: Deep rotary tillage＋straw return; DR: Deep rotary tillage＋straw return; DC: Deep rotary tillage＋biochar return. Different lower case letters above the columns indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same in figures 2－4.

图 1 不同耕作与秸秆还田方式下小麦-玉米轮作中土壤养分含量

Fig. 1 Soil nutrient contents in wheat-maize rotation under different tillage and straw returning methods

对土壤速效磷，与 SN 处理相比，2021－2022 年小麦季 0～20 cm 土层的 SR（36.12%）、SC（25.80%）、DR（20.22%）和 DC（6.83%）处理显著增加，20～40 cm 土层 SR（6.64%）、DR（16.59%）和 DC（35.55%）处理显著增加，SC 处理显著降低（－12.80%）；2022 年玉米季 0～20 cm 土层 DR 处理显著增加（11.38%），20～40 cm 土层 SR（39.02%）、SC（49.59%）、DN（17.07%）、DR（121.95%）、DC（103.25%）处理显著增加；2022－2023 小麦季 0～20 cm 和 20～40 cm 土层 SR（102.21%和 13.07%）、SC（59.18%和 17.09%）、DN（29.76%和 16.08%）、DR（64.29%和 36.18%）、DC（40.99%和 23.62%）处理均显著增加；2023 年玉米季 0～20 cm 土层 SR（5.79%）、DR（24.30%）、DC（14.85%）显著增加，20～40 cm 土层 DN（7.08%）、DR（11.06%）和 DC（6.19%）处理显著增加，SC 处理显著降低（－4.42%）。就土壤速效钾而言，与 SN 处理相比，2021－2022 年小麦季 0～20 cm 土层 DR 处理显著增加（33.56%），20～40 cm 土层 SR、SC、DR 和 DC 处理显著增加，增幅分别为 46.42%、32.98%、62.16%和 36.39%；2022 年玉米季 0～20 cm 土层 SR 处理显著增加（23.30%），20～40 cm 土层 DR 处理显著增加（34.54%）；2022－2023 年小麦季 0～20 cm 土层各处理间差异均不显著，20～40 cm 土层 DR 处理显著增加（25.25%）；2023 年玉米季 0～20 cm 土层 SR 和 DR 处理显著增加，增幅 27.53%和 27.22%，20～40 cm 土层 SR、DN 和 DR 处理显著增加，增幅分别为 30.39%、28.85%和 29.58%。综上所述，耕作与秸秆还田方式对土壤养分的影响程度与土层深度和作物种类有关，对全磷和全钾含量的影响较小，对速效氮、速效磷和速效钾含量影响较大；深耕可提高土壤速效养分含量，DR 处理效应最高。

2.2 耕作与秸秆还田方式对土壤酶活性的影响

由图 2 可知，在 2022—2023 年度小麦季和 2023 年玉米季，耕作与秸秆还田方式对土壤酶活性有显著影响。与 SN 处理相比，SR（44.31%和 16.54%）、SC（16.26%和 15.44%）、DN（26.02%和 16.54%）、DR（52.03%和 20.96%）、DC（32.11%和 12.13%）处理的蔗糖酶活性均显著增加；其中 DR 处理在小麦季和玉米季的蔗糖酶活性最高。对于土壤过氧化氢酶活性，小麦季各处理间无显著差异；在玉米季，DR 较 SN 处理显著降低，其

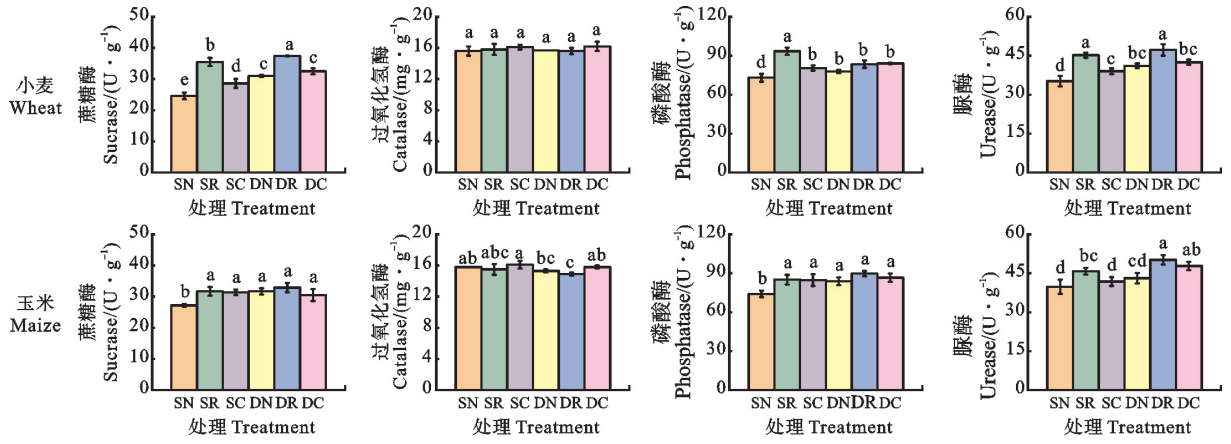


图 2　不同耕作与秸秆还田方式下小麦-玉米轮作中土壤酶活性

Fig. 2　Soil enzyme activity in wheat-maize rotation under different tillage and straw returning methods

他处理与 SN 处理间差异不显著。对磷酸酶活性,与 SN 处理相比,小麦季和玉米季的 SR(27.95%和 14.84%)、SC(10.27%和 14.44%)、DN(6.58%和 13.23%)、DR(14.38%和 21.05%)、DC(15.21%和 16.87%)处理均显著增加;小麦季 SR 处理显著高于其他处理;玉米季中,DN 和 DC 处理较高,但除 SN 外各处理间差异均不显著。就脲酶活性而言,与 SN 处理相比,小麦季 SR(28.41%)、SC(10.80%)、DN(16.76%)、DR(34.09%)、DC(20.74%)处理均显著提高;玉米季,SR(15.08%)、DR(26.13%)、DC(20.10%)处理显著提高。综上所述,深耕和秸秆还田均可显著提高土壤蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性。

2.3　耕作与秸秆还田方式对土壤微生物数量的影响

由图 3 可知,与 SN 相比,2022—2023 年度小麦季和 2023 年玉米季的 SR、SC、DN、DR 和 DC 处理对土壤细菌、真菌和放线菌数量均有提高效应。对土壤细菌数量小麦季 SR、SC、DN、DR、DC 处理较 SN 处理分别增加 29.16%、10.49%、6.79%、27.69%、24.26%,其中 SR、SC、DR、DC 增加显著;玉米季 SR、SC、DN、DR、DC 较 SN 处理分别增加 15.69%、8.97%、2.29%、14.81%、7.04%,SR 与 DR 处理增加显著。对土壤真菌数量,小麦季和玉米季的 SR(65.84%和 23.73%)、SC(56.27%和 18.07%)、DR(74.85%和 19.66%)和 DC(58.84%和 11.86%)处理较 SN 均显著提高,DN 与 SN 处理间差异不显著。对土壤放线菌数量,与 SN 处理相比,小麦季 SR(55.41%)、SC(47.51%)、DN(31.59%)、DR(61.85%)、DC(47.14%)处理显著增加,玉米季的 SR(24.21%)、SC(7.92%)、DR(27.00%)、DC(8.36%)处理显著增加;DR 与 SR 处理在两季均较高。综合来看,DR 和 SR 处

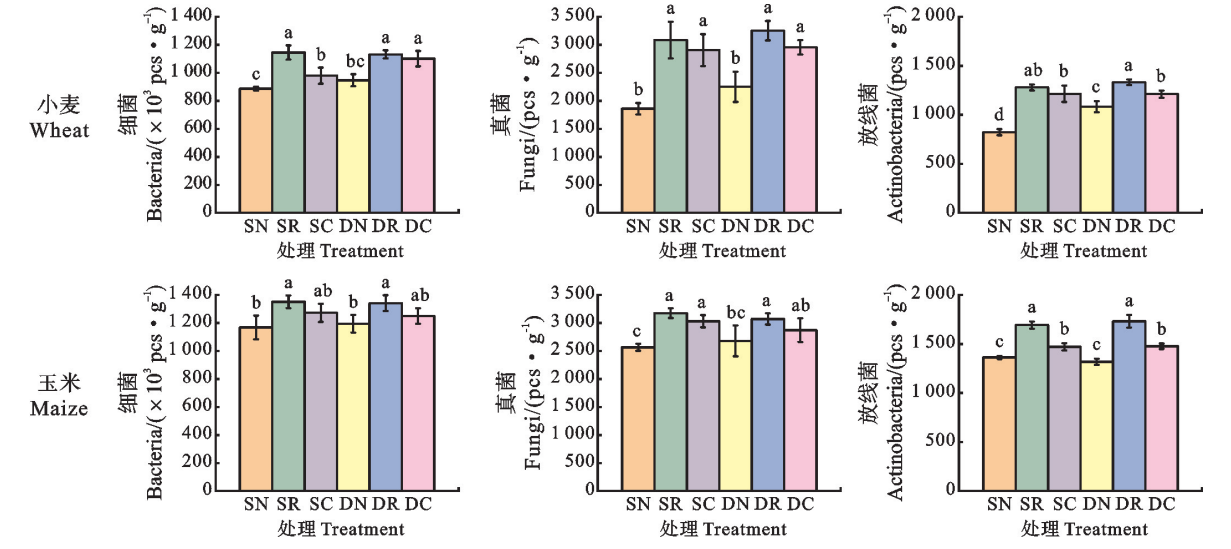


图 3　不同耕作与秸秆还田方式下小麦-玉米轮作中土壤微生物数量

Fig. 3　Soil microbial abundance in wheat-maize rotation under different tillage and straw returning methods

理对土壤微生物数量的增幅较大，DC 次之，而 DN 处理效应较弱。这表明秸秆还田较深耕提高土壤微生物数量的效应更大。

2.4 耕作与秸秆还田方式对干物质积累量的影响

由图 4 可知，小麦和玉米的干物质积累量均随着生育期的推进而增加。2021—2022 和 2022—2023 年度小麦 DR 处理（8.52×10³ kg·hm⁻²～15.45×10³ kg·hm⁻²）的干物质积累量最高，DC 处理（8.21×10³ kg·hm⁻²～14.97×10³ kg·hm⁻²）次之，SN（7.30×10³ kg·hm⁻²～12.73×10³ kg·hm⁻²）最低。2022 和 2023 年玉米 DR 处理（0.90×10³ kg·hm⁻²～19.42×10³ kg·hm⁻²）干物质积累量最高，DC 处理（0.82×10³ kg·hm⁻²～18.17×10³ kg·hm⁻²）次之，SN 处理（0.56×10³ kg·hm⁻²～14.33× 10³ kg·hm⁻²）最低。小麦和玉米的 DC 处理的干物质积累量（0.64× 10³ kg·hm⁻²～17.36×10³ kg·hm⁻²）明显高于 SN（0.56× 10³ kg·hm⁻²～19.42×10³ kg·hm⁻²）处理。秸秆还田方式间比较，小麦和玉米 SN（0.56 ×10³ kg·hm⁻²～7.68 ×10³ kg·hm⁻²）、DN（0.64×10³ kg·hm⁻²～17.38×10³ kg·hm⁻²）处理的干物质积累量低于 SR（0.60×10³ kg·hm⁻²～17.36×10³ kg·hm⁻²）和 SC（0.57×10³ kg·hm⁻²～15.59×10³ kg·hm⁻²）、DR（0.90×10³ kg·hm⁻²～19.42×10³ kg·hm⁻²）、DC（0.82×10³ kg·hm⁻²～18.17×10³ kg·hm⁻²）处理。因此，DR、DC 处理更有助于提高小麦干物质积累。

2.5 耕作与秸秆还田方式对作物产量的影响

由表 1 可知，在小麦季，由 F 值可知，耕作与秸秆还田方式对穗数和产量有显著效应，年份对穗数、穗粒数、千粒重和产量均有显著效应，耕作与秸秆还田方式和年份仅对穗数有显著交互效应。耕作和秸秆还田方式主要通过影响穗数与穗粒数影响小麦产量，千粒重变化不显著。与 SN 处理相比，在 2021—2022 年度，SC、DN 和 DC 处理的穗数显著提高，增幅分别为 15.26%、12.13%、15.04%，SR、DR 较 SN 处理穗数差异不显著；2022—2023 年度，SR、SC、DN、DR 和 DC 处理的穗数分别提高 1.32%、4.32%、7.64%、2.33%、12.96%，DC 处理显著高于其他处理。2021－2022 年度，SR、SC、DN、DR 和 DC 处理穗粒数较 SN 处理有不同程度提高，2022－2023 年度各处理间差异均不显著。对小麦产量，2021—2022 年度

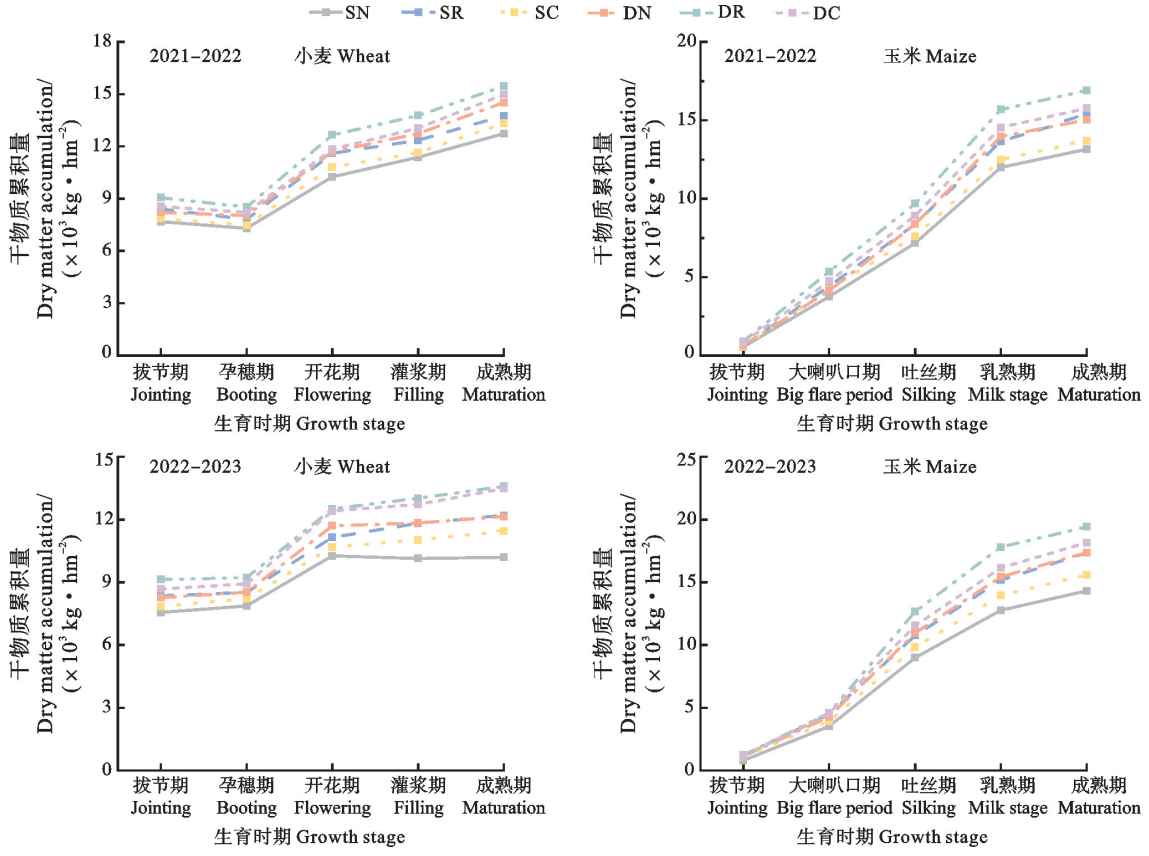


图 4 不同耕作与秸秆还田方式下小麦和玉米干物质累积量

Fig. 4 Dry matter accumulation of wheat and maize under different tillage and straw returning methods

表 1　耕作与秸秆还田方式对冬小麦、夏玉米产量及其组成因子的影响

Table 1　Effects of tillage and straw returning on yield and yield components of winter wheat and summer maize

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Number of spikes/($\times10^4$ · hm^{-2})	穗粒数 Spikelet number	千(百)粒重 Thousand(hundred)-grain weight/g	产量 Yield/($\times10^3$ kg · hm^{-2})
2021－2022 小麦	SN	566.75±16.88bc	37.68±0.89b	50.48±1.87a	9.95±0.17c
2021－2022 Wheat	SR	537.00±11.32c	38.32±0.6ab	50.33±0.83a	10.62±0.28ab
	SC	653.25±26.84a	38.18±1.75ab	50.49±1.79a	10.16±0.42bc
	DN	635.50±14.29a	40.48±0.68a	51.13±1.44a	10.58±0.33ab
	DR	588.00±27.5bc	40.17±1.37ab	50.98±1.88a	10.84±0.13a
	DC	652.00±30.05a	40.25±1.99ab	51.29±1.23a	10.73±0.29a
2022－2023 小麦	SN	501.92±14.44b	41.13±2.22a	41.50±2.75a	6.57±0.21c
2022－2023 Wheat	SR	508.57±40.75b	43.03±2.57a	42.77±0.35a	7.19±0.1ab
	SC	523.60±45.39ab	43.13±2.39a	41.77±1.55a	6.77±0.26bc
	DN	540.27±15.03ab	44.22±1.77a	42.50±0.53a	7.09±0.32ab
	DR	513.59±12.86ab	43.88±1.14a	41.83±0.65a	7.59±0.24a
	DC	566.96±18.94a	44.42±2.43a	43.10±1.10a	7.18±0.43ab
F	处理 Trement(T)	11.203**	2.674	0.540	9.216**
	年份 Year(Y)	89.132**	48.293**	296.626**	1 322.849**
	Y×T	2.646*	0.171	0.228	0.187
2022 玉米	SN	6.53±0.34ab	470.03±50.2a	35.78±1.58a	8.55±0.22c
Maize	SR	6.33±0.30c	495.00±34.03a	32.11±2.16ab	9.39±0.28b
	SC	6.95±0.35a	510.83±14.60a	30.76±2.56b	8.91±0.3bc
	DN	6.95±0.48a	483.00±24.58a	32.98±2.57ab	9.28±0.26b
	DR	6.81±0.17ab	508.67±35.9a	34.36±1.89ab	10.15±0.16a
	DC	7.36±0.59a	512.64±35.1a	33.53±2.63ab	9.41±0.36b
2023 玉米	SN	7.54±0.14ab	482.13±25.15a	33.58±0.91a	10.58±0.20c
2023 Maize	SR	7.22±0.14b	485.57±26.76a	33.76±0.64a	11.87±0.09ab
	SC	7.62±0.24a	503.12±27.4a	33.41±0.51a	11.53±0.17b
	DN	7.54±0.14ab	484.80±20.91a	33.8±0.90a	11.74±0.27ab
	DR	7.30±0.14ab	485.29±42.42a	32.58±0.48a	12.15±0.21a
	DC	7.62±0.24a	502.40±26.84a	32.94±0.36a	11.90±0.38ab
F	处理 Trement(T)	3.677*	0.949	1.530	25.894**
	年份 Year(Y)	70.386**	0.337	0.027	760.637**
	Y×T	0.848	0.216	2.010	1.587

相同作物同一年份的同列数据后不同小写字母表示处理间差异在 0.05 水平上显著。*:$P<0.05$;**:$P<0.01$。

Different letters following data within same crop, year and column mean significant difference among treatments at 0.05 level. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

SR、DC、DN 和 DR 处理较 SN 处理显著提高,增幅分别为 6.73%、7.84%、6.33%、8.94%,2022—2023 年度 SR、DN、DR 和 DC 较 SN 处理显著提高,增幅分别为 9.44%、7.91%、15.53%、9.28%,两个年度 SC 与 SN 处理间差异均不显著。这说明秸秆生物炭还田和深耕更有利于增加小麦穗数;秸秆还田与深耕均增加了小麦穗粒数,且深耕效果较明显;秸秆还田与深耕均可提高小麦产量,秸秆直接还田的效应大于秸秆生物炭还田。

在玉米季,由 *F* 值可知,不同处理对穗数影响显著,对产量影响极显著($P<0.01$),对穗粒数和百粒重影响不显著;年份对穗数和产量影响极显著,对穗粒数和百粒重影响不显著;年份与处理互作对各指标的影响均不显著。2022 年 SR 处理的穗数显著低于 SC、DN 和 DC 处理,其余处理间差异均不显著;2023 年 SC 和 DC 处理的穗数显著高于 SR 处理,其余处理间差异均不显著。两个年份各处理间穗粒数和百粒重的差异均不显

著。与 SN 处理相比，2022 年 SR、SC、DN、DR 和 DC 处理产量分别提高 9.82%、4.21%、8.54%、18.71% 和 10.06%，其中 SR、DN、DR 和 DC 处理显著提高；2023 年上述处理均显著提高，增幅依次为 12.19%、8.98%、10.96%、14.84% 和 12.48%。综合两年平均值，在深耕和浅耕条件下，秸秆生物炭还田较秸秆不还田分别增产 1.38% 和 6.85%，秸秆还田分别增产 6.09% 和 11.13%；在相同秸秆处理条件下，深耕较浅耕增产 4.26%～9.88%；DR 处理在两个年份的产量均最高。

3 讨论

本研究分析了小麦-玉米轮作系统不同处理下 0～20 cm 与 20～40 cm 两个土层养分含量的变化，发现不同耕作措施对土壤养分含量的效应与土层深度有关。秸秆还田使 0～20 cm 表层土养分含量显著提高（SR 处理全磷增加 23.22%，小麦季速效磷增幅达 102.21%），而深耕使 20～40 cm 土层被测养分含量整体升高，但多数指标差异不显著，说明单纯深耕在短期内对深层土壤养分含量的驱动作用有限。这与 Niu 等[2]在华北平原长期试验中得出的结论一致。DR 和 DC 处理对土壤速效氮和速效磷含量有显著提高效应，这与赵亚丽等[12]研究结果一致。可能因为耕作和秸秆还田方式的增益机制并非任意单因素的简单叠加，而是深耕改善了秸秆分解产物向深层的运移通道[19-20]。

土壤酶活性作为土壤生化过程的核心驱动因子，其变化直接反映了土壤理化性质、养分含量及耕作方式的综合效应[27-28]。本研究结果表明，深耕与秸秆还田对土壤酶活性的影响呈现显著的酶类型特异性与处理互作效应，蔗糖酶、磷酸酶与脲酶活性对秸秆还田均呈显著正响应，表现为 DR＞SR＞DC＞SC＞DN，这主要归因于深耕改善了土壤通气性与根系分布，增强了有机物与微生物的接触频率，有利于碳、氮、磷循环相关酶的活化；而过氧化氢酶活性则表现出明显的生育期依赖性，小麦季各处理间无显著差异，玉米季 DR 较 SN 处理显著降低（5.70%），这可能与玉米季高温加速代谢导致 H_2O_2 底物快速分解有关，也印证了该酶不能与其他循环酶等同评价的观点[29-31]。深耕可改善土壤物理结构，秸秆还田可提供有机底物，二者配合实现了对酶促循环过程的协同强化，使蔗糖酶与脲酶活性（增幅 52.03% 和 34.09%）显著高于 SN 处理，有效提升了养分转化与供给效率；相比之下，深耕虽可改善根层环境，但缺乏有机质输入导致上述酶活性增幅有限，凸显了有机物在酶合成与分泌中的关键作用[32-34]。综上所述，深耕与秸秆还田通过优化土壤微环境与底物供给，显著增强了土壤酶活性，为养分释放与作物吸收奠定了生物学基础。

土壤微生物丰度对耕作与秸秆还田的响应呈现显著的类群差异性与季节动态性，本研究中，深耕对真菌（DR 处理增幅 74.85%）、放线菌量促进效果大于细菌。可能因为深耕可改善 20～40 cm 土层土壤通气条件，为丝状真菌和放线菌提供了相对稳定的扩展环境，使其菌丝结构得以充分延伸，从而提高种群数量；而细菌对表层有机底物变化更为敏感，受耕层深度影响相对较弱，这与赵亚丽等[12]在小麦-玉米轮作体系中“耕作方式对微生物类群差异调控”的结论一致。秸秆还田通过分解有机物、释放可溶性有机碳为微生物提供充足能源底物，显著增加了微生物数量；生物炭还田则通过其多孔结构改善土壤微环境，形成“微生物庇护所效应”，促进微生物定殖与群落稳定，这与郭晓雯等[7]在盐渍化棉田研究中“生物炭为微生物提供附着位点”的发现一致，其作用机制与秸秆还田的“底物驱动”形成互补。值得注意的是，本研究中夏玉米季土壤中各类微生物数量均明显高于冬小麦季，这可能因为夏季较高的温度加速了微生物代谢速率与底物转化，从而提高微生物群体规模，与张玉娇等[36]、潘雅文等[37]的研究结果一致。本研究跨越冬小麦-夏玉米两季，捕捉到了耕作与还田效应的季节性动态，是方法上的重要优势。综上，深耕与秸秆还田共同调节了土壤物理结构与碳源供给量，重塑了微生物的类群组成与季节动态，为土壤养分循环提供了重要的生物驱动力[3]。

本研究结果表明，深耕（D）、秸秆还田（R）与生物炭还田（C）均可通过提高干物质积累量实现冬小麦与夏玉米增产，其中 DR 处理下两作物各生育期的干物质累积量均最高。深耕的增产效应可能与耕作层孔隙度增加有关，增强了深层土壤保水能力和有机质矿化速率，促进了养分垂直运

移[38-39];而作物干物质积累作为产量形成的物质基础,其效率取决于根系吸收能力、养分供给强度及源库协调程度,适宜的耕作与秸秆还田方式通过改善耕层物理结构与水肥状况促进干物质生产,最终实现高产稳产[9]。分析增产路径发现,小麦产量由穗数与穗粒数共同调控,SR 处理因生育前期耗氮较多导致穗数下降 5.25%,而 DC 凭借缓释特性显著增加穗数(12.96%),说明两种还田方式对穗数的调控机制截然相反[22];玉米产量则主要由穗粒数决定,DR 处理两年均实现最高增产(最高达 18.71%),秸秆生物炭还田(9.07%)对穗粒数的效应显著优于秸秆直接还田(5.31%),这与丁炜等[25]和 Zhang 等[40]的结论一致。与小麦不同,玉米季生物炭的缓释特性对产量构成因素的调控更为有效。年份与处理互作对产量效应不显著,说明各耕作措施效果年际间较为稳定,但两年间小麦和玉米的产量差异均明显,推测气候波动会影响产量构成因素导致产量波动,这与张玉娇等[36]关于温度调控作物生长动态的结论一致。综上,深耕与秸秆还田通过改良土壤物理结构促进养分循环,增强干物质积累量,从而实现增产。

从整体机制上看,深耕打破犁底层后可以改善耕层通气性与养分剖面分布,秸秆直接还田与生物炭还田则通过增加有机碳输入提高养分有效性与底物供给水平,使土壤微生物活性增强、酶促反应加快,促进碳、氮、磷元素的矿化与循环,最终提升根系吸收能力与源库协调效率,表现为干物质积累量与产量提升。本研究通过 SR、SC、DN、DR、DC 5 个处理设计,克服了已有研究分段讨论土壤理化、生物与作物响应的局限[5,26-27];通过 0～20 cm 和 20～40 cm 双层取样揭示了养分调控的土层分异特征,避免了 Gál 等[11]所警示的传统取样深度导致的结论偏差;通过冬小麦-夏玉米两季轮作设计捕捉了微生物的季节调控效应,弥补了已有研究多在单一季节评估的不足[17,36]。本研究发现,单一深耕在短期内对深层养分驱动有限,且秸秆还田年限较短时酶活性累积效应尚不明显,提示评价措施效应时应充分考虑时间尺度与土层深度的交互影响[30-31]。

4　结论

深耕配合秸秆直接还田或秸秆生物炭还田可显著提升 0～40 cm 土层土壤养分含量,增强土壤蔗糖酶、磷酸酶及脲酶活性,提高土壤细菌、真菌与放线菌丰度,显著提高冬小麦和夏玉米干物质积累量和产量。深耕与秸秆还田耦合是兼顾土壤培肥与作物高产稳产的优化耕作模式,可为黄淮海冬小麦－夏玉米轮作体系实现固碳培肥与粮食增产协同发展提供理论依据与实践参考。

参考文献:

[1]Bhatti U A, Bhatti M A, Tang H, *et al*. Global production patterns: Understanding the relationship between greenhouse gas emissions, agriculture greening and climate variability [J]. *Environmental Research*, 2024, 245: 118049.

[2]Niu L G, Hao J M, Zhang B Z, *et al*. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 813.

[3]唐志伟,翁 颖,朱夏童,等. 秸秆还田下中国农田土壤微生物生物量碳变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1552.
Tang Z W, Weng Y, Zhu X T, *et al*. Meta-analysis of soil microbial mass carbon and its influencing factors in farmland in China under straw return [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(9): 1552.

[4]Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, *et al*. Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China Plain [J]. *Catena*, 2020, 187: 104359.

[5]张 彬,杨联安,杨粉莉,等. 基于投影寻踪的土壤养分综合评价及影响因素研究[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1239.
Zhang B, Yang L A, Yang F L, *et al*. Study on comprehensive evaluation and influencing factors of soil nutrients based on projection pursuit [J]. *Soils*, 2020, 52(6): 1239.

[6]张华艳,牛灵安,郝晋珉,等. 秸秆还田配施缓控释肥对土壤养分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 140.
Zhang H Y, Niu L A, Hao J M, *et al*. Effects of straw returning combined with slow release fertilizer on soil nutrient and crop yield [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(1): 140.

[7]郭晓雯,向贵琴,张发朝,等. 生物炭和秸秆还田对咸水滴灌棉田土壤微生物群落特征及功能差异的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3571.
Guo X W, Xiang G Q, Zhang F C, *et al*. Effects of biochar and straw return on soil microbial community characteristics and functional differences in saline water drip irrigation cotton fields [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3571.

[8]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.

[9]周怀平,解文艳,关春林,等.长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):321.
Zhou H P,Xie W Y,Guan C L,*et al*. Effects of long-term straw-returning on corn yield,economic benefit and water use in arid farming areas [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,2013,19(2):321.

[10]王斯文,柏程瀚,吉林爽,等.秸秆还田条件下水分调控对水稻生长发育和稻田生态系统的影响研究[J].东北农业科学,2024,49(6):1.
Wang S W,Bai C H,Ji L S,*et al*. A review of the effects of water regulation under straw returning to fields on rice growth,yield and field ecosystem [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*,2024,49(6):1.

[11]Gál A,Vyn T J,Michéli E,*et al*. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths [J]. *Soil and Tillage Research*,2007,96(1/2):42.

[12]赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等.耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1785.
Zhao Y L,Guo H B,Xue Z W,*et al*. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity,enzyme activities in soils and grain yield [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2015,26(6):1785.

[13]杨招弟,蔡立群,张仁陟,等.不同耕作方式对旱地土壤酶活性的影响[J].土壤通报,2008,39(3):514.
Yang Z D,Cai L Q,Zhang R Z,*et al*. Soil enzymatic activities under different tillage practrices in dryland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2008,39(3):514.

[14]刘晓芳,李晓婷,李立军,等.不同耕作方式下旱作农田土壤酶活性与有机碳的关系研究[J].中国农学通报,2018,34(13):106.
Liu X F,Li X T,Li L J,*et al*. Relationship between soil organic carbon and enzyme activity in rain-fed field under different tillage methods [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2018,34(13):106.

[15]孙 建,刘 苗,李立军,等.免耕与留茬对土壤微生物量C、N及酶活性的影响[J].生态学报,2009,29(10):5508.
Sun J,Liu M,Li L J,*et al*. Influence of non-tillage and stubble on soil microbial biomass and enzyme activities in rain-fed field of Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2009,29(10):5508.

[16]Zhang L,Wang J,Fu G Z,*et al*. Rotary tillage in rotation with plowing tillage improves soil properties and crop yield in a wheat-maize cropping system [J]. *PLoS One*,2018,13(6):e0198193.

[17]武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等.不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J].生态学报,2013,33(2):565.
Wu J,Guo X S,Lu J W,*et al*. Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2013,33(2):565.

[18]王 晶,孙松青,李 雪,等.秸秆不同还田方式对轮作小麦—玉米产量、土壤养分及蔗糖酶活性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(4):85.
Wang J,Sun S Q,Li X,*et al*. Effects of different straw returning methods on yield,soil nutrients and sucrase activity of wheat-maize rotation [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2023,51(4):85.

[19]王玉玲,李 军.利于小麦-玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1139.
Wang Y L,Li J. Study of tillage patterns suitable for soil physicochemical properties and crop yields in wheat/maize fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,2014,20(5):1139.

[20]黄 明,吴金芝,李友军,等.耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J].草业学报,2018,27(9):34.
Huang M,Wu J Z,Li Y J,*et al*. Effects of tillage method and straw mulching on grain yield and protein content in wheat and soil nitrate residue under a winter wheat and summer soybean crop rotation in drylands [J]. *Acta Prataculturae Sinica*,2018,27(9):34.

[21]李玲玲,黄高宝,秦舒浩,等.保护性耕作对绿洲灌区冬小麦产量形成的影响[J].作物学报,2011,37(3):514.
Li L L,Huang G B,Qin S H,*et al*. Effect of conservation tillage on dry matter accumulating and yield of winter wheat in oasis area [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2011,37(3):514.

[22]魏龙雪,裴艳婷,张书良,等.玉米秸秆还田配施不同腐熟剂对小麦氮素利用和产量的影响[J].安徽农业科学,2024,52(14):117.
Wei L X,Pei Y T,Zhang S L,*et al*. Effect of corn straw returned to field with different maturing agents on nitrogen utilization and yield of wheat [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*,2024,52(14):117.

[23]朱洪彬,朱建龙.秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J].农业开发与装备,2025(3):142.
Zhu H B,Zhu J L. Effects of straw returning methods on soil physical and chemical properties and maize yield [J]. *Agricultural Development & Equipments*,2025(3):142.

[24]马守臣,张紧紧,冯荣成,等.深耕和施用有机肥对麦田土壤微环境的影响[J].华北农学报,2014,29(4):192.
Ma S C,Zhang J J,Feng R C,*et al*. Effects of deep tillage and organic fertilizer application on soil micro-environment of wheat field [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2014,29(4):192.

[25]丁 炜,孙 义,杨莉兰,等.玉米秸秆还田及不同施肥方式对玉米农艺性状和产量的影响[J].河北农机,2017(6):16.
Ding W,Sun Y,Yang L L,*et al*. Effects of returning corn stalk to field and different fertilization methods on agronomic

traits and yield of maize [J]. *Hebei Agricultural Machinery*,2017(6):16.

[26]贠 超,杨春玲,韩 勇,等.不同秸秆还田量对安麦 13 产量及产量要素的影响[J].中国种业,2021(6):75.
Yuan C,Yang C L,Han Y,*et al*. Effects of different straw returning amount on the yield and yield elements of anmai 13 [J]. *China Seed Industry*,2021(6):75.

[27]胡心意,傅庆林,刘 琛,等.秸秆还田和耕作深度对稻田耕层土壤的影响[J].浙江农业学报,2018,30(7):1202.
Hu X Y,Fu Q L,Liu C,*et al*. Effects of straw-returning and tillage depth on soil properties in plough layer of paddy soil [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*,2018,30(7):1202.

[28]朱长伟,龙 潜,董士刚,等.小麦-玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):51.
Zhu C W,Long Q,Dong S G,*et al*. Effects of rotary and deep tillage modes on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in fluvo-aquic soil under wheat-maize rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,2020,26(1):51.

[29]陈 金,庞党伟,韩明明,等.耕作模式对土壤生物活性与养分有效性及冬小麦产量的影响[J].作物学报,2017,43(8):1245.
Chen J,Pang D W,Han M M,*et al*. Effects of tillage patterns on soil biological activity,availability of soil nutrients and grain yield of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2017,43(8):1245.

[30]Liu E K,Yan C R,Mei X R,*et al*. Long-term effect of chemical fertilizer,straw,and manure on soil chemical and biological properties in northwest China [J]. *Geoderma*,2010,158(3/4):173.

[31]张 聪,慕 平,尚建明.长期持续秸秆还田对土壤理化特性、酶活性和产量性状的影响[J].水土保持研究,2018,25(1):92.
Zhang C,Mu P,Shang J M. Effects of continuous returning corn straw on soil chemical properties,enzyme activities and yield trait [J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2018,25(1):92.

[32]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.

[33]刘 兴,武国慧,张玉兰,等.生物炭施用方式对黑土和潮棕壤养分及氮磷转化相关酶活性的影响[J].应用生态学报,2021,32(8):2693.
Liu X,Wu G H,Zhang Y L,*et al*. Effects of biochar application patterns on soil nutrients and nitrogen-and phosphorus-related enzyme activities in phaeozem and luvisol [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2021,32(8):2693.

[34]高日平,王伟妮,狄彩霞,等.有机肥和秸秆还田对河套灌区盐渍化土壤养分及微生物数量的影响[J].中国土壤与肥料,2023(2):43.
Gao R P,Wang W N,Di C X,*et al*. Effects of organic manure and straw returning on nutrient and microbial quantity of saline soil in river-loop irrigation area [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*,2023(2):43.

[35]潘 晶,杨 墨,黄琳丽,等.秸秆还田对土壤主要微生物数量、酶活性及细菌群落结构、多样性的影响[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2021,39(3):266.
Pan J,Yang M,Huang L L,*et al*. Effects of maize straw returning on main soil microbial quantity,soil enzyme activity and bacteria community structure and diversity [J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*,2021,39(3):266.

[36]张玉娇,李 军,郭 正,等.渭北旱塬麦田保护性轮耕方式的产量和土壤水分效应长周期模拟研究[J].中国农业科学,2015,48(14):2730.
Zhang Y J,Li J,Guo Z,*et al*. Long-term simulation of winter wheat yield and soil water response to conservation tillage rotation in Weibei highland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2015,48(14):2730.

[37]潘雅文,樊 军,郝明德,等.黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表层土壤理化性状和玉米产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1558.
Pan Y W,Fan J,Hao M D,*et al*. Effects of long-term tillage and mulching methods on properties of surface soil and maize yield in tableland region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,2016,22(6):1558.

[38]孟凡德,马 林,石书兵,等.不同耕作条件下春小麦干物质积累动态及其相关性状的研究[J].麦类作物学报,2007,27(4):693.
Meng F D,Ma L,Shi S B,*et al*. Dynamics change of dry matter accumulation and relative characteristics of spring wheat under different tillage [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2007,27(4):693.

[39]刘国利,崔双双,孙泽强,等.深松深度对鲁西南土壤耕层理化性状和作物产量的影响[J].山东农业科学,2021,53(2):71.
Liu G L,Cui S S,Sun Z Q,*et al*. Effects of subsoiling depth on soil physicochemical characters of plough layer and crop yield in southwest Shandong [J]. *Shandong Agricultural Sciences*,2021,53(2):71.

[40]Zhang W F,Yang S Q,Jin Y H,*et al*. The effects of straw mulching combined with nitrogen applications on the root distributions and nitrogen utilization efficiency of summer maize [J]. *Scientific Reports*,2020,10:21082.