

李 彤, 李翻过, 姬月梅, 等. 宁夏引黄灌区不同还田年限对土壤质量及玉米产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(4): 727-735.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.04.009

宁夏引黄灌区不同还田年限对土壤质量及玉米产量的影响

李 彤¹, 李翻过¹, 姬月梅², 蔡巧红¹, 汪 华¹, 苏 明¹, 洪自强¹, 张文杰²,
吴宏亮¹, 康建宏¹

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏农林科学院农作物研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要: 为明确秸秆还田年限对宁夏引黄灌区土壤质量及玉米产量的影响, 本研究以该地区秸秆不还田地块(CK)、秸秆还田1年地块(H1)、秸秆还田3年地块(H3)、秸秆还田4年地块(H4)、秸秆还田5年地块(H5)和秸秆还田6年地块(H6)开展玉米栽培试验, 分析不同地块玉米收获期土壤理化特征、酶活性及玉米产量特征, 综合评估秸秆还田年限对土壤质量和玉米生长的影响。结果表明, 秸秆还田能够改善土壤理化性质, 提高土壤酶活性, 增加玉米产量。与秸秆不还田对照(CK)相比, 秸秆还田6年处理(H6)土壤容重降低16.23%, 土壤孔隙度和含水率分别增加16.92%和10.35%, 土壤碱解氮含量、全磷含量、有机质含量分别增加43.21%、42.86%、21.33%, 土壤脲酶活性、碱性磷酸酶活性分别显著增加33.79%、35.63%。随着秸秆还田年限的增加, 玉米产量呈增加趋势, H5、H6处理玉米产量分别比CK提高12.84%和11.37%。H6处理综合得分最高, 说明长期秸秆还田有利于改善土壤理化性质, 提高玉米产量。综上所述, 长期玉米秸秆还田是宁夏引黄灌区土壤改良和玉米增产的有效措施。

关键词: 秸秆还田; 土壤理化性质; 酶活性; 玉米产量

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)04-0727-09

Effects of consecutive years of straw returning on soil quality and maize yield in the Ningxia Yellow River irrigation area

LI Tong¹, LI Fanguo¹, JI Yuemei², CAI Qiaohong¹, WANG Hua¹, SU Ming¹, HONG Ziqiang¹,
ZHANG Wenjie², WU Hongliang¹, KANG Jianhong¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Institute of Crop Sciences, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: To clarify the effect of straw returning years on soil quality and maize yield, this study carried out maize cultivation experiments in the Yellow River irrigation area of Ningxia with straw non-returning plots (CK), straw returning plots for one year (H1), straw returning plots for three years (H3), straw returning plots for four years (H4), straw returning plots for five years (H5) and straw returning plots for six years (H6). The soil physical and chemical characteristics, enzyme activities and maize yield characteristics at the maize harvest stage of different plots were analyzed, and the effects

收稿日期: 2025-07-26

基金项目: 宁夏高质量发展与生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-3-02); 宁夏粮食作物种质创制与生长调控科技创新团队(2022BSB03109)

作者简介: 李 彤(2000-), 男, 陕西扶风人, 硕士研究生, 主要研究方向为作物生理生化。(E-mail)lt026778625@163.com

通讯作者: 康建宏, (E-mail)kangjianhong@163.com

of straw returning years on soil quality and maize growth were comprehensively evaluated. The results showed that straw returning could improve soil physical and chemical properties, increase soil enzyme activity and increase maize yield. Compared with the control (CK) without straw returning, the soil bulk density of the six-year straw returning treatment (H6) decreased by 16.23%, the soil

porosity and water content increased by 16.92% and 10.35%, respectively, the soil alkali-hydrolyzed nitrogen content, total phosphorus content and organic matter content increased by 43.21%, 42.86% and 21.33%, respectively, and the soil urease activity and alkaline phosphatase activity increased significantly by 33.79% and 35.63%, respectively. With the increase of straw returning years, the yield of maize showed an increasing trend. The yield of maize treated with H5 and H6 increased by 12.84% and 11.37% respectively compared with CK. The comprehensive score of H6 treatment was the highest, indicating that long-term straw returning was beneficial to improve soil physical and chemical properties and increase maize yield. In summary, long-term maize straw returning is an effective measure for soil improvement and maize yield increase in the Yellow River irrigation area of Ningxia.

Key words: straw return to the field; soil physical and chemical properties; enzyme activity; corn yield

宁夏地处温带干旱半干旱气候区,是中国重要的粮食产区。该地区降水不足,土壤结构不良,养分匮乏,水肥利用效率较低,这些因素共同制约了当地农业发展^[1]。作物秸秆富含氮、磷、钾以及有机物质等营养成分^[2],秸秆还田后,这些营养成分会在土壤微生物的作用下逐渐分解,从而提升土壤养分含量和有机碳水平,最终促进土壤肥力的提高^[3]。因此,秸秆还田技术已成为该地区广泛应用的一种土壤培肥措施。白伟等^[4]和王淑兰等^[5]研究发现,秸秆还田可以显著提高土壤含水量,降低土壤容重,改善土壤固液气三相比,进而提高春玉米产量。Chen等^[6]研究发现,秸秆深翻还田能够有效改善土壤结构,促进深层土壤养分的增加,从而形成深厚的耕作层,为作物生长创造更优越的条件,进而显著提升作物产量。王治统等^[7]研究发现,秸秆还田一方面有助于土壤团聚体的形成,提升土壤的稳定性与抗侵蚀能力,另一方面还通过秸秆释放有机酸调节土壤酸碱度平衡,改善土壤的化学性质。饶越悦等^[8]研究发现,秸秆深层还田(深翻)能显著提高土壤全氮含量、铵态氮含量和硝态氮含量,促进养分积累,减少养分矿化损失。慕平等^[9]研究发现,秸秆还田能显著提高土壤有机质含量,且随着还田年限的增加,土壤有机质含量呈现持续提升趋势。江晗等^[3]研究发现,秸秆还田能显著提高耕层土壤脲酶活性、铵态氮含量和硝态氮含量。Yang等^[10]研究发现,秸秆还田与适量施用氮肥相结合能够提高土壤酶活性。秸秆还田不仅能够改善土壤的理化性质,还能促进土壤微生物的繁殖和提高其活力,从而提升土壤质量^[11]。秸秆还田在提高土壤肥力和作物产量方面具有显著优势^[4,7,12]。尽管前人关于宁夏引黄灌区玉米秸秆还田对土壤质量和作物产量的影响研究已有开展,但不同秸秆还田年限对该地区土壤质量和玉米产量的影响研究还缺乏深入分析。因此,本研究拟通过相关性分析和主成分分析,

明确宁夏引黄灌区不同秸秆还田年限对土壤理化性质、酶活性和玉米产量的影响,阐明秸秆还田改善土壤质量的内在机制,为该地区秸秆还田技术应用和土壤改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

定位试验于宁夏农林科学院农作物研究所永宁望洪基地(38°18'N,106°12'E)进行。试验地地势平坦,海拔1 087 m。2019–2023年,试验地年平均气温8.7℃,年降水量160~280 mm,年均蒸发量约1 489 mm,全年无霜期约170 d,全年≥10℃积温3 245.8℃。试验地土壤类型为灌淤土,长期连年种植春玉米,一年一茬。

1.2 试验设计及土壤样品的采集

2024年选取秸秆不还田(CK)、秸秆还田1年(H1,2023年)、秸秆连续还田3年(H3,2021–2023年)、秸秆连续还田4年(H4,2020–2023年)、秸秆连续还田5年(H5,2019–2023年)和秸秆连续还田6年(H6,2018–2023年)的地块进行栽培试验。各地块秸秆还田前(2018年)土壤基础养分见表1。2024年玉米生长季逐月平均温度和降雨量如图1所示。本试验采用单因素随机区组设计,共设置6个秸秆不同还田年限处理。每处理3个重复,共18小区,每个小区45 m²。其中,秸秆不还田对照(CK)采用铧式犁将土壤进行深度耕翻,但不进行秸秆还田;秸秆还田处理为全量粉碎还田,每年还田量约18 000 kg/hm²,具体操作为每年玉米收获后将全部秸秆直接切成小段进行深翻还田。2024年以当地主栽品种先玉335为供试品种进行栽培试验。采用宽窄行种植,宽行距70 cm,窄行距40 cm,株距22 cm,每1 hm²种植82 500株,每小区种植6行,每行62株。各处理玉米全生育期总施氮量为375

表 1 秸秆还田前(2018年)试验地土壤基础养分状况

Table 1 Basic nutrient status of the soil at the experimental sites before straw returning (2018)

处理	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	pH
CK	0.38a	25.2a	0.37a	16.68a	62.47a	167.36a	6.33a
H1	0.36a	25.4a	0.38a	16.69a	62.48a	171.53a	6.42a
H3	0.37a	24.9a	0.36a	16.58a	62.44a	166.33a	6.43a
H4	0.38a	25.5a	0.37a	16.66a	62.45a	173.63a	6.54a
H5	0.39a	25.2a	0.39a	16.72a	63.01a	170.21a	6.24a
H6	0.38a	25.4a	0.38a	16.69a	62.82a	169.85a	6.63a

CK、H1、H3、H4、H5、H6 分别为秸秆不还田对照及秸秆还田 1 年、连续秸秆还田 3 年、连续秸秆还田 4 年、连续秸秆还田 5 年、连续秸秆还田 6 年处理。

kg/hm², 种植前施用基肥, 施氮量 225 kg/hm², 拔节期至大喇叭口期追施氮肥 150 kg/hm²; 磷肥和钾肥的施用量分别为 138 kg/hm² 和 120 kg/hm², 均作为基肥施用。采用漫灌方式进行灌溉, 总灌溉量为 6 600 m³/hm²。灌溉时间为苗期、拔节期、大喇叭口期和灌浆期, 各时期灌水量按 20% : 25% : 35% : 20% 的比例进行分配。其他田间管理措施均同当地玉米高产栽培方案。

于 2024 年玉米收获期, 采用五点法采集各处理耕层土样(0~20 cm), 用于土壤理化性质和酶活性的测定。

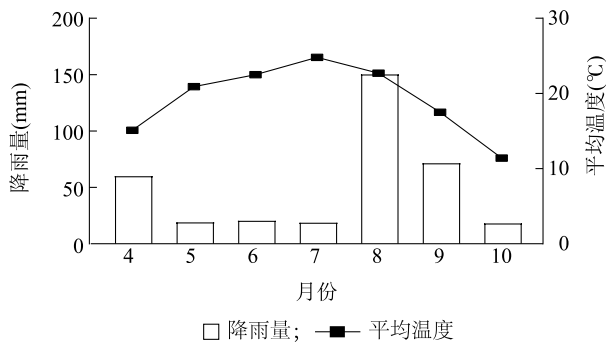


图 1 2024 年玉米生长季逐月平均温度与降雨量

Fig.1 Monthly average temperature and precipitation of maize growing season in 2024

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤理化性质的测定 参照文献[13]的方法进行土壤理化性质的测定: 应用环刀法获取土壤容重; 用比重瓶法测得土壤密度; 基于容重(g/cm³)和土壤密度(g/cm³), 计算土壤总孔隙度; 采用 PICO-BT 型便携式土壤剖面水分速测仪测定土壤含水率。利用凯氏定氮法测定土壤全氮含量与碱解氮含量; 采用硫酸-高氯酸(H₂SO₄-HClO₄)联合消解法

测定土壤全磷含量; 采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量; 利用 0.5 mol/L 碳酸氢钠(NaHCO₃, pH 8.5) 对土样浸提后, 采用钼锑抗分光光度法测定土壤速效磷含量; 采用乙酸铵浸提及火焰光度计法测定土样速效钾含量; 配制 5 mL 水 : 1 g 土的悬浊液, 利用 pHS-3E 型台式酸度计测定土壤 pH 值; 使用 DDS-307A 电导率仪测定土壤全盐含量。

1.3.2 土壤酶活性的测定 采用苯酚-次氯酸钠显色分光光度法测定土壤脲酶活性; 以磷酸苯二钠为底物进行土壤碱性磷酸酶活性测定; 利用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性; 利用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶活性。

1.3.3 玉米产量的测定 玉米成熟期从每小区随机选取两行玉米植株进行测产, 按平均穗重从所收获的玉米果穗中随机选取 10 个进行考种, 测定产量构成因素。

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 进行统计与数据分析, 使用 SPSS 26.0 软件和最小显著性差异法(LSD) 进行处理间差异显著性分析($P < 0.05$); 利用 Origin 2021 软件和 GraphPad Prism 9.5.1 软件进行图表绘制、相关性分析和主成分分析。

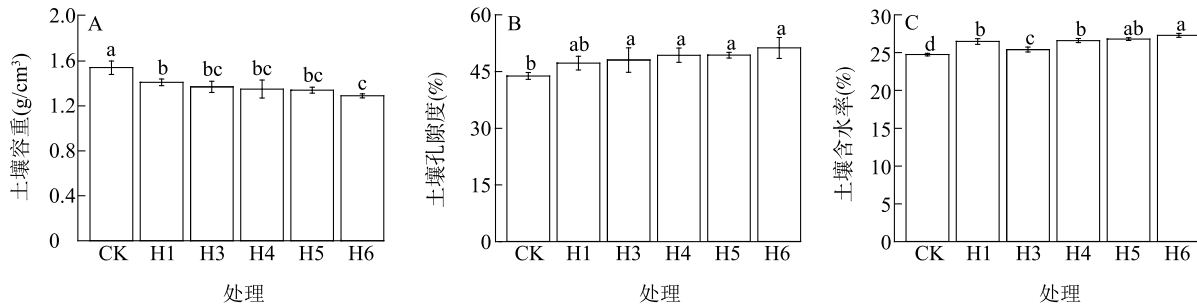
2 结果与分析

2.1 秸秆还田年限对土壤物理性质的影响

秸秆还田年限对土壤物理性质的影响如图 2 所示。从图中可以看出, 随着秸秆还田年限的增加, 土壤容重呈减少趋势, 土壤孔隙度和含水率整体呈增加趋势。秸秆还田 6 年处理(H6) 土壤容重比秸秆不还田对照(CK) 降低 16.23%。H3、H4、H5、H6 处理土壤孔隙度分别比 CK 增加 9.58%、12.52%、

12.53%和16.92%,H1处理土壤孔隙度与CK无显著差异。秸秆还田1年处理(H1)土壤含水率显著高于秸秆不还田对照(CK),H3处理略有降低,随后持续增加。H1、H3、H4、H5、H6处理土壤含水率分

别比CK增加7.00%、2.70%、7.50%、8.30%和10.35%。综上所述,长期秸秆还田能够有效改善土壤的物理性质,连续秸秆还田6年能有效降低土壤容重,增加孔隙度,提高含水率,表现较优。



CK、H1、H3、H4、H5、H6 见表1注。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 不同处理土壤容重、孔隙度和含水率变化

Fig.2 Changes in soil bulk density, porosity, and water content under different treatments

2.2 秸秆还田年限对土壤化学性质的影响

秸秆还田年限对土壤化学性质的影响如表2所示。从表中可以看出,秸秆还田处理能显著提高耕层土壤全氮含量、碱解氮含量、全磷含量、有机质含量、速效磷含量、速效钾含量。H1、H3、H4、H5、H6处理全氮含量分别比CK增加23.53%、23.53%、29.41%、35.29%、38.24%,秸秆不同还田年限处理间差异不显著;H1、H3、H4、H5、H6处理土壤碱解氮含量分别比CK增加34.17%、37.41%、34.84%、40.64%、43.21%,秸秆不同还田年限处理间差异亦不显著;H1、H3、H4、H5、H6处理土壤全磷含量分别比CK增加25.00%、39.29%、32.14%、39.29%、42.86%,其中H5、H6、H3处理土壤全磷含量显著高于H1处理;H1、H3、H4、H5、H6处理土壤有机质含量分别比CK增加9.78%、13.33%、17.85%、22.15%、21.33%,且H4、H5、H6处理土壤的有机质

含量显著高于H1处理。H1、H3、H4、H5、H6处理土壤速效磷含量分别比CK增加33.59%、40.20%、34.05%、40.07%、38.16%,秸秆不同还田年限处理间差异亦不显著;H1、H3、H4、H5、H6处理土壤速效钾含量分别比CK增加20.14%、14.18%、20.88%、27.10%、30.38%。H1处理土壤pH值显著高于CK,土壤碱性加强,而H3、H4、H5、H6处理土壤pH值显著低于CK,土壤更偏向中性,说明长期秸秆还田有利于土壤酸碱性平衡。H1、H3、H4、H5、H6处理土壤全盐含量分别比CK降低7.35%、11.76%、17.65%、23.53%、33.82%,说明秸秆还田还可以降低土壤盐分含量,且随着还田年限的增加,全盐含量逐渐降低。总之,秸秆还田能有效提高耕层土壤的营养含量,降低土壤全盐含量,且秸秆还田年限越长土壤化学指标越优。

表2 不同处理下耕层土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties at the plow layer under different treatments

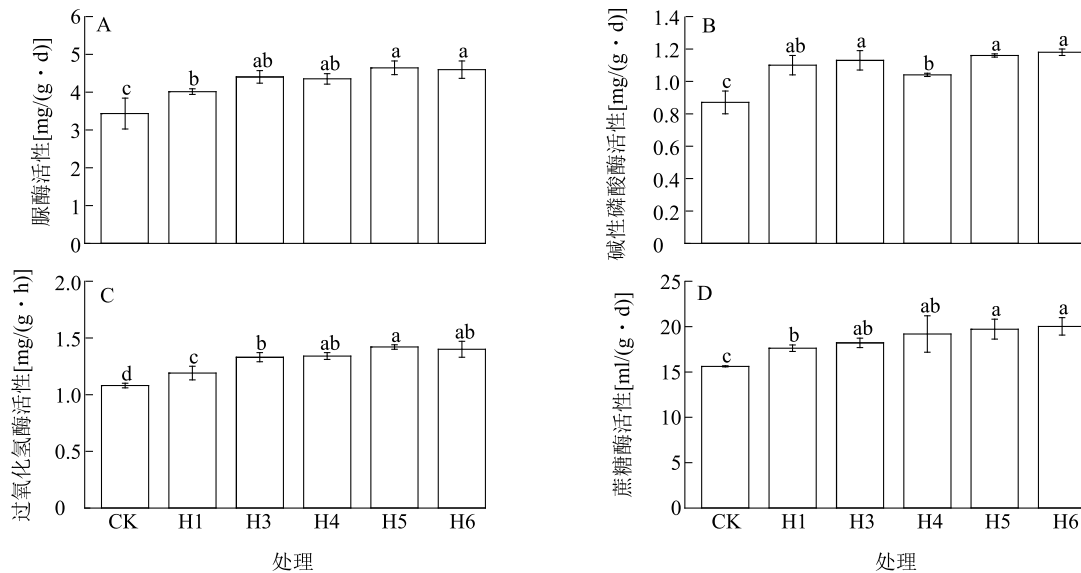
处理	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	pH	全盐含量 (g/kg)
CK	0.34±0.09b	36.17±1.76b	0.28±0.01c	13.50±0.66d	39.68±1.92b	174.89±17.03c	8.14±0.40b	0.68±0.02a
H1	0.42±0.01a	48.53±1.76a	0.35±0.03b	14.82±0.18c	53.01±3.41a	210.12±18.27ab	8.60±0.44a	0.63±0.02b
H3	0.42±0.03a	49.70±0.70a	0.39±0.01a	15.30±0.65bc	55.63±2.77a	199.69±6.58b	8.05±0.30c	0.60±0.01c
H4	0.44±0.01a	48.77±0.40a	0.37±0.01ab	15.91±0.32abc	53.19±0.90a	211.41±13.97ab	7.59±0.02d	0.56±0.02d
H5	0.46±0.04a	50.87±3.59a	0.39±0.02a	16.49±1.15a	55.58±2.31a	222.29±3.17ab	7.64±0.01d	0.52±0.02e
H6	0.47±0.01a	51.80±1.40a	0.40±0.01a	16.38±0.44ab	54.82±8.50a	228.02±4.66a	7.58±0.05d	0.45±0.01f

CK、H1、H3、H4、H5、H6 见表1注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 秸秆还田年限对土壤酶活性的影响

秸秆不同还田年限土壤种植玉米后酶活性的变化特征如图3所示。从图中可以看出,随着秸秆还田年限的增加,种植玉米后耕层土壤脲酶活性、碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性整体均呈增加趋势。H1、H3、H4、H5、H6处理土壤脲酶活性分别比CK增加16.89%、26.80%、26.70%、35.24%、33.79%;H1、H3、H4、H5、H6处理土壤碱性

磷酸酶活性分别比CK增加26.44%、29.89%、19.54%、33.33%、35.63%;H1、H3、H4、H5、H6处理土壤过氧化氢酶活性分别比CK增加10.19%、23.15%、24.07%、31.48%和29.62%。H1、H3、H4、H5、H6处理土壤蔗糖酶活性分别比CK增加12.83%、16.59%、22.87%、26.29%、28.21%。由此可见,秸秆还田年限的增加有利于增加土壤酶活性。



CK、H1、H3、H4、H5、H6 见表1注。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图3 不同处理土壤酶活性变化

Fig.3 Changes in soil enzyme activities under different treatments

2.4 秸秆还田年限对玉米产量及构成因素的影响

秸秆不同还田年限土壤对玉米产量及其构成因素的影响如表3所示。从表中可以看出,还田年限4年及以下时,秸秆还田对产量的增益不显著,秸秆还田5年(H5)和6年(H6)处理玉米产量显著高于CK,分别比CK增加12.84%、11.37%。不同还田年

限处理玉米穗数均与CK无显著差异,H1、H3、H4、H5、H6处理穗粒数分别比CK增加6.98%、5.53%、8.27%、11.18%、11.04%,H3、H4处理百粒重分别比CK增加8.78%、7.80%,因此,秸秆还田对产量增加的主要机制在于穗粒数的增加。

表3 不同处理对玉米产量及构成因素的影响

Table 3 Impacts of different treatments on maize yield and its constituent factors

处理	穗数(个,1 hm ²)	穗粒数	百粒重(g)	产量(kg/hm ²)
CK	76 023.75±1 836.72a	620.67±16.44c	33.71±1.27b	14 703.65±237.30b
H1	76 429.15±2 737.47a	664.00±24.98ab	34.85±2.67ab	16 149.90±1 430.80ab
H3	73 370.30±2 192.22a	655.01±15.52b	36.67±0.67a	16 263.05±699.63ab
H4	73 624.10±1 677.25a	672.00±12.17ab	36.34±0.60a	16 157.10±584.72ab
H5	74 048.05±1 361.20a	690.06±11.36a	35.67±0.64ab	16 591.65±379.87a
H6	73 421.90±1 440.68a	689.20±6.56a	35.32±0.56ab	16 375.80±1 081.79a

CK、H1、H3、H4、H5、H6 见表1注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.5 土壤理化性质、土壤酶活性和玉米产量之间的相关性分析

玉米产量与土壤理化性质指标及酶活性的相关性如表 4 所示。从表中可以看出,玉米产量与土壤全氮含量(*TN*)、碱解氮含量(*AN*)、全磷含量(*TP*)、速效磷含量(*SAP*)、脲酶(*URE*)活性、碱性磷酸酶(*AKP*)活性呈现极显著正相关,与土壤孔隙度(*POR*)、有机质含量(*SOM*)、速效钾含量(*SAK*)、过氧化氢酶(*CAT*)活性、蔗糖酶(*SUC*)活性呈现显著正相关,与土壤容重(*BD*)呈现极显著负相关,与 pH、土壤全盐含量(*TS*)、土壤含水率(*SWC*)相关性

不显著。*POR*、*SWC*、*TN*、*AN*、*TP*、*SOM*、*SAP*、*SAK*、*URE*、*AKP*、*CAT*、*SUC* 等指标两两之间总体呈现正相关,与 *BD*、pH、*TS* 指标呈负相关;*BD*、pH、*TS* 等指标两两之间呈现正相关,与其他指标总体呈负相关。长期秸秆还田可以提升土壤耕作层 *TN*、*AN*、*TP*、*SAP*、*URE*、*AKP*、*POR*、*SOM*、*SAK*、*CAT*、*SUC* 等指标,而这些指标与玉米产量呈显著或极显著正相关;*BD* 与玉米产量呈极显著负相关,与秸秆还田可以降低该指标相一致。因此,长期秸秆还田有利于土壤质量的改善,进而提高玉米产量。

表 4 指标相关性

Table 4 Index correlation

指标	<i>BD</i>	<i>POR</i>	<i>SWC</i>	<i>TN</i>	<i>AN</i>	<i>TP</i>	<i>SOM</i>	<i>SAP</i>	<i>SAK</i>	pH	<i>TS</i>	<i>URE</i>	<i>AKP</i>	<i>CAT</i>	<i>SUC</i>	产量
<i>BD</i>	1.00															
<i>POR</i>	-0.99**	1.00														
<i>SWC</i>	-0.86*	0.89*	1.00													
<i>TN</i>	-0.98**	0.97**	0.90*	1.00												
<i>AN</i>	-0.95**	0.91*	0.81*	0.97**	1.00											
<i>TP</i>	-0.97**	0.93**	0.75	0.96**	0.98**	1.00										
<i>SOM</i>	-0.93**	0.92**	0.71	0.90*	0.84*	0.93**	1.00									
<i>SAP</i>	-0.91*	0.85*	0.72	0.93**	0.99**	0.97**	0.82*	1.00								
<i>SAK</i>	-0.94**	0.94**	0.97**	0.97**	0.92*	0.88*	0.82*	0.85*	1.00							
pH	0.70	-0.74	-0.54	-0.63	-0.49	-0.62	-0.87*	-0.43	-0.58	1.00						
<i>TS</i>	0.91*	-0.95**	-0.85*	-0.89*	-0.77	-0.81*	-0.88*	-0.68	-0.89*	0.81	1.00					
<i>URE</i>	-0.97**	0.94**	0.77	0.96**	0.94**	0.98**	0.97**	0.93**	0.89*	-0.72	-0.87*	1.00				
<i>AKP</i>	-0.91*	0.86*	0.76	0.93**	0.96**	0.94**	0.78	0.95**	0.89*	-0.41	-0.77	0.91*	1.00			
<i>CAT</i>	-0.94**	0.93**	0.74	0.93**	0.88*	0.95**	0.99**	0.86*	0.85*	-0.82*	-0.89*	0.99**	0.84*	1.00		
<i>SUC</i>	-0.98**	0.98**	0.88*	0.97**	0.91*	0.94**	0.96**	0.86*	0.95**	-0.78	-0.94**	0.97**	0.85*	0.97**	1.00	
产量	-0.92**	0.88*	0.79	0.96**	0.99**	0.97**	0.84*	0.99**	0.90*	-0.48	-0.73	0.94**	0.95**	0.88*	0.90*	1.00

BD:土壤容重;*POR*:土壤孔隙度;*SWC*:土壤含水率;*TN*:全氮含量;*AN*:碱解氮含量;*TP*:全磷含量;*SOM*:有机质含量;*SAP*:速效磷含量;*SAK*:速效钾含量;*TS*:全盐含量;*URE*:脲酶活性;*AKP*:碱性磷酸酶活性;*CAT*:过氧化氢酶活性;*SUC*:蔗糖酶活性。*、** 分别表示指标间相关性显著($P<0.05$)和相关性极显著($P<0.01$)。

2.6 土壤理化性质、土壤酶活性和玉米产量之间综合性评价分析

利用不同处理土壤理化性质指标、土壤酶活性和玉米产量等 16 个指标进行主成分分析,可以得到 2 个特征值大于 1 的主成分,其贡献率分别为 70.9%和 7.4%,累计贡献率为 78.3%。各指标主成分载荷值如图 4A 所示。根据各主成分贡献率及得分值进行加权处理得到的综合得分如图 4B 所示。从图中可以看出,综合得分由高到底依次为 H6>

H5>H4>H3>H1>CK。其中 H6 表现最好,说明秸秆还田年限越长,综合得分越高,即长期持续的秸秆还田有利于改善宁夏引黄灌区土壤质量,提高玉米产量。

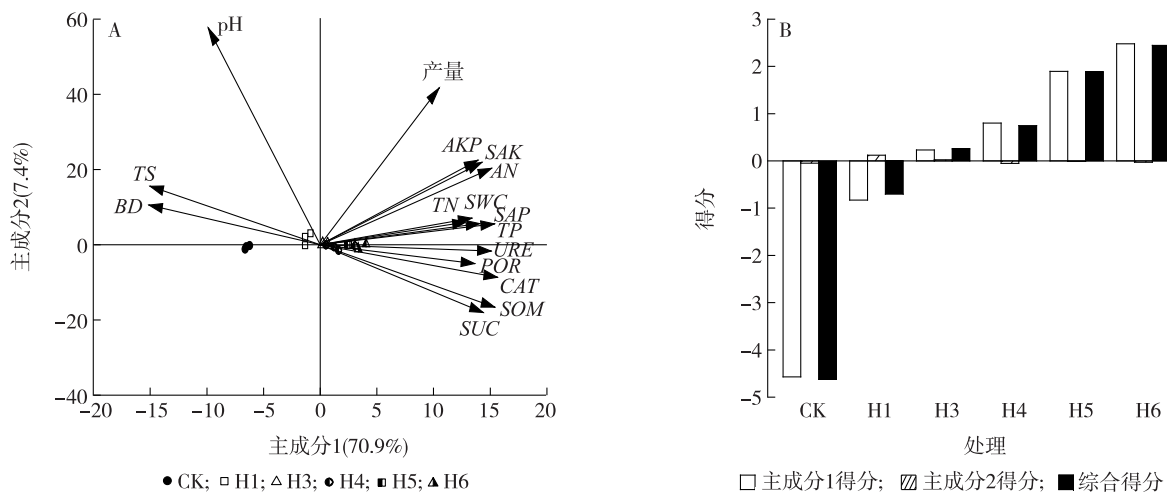
3 讨论

3.1 秸秆还田年限对土壤物理性质的影响

土壤容重和孔隙度是反映土壤通气性和透水性的重要指标^[14]。张亚丽等^[15]、崔正果^[16]研究发现,

秸秆还田可以显著降低土壤容重,增加土壤含水量。王治统等^[7]研究指出,秸秆还田可显著降低土壤容重,增加土壤孔隙度,进而优化土壤的通气性和透水性。秸秆在土壤中分解产生腐殖质,这类物质能够胶结土壤颗粒,有助于改善土壤团粒结构,提升土壤大孔隙的占比,进而导致土壤容重下降^[17-18]。秸秆深埋还田可打破犁底层,减轻耕作对土壤的压实作用,进而提高土壤疏松程度,降低土壤容重,提高土壤孔隙度^[19]。秸秆还田能为土壤微生物生长提供C、N等资源,促进其繁殖与代谢,这有利于秸秆中

有机物质分解,并释放气体,间接扩大土壤孔隙空间^[18,20]。秸秆还田提高土壤持水量的机制主要有2个方面,一方面是减少土壤蒸发^[7],另一方面是秸秆分解后形成的腐殖质能够吸收更多水分^[21]。本研究结果表明,秸秆还田1年即可显著降低土壤容重,且随着秸秆还田年限增加,土壤容重呈现持续降低趋势;秸秆还田3年及以上处理可以显著提高土壤孔隙度,这与前人研究结果^[15-16]基本一致。因此,长期的秸秆还田可以有效改善土壤物理结构。



A: 载荷图; B: 得分图。BD、POR、SWC、TN、AN、TP、SOM、SAP、SAK、TS、URE、AKP、CAT、SUC 见表4注。CK、H1、H3、H4、H5、H6 见表1注。

图4 不同处理主成分分析及综合性评价

Fig.4 Principal component analysis and comprehensive evaluation of different treatments

3.2 秸秆还田年限对土壤化学性质的影响

土壤化学性质是表征土壤肥力与生态功能的关键指标,直接影响植物生长、养分循环及微生物活动^[14,22-25]。房佰涵等^[26]、殷浩凯等^[27]研究发现,秸秆还田能增加土壤养分含量,并提高土壤养分有效性,进而提升土壤肥力。还田初期,秸秆中有机氮在分解过程中会矿化为铵态氮(NH_4^+),而铵态氮的增加会使土壤溶液中的氢离子浓度降低,进而导致土壤pH值上升^[28];同时还田初期的土壤高C/N比会导致微生物优先固持氮素,减少 NH_4^+ 向 NO_3^- 的转化,延缓酸化过程^[29];还田后期秸秆充分分解产生有机酸,同时较多铵态氮通过硝化作用转化为硝态氮,进而致使土壤pH降低^[30]。随着还田年限的增加,土壤有机质分解和氮素矿化达到动态平衡,同时微生物群落结构逐渐优化,土壤酸碱度逐渐稳定在弱碱性^[31]。饶越悦等^[8]、

赵永敢^[32]研究发现,秸秆深层还田能够形成秸秆隔层,这种隔层可以破坏土壤毛管孔隙的连续性,从而阻止高矿化度潜水的蒸发,同时,秸秆还田还可以改善土壤的水分特性,增加土壤的持水能力和水分入渗率,这有助于减少土壤水分的蒸发,从而降低盐分向土壤表面的聚积,进而降低耕作层土壤的盐分含量。许明敏等^[33]的研究结果表明,秸秆还田通过增加土壤有机质含量和促进微生物代谢,降低土壤溶液中的盐离子浓度。本研究结果表明,秸秆还田处理能够显著提高土壤养分含量,1~6年还田处理土壤全氮含量、碱解氮含量、全磷含量、速效磷含量、有机质含量均显著高于CK。而秸秆还田1年,土壤pH显著高于CK,还田3~6年,土壤pH值低于CK。秸秆还田处理土壤全盐含量均显著降低,且随着还田年限增加,土壤全盐含量持续降低。这与前人研究结果^[9,20]

基本一致。

3.3 秸秆还田年限对土壤酶活性的影响

土壤酶参与土壤物质循环和能量流动,是衡量土壤质量及生态功能的重要指标^[34]。侯贤清等^[35]、王西亚等^[36]研究发现,秸秆还田能增强土壤微生物的代谢活性,增加其生物量。原因在于秸秆还田能为土壤提供有机物质,这些有机物质在微生物的作用下分解,释放出大量养分,从而为土壤酶的合成和活性提供了必要的底物和能量,进而促进了酶活性提升,且随着还田年限的增加,土壤中有机质和养分积累量逐渐增加,酶活性亦随之提升;此外,秸秆还田还能提升土壤微生物的多样性,特别是分解复杂有机物质的微生物丰度,这些微生物在分解秸秆的过程中,释放出大量的酶,从而提高了土壤酶的活性^[37]。秸秆还田初期,土壤中的有机物质分解较快,酶活性提升较明显,而随着还田年限的延长,土壤酶活性趋于稳定,一方面可能是土壤中有机物质分解逐渐趋于稳定,另一方面可能是微生物群落逐渐适应了土壤环境,减少了对酶的需求,导致其活性趋于稳定^[38]。本研究结果表明,秸秆还田处理能显著提高耕层土壤酶活性,还田1~3年,土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性显著增加,还田4~6年土壤酶活性基本稳定。

3.4 秸秆还田年限对玉米产量的影响

秸秆还田能够提升土壤有机质含量,改善土壤的物理结构,促进土壤养分循环和提升保水保肥能力,同时还有利于有益微生物的大量繁殖,为作物生长创造更有利的条件,最终实现作物产量的提升。殷浩凯等^[27]研究发现,长期秸秆还田能显著提高土壤肥力和玉米产量。刘玮斌等^[39]研究发现,秸秆深耕还田能提高玉米穗粒重,进而提高产量。黄毅等^[40]研究发现,秸秆深层还田能促进玉米植株根系发育,提高植株对水分及养分的吸收效率,进而提高玉米产量。徐强^[41]研究发现,秸秆粉碎翻压还田、秸秆粉碎行间覆盖还田、秸秆发酵翻压还田、秸秆炭化还田均能有效提高玉米产量,其中秸秆发酵翻压还田方式最好。本研究结果表明,秸秆还田1~4年处理下,玉米产量增加不显著,秸秆还田5年和6年处理玉米产量分别比不还田对照增加12.84%和11.37%。产量提高的主要机制在于穗粒数和百粒重的增加,这与前人研究结果^[39]基本一致。

4 结论

随着秸秆还田年限的增加,土壤容重持续下降,土壤孔隙度和土壤含水量率整体呈增加趋势。秸秆还田1~6年能显著提高土壤全氮含量、碱解氮含量、全磷含量、有机质含量、速效磷含量、速效钾含量;秸秆还田1年土壤pH升高,秸秆还田3~6年土壤pH低于CK;随着秸秆还田年限的增加,土壤全盐含量持续降低。秸秆还田1~3年土壤酶活性显著增加,秸秆还田4~6年土壤酶活性稳定。秸秆还田5~6年能显著提高玉米穗粒数和玉米产量。

参考文献:

- [1] 李 荣,勉有明,侯贤清,等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性质及玉米水氮利用效率的影响[J]. 作物学报,2023,49(10):2820-2832.
- [2] YANG X L, LU Y L, DING Y, et al. Optimising nitrogen fertilisation: a key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008-2014)[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 1-10.
- [3] 江 晗,王 磊,卢艳丽,等. 长期秸秆还田对典型潮土区冬小麦-夏玉米轮作体系产量及氮挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2025,31(2):213-225.
- [4] 白 伟,安景文,张立祯,等. 秸秆还田配施氮肥改善土壤理化性状提高春玉米产量[J]. 农业工程学报,2017,33(15):168-176.
- [5] 王淑兰,王 浩,李 娟,等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(5):1530-1540.
- [6] CHEN J, ZHENG M J, PANG D W, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(8): 1708-1719.
- [7] 王治统,凌 俊,刘子熙,等. 秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2024,32(4):663-674.
- [8] 饶越悦,周顺利,黄 毅,等. 秸秆富集深层还田对农田土壤质量影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(10):1579-1587.
- [9] 慕 平,张恩和,王汉宁,等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(3):291-296.
- [10] YANG L, CHEN T Y, LI Z Y, et al. Straw incorporation and nitrogen fertilization regulate soil quality, enzyme activities and maize crop productivity in dual maize cropping system [J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 729.
- [11] 杨 钊,尚建明,陈玉梁. 长期秸秆还田对土壤理化特性及微

- 生物数量的影响[J]. 甘肃农业科技,2019,50(1):13-20.
- [12] 赵宇航,殷浩凯,解文艳,等. 长期玉米秸秆还田对褐土细菌群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(5):996-1007.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 黄巧云. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [15] 张亚丽,吕家珑,金继运,等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(2):307-314.
- [16] 崔正果. 不同年限玉米秸秆还田对黑土土壤理化性状以及土壤微生物的影响[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [17] 温云杰,张建诚,杨 娜,等. 长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报,2024,40(21):74-81.
- [18] 庞党伟,陈 金,唐玉海,等. 玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报,2016,42(11):1689-1699.
- [19] 徐莹莹,王俊河,刘玉涛,等. 秸秆不同还田方式对土壤物理性状、玉米产量的影响[J]. 玉米科学,2018,26(5):78-84.
- [20] 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):92-98.
- [21] 王毅琪,韩文彪,陈 灏,等. 农作物秸秆深耕还田技术研究进展[J]. 安徽农业科学,2017,45(6):50-53.
- [22] 张永亮,汪 泓,肖玖军,等. 基于高光谱的山区耕地土壤有机质含量估测[J]. 江苏农业学报,2024,40(1):112-120.
- [23] 刘红江,郭 智,张岳芳,等. 不同类型有机肥对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(4):645-651.
- [24] 王 钊,张小莉,杨 杰,等. 不同改良剂对富硒高镉耕地土壤理化性质和玉米对硒、镉吸收的影响[J]. 江苏农业学报,2025,41(3):517-525.
- [25] 赵文举,曹 伟,吴克倩,等. 盐碱地水肥耦合对基质栽培番茄生长与产量品质的影响[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(6):619-626.
- [26] 房佰涵,李钥瑶,杨茂琪,等. 干旱区棉秆不同还田量对土壤理化性质及棉花生长的影响[J]. 水土保持学报,2025,39(2):230-237,249.
- [27] 殷浩凯,赵宇航,解文艳,等. 长期玉米秸秆还田对褐土真菌群落和玉米产量的影响[J]. 环境科学,2025,46(7):4699-4709.
- [28] 郭春雷,李 娜,彭 靖,等. 秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(5):1205-1213.
- [29] 马 想,黄 晶,赵惠丽,等. 秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(6):1574-1580.
- [30] LI Y, CHANG S X, TIAN L H, et al. Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils; a global meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry,2018,121:50-58.
- [31] LIU R Z, BORJIGIN Q, GAO J L, et al. Effects of different straw return methods on soil properties and yield potential of maize[J]. Scientific Reports,2024,14:28682.
- [32] 赵永敢. “上膜下秸”调控河套灌区盐渍土水盐运移过程与机理[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
- [33] 许明敏,冯金侠,陈卫平,等. 秸秆集中沟埋还田对土壤氮素分布及微生物群落的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(10):1960-1967.
- [34] 杨叶华,黄兴成,朱华清,等. 长期有机与无机肥配施的黄壤稻田土壤细菌群落结构特征[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(6):984-992.
- [35] 侯贤清,李 荣,吴鹏年,等. 秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报,2018,49(9):238-246.
- [36] 王西亚,吕继龙,何 萍,等. 玉米秸秆分解过程中细菌群落组成演化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(1):45-53.
- [37] 刘志平,周怀平,解文艳,等. 长期氮磷配施对褐土细菌多样性及土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(2):163-171.
- [38] 张翰林,白娜玲,郑宪清,等. 秸秆还田与施肥方式对稻麦轮作土壤细菌和真菌群落结构与多样性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(3):531-539.
- [39] 刘玮斌,田文博,陈 龙,等. 不同秸秆还田方式对土壤酶活性和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(5):25-29.
- [40] 黄 毅,毕素艳,邹洪涛,等. 秸秆深层还田对玉米根系及产量的影响[J]. 玉米科学,2013,21(5):109-112.
- [41] 徐 强. 玉米秸秆还田对玉米生长发育及产量的影响[J]. 中国农业文摘(农业工程),2024,36(3):56-59.

(责任编辑:石春林)