植物生态学报 2026, **50** (1): 222-236 DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048
Chinese Journal of Plant Ecology CSTR: 32100.14.cjpe.2025.0048

垂直深旋耕配施有机肥对盐碱地玉米叶片衰老特性及产量的影响

李月琪[1] 麻仲花[1] 刘威帆[1] 苏 明[1] 万猛虎[1] 李清云[1] 张 丹[1] 刘吉利[2] 吴 娜[1*]

[1]宁夏大学农学院, 银川 750021; [2]宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

摘 要 针对宁夏引黄灌区盐碱地面积不断扩大和种植玉米(*Zea mays*)产量降低等问题, 探讨垂直深旋耕配施有机肥对玉米叶片衰老特性及产量的影响, 可为该地区盐碱地玉米延衰增产提供理论依据。该研究于2021–2022年在宁夏平罗县开展裂区试验。设置常规耕作(TF, 翻耕深度25–30 cm)和垂直深旋耕(DT, 深度40–45 cm) 2种耕作方式为主区, 以0 kg·hm^{-2} (M0)、7 500 kg·hm^{-2} (M1)、15 000 kg·hm^{-2} (M2)和22 500 kg·hm^{-2} (M3) 4个有机肥用量水平为副区, 用于分析盐碱地玉米产量及叶片衰老特性。结果表明: (1) DT加M2处理, 玉米产量显著提高, 有机肥用量保持在14 505–16 710 kg·hm^{-2}之间可实现产量最大化; 在该处理下, 玉米的叶面积指数(LAI)、相对叶绿素含量(SPAD)显著提升, 叶片衰老起始期推迟1.7–2.19 d。(2) DT配施有机肥较其他处理降低了土壤pH和电导率(EC), 增加了碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)和有机质(OM)的含量, 显著提高了超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性并降低了脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量, 显著提升了可溶性糖(SS)含量。其中以M2处理最优, 与其相比, 过多的有机肥投入(M3)会使土壤pH和EC升高, 养分含量降低, SOD活性、POD活性、CAT活性、SS含量、Pro含量下降且增加MDA的含量, 抑制玉米生长和产量的持续提升。(3) Pearson相关性分析表明, 玉米产量与叶片的LAI、SPAD、SOD活性、POD活性、CAT活性、Pro含量、SS含量及土壤的AN、AK、OM含量呈显著或极显著正相关关系, 与MDA含量、EC呈显著或极显著负相关关系。(4)主成分分析表明, 垂直深旋耕配施有机肥处理下综合得分呈现M2 > M3 > M1 > M0的态势。该研究中垂直深旋耕配施15 000 kg·hm^{-2}有机肥(M2)可有效改善盐碱地土壤环境, 推迟叶片衰老时间, 提高叶片抗氧化酶活性, 降低MDA的积累, 进而提高玉米产量。

关键词 玉米; 耕作方式; 有机肥用量; 叶片生理特性; 土壤化学性质; 产量

李月琪, 麻仲花, 刘威帆, 苏明, 万猛虎, 李清云, 张丹, 刘吉利, 吴娜 (2026). 垂直深旋耕配施有机肥对盐碱地玉米叶片衰老特性及产量的影响. 植物生态学报, 50, 222-236. DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer on leaf senescence characteristics and yield of maize in saline soil

LI Yue-Qi[1], MA Zhong-Hua[1], LIU Wei-Fan[1], SU Ming[1], WAN Meng-Hu[1], LI Qing-Yun[1], ZHANG Dan[1], LIU Ji-Li[2], and WU Na[1*]

[1]College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; and [2]College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract

Aims In view of the expanding area of saline-alkaline land and the decline of maize (*Zea mays*) yield in Yinhuang Irrigation District of Ningxia, it is important to explore the effect of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer on the aging characteristics of maize leaves and yield, which can provide theoretical basis for delaying the aging of maize and boosting yield in saline-alkaline land of this region.

Methods The study was carried out in Pingluo, Ningxia in 2021–2022. Two types of tillage methods including conventional tillage (TF, tilling depth 25–30 cm) and vertical deep rotary tillage (DT, depth 40–45 cm) were set as main zones, and four levels of organic fertilizers including 0 kg·hm^{-2} (M0), 7 500 kg·hm^{-2} (M1), 15 000 kg·hm^{-2} (M2) and 22 500 kg·hm^{-2} (M3) were set as sub-zones for analyzing the yield and leaf senescence characteristics of maize in saline-alkaline land.

收稿日期Received: 2025-02-10 接受日期Accepted: 2025-03-21
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1900603)和宁夏重点研发计划(2019BFG02015)。Supported by the National Key R&D Program of China (2021YFD1900603) and the Ningxia Key R&D Program (2019BFG02015).
* 通信作者Corresponding author (nawu2000@163.com)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Important findings (1) In the DT plus M2 treatment, the yield of maize was significantly increased, and the amount of organic fertilizer should be kept between 14 505–16 710 kg·hm^{-2} to maximize the yield; under this treatment, the leaf area index (LAI) and relative chlorophyll content (SPAD) of maize were significantly increased, and the onset of leaf senescence was delayed by 1.7–2.19 d. (2) Compared with other treatments, DT with organic fertilizers decreased soil pH and electrical conductivity (EC), proline (Pro) and malondialdehyde (MDA) contents, and increased the contents of alkaline nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), and organic matter (OM). The activity of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), and the contents of soluble sugar (SS) has significantly increased. The M2 treatment was the best among the four treatments. Compared with the M2 treatment, excessive organic fertilizer input (M3) increased soil pH, EC, and MDA content, and decreased nutrient content, SOD activity, POD activity, CAT activity, SS content, and Pro content, which inhibited the growth and yield of maize. (3) Pearson correlation analysis showed that maize yield was significantly or highly significantly positively correlated with leaf LAI, SPAD, SOD activity, POD activity, CAT activity, Pro content, SS content, soil AN content, AK content, and OM content, and significantly or highly significantly negatively correlated with MDA content and EC. (4) The principal component analysis showed that the composite scores of M2 > M3 > M1 > M0 under vertical deep rotary tillage with organic fertilizer treatment. In this study, vertical deep rotary tillage with 15 000 kg·hm^{-2} organic fertilizer could effectively improve the saline soil environment, delay leaf senescence, increase leaf antioxidant enzyme activity, and reduce the accumulation of MDA, which in turn could stimulate the yield of maize.

Key words maize; tillage practices; organic fertilizer dosage; leaf physiological properties; soil chemical properties; yield

Li YQ, Ma ZH, Liu WF, Su M, Wan MH, Li QY, Zhang D, Liu JL, Wu N (2026). Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer on leaf senescence characteristics and yield of maize in saline soil. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 50, 222-236. DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

目前, 玉米(*Zea mays*)是我国产量最高的粮食作物, 但耕地土壤盐渍化面积不断扩大, 对玉米生产的不利影响也愈发严重。在我国西北地区该现象较为严重, 宁夏盐碱地面积扩大现象尤为明显, 严重制约了玉米等农作物产量的提升; 其中引黄灌区作为宁夏玉米种植的第一大区, 种植面积约占全区玉米种植总面积的75%, 同时, 该区域盐碱地面积已达24万hm^2, 约占全区现有耕地面积的48.9%, 极大地阻碍了农业的可持续发展(王学琴等, 2010; 王长军等, 2021; 张建业等, 2021); 土壤盐碱化会使农作物低产或不能生长, 从而导致作物产量下降(孙洁等, 2013; 刘鸿博等, 2024)。因此, 探寻有效的盐碱地改良措施, 对于提高玉米在盐碱地的产量和抗逆性具有重要的意义。

农艺措施对盐碱地改良及作物生长具有重要作用, 众多研究聚焦于其对土壤环境和作物生理特性的影响。有研究表明, 种植模式(王玉等, 2020)、水肥管理(李广浩等, 2017)等农艺措施均可优化土壤结构, 改善田间小气候, 促进水盐运动, 减少土壤中盐分的积累, 增加叶片抗氧化酶活性(张乃旭等, 2018; 于浩东等, 2023), 从而延缓作物叶片衰老并提高产量; 其中耕作方式是调控土壤环境、改善作物生长的关键农艺手段, 垂直深旋耕作为特殊耕作方式, 相比常规耕作, 能打破犁底层、降低土壤密度、增强根系活力, 还能提高土壤的通气性, 改善蓄水能力, 促进盐分淋洗, 为作物生长提供稳定的水分环境。王本龙等(2024)研究指出深松耕能提高土壤透水透气性, 改善水热条件, 降低土壤pH和盐分对作物的胁迫; 土壤中盐分过高会影响作物生长, 深松耕作能显著降低土壤全盐含量, 而在深松耕和覆膜作用下, 西辽河盐碱地玉米产量有显著提高, 且土壤理化性质得到充分改良。杨海龙和别海(2024)的研究表明目前针对盐碱地的治理方法有农业措施(深耕、灌溉)和化学措施(石膏、有机肥)。还有研究表明, 玉米根系的发达程度对其产量有直接的影响, 根系的扩展有利于深层土壤中水分养分的吸收, 且深层土壤环境相对稳定, 对根系生长、延缓衰老有重要作用(杨群辉等, 2019)。此外, 施用有机肥作为减少化学肥料投入量和提高耕地质量的技术手段已得到较为广泛的研究(匡恩俊等, 2020)。王庆蒙等(2020)指出, 在盐碱地施加有机肥, 能够改善土壤的物理结构, 提升土壤中的有机质含量, 加速盐分淋洗, 促进作物生长发育, 进而提高作物产量。宿庆瑞等(2006)研究认为施用有机肥一方面能够促进土

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

壤脱盐, 另一方面能有效抑制土壤返盐现象。通过有机肥的投入可以调节土壤酸碱度, 降低盐分对玉米根系及地上部的胁迫程度, 从根源上缓解叶片衰老的胁迫诱导因素, 以实现玉米产量的提升。另有研究表明, 合理施用有机肥可以降低土壤pH和全盐含量, 能够有效改善盐碱地玉米根际土壤微生物群落结构, 为作物生长创造更好的环境, 同时能够有效防止土壤板结、盐碱化(邓炯, 2024; 刘昊等, 2025)。目前大量研究已证实, 施用有机肥可改善盐胁迫, 如合理的有机肥投入可有效改善盐胁迫对保护性酶活性的抑制, 减缓作物叶面积指数(LAI)、相对叶绿素含量(SPAD)等指标的下降, 减少由于盐胁迫所造成的膜脂过氧化作用对膜系统造成的伤害, 从而保持膜系统的稳定性, 提高作物自身抵御逆境胁迫的能力(张金柱, 2007)。同时, 垂直深旋耕配施有机肥二者协同, 不仅能够降低土壤pH和盐分含量, 还能够提高深层次土壤的养分含量, 包括有效磷、速效钾和有机质等, 为叶片持续供应养分, 维持叶片的光合作用和其他生理功能, 防止叶片因缺乏营养而早衰, 为作物高产与土壤培肥提供重要的保障(匡恩俊等, 2020)。

目前, 关于垂直深旋耕配施有机肥对土壤化学性质、酶活性及延缓玉米叶片衰老特征的研究较少, 尤其在盐碱地方面。多数研究未聚焦于盐碱地的垂直深旋耕, 难以揭示其与配施有机肥协同作用的内在机制。因此, 本研究以宁夏引黄灌区盐碱地玉米生产困境为背景, 探究垂直深旋耕配施有机肥对玉米叶片衰老特性、细胞抗氧化酶活性和渗透调节物质的影响, 剖析二者协同作用机制, 以期延缓叶片衰老、增加籽粒产量, 为盐碱地玉米高产抗逆栽培提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

本试验于2021–2022年在宁夏回族自治区石嘴山市平罗县宁夏大学西大滩盐碱地试验站(38.83° N, 106.40° E)进行, 气候属半干旱大陆性气候, 海拔高度1 150 m, 年平均气温9.5 ℃, 年降水量205 mm, 年蒸发量1 875 mm。该地区光照充裕, 昼夜温差大, 降水不足与蒸发量过大等成为该地区土壤盐渍化的重要因素。该试验地含盐量为2.56 g·kg^{-1}, 属轻度盐碱土壤。播种前0–40 cm基础土壤理化性质如表1所示。

1.2 试验材料与设计

本研究采用裂区试验设计, 主区为耕作方式, 分别为常规耕作(TF), 翻耕深度为25–30 cm和垂直深旋耕(DT), 深度为40–45 cm; 副区为有机肥施用量, 设 4 个水平, 分别为0 kg·hm^{-2} (M0)、7 500 kg·hm^{-2} (M1)、15 000 kg·hm^{-2} (M2)、22 500 kg·hm^{-2} (M3)。每个处理重复3次, 共24个小区, 小区面积48 m^2, 行距60 cm, 株距22 cm, 等行距种植, 供试玉米品种为‘先玉1225’, 属于中晚熟品种, 生育期为127天左右; 种植密度为75 000株·hm^{-2}, 两年均在4月16日播种, 9月22日收获。施肥制度按照当地的施肥习惯, 尿素(氮含量46%)、磷酸二铵(氮含量18%, P_2O_5含量46%)、硫酸钾(K_2O含量50%), 纯氮施用量300 kg·hm^{-2}, 纯磷(P_2O_5)施用量180 kg·hm^{-2}, 纯钾(K_2O)施用量90 kg·hm^{-2}, 有机肥为羊粪鸡粪混合堆肥(氮含量1.2%, P_2O_5含量0.8%, K_2O含量1.0%)。其中磷肥、钾肥和有机肥全部作为基肥, 于春季整地前撒施, 氮肥分配按照50%作为基肥施用, 50%在大喇叭口期按行追施。灌水方式为畦灌, 分别于6月中旬、7月中旬、8月上旬、8月底进行灌水, 总灌水量6 000 m^3·hm^{-2}。其他田间管理同大田生产一致。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 玉米根际土壤化学性质的测定

在玉米吐丝期, 每个小区随机采集5株长势相同的玉米植株的根际土壤样品, 具体步骤为: 对铲子进行消毒后, 距离玉米茎20 cm处向下挖约40 cm, 之后将玉米植株连根带土拔起, 轻轻晃动玉米植株的根部, 从而收集附着在玉米根部的土壤, 将每个

表1 宁夏引黄灌区盐碱地土壤基础肥力水平
Table 1 Basic fertility level of saline-alkaline soils in Yinhuang Irrigation District, Ningxia, China

年份 Year	全盐含量 Total salt content (g·kg^{-1})	pH	有机质含量 Organic matter content (g·kg^{-1})	全氮含量 Total nitrogen content (g·kg^{-1})	全磷含量 Total phosphorus (P) content (g·kg^{-1})	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzed nitrogen content (mg·kg^{-1})	速效磷含量 Available P content (mg·kg^{-1})	速效钾含量 Available potassium content (mg·kg^{-1})
2021	2.76	8.68	14.20	0.77	0.58	30.29	22.00	214.27
2022	2.31	7.98	17.28	0.88	0.67	35.67	25.76	234.76

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

处理收集的玉米根际土壤放入对应的无菌袋中, 低温运至实验室, 风干、研磨和过筛后, 参照鲍士旦(2000)的方法测定土壤pH、全盐含量、有机质(OM)含量、碱解氮(AN)含量、速效磷(AP)含量和速效钾(AK)含量。

1.3.2 玉米叶片生理指标的测定

分别在玉米出苗后10、35、60、75、95和120天选择生长健康、长势均匀的玉米植株测定其叶片的叶长和最大叶宽, 进而按照公式(1)求得LAI (Wang et al., 2023)。并参照王丽萍等(2025)的方法对整个生育期内绿色叶面积指数的动态变化利用Origin 2021进行二次函数拟合, 得到叶片衰老的起始时间(t)。当LAI达到最大值时, 代表叶片衰老的开始时间。同时, 利用SPAD-50Plus叶绿素仪(浙江托普云农科技股份有限公司, 杭州)测定棒三叶的SPAD并采集棒三叶, 每个处理采集3片放入冰盒带回实验室, 采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性; 采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性; 采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性; 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量; 采用磺基水杨酸提取法测定脯氨酸(Pro)含量; 采用蒽酮法测定叶片中可溶性糖(SS)的含量, 具体操作参照孙群和胡景江(2006)。

$$\mathrm{LAI}=0.75\times \mathrm{P}\times\sum_{i=1}^{n}(a_i\times b_i) \quad (1)$$

式中, 0.75为校正系数, P为种植密度, a和b分别为叶片的长和宽, i为叶片个数。

1.3.3 玉米产量测定

玉米成熟期, 于每个小区中部取5行, 测其果穗鲜质量, 并采用MinIGAC水分测定仪(北京宇智思达科技有限公司, 北京)对鲜玉米脱粒进行水分测定, 折算成14%含水率的产量。

1.4 数据处理

数据采用Microsoft Excel 2019整理及汇总, 使用SPSS 20.0软件分别进行单因素和三因素方差分析, 分析不同处理的差异, 并使用LSD法进行多重比较。使用GraphPad Prism 9.5.1软件进行图片绘制以及使用Origin 2021软件对LAI进行衰老拟合并进行相关性分析和主成分分析。参考苏明等(2024b)的方法将有机肥施用量与产量利用Origin 2021软件进行二次函数拟合, 推算最佳有机肥施用量。

2 结果和分析

2.1 DT配施有机肥对玉米根际土壤化学性质的影响

DT配施有机肥对玉米根际土壤化学性质产生显著影响, 且单个因素及二、三因素交互作用在不同程度上改变了土壤的各项化学指标(表2)。具体而言, 年份对AK含量的影响未达到显著水平, 但对其他指标的影响均达到极显著水平; 耕作方式对电导率(EC)、土壤AN含量、AP含量、OM含量影响显著或极显著; 有机肥用量对各指标影响同样达到极显著水平; 年份与耕作方式两因素交互效应对OM含量影响极显著, 其余指标未达到显著水平; 年份与有机肥用量两因素交互效应对EC、AN含量、OM含量影响显著或极显著, 其余指标未达到显著水平; 耕作方式与有机肥用量两因素交互效应对pH、EC影响达到极显著, 其余指标未达到显著水平; 三因素交互作用效应对EC、AN含量影响达到显著或极显著水平, 其余指标未达到显著水平。

此外, 在不同耕作方式和有机肥用量处理下, 玉米根际土壤化学性质呈现出不同的变化。2021年TF下, 随着有机肥用量增加, 与M0、M1相比, M2、M3处理显著降低土壤pH和EC; 未施用有机肥M0处理下, AN、AP、AK、OM含量均较低, 但随着有机肥用量增加, AN、AP、AK和OM含量均有所提高, 其中以M2处理下达到最大值。DT下, M2处理与M1、M3相比, 显著降低土壤pH和EC; 在M2处理下, AN、AP、AK和OM含量均达到最高, 其中各指标在相同有机肥用量下多高于TF处理。2022年, TF和DT处理下, 变化趋势与2021年相似, M2处理下土壤pH与EC同样下降, AN、AP、AK和OM含量达到最高。综合两年数据, DT配施适量有机肥在降低土壤pH和EC、提高土壤养分含量方面效果更显著。

2.2 DT配施有机肥对玉米叶片生理特性的影响

2.2.1 DT配施有机肥对玉米叶片生理指标及产量的方差分析

从方差分析结果(表3)可看出, 玉米各项生理指标在不同年际、耕作方式和有机肥施用量单个因素及其互作条件下均存在一定差异。具体表现为, 玉米叶片SOD和POD活性在单个因子和二、三因子交互作用下差异均达到极显著水平。CAT活性在不同年际间差异达到显著水平, 在不同耕作方式、有机肥单因子下、耕作方式×有机肥互作下差异达到极

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表2 垂直深旋耕配施有机肥对玉米根际土壤化学性质的影响
Table 2 Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizers on inter-root soil chemical properties of maize

年份 Year	耕作方式 Farming practices	有机肥用量 Organic fertilizer application rate (M)	pH	EC	AN (mg·kg^{-1})	AP (mg·kg^{-1})	AK (mg·kg^{-1})	OM (mg·kg^{-1})
2021	TF	M0	8.91^{a}	0.30^{a}	35.09^{c}	16.15^{c}	213.97^{c}	16.82^{d}
		M1	8.91^{a}	0.28^{a}	39.76^{b}	18.97^{b}	256.34^{b}	18.46^{c}
		M2	8.44^{b}	0.15^{c}	44.43^{a}	22.20^{a}	350.19^{a}	24.37^{a}
		M3	8.49^{b}	0.18^{b}	42.56^{a}	19.29^{b}	257.45^{b}	23.09^{b}
	DT	M0	8.58^{b}	0.25^{a}	36.03^{c}	17.33^{a}	229.89^{c}	18.03^{b}
		M1	8.83^{a}	0.19^{b}	43.49^{bc}	18.97^{a}	257.01^{b}	18.49^{b}
		M2	8.56^{b}	0.13^{c}	51.89^{a}	23.70^{a}	350.52^{a}	24.15^{a}
		M3	8.81^{a}	0.18^{b}	48.16^{ab}	21.24^{a}	270.60^{b}	23.41^{a}
2022	TF	M0	8.56^{a}	0.79^{a}	42.81^{b}	19.96^{b}	196.97^{b}	14.00^{d}
		M1	8.40^{ab}	0.33^{b}	44.27^{b}	20.53^{b}	241.80^{ab}	15.80^{c}
		M2	7.59^{c}	0.23^{c}	50.89^{a}	25.78^{a}	337.92^{a}	19.36^{a}
		M3	7.64^{bc}	0.32^{b}	50.46^{a}	21.97^{b}	248.79^{ab}	17.74^{b}
	DT	M0	7.95^{a}	0.51^{a}	48.93^{c}	20.27^{c}	209.50^{b}	14.90^{c}
		M1	7.82^{b}	0.43^{ab}	51.08^{bc}	23.04^{b}	246.94^{b}	16.39^{b}
		M2	7.71^{b}	0.25^{b}	54.64^{a}	26.48^{a}	342.14^{a}	20.62^{a}
		M3	7.82^{b}	0.31^{ab}	52.75^{ab}	24.18^{b}	250.85^{b}	20.07^{a}
方差分析 ANOVA								
年份 Year (Y)			**	**	**	**	NS	**
耕作方式 Farming practices (F)			NS	*	**	*	NS	**
有机肥施用量 OFA rate (M)			**	**	**	**	**	**
Y × F			NS	NS	NS	NS	NS	**
Y × M			NS	**	*	NS	NS	**
F × M			**	**	NS	NS	NS	NS
Y × F × M			NS	**	*	NS	NS	NS

DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}; AN、AP、AK、OM、EC分别表示碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量、有机质含量、电导率; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$); *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; NS, $p > 0.05$。
DT, vertical deep rotary tilling; TF, conventional farming. M0, 0 kg·hm^{-2} organic fertilizer application; M1, 7 500 kg·hm^{-2} organic fertilizer application; M2, 15 000 kg·hm^{-2} organic fertilizer application; M3, 22 500 kg·hm^{-2} organic fertilizer application; AN, AP, AK, OM, EC represent alkali-hydrolyzable nitrogen content, available phosphorus content, available potassium content, organic matter content, and electrical conductivity, respectively; different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$); *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; NS, $p > 0.05$.

表3 年份、耕作方式和有机肥施用量对玉米生理指标及产量的主体间效应分析
Table 3 Inter-subject effects of year, cultivation mode and organic fertilizer application on physiological indexes and yield of maize

变异来源 Source of variation	年份 Year (Y)	耕作方式 Farming practices (F)	有机肥施用量 Organic fertilizer application rate (M)	Y × F	Y × M	F × M	Y × F × M
LAI	0.20^{NS}	48.55**	80.48**	12.66**	0.21^{NS}	2.59^{NS}	1.25^{NS}
SPAD	4.01^{NS}	273**	55.54**	13.87**	0.87^{NS}	0.97^{NS}	0.78^{NS}
SOD	69 863**	2 104**	321**	1 646**	163**	37.81**	26.70**
POD	68 952**	2 162**	330**	1 690**	168**	38.84**	27.45**
CAT	9.84*	959**	2 053**	0.01^{NS}	0.00^{NS}	8.63**	0.00^{NS}
MDA	44.67**	28.93**	26.76**	0.02^{NS}	0.94^{NS}	1.75^{NS}	0.51^{NS}
Pro	82.10**	606**	1 227**	66.46**	11.74**	60.48**	12.28**
SS	0.61^{NS}	46.42**	38.43**	10.40**	0.65^{NS}	3.96*	0.03^{NS}
产量 Yield	0.15^{NS}	82.53**	59.13**	0.22^{NS}	0.21^{NS}	3.58*	0.34^{NS}

CAT, 过氧化氢酶活性; LAI, 叶面积指数; MDA, 丙二醛含量; POD, 过氧化物酶活性; Pro, 脯氨酸含量; SOD, 超氧化物歧化酶活性; SPAD, 相对叶绿素含量; SS, 可溶性糖含量。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; NS, $p > 0.05$。
CAT, catalase activity; LAI, leaf area index; MDA, malondialdehyde content; POD, peroxidase activity; Pro, proline content; SOD, superoxide dismutase activity; SPAD, relative chlorophyll content; SS, soluble sugar content. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; NS, $p > 0.05$.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

显著水平。同理, LAI和SPAD除了在年份间差异不显著之外, 在其他单个因子和年份×耕作方式互作下差异均达到极显著水平。玉米叶片的Pro含量在单个因子和二、三因子交互作用下差异均达到极显著水平。此外, 玉米叶片SS含量在耕作方式、有机肥单因子下、年份×耕作方式两因子交互下均达到极显著水平, 在耕作方式×有机肥两因子交互下达到显著水平。叶片MDA含量在单个因子下达到极显著水平, 在二、三因子交互作用下差异均不显著。而玉米产量在耕作方式、有机肥施用量和两者交互作用下均达到显著或极显著水平。

2.2.2 DT配施有机肥对LAI和SPAD的影响

DT配施有机肥显著影响玉米的LAI, 其中M2处理优势明显(表3)。具体而言, 2年试验中(图1A–1D), 玉米全生育期LAI均呈现单峰的变化趋势, 于出苗后75 d达到峰值。其中DT极显著提高了玉米全生育期LAI (表3), 较TF分别平均提高4.1%–15.7%和2.0%–5.5%。以出苗后75 d为例, 2年DT处理下, M1、M2和M3处理较M0的LAI分别提高13.8%、30.3%、21.1% (2021)和11.8%、26.3%、13.2% (2022)。同时, 由单株绿色叶面积指数的拟合结果(表4)表明, DT较TF处理能显著延缓玉米叶片衰老。在2年研究中, DT较TF叶片衰老开始时间平均推迟了1.7–2.19 d。

DT配施有机肥显著影响玉米的SPAD (表3), 其中以M2处理最优。具体表现为, 2年试验中(图1E–1H), 玉米叶片SPAD值随生育进程推进逐渐增大, 于出苗后75 d达到峰值后逐渐下降。其中DT极显著提高了玉米全生育期SPAD (表3), 较TF分别平均提高6.2%–9.3%和4.4%–5.4%。出苗后75 d, 2年DT处理下, M1、M2和M3处理较M0的SPAD分别提高2.3%、5.2%、3.9% (2021)和5.0%、7.6%、4.6% (2022)。

2.2.3 DT配施有机肥对SOD和POD活性的影响

DT配施有机肥显著影响叶SOD和POD活性, 其中以M2处理最好(表3)。具体地, 2年试验中(图2A–2H), SOD、POD活性呈先上升后下降的趋势, 均在出苗后75 d达到峰值, 此时DT较TF处理SOD活性2年分别提高7.9%–19.3% (2021)、7.6%–18.4% (2022), POD提高25.8%–40.2% (2021)、25.8%–39.8% (2022)。出苗后75 d, 2年DT处理下, 与M0相比, M1、M2和M3处理的SOD活性分别提高9.2%、33.4%、19.3% (2021)和8.7%、31.6%、18.3% (2022); 2年POD活性分别提高8.1%、30.4%、27.1% (2021)和8.0%、30.1%、21.5% (2022)。

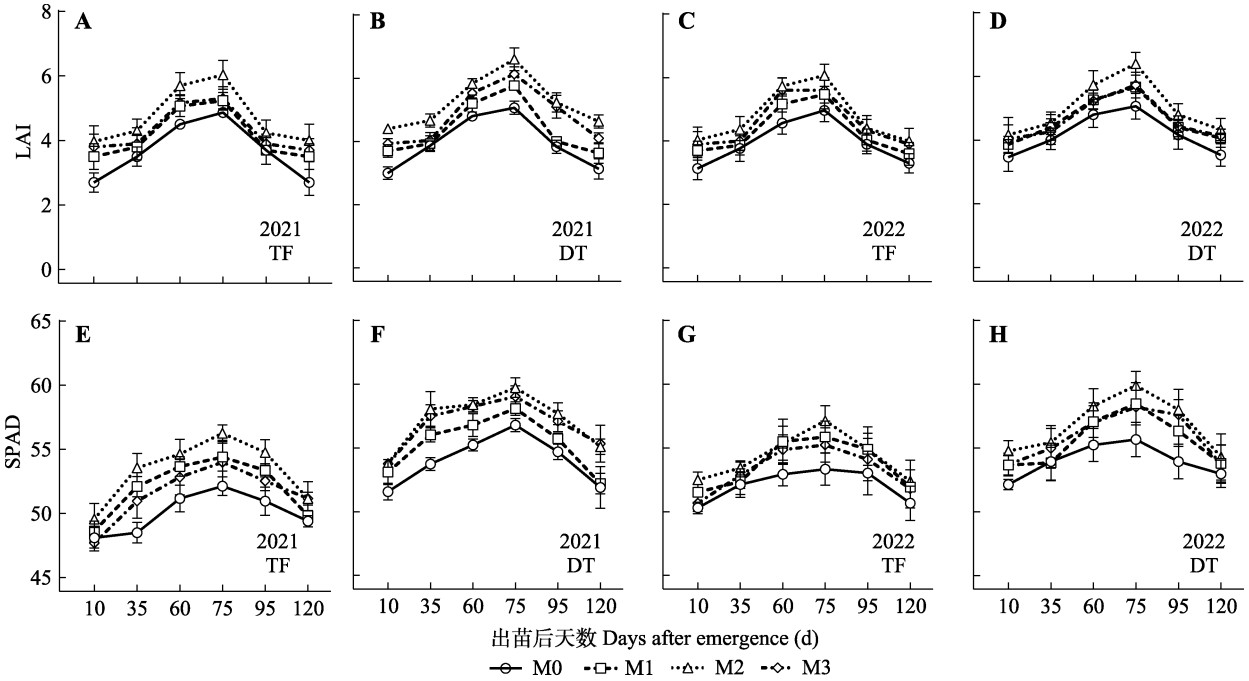


图1 垂直深旋耕配施有机肥对玉米叶面积指数(LAI)和相对叶绿素含量(SPAD)的影响(平均值±标准差)。DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}。

Fig. 1 Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer on leaf area index (LAI) and relative chlorophyll content (SPAD) of maize (mean ± *SD*). DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. M0, 0 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M1, 7 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M2, 15 000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M3, 22 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer.

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表4 垂直深旋耕配施有机肥对玉米衰老起始期的影响
Table 4 Effects of vertical deep rotary tillage combined with organic fertilizer on the initial aging period of maize

年份 Year	耕作方式 Farming practices	处理 Treatment	二次函数拟合 Quadratic function fitting	R^2	衰老起始期 Onset of ageing (d)
2021	TF	M0	$Y = -0.000581X^2 + 0.066X + 1.95$	0.848 9*	56.80
		M1	$Y = -0.000475X^2 + 0.062X + 2.75$	0.778 7*	63.16
		M2	$Y = -0.000517X^2 + 0.069X + 3.12$	0.737 8*	66.73
		M3	$Y = -0.000417X^2 + 0.053X + 3.11$	0.702 5*	63.55
	DT	M0	$Y = -0.000578X^2 + 0.070X + 2.20$	0.878 2*	60.55
		M1	$Y = -0.000519X^2 + 0.068X + 2.83$	0.744 0*	60.51
		M2	$Y = -0.000572X^2 + 0.081X + 3.12$	0.762 2*	70.80
		M3	$Y = -0.000537X^2 + 0.070X + 2.85$	0.735 0*	65.18
2022	TF	M0	$Y = -0.000576X^2 + 0.064X + 2.72$	0.848 6*	55.56
		M1	$Y = -0.000478X^2 + 0.063X + 2.88$	0.752 9*	65.90
		M2	$Y = -0.000524X^2 + 0.071X + 3.16$	0.783 6*	67.75
		M3	$Y = -0.000485X^2 + 0.063X + 3.05$	0.753 4*	64.95
	DT	M0	$Y = -0.000432X^2 + 0.051X + 2.82$	0.876 7*	59.03
		M1	$Y = -0.000426X^2 + 0.057X + 3.24$	0.781 9*	66.90
		M2	$Y = -0.000526X^2 + 0.070X + 3.27$	0.788 0*	69.39
		M3	$Y = -0.000392X^2 + 0.053X + 3.35$	0.756 3*	67.60

DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}。*X*, 出苗后天数; *Y*, 叶面积指数。*, $p < 0.05$。
DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. M0, 0 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M1, 7 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M2, 15 000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M3, 22 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer. *X*, days after emergence; *Y*, leaf area index. *, $p < 0.05$.

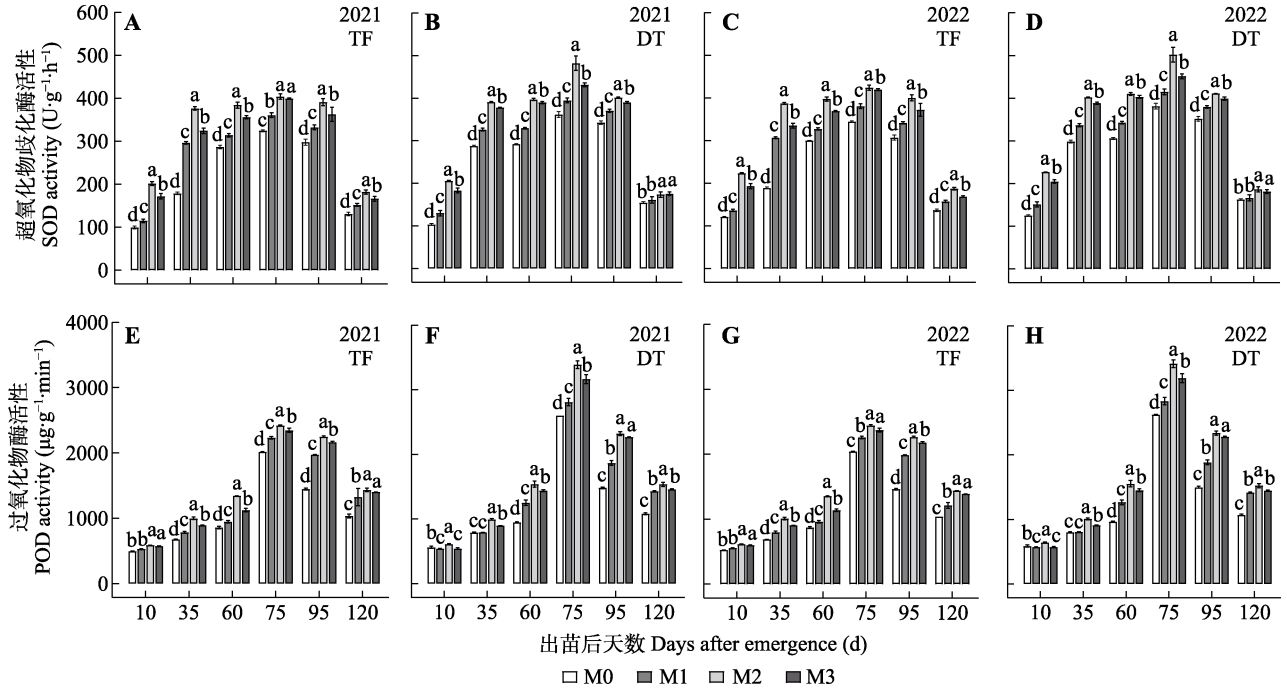


图2 垂直深旋耕配施有机肥对玉米叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性的影响(平均值±标准差)。DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。
Fig. 2 Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer on superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities of maize leaves (mean ± *SD*). DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. M0, 0 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M1, 7 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M2, 15 000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M3, 22 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$).

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

2.2.4 DT配施有机肥对CAT活性的影响

DT配施有机肥显著影响叶片CAT活性, 其中以M2处理效果最好。具体而言, 随着玉米生育期的推进, 玉米叶片CAT呈现先上升后下降的趋势(图3A–3D), 在出苗后75 d达到峰值。2年试验中, DT较TF处理CAT活性平均提高5.3%–10.6%。出苗后75 d, 2年DT处理下, M1、M2和M3处理较M0的CAT活性分别提高7.5%、27.7%、20.3% (2021)和7.4%、27.5%、20.1% (2022)。

2.2.5 DT配施有机肥对MDA含量的影响

DT配施有机肥显著影响叶片MDA含量(表3), 其中以M2和M3处理最好。具体地, 玉米叶片MDA在出苗后10–120 d呈现逐渐上升趋势(图4A–4D), 在出苗后120 d达到顶峰。2年试验中, DT较TF处理MDA含量平均下降3.0%–8.1%和1.4%–9.8%。出苗后120 d, 2年DT处理下, M1、M2和M3处理较M0的MDA含量分别下降1.3%、3.0%和6.4% (2021); M1较M0处理提高0.5%, M2、M3处理较M0下降4.5%和5.6% (2022)。

2.2.6 DT配施有机肥对Pro和SS含量的影响

DT配施有机肥显著影响叶片Pro和可溶性糖含量(表3), 其中以M2处理最好。具体表现为, 玉米叶片Pro在出苗后10–120 d呈现先下降后上升的趋势(图5A–5D), 在出苗后120 d达到顶峰。以出苗后120 d为例, 2年试验中, DT较TF处理在M0水平下Pro含量提高1.9%, 但在M1、M2、M3处理下Pro含量下降2.1%–6.8% (2021); 同理, DT较TF处理Pro含量下降3.7%–8.8% (2022)。2年DT处理下, M1、M2、M3较M0处理的叶片Pro分别平均提高6.7%–23.8%、14.4%–29.7%、0.6%–4.7% (2021)和6.7%–23.5%、

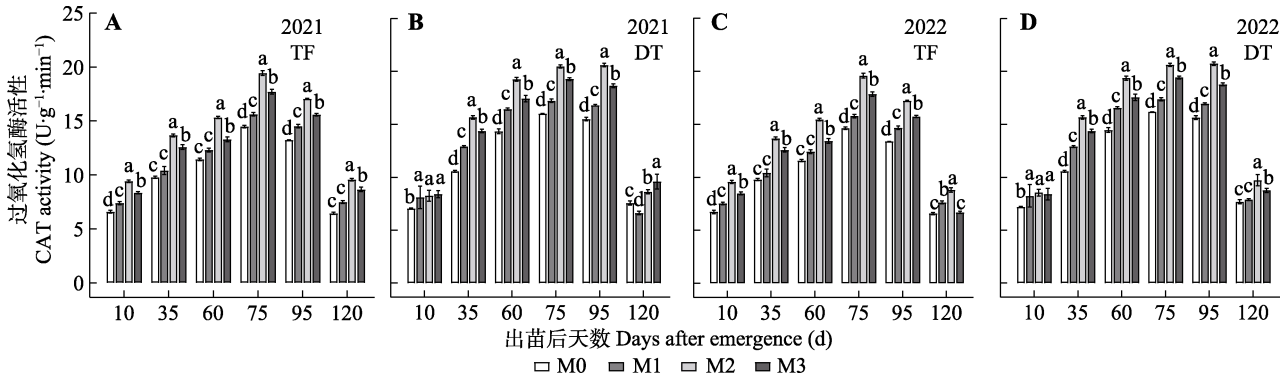


图3 垂直深旋耕配施有机肥对玉米叶片过氧化氢酶活性的影响(平均值±标准差)。DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer on catalase (CAT) activity of maize leaves (mean ± *SD*). DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. M0, 0 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M1, 7 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M2, 15 000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M3, 22 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$).

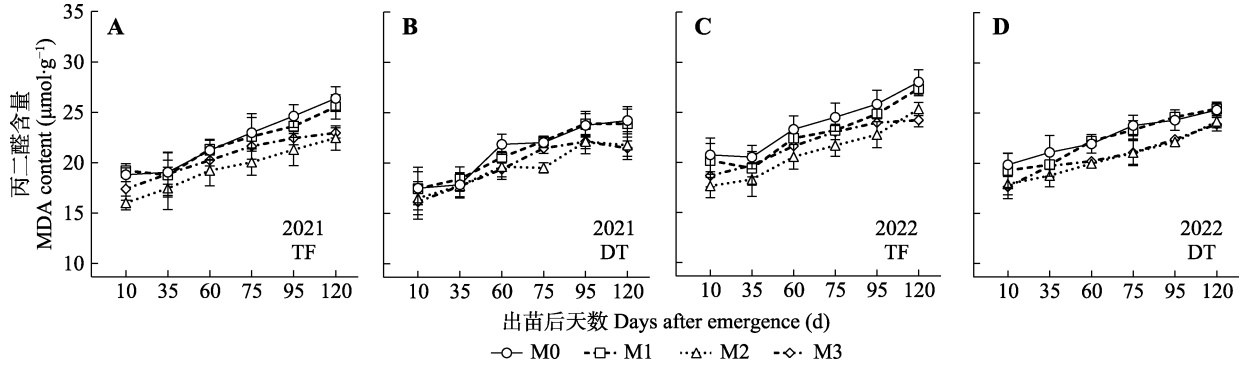


图4 垂直深旋耕配施有机肥对玉米叶片丙二醛含量的影响(平均值±标准差)。DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}。

Fig. 4 Effect of vertical deep tillage combined with organic fertilizer application on malondialdehyde (MDA) content in maize leaves (mean ± *SD*). DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. M0, 0 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M1, 7 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M2, 15 000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M3, 22 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer.

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

14.4%–29.4%、0.6–4.5% (2022)。随着玉米生育期的推进, 玉米叶片可溶性糖含量呈现先上升后下降的趋势(图5E–5H), 在出苗后75 d达到峰值, 2021年, DT较TF处理在M0水平下可溶性糖含量下降2.7%, 但在M1、M2、M3水平下可溶性糖含量平均提高3.5%–18.0%。2022年, DT较TF处理可溶性糖含量平均提高16.2%–33.2%。出苗后75 d, 2年DT处理下, M1、M2和M3较M0处理的可溶性糖含量分别提高35.9%、59.5%、50.15% (2021)和24.3%、44.1%、35.8% (2022)。

2.3 DT配施有机肥对玉米产量的影响

不同耕作方式下, 玉米产量呈现出DT > TF的态势(图6)。具体而言, 2年试验中, DT较TF处理的玉米产量平均提高10.9%–22.0% (2021)和12.7%–18.6%

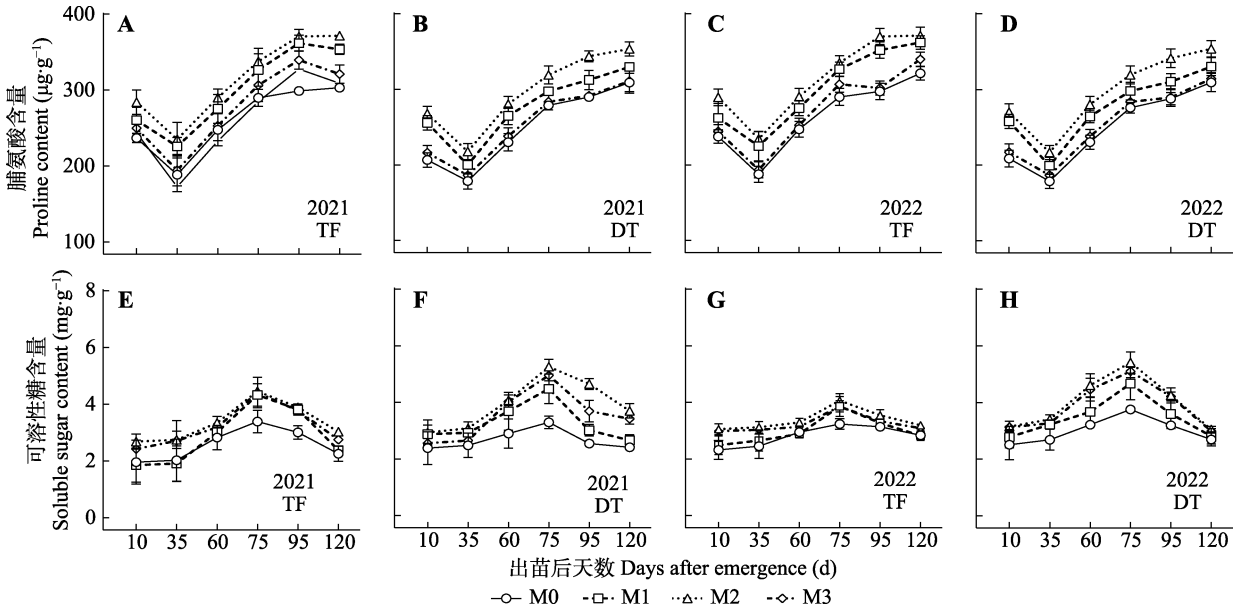


图5 垂直深旋耕配施有机肥对玉米叶片脯氨酸和可溶性糖含量的影响(平均值±标准差)。DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}。

Fig. 5 Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer on proline and soluble sugars content of maize leaves (mean ± *SD*). DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. M0, 0 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M1, 7 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M2, 15 000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M3, 22 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer.

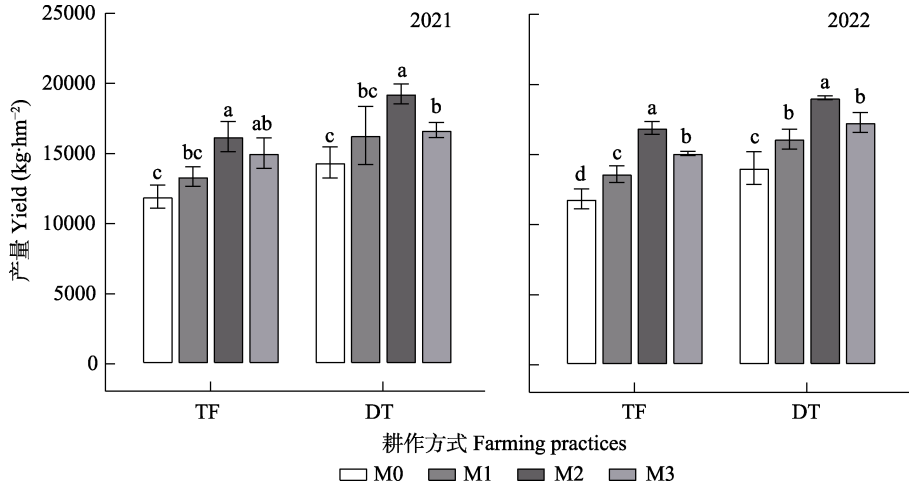


图6 垂直深旋耕配施有机肥对玉米产量的影响(平均值±标准差)。DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。M0, 施有机肥0 kg·hm^{-2}; M1, 施有机肥7 500 kg·hm^{-2}; M2, 施有机肥15 000 kg·hm^{-2}; M3, 施有机肥22 500 kg·hm^{-2}。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 6 Effects of vertical deep rotary tillage combined with organic fertilizer on maize yield (mean ± *SD*). DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. M0, 0 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M1, 7 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M2, 15 000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer; M3, 22 500 kg·hm^{-2} of organic fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$).

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

(2022)。在不同有机肥水平配施下, 其产量均呈现出M2 > M3 > M1 > M0的趋势。2年DT处理下M1、M2和M3处理的玉米产量较M0分别提高13.5%、34.1%、16.1% (2021)和14.8%、35.7%、23.1% (2022)。2年产量趋势基本一致。因此, DT耕作方式下M2处理显著影响玉米产量。

进一步探寻玉米产量和有机肥施用量之间的相互关系发现, 产量与有机肥施用量之间呈现二次函数关系, 决定系数(R^2)在0.822 9–0.883 3范围内, 能够较为清晰地反映出两者之间的相互关系(表5)。2021年TF处理下, 玉米的最佳有机肥施用量为18 276 kg·hm^{-2}, 对应的产量为15 530 kg·hm^{-2}, 而DT处理下, 玉米的最佳有机肥施用量为14 505 kg·hm^{-2}, 对应的产量为18 282 kg·hm^{-2}。2022年TF处理下, 玉米的最佳有机肥施用量为16 688 kg·hm^{-2}, 对应的产量为15 963 kg·hm^{-2}, 而2022年DT处理下, 玉米的最佳有机肥施用量为16 170 kg·hm^{-2}, 对应的产量为18 235 kg·hm^{-2}。

2.4 DT配施有机肥下土壤理化性质、叶片生理指标与产量的相关性及综合评价

通过相关性分析(表6), 揭示了土壤理化性质、玉米叶片生理指标与产量之间的内在联系。具体而言, 2年试验DT处理下, pH与其叶片的各项生理指标及产量的相关性均未达到显著水平; EC与叶片的LAI、SPAD、SOD活性、POD活性、CAT活性、Pro含量、SS含量及产量的相关性均达到显著或极显著负相关水平, 与MDA含量未达到显著水平; AN含量与叶片的LAI、SPAD、SOD活性、POD活性、CAT活性、Pro含量、SS含量及产量的相关性均达到显著或极显著正相关水平, 与MDA含量极显著负相关; AP含量与叶片的LAI、SPAD、SOD活性、POD活性、CAT活性的相关性均达到显著或极显著正相关水平, 与MDA含量、Pro含量、SS含量及产量的相关性未达到显著水平; AK含量与叶片的LAI、SPAD、SOD活性、POD活性、CAT活性、Pro含量、SS含量及产量的相关性均达到极显著正相关水平, 与MDA含量的相关性未达到显著水平; OM含量与叶片LAI、SPAD、SOD活性、POD活性、CAT活性、SS含量及产量的相关性均达到显著或极显著正相关水平, 与MDA含量的相关性达到极显著负相关水平, 与Pro含量的相关性未达到显著水平; 玉米产量与叶片LAI、SPAD、SOD活性、POD活性、CAT活性、Pro

表5 不同耕作方式配施有机肥量与玉米产量的二次函数关系
Table 5 Quadratic relationship between the amount of organic fertilizer with different tillage practices and maize yield

年份 Year	耕作方式 Farming practices	二次函数拟合 Quadratic function fitting	R^2	最佳有机肥施用量 Optimal organic fertilizer application rate (kg·hm^{-2})	最高产量 Maximum production (kg·hm^{-2})
2021	TF	$Y = -0.0000116X^2 + 0.424X + 11655.45$	0.860 6*	18 276	15 530
	DT	$Y = -0.0000202X^2 + 0.586X + 14031.56$	0.822 9*	14 505	18 282
2022	TF	$Y = -0.0000160X^2 + 0.534X + 11507.11$	0.843 7*	16 688	15 963
	DT	$Y = -0.0000171X^2 + 0.553X + 13764.44$	0.883 3*	16 170	18 235

DT, 垂直深旋耕; TF, 常规耕作方式。X, 有机肥用量; Y, 玉米产量。*, $p < 0.05$。
DT, vertical deep rotary tillage; TF, conventional tillage. X, organic fertilizer application rate; Y, maize yield. *, $p < 0.05$.

表6 垂直深旋耕配施有机肥土壤理化性质与玉米叶片生理指标的相关性分析
Table 6 Correlations between soil physicochemical properties and physiological variables of leaves of maize under vertical deep rotary tillage with organic fertilizers

项目 Item	LAI	SPAD	SOD	POD	CAT	MDA	Pro	SS	产量 Yield
pH	0.01^{NS}	0.05^{NS}	–0.12^{NS}	–0.10^{NS}	0.09^{NS}	0.02^{NS}	0.26^{NS}	0.21^{NS}	–0.01^{NS}
EC	–0.88**	–0.87**	–0.94**	–0.91**	–0.93**	0.56^{NS}	–0.87**	–0.89**	–0.81**
AN	0.81**	0.91**	0.85**	0.87**	0.88**	–0.62**	0.67*	0.87**	0.65*
AP	0.82**	0.63*	0.76**	0.71**	0.69*	–0.39^{NS}	0.54^{NS}	0.46^{NS}	0.44^{NS}
AK	0.88**	0.79**	0.95**	0.90**	0.87**	–0.50^{NS}	0.90**	0.74**	0.83**
OM	0.82**	0.88**	0.90**	0.92**	0.95**	–0.76**	0.50^{NS}	0.76**	0.65*
产量 Yield	0.81**	0.72**	0.85**	0.83**	0.80**	–0.49^{NS}	0.77**	0.79**	1.00**

AK, 速效钾含量; AN, 碱解氮含量; AP, 有效磷含量; CAT, 过氧化氢酶活性; EC, 电导率; LAI, 叶面积指数; MDA, 丙二醛含量; OM, 有机质含量; POD, 过氧化物酶活性; Pro, 脯氨酸含量; SOD, 超氧化物歧化酶活性; SPAD, 相对叶绿素含量; SS, 可溶性糖含量。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; NS, $p > 0.05$。
AK, quick-acting potassium content; AN, alkaline dissolved nitrogen content; AP, effective phosphorus content; CAT, catalase activity; EC, electrical conductivity; LAI, leaf area index; MDA, malondialdehyde content; OM, organic matter content; POD, peroxidase activity; Pro, proline content; SOD, superoxide dismutase; SPAD, relative chlorophyll content; SS, soluble sugar content. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; NS, $p > 0.05$.

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

和SS含量均极显著正相关，与MDA含量的相关性未达到显著水平。

进一步对玉米产量、生理指标及抗氧化参数做主成分分析，将9个相关的单项指标降维成2个相互独立的综合指标(图7)。2021年其主成分贡献率分别为80.5%和9.0%，累计贡献率达到89.5%，且各有机肥处理综合得分表现为M2 > M3 > M1 > M0；而2022年的第一主成分贡献率为74.5%，第二主成分贡献率则为11.3%，累积贡献率达到85.8%，各处理综合得分表现为M2 > M3 > M1 > M0。2年结果一致，共同表现为合理的有机肥施用量(M2处理)可提高累积贡献率及综合得分。

3 讨论

3.1 垂直深旋耕配施有机肥对盐碱地土壤环境的影响

在盐碱地生态系统中，要达成作物的可持续生产，核心在于优化根际土壤环境。根际作为植物根系与土壤产生交互作用的关键区域，其土壤的理化性质对作物生长起着决定性作用。在盐碱地条件下，土壤中的pH和EC较高，养分(如AN、AP、AK和OM)含量相对较低。有研究表明，垂直深旋耕打破了土壤紧实层，改善了土壤结构和微生物群落多样性(刘昊等，2025)，降低了土壤pH和EC，提高土壤养分含量及其相关酶活性(麻仲花等, 2023)。同时，杜木林等(2025)研究表明，施用有机肥后，土壤中的AN、AP、AK和OM含量均有明显提升，为玉米作物提供了充足的养分供应。本研究表明，垂直深旋耕配施有机肥15 000 kg·hm^{-2} (M2处理)两措施协同，在降低土壤pH和EC、提高土壤养分含量方面效果显著，有效改善了土壤环境质量，提升了盐碱土壤的生态功能。此外，有机肥的施用可为土壤带来丰富的有机质，一方面，有机质可以与土壤中的盐分离子发生络合反应，降低盐分活性，减少其对植物根系的毒害作用，进一步调节土壤pH和EC (熊伟等，2024)；另一方面，有机肥在土壤微生物作用下逐步

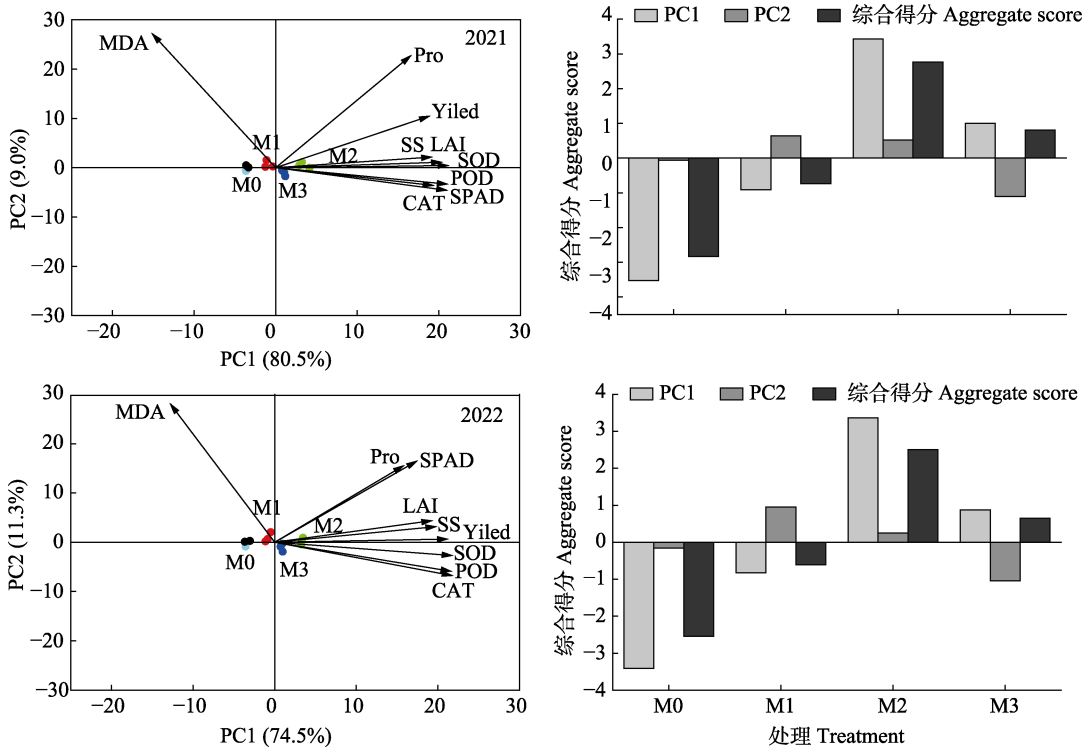


图7 垂直深旋耕配施有机肥对玉米产量与生理指标的综合评价分析。AK，速效钾含量；AN，碱解氮含量；AP，有效磷含量；CAT，过氧化氢酶活性；EC，电导率；LAI，叶面积指数；MDA，丙二醛含量；OM，有机质含量；POD，过氧化物酶活性；Pro，脯氨酸含量；SOD，超氧化物歧化酶活性；SPAD，相对叶绿素含量；SS，可溶性糖含量。

Fig. 7 Comprehensive evaluation analysis of maize yield and physiological variables by vertical deep rotary tillage with organic fertilizer application. AK, quick-acting potassium content; AN, alkaline dissolved nitrogen content; AP, effective phosphorus content; CAT, catalase activity; EC, electrical conductivity; LAI, leaf area index; MDA, malondialdehyde content; OM, organic matter content; POD, peroxidase activity; Pro, proline content; SOD, superoxide dismutase activity; SPAD, relative chlorophyll content; SS, soluble sugar content.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

分解释放出氮、磷、钾等多种养分, 提高了土壤养分的有效性。但过多的有机肥投入可能会导致土壤中某些离子浓度过高, 影响了土壤的酸碱平衡和盐分调节能力, 不利于玉米根系生长及养分吸收, 导致经济效益明显下降(宿庆瑞等, 2006)。本研究也证明, 有机肥用量达到22 500 kg·hm^{-2} (M3处理)虽增加了土壤部分养分含量, 但与M2相比, 在一定程度上提高了土壤pH和EC, 导致土壤溶液浓度过高, 限制了土壤生态功能的持续提升。

3.2 垂直深旋耕配施有机肥对盐碱地玉米叶片衰老特性的影响

作物叶片保持良好的生长生理状态, 有助于扩大光合面积和提高光合性能, 进而促进光合产物合成与转运(苏明等, 2024a)。盐碱胁迫会破坏细胞渗透压平衡引发活性氧积累, 造成膜脂过氧化损伤, 影响叶片叶绿素合成与酶活性, 造成玉米叶片早衰(王丽萍等, 2025)。有研究(邓永晟等, 2020)表明, 垂直深旋耕通过打破犁底层, 降低了土壤的盐碱浓度, 减少盐分对叶片的伤害, 有利于LAI和叶片SPAD的提升, 使玉米拥有较高的光合性能, 延缓叶片衰老。还有研究表示, 充足的养分供应有助于叶绿素的合成, 提高叶片的光合作用效率(尤召阳等, 2024), 而有机肥的施用为土壤提供丰富的养分(杜木林等, 2025)。本研究表明, 垂直深旋耕配施适量有机肥(M2处理)能显著提高玉米叶片的LAI和SPAD, 且延缓叶片衰老起始时间1.7–2.19 d, 这主要源于垂直深旋耕和有机肥施用对盐碱土壤生态功能的改善。然而, 过量的有机肥投入(M3处理)导致LAI和SPAD提升效果低于M2处理, 这可能是因为土壤酶活性和微生物功能受到抑制(麻仲花等, 2023), 影响了土壤养分的转化释放, 进而限制了叶片的生长发育。

盐碱胁迫引起膜脂过氧化, 会导致MDA含量增加, 其积累会破坏细胞膜结构和功能(坚天才等, 2021)。抗氧化防御系统和渗透调节物质(Pro、SS等)在植物逆境中, 通常用来抵御细胞受损并维护膜结构的完整性(吴含玉等, 2019), 以延缓作物叶片衰老(仇琳等, 2022)。已有研究(王丹等, 2022; 赵雯馨等, 2023; Xie et al., 2024)表明, 优化耕作和施肥措施能够有效提升叶片抗氧化酶活性以延缓叶片衰老。本研究发现, 垂直深旋耕下配施适量有机肥(M2处理)显著延缓了玉米叶片衰老, 其主要机理是合理的耕作施肥措施提高了叶片的SOD、POD、CAT等抗氧化酶活性和可溶性糖含量, 降低了MDA的含量, 促进叶片抗氧化酶系统对活性氧的清除, 增强植株的抗氧化能力, 从而延缓叶片的衰老(李翠红等, 2016; 张美微等, 2022; 马达灵等, 2023)。但是, 过量施用有机肥(M3处理)对玉米叶片衰老的延缓效果有所降低, 这可能是因为过度施肥会导致土壤酶活性下降, 破坏土壤生态平衡, 影响矿质元素的吸收和运输, 从而对作物生长和生理过程产生负面影响(张波等, 2024; 张肖, 2024)。此外, 本研究发现垂直深旋耕配施有机肥降低了盐碱地玉米叶片中Pro的含量, 这可能是由于合理的耕作和施肥措施降低了土壤盐碱含量, 提高了土壤肥力, 在一定程度上减轻了盐碱胁迫对玉米叶片Pro代谢的影响(苏明等, 2024b)。

3.3 垂直深旋耕配施有机肥对盐碱地玉米产量的影响

DT配施有机肥二者协同作用显著影响盐碱地玉米籽粒产量, 这与土壤环境质量提升和叶片生理功能的改善密切相关。作物产量的高低是衡量盐碱地改良和培肥效果最直接的标准(屈忠义等, 2020)。李中海等(2023)研究发现, 延缓叶片衰老是提高籽粒产量的有效途径。垂直深旋耕和施用有机肥是改善土壤环境质量, 增强作物抗逆性, 提高产量的重要措施。王宇先等(2018)的研究表明, 深松措施能够改良土壤结构, 使土壤盐分降低约30%–40%, 玉米产量增加12%–15%。另有研究(于菲等, 2022)发现, 施用有机肥可提高盐碱土壤肥力, 促进养分的吸收利用, 从而提高了玉米产量。本研究结果表明, 与常规耕作施肥措施相比, 垂直深旋耕配施适量的有机肥既能改善土壤结构, 降低土壤盐分含量, 还能增加土壤养分含量, 有效提升土壤质量和玉米抗逆生理活性, 从而表现出更为显著的协同增产效应, 其中深旋耕配施有机肥14 505–16 710 kg·hm^{-2}时可实现产量最大化。但是, 过多的有机肥施用(M3)在一定程度上提高了土壤pH和EC, 造成土壤溶液浓度升高, 抑制了玉米正常的生理代谢过程, 加速了玉米生育中后期叶片衰老, 致使产量较M2处理有所降低。因此, 垂直深旋耕配施适量的有机肥, 可改善盐碱土壤环境质量, 提升盐碱地土壤生态功能, 增强玉米生理活性, 延缓叶片衰老, 从而实现玉米增产。

4 结论

垂直深旋耕配施有机肥(M2处理)能降低土壤

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

pH和EC, 提高土壤养分含量, 为玉米生长营造了更适宜的土壤环境; 还能保持玉米全生育期较大的LAI和SPAD, 增强叶片光合作用, 延缓叶片衰老起始时间1.7–2.19 d; 同时显著提高了叶片的抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性, 增强了清除活性氧的能力, 有效减少了MDA的积累。而过多施用有机肥(M3处理)会使土壤pH和EC升高, 导致各生理指标也会相应降低, 致使其产量低于M2。其中有机肥施用量保持在14 505–16 710 kg·hm^{-2}时可实现产量最大化。这为宁夏引黄灌区盐碱地玉米绿色高效生产提供了理论支撑。

参考文献

Bao SD (2000). *Soil Agrochemical Analysis*. 3rd ed. China Agricultural Publishing House, Beijing. [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 3版. 中国农业出版社, 北京.]

Deng J (2024). Research on the role of fertilizers in sustainable soil use. *Rural Scientific Experiment*, (1), 48-50. [邓炯 (2024). 肥料在土壤可持续利用中的作用研究. 农村科学实验, (1), 48-50.]

Deng YS, Zhang M, Li W, Liu YJ, Peng SG, Tian F, Zhang ZW, Zhang C, Jiang ZM, Chen J, Su GX, Deng XH (2020). Effects of deep vertical rotary tillage on physicochemical properties of tobacco-planting soil and growth of flue-cured tobacco. *Chinese Tobacco Science*, 41(6), 30-36. [邓永晟, 张敏, 李伟, 刘勇军, 彭曙光, 田峰, 张仲文, 章程, 江智敏, 陈金, 粟戈璇, 邓小华 (2020). 垂直深旋耕对植烟土壤理化性状和烤烟生长的影响. 中国烟草科学, 41(6), 30-36.]

Du ML, Chen LL, Yang L, Yue LN, Liu XW, Jing JY (2025). Effects of mixed cropping of different varieties of silage maize on yield and quality. *Acta Agrestia Sinica*, 33, 273-282. [杜木林, 陈莉莉, 杨靓, 岳丽楠, 刘笑玮, 荆晶莹 (2025). 不同基因型青贮玉米混作对产量及品质的影响. 草地学报, 33, 273-282.]

Jian TC, Kang JH, Wu HL, Liu GH, Gao D, Ma XY, Li X (2021). Antioxidative characteristics study of nitrogen in alleviating premature senescence of spring wheat at high temperature after anthesis. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(7), 33-44. [坚天才, 康建宏, 吴宏亮, 刘根红, 高娣, 马雪莹, 李鑫 (2021). 氮素缓解春小麦花后高温早衰的抗氧化特性研究. 中国农业科技导报, 23(7), 33-44.]

Kuang EJ, Li ZX, Chi FQ, Zhang JM, Su QR, Zhu BG (2020). Effect of different plough and organic fertilizer on characteristics of soybean yield and soil nutrients. *Soybean Science*, 39(1), 108-115. [匡恩俊, 李梓瑄, 迟凤琴, 张久明, 宿庆瑞, 朱宝国 (2020). 耕地方式与有机肥配施对大豆产量及土壤养分特征的影响. 大豆科学, 39(1), 108-115.]

Li CH, Zhang Q, Feng YQ, Chen DP, Zhang YM, Wei QP (2016). Effects of organic fertilization within partial root on the growth and leaf physiological characteristics of apple trees. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 34(3), 23-30. [李翠红, 张强, 冯毓琴, 陈大鹏, 张永茂, 魏钦平 (2016). 分区施用有机肥对苹果树体生长和叶片生理特性的影响. 干旱地区农业研究, 34(3), 23-30.]

Li GH, Liu PP, Zhao B, Dong ST, Liu P, Zhang JW, Tian CX, He ZJ (2017). Effects of water conditions and controlled release urea on yield and leaf senescence physiological characteristics in summer maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 571-580. [李广浩, 刘平平, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 田翠霞, 何在菊 (2017). 不同水分条件下控释尿素对夏玉米产量和叶片衰老特性的影响. 应用生态学报, 28, 571-580.]

Li ZH, Guo YF, Ren GD, Zhang KW, Miu Y, Guo HW (2023). Advances in leaf senescence. *Journal of Plant Physiology*, 59, 1627-1656. [李中海, 郭永峰, 任国栋, 张可伟, 缪颖, 郭红卫 (2023). 叶片衰老研究进展. 植物生理学报, 59, 1627-1656.]

Liu H, Ma ZH, Liu WF, Wan MH, Ma FL, Wu N, Liu JL (2025). Effects of different tillage practices with organic fertilizers on rhizosphere soil microbial communities of maize in saline-alkali soils. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 33(1), 25-39. [刘昊, 麻仲花, 刘威帆, 万猛虎, 马风兰, 吴娜, 刘吉利 (2025). 不同耕作方式配施有机肥对盐碱地玉米根际土壤微生物群落的影响. 中国生态农业学报, 33(1), 25-39.]

Liu HB, Liu GL, Cheng YF, Li HX, Yin CL, Ning TY, Liu P, Li G (2024). Effects of alternate tillage mode on soil water-salt distribution and winter wheat yield in saline-alkali soil. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, (5), 54-57. [刘鸿博, 刘国利, 程云飞, 李宏旭, 尹承龙, 宁堂原, 刘鹏, 李耕 (2024). 交替耕作模式对盐碱地土壤水盐分布及冬小麦产量的影响. 农业科技与装备, (5), 54-57.]

Ma DL, Gao HX, Yu XF, Gao JL, Li B (2023). Effects of subsoiling tillage on stalk lodging resistant mechanical characteristic of maize varieties after physiological maturity. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 41(1), 140-149. [马达灵, 高慧霞, 于晓芳, 高聚林, 李博 (2023). 深松耕作对不同年代玉米品种生理成熟后的抗倒伏力学特性的影响. 干旱地区农业研究, 41(1), 140-149.]

Ma ZH, Liu JL, Wu N, Yang YS, Hu YQ, Zhe YQ (2023). Effects of deep rotary tillage combined with organic fertilizer on bacterial community structure and function of maize rhizosphere soil in saline alkali land. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 44, 479-491. [麻仲花, 刘吉利, 吴娜, 杨永森, 胡永琪, 者永清 (2023). 深旋耕配施有机肥对盐碱地玉米根际土壤细菌群落结构及其功能的影响. 中国农业气象, 44, 479-491.]

Qiu L, Zhao LS, Xie YD, Xiong HC, Gu JY, Bi XL, Liu LX,

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Guo HJ (2022). Advances in research on premature senescence in plants. *Journal of Plant Genetic Resources*, 23, 346-357. [仇琳, 赵林姝, 谢永盾, 熊宏春, 古佳玉, 毕秀丽, 刘录祥, 郭会君 (2022). 植物早衰研究进展. 植物遗传资源学报, 23, 346-357.]

Qu ZY, Hu M, Wang LP, Ding YH, Gao XY (2020). Effects of different improvement measures on hydrothermal carbon and sunflower yield in salinized soil. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51, 268-275. [屈忠义, 胡敏, 王丽萍, 丁艳宏, 高晓瑜 (2020). 不同改良措施对盐渍化土壤水热碳与葵花产量的影响. 农业机械学报, 51, 268-275.]

Su M, Liu QJ, Hong ZQ, Li FG, Zhang ZZ, Zhou T, Ma JL, Wu HL, Kang JH (2024a). Effects of different nitrogen application rates on photosynthetic characteristics and yield formation of potato in semi-arid region of northwest China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 30, 1919-1933. [苏明, 柳强娟, 洪自强, 李翻过, 张正珍, 周甜, 马纪龙, 吴宏亮, 康建宏 (2024a). 西北半干旱区不同施氮量对马铃薯光合特性及产量形成的影响. 植物营养与肥料学报, 30, 1919-1933.]

Su M, Liu QJ, Zhang ZZ, Zhou T, Hong ZQ, Li FG, Kang JH, Wu HL (2024b). Effects of nitrogen application on antioxidant properties and yield of dryland potato leaves in the mountainous region of southern Ningxia. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 32, 1341-1354. [苏明, 柳强娟, 张正珍, 周甜, 洪自强, 李翻过, 康建宏, 吴宏亮 (2024b). 施氮量对宁夏南部山区旱地马铃薯叶片抗氧化特性及产量的影响. 中国生态农业学报, 32, 1341-1354.]

Su QR, Li WX, Chi FQ (2006). Effect of organic fertilizer application on soil salt content and the yield of rice. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 22, 299-301. [宿庆瑞, 李卫孝, 迟凤琴 (2006). 有机肥对土壤盐分及水稻产量的影响. 中国农学通报, 22, 299-301.]

Sun J (2013). Improvement of saline and waste land into good land. *China Rural Science & Technology*, (8), 28-29. [孙洁(2013). 盐碱地改良废弃土地变良田. 中国农村科技 (8), 28-29.]

Sun Q, Hu JJ (2006). *Research Techniques in Plant Physiology*. Northwest A&F University Press, Xianyang, Shaanxi. [孙群, 胡景江 (2006). 植物生理学研究技术. 西北农林科技大学出版社, 陕西咸阳.]

Wang BL, Zhou CS, Hai Z, Lou YX, Liu XY, Zhen T, Liu P (2024). Effects of deep-pine tillage and mulching on soil physicochemical properties and maize yield in saline-alkaline land of West Liao He Soda. *Jiangsu Agricultural Science*, 52(19), 252-258. [王本龙, 周春生, 海珍, 娄雨欣, 刘学瑶, 甄婷, 刘萍 (2024). 深松耕作与覆膜对西辽河苏打盐碱地土壤理化性质及玉米产量的影响. 江苏农业科学, 52(19), 252-258.]

Wang CJ, Li FX, Wu X (2021). Effects of different organic materials on soil nutrient content and nitrogen availability in saline alkali land of Yinbei irrigation area. *Modern Agricultural Science and Technology*, (23), 141-142. [王长军, 李凤霞, 吴霞 (2021). 不同有机物料对银北灌区盐碱地土壤养分含量及氮有效性的影响. 现代农业科技, (23), 141-142.]

Wang D, Lyu YJ, Yao FY, Xu WH, Chen SM, Shao XW, Cao YJ, Wang YJ (2022). Leaf senescence characteristics post-anthesis at different positions of spring maize canopy under different cultivation models. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 30, 1925-1937. [王丹, 吕艳杰, 姚凡云, 徐文华, 陈帅民, 邵玺文, 曹玉军, 王永军 (2022). 不同栽培模式春玉米花粒期冠层不同部位叶片的衰老特性. 中国生态农业学报, 30, 1925-1937.]

Wang LP, Li P, Zhao LH, Fan ZL, Hu FL, Fan H, He W, Chai Q, Yin W (2025). Response of senescence characteristics for maize leaves under different plastic mulching and using patterns in oasis irrigation areas of northwestern China. *Acta Agronomica Sinica*, 51, 233-246. [王丽萍, 李盼, 赵连豪, 樊志龙, 胡发龙, 范虹, 何蔚, 柴强, 殷文 (2025). 西北绿洲灌区玉米叶片衰老特征对不同地膜覆盖利用方式的响应. 作物学报, 51, 233-246.]

Wang QM, Jing YP, Li YJ, Zhao J, Zhang YZ, Li XP, Li HC, Liu YJ, Bai YX (2020). Effect of different fertilizer regime on the improvement of saline-alkali soil in Hetao Irrigation District. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (5), 124-131. [王庆蒙, 景宇鹏, 李跃进, 赵举, 张雅贞, 李秀萍, 李焕春, 刘宇杰, 白勇兴 (2020). 不同培肥措施对河套灌区盐碱地改良效果. 中国土壤与肥料, (5), 124-131.]

Wang W, Li MY, Zhou R, Mo F, Khan A, Batool A, Zhang W, Lu JS, Zhu Y, Wang BZ, Yang YM, Wang J, Tao XP, Xiong YC (2023). Leaf senescence, nitrogen remobilization, and productivity of maize in two semiarid intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 150, 126943. DOI: 10.1016/J.EJA.2023.126943.

Wang XQ, Xu X, Li FX (2010). Possible effects of coal flue gas desulfurization on nitrogen metabolism of alfalfa and research progress. *Agricultural Science Research*, 31(4), 84-87. [王学琴, 许兴, 李凤霞 (2010). 燃煤烟气脱硫物施用对苜蓿氮素代谢的可能影响及研究进展. 农业科学研究, 31(4), 84-87.]

Wang Y, Zhao C, Fan ZL, Gou ZW, Hu FL, Yin W, Chai Q (2020). Characteristics of dry matter accumulation and yield formation of dense planting maize in different row spacings. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 28, 652-661. [王玉, 赵财, 樊志龙, 苟志文, 胡发龙, 殷文, 柴强 (2020). 行距及密度影响玉米密植潜力的干物质累积和产量构成机制. 中国生态农业学报, 28, 652-661.]

Wang YX, Wang JH, Liu YT, Ren CM, Yang HY, Xu YY, Gao P, Zhao L, Hu JF (2018). Effects of different deep loosening years treatments on the layer structure and the yield of maize of saline alkali soil in semi-arid region of Heilongjiang Province. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, (8), 15-18. [王宇先, 王俊河, 刘玉涛, 任翠梅, 杨慧莹, 徐莹莹, 高盼, 赵蕾, 胡继芳 (2018). 不同深

DOI: 10.17521/cjpe.2025.0048

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

松年限处理对黑龙江省西部地区盐碱土耕层结构及玉米产量的影响. 黑龙江农业科学, (8), 15-18.]

Wu HY, Zhang YJ, Zhang WF, Wang KR, Li SK, Jiang CD (2019). Photosynthetic characteristics of senescent leaf induced by high planting density of maize at heading stage in the field. *Acta Agronomica Sinica*, 45, 248-255. [吴含玉, 张雅君, 张旺锋, 王克如, 李少昆, 姜闯道 (2019). 田间密植诱导抽穗期玉米叶片衰老时的光合作用机制. 作物学报, 45, 248-255.]

Xie GM, Liang M, Chen P, Zhang C, Fan MY, Wang CY, Zhao L (2024). The effects of tillage and the combined application of organic and inorganic fertilizers on the antioxidant enzyme activity and yield of maize leaves. *Agronomy*, 14, 968. DOI: 10.3390/agronomy14050968.

Xiong W, Jiang LX, Chi P, Wu Y, Geng D, Du CQ, Liu S, Liu Y, Yang YL, Pan C (2024). Application and effect of soil fertility enhancement measures in high standard farmland construction in Luotian County. *Central South Agricultural Science and Technology*, 45(11), 81-84. [熊伟, 江路霞, 池鹏, 吴雨, 耿栋, 杜成全, 刘胜, 刘洋, 杨乙琳, 潘超 (2024). 罗田县高标准农田建设土壤地力提升措施的应用及效果. 中南农业科技, 45(11), 81-84.]

Yang HL, Bie H (2024). Characteristics and application prospect of a new oil crop *Cyperus esculentus*. *Seed Science & Technology*, 42(17), 139-141. [杨海龙, 别海 (2024). 新型油料作物油莎豆的特性及应用前景探析. 种子科技, 42(17), 139-141.]

Yang QH, Zhang Q, Wang YX, He X, Yang PW, Zhao DZ, Ni M, Zhu HY (2019). Effects of deep ploughing on soil layer characteristics and maize yield on red soil sloping land. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 32, 2783-2789. [杨群辉, 张庆, 王应学, 何翔, 杨佩文, 赵德柱, 倪明, 朱红业 (2019). 红壤坡地深松耕对土层特性和玉米产量的影响. 西南农业学报, 32, 2783-2789.]

Yu F, Zhao S, Zhao Y, Wang Y, Fan YK, Meng QF (2022). Effects of long-term application of cattle manure on soil fertilityand corn yield of saline-sodic soil in western Songnen Plain. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 40, 172-180. [于菲, 赵硕, 赵影, 汪勇, 范益恺, 孟庆峰 (2022). 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土肥力和玉米产量的影响. 干旱地区农业研究, 40, 172-180.]

Yu HD, Chu ZY, Wang SY, Guo YQ, Ren BZ, Zhang JW (2023). Effects of different controlled nitrogen ratios on leaf senescence and grain filling characteristics of summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 56, 3511-3529. [于浩东, 初振宇, 汪顺源, 郭艳青, 任佰朝, 张吉旺 (2023). 不同控释氮素比例对夏玉米叶片衰老和籽粒灌浆特性的影响. 中国农业科学, 56, 3511-3529.]

You ZY, Wang JG, Liu Y, Yan ZH, Zhang JL, Wan SB (2024). Interactive effect of N and Ca on the nitrogen metabolism enzyme activity, nitrogen utilization and calcium accumulation of peanut. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 46, 904-912. [尤召阳, 王建国, 刘颖, 闫振辉, 张佳蕾, 万书波 (2024). 氮钙互作对花生氮素利用及钙素积累的影响. 中国油料作物学报, 46, 904-912.]

Zhang B, Li JR, Guo LN, Zhu SJ, Fu FW (2024). Research progress on the effect of organic fertilizer application on soil microorganisms. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 53(6), 27-32. [张波, 李江荣, 郭亮娜, 朱思洁, 付芳伟 (2024). 有机肥添加对土壤微生物的影响研究进展. 吉林林业科技, 53(6), 27-32.]

Zhang JY, Du QZ, Liu X, Deng JH, Jiao Q, Gong L, Jiang XY (2021). The regulation of S-abscisic acid on corn growth and yield in saline-alkali soil. *Agrochemicals*, 60, 853-858. [张建业, 杜庆志, 刘翔, 邓佳辉, 焦芹, 龚洛, 姜兴印 (2021). S-诱抗素对盐碱地玉米生长及产量的调控作用. 农药, 60, 853-858.]

Zhang JZ (2007). *Effect of Microbial Organic Fertilizer on Physicochemical Property of Saline Alkali Soil and Physiologic Reaction of Alfalfa*. Master degree dissertation, Northeast Agricultural University, Harbin. [张金柱 (2007). 生物有机肥对盐碱土理化性质及苜蓿生理反应影响的研究. 硕士学位论文, 东北农业大学, 哈尔滨.]

Zhang MW, Qiao JF, Song SS, Ma J, Zhang PP, Li C, Niu J, Guo HX (2022). Effect of drought stress on grain-filling and physiological properties of summer maize and the exogenous spermidine regulation. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 36, 2501-2509. [张美微, 乔江方, 宋韶帅, 马娟, 张盼盼, 李川, 牛军, 郭涵潇 (2022). 干旱对夏玉米籽粒充实和生理特性的影响及其外源亚精胺调控. 核农学报, 36, 2501-2509.]

Zhang NX, Zhao C, Zhao LX, Cai LJ, Wang YF, Chai Q (2018). Water-saving potential for biennial mulched corn with same plastic film in oasis irrigation area. *Acta Agronomica Sinica*, 44, 876-885. [张乃旭, 赵财, 赵良霞, 蔡莉娟, 王一帆, 柴强 (2018). 绿洲灌区一膜覆两年玉米的节水潜力. 作物学报, 44, 876-885.]

Zhang X (2024). Agricultural environmental protection technology in the development of ecological agriculture. *World Tropical Agriculture Information*, (11), 21-22. [张肖 (2024). 生态农业发展中的农业环保技术. 世界热带农业信息, (11), 21-22.]

Zhao WX, Huang M, Li YJ, Wu JZ, Zhao KN, Zhang J, Li SJ, Wang HT, Huang XL, Li S, Li WN (2023). Effects of different tillage practices on physiological characteristics in flag leaves and grain yield of wheat during the summer fallow season in dryland of Western Henan. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 41(5), 175-185. [赵雯馨, 黄明, 李友军, 吴金芝, 赵凯男, 张军, 李淑靖, 汪洪涛, 黄修利, 李爽, 李文娜 (2023). 夏闲季不同耕作方式对豫西旱地小麦旗叶生理特性和产量的影响. 干旱地区农业研究, 41(5), 175-185.]

责任编委: 李凤民 责任编辑: 李 敏

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology