

秦培亮,杨艳山,邵金发. 不同耕作方式对小麦根系构型及抗根倒伏能力的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(6):105-110.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.06.012

不同耕作方式对小麦根系构型及抗根倒伏能力的影响

秦培亮,杨艳山,邵金发

(苏州农业职业技术学院,江苏苏州 215000)

摘要:为揭示不同耕作方式对小麦根系构型及抗根倒伏能力的影响,深入探究免耕单粒精量播种(MT)和带状耕作单粒精量播种(DT)和全幅耕作单粒精量播种(QT)等3种不同种植方式对小麦根系抗倒伏性能的具体效应及其与根系形态结构之间的内在联系。通过构建三维根系可视化模型,量化根系条数、根拔力、土体空间覆盖率差异系数、角度拓展趋势差异系数、长度拓展趋势差异系数等5个关键指标,系统分析了不同种植方式对根系形态及抗倒伏能力的影响。研究表明,免耕(MT)处理相比耕作处理根系数量平均少25%,根拔力平均少7%,根系土体空间分布均匀性低于耕作处理。带状耕作方式下小麦根系沿种沟平行方向角度拓展趋势较全幅耕作高出55.3%,长度拓展高出63.1%,根系土体空间分布不均导致根拔力比全幅耕作小10%,抗倒伏能力低于全幅耕作,相对减产5%。说明本研究提出的观点和研究方法能够揭示不同耕作方式对小麦根系构型及抗根倒伏能力的影响。根系在土体中的分布越均匀,各向生长趋势差异越小,其根拔力越大,抗倒伏能力越强,产量越好。

关键词:小麦;耕作方式;根系构型;生长趋势;根倒伏

中图分类号:S512.104 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)06-0105-06

小麦作为我国农业领域的核心作物,具有很高的食用与经济价值,其产量深受种植方式的影响^[1-2]。种植方式直接影响土壤耕层结构,进而影响作物根系的生长发育及其功能发挥,最终决定作

物的生长状况与产量潜力^[3]。根系,作为作物的关键组成部分,不仅负责水分与养分的汲取,更在稳固植株、抵抗倒伏方面扮演着至关重要的角色^[4]。

研究已证实,根系的发育状况,包括其粗细、分布广度及土体空间占用率,均是决定作物抗倒伏能力的重要因素,根系构型及其分布为作物提供了关键的抗倒伏支撑^[5-6]。为深入探讨种植方式对根系构型及抗倒伏力的影响,一系列衡量指标应运而生,如根直径、入土角度、土体空间占有率及根拔力等^[7-9]。这些指标均需要基于根系构型的精确获

收稿日期:2024-10-06

基金项目:江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(编号:NJ2023-24)。

作者简介:秦培亮(1981—),男,江苏徐州人,博士,副教授,主要从事农业机械化研究。E-mail:28463737@qq.com。

通信作者:杨艳山,博士,讲师,从事智农机装备研究。E-mail:ysyang@szai.eud.cn。

[18]师超,丁敬芝,上官力,等. 施肥量对烤烟产量和上部烟叶质量的影响[J]. 湖北农业科学,2018,57(4):90-92,95.

[19]成明珠,毕一鸣,王浩然,等. 留叶数对烤烟经济性状和烟叶品质的影响[J]. 作物研究,2023,37(6):588-593.

[20]王芳,周亚哲,张雨薇,等. 留叶数和采收方式对郴州烤烟品种‘云烟99’产质量的影响[J]. 作物研究,2018,32(5):403-410.

[21]王雅妮,徐旭光,陈爱国,等. 不同留叶数对烤烟化学成分及焦油释放量的影响[J]. 贵州农业科学,2016,44(9):20-23.

[22]韩玉环,刘晨,杨龙,等. 打顶时期和留叶数对山东烤烟上部叶生长发育的影响[J]. 作物杂志,2023(2):157-162.

[23]穰中文,李思纯,刘佳,等. 种植密度与施氮量对烟田小气候及烟株光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(3):258-263.

[24]贺凌霄,张谦,彭玉富,等. 种植密度、施氮量和留叶数对烤烟

生长特性及产质量的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2020,41(2):40-45.

[25]易镇邪,易迪,张妮敏,等. 施氮量和留叶数对烤烟产量与主要品质指标的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(34):149-153.

[26]李洪勋. 不同施氮量和密度对烤烟产量和质量的影响[J]. 吉林农业科学,2008(3):22-26.

[27]占俊文,梁淑平,沈雪婷,等. 不同施氮量对烤烟生长发育、感官评吸质量及烟碱含量的影响[J]. 山东农业科学,2016,48(4):75-78.

[28]刘国. 施氮量、种植密度对红大品种生长发育与产质量的影响[M]. 北京:中国农业科学院,2011,13-15.

[29]胡丽涛,马啸,岑小红,等. 不同留叶数对重庆丰都地区烤烟K326综合性状影响研究[J]. 重庆与世界(学术版),2015,32(12):20-23,46.

取,然而传统方法如土壤剖面法、石料法等^[10],量化指标主要有根系干重、根系长度、根系直径、根系表面积等^[11-12],这些方法和指标虽能提供一定信息,但多限于定性描述,难以实现根系的定量分析。杨艳山等运用三坐标测量仪结合三维重建技术,成功实现了根系结构的量化研究,并深入剖析了耕作方式对小麦根系构型及生长趋势的具体影响,为探索种植方式与根系抗倒伏能力之间的关系开辟了新路径^[13]。

本研究以根系分布模型为切入点,旨在通过构建根系的三维可视化模型,提出一系列科学且可操作的评估指标,以明确不同种植方式对根系抗倒伏性的具体影响及其与根系构型的内在联系。这一研究不仅丰富了对稻麦系统根系特性的理解,也为优化种植方式、强化耕层管理提供了坚实的理论基础与科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及种植方式

田间试验于 2020—2021 年小麦收割季节在苏州市相城区试验田进行,试验地土壤为典型的黏壤土,设置免耕单粒精量播种(MT)、带状耕作单粒精量播种(DT)、全幅耕作单粒精量播种(QT)等 3 种植方式进行对比试验,单粒精量播种的行距和株距均为 5 cm(图 1)。田间试验主要以小区实现为主,小区面积为 300 m²(长、宽分别为 30、10 m),3 种处理田间管理相同,种植所用品种为宁麦 26。

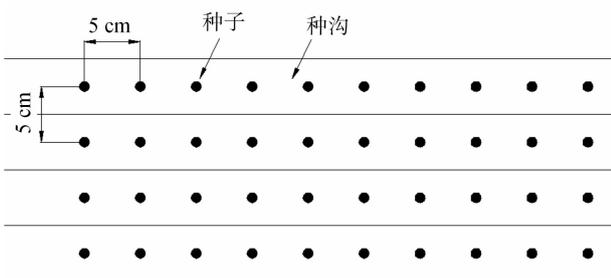


图1 单粒精量播种示意

1.2 小麦根系数据采集及 3D 构型构建

使用陈信信等设计的根系构型数字化仪^[10]对从田间带回的根系样本进行处理,获取其根系空间拓扑数据,具体测量方法见文献[1]。综合考虑小麦根系生长周期、分布特征、土壤恢复时间和取样工作量,取样时间定于小麦收获前 1 周,为了确保数据准确,每次测量随机抽取 4 株小麦根系,将记录的数据转换成 SolidWorks 软件可读取的坐标数据,导

入到 SolidWorks 软件中,生成根系的三维模型(图 2)。

将根系的三维模型按照 40 mm 分为 5 层,通过向 $x-y$ 平面投影统计该层内根系在 $x \sim y$ 、 $x \sim -y$ 、 $-x \sim -y$ 、 $-x \sim y$ 区域内小麦根系的数量(图 2),以便比对不同种植方式对小麦根系长势的影响。

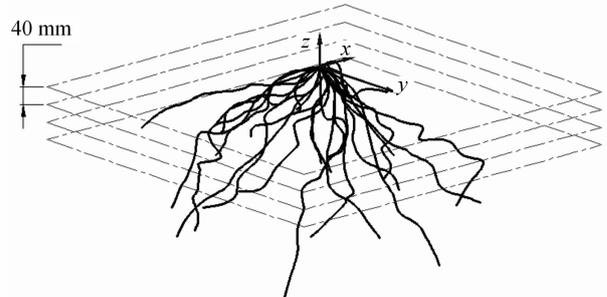


图2 根系 3D 构型及分层处理

1.3 小麦根系生长趋势

小麦根系的生长特性体现在其角度与长度的扩展趋势上。将采集到的小麦根系构型数据,分别映射至 $x-z$ 与 $y-z$ 平面,以便于分析。以种子当前位置为基准点(即坐标原点),沿垂直方向每 5 mm 划分一层,实现根系的分层处理。如图 3 所示,依据坐标系,将研究区域划分为左、右 2 区,其中左侧区域将 x 轴(或 y 轴)的负向视为正向,而右侧区域则保持 x 轴(或 y 轴)的正向定义不变。接着,针对每一层根系,逐一测量,计算出层内相邻两点间的水平根扩展角 α 以及根系的扩展长度 L ,从而全面解析小麦根系的生长特性。

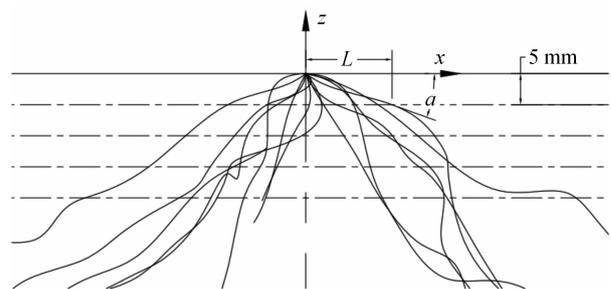


图3 小麦根系构型的分层处理

对根系拓展角 α 的余弦值及最大拓展长度 L 实施方差分析策略,预设角度与长度拓展的期望值为零基准。随后,将左侧与右侧(或称为“非左侧”部分)根系的角与长度拓展趋势的方差值分别累加,得到 T_A 与 T_L ,以此作为量化根系生长趋势的关键指标。其中, T_A 值越低,反映角度拓展趋势越显著;而 T_L 值越高,则表明长度拓展趋势更为强劲。

具体计算公式如下:

$$C_1 = \frac{\cos\alpha_{11} + \cos\alpha_{12} + \cdots + \cos\alpha_{1n}}{n}; \quad (1)$$

$$T_\alpha = \frac{1}{n}[(C_1 - 1)^2 + (C_2 - 1)^2 + \cdots + (C_n - 1)^2]; \quad (2)$$

$$T_A = T_{\alpha_R} + T_{\alpha_L}. \quad (3)$$

式中: C_1 表示各根系在第 1 层的拓展角余弦值均值; α_{11} 表示第 1 条根在第 1 层内的拓展角度; T_α 表示角度拓展系数; n 表示层数; T_A 表示视图根系的角度拓展系数; T_{α_R} 表示视图右侧部分的根系角度拓展系数; T_{α_L} 表示视图左侧部分的根系角度拓展系数。

$$L_1 = \frac{L_{11} + L_{12} + \cdots + L_{1n}}{n}; \quad (4)$$

$$T_L = \frac{1}{n}[(L_1 - 0)^2 + (L_2 - 0)^2 + \cdots + (L_n - 0)^2]; \quad (5)$$

$$T_L = T_{LR} + T_{LL}. \quad (6)$$

式中: L_1 表示各根系在第 1 层内的拓展长度均值; L_{11} 表示第 1 条根在第 1 层内的拓展长度; n 表示层数; T_L 表示整体长度拓展趋势; T_{LR} 表示投影面右侧长度拓展趋势; T_{LL} 表示投影面左侧长度拓展趋势。

引入根系角度拓展趋势差异度指标 P_α 与长度拓展趋势差异度指标 P_L , 旨在量化根系在 y 轴 ($y-z$ 视图) 与 x 轴 ($x-z$ 视图) 方向上生长趋势的差异性。这 2 个指标的绝对值越大, 意味着角度与长度的扩展趋势在 2 个方向上的差异越显著。特别地, 当 P_α 与 P_L 的值为正时, 它们共同指示了小麦根系在 y 方向上的生长趋势更为突出。具体计算公式如下:

$$P_\alpha = \left(\frac{TA_{x-z}}{TA_{y-z}} - 1 \right) \times 100\%。 \quad (7)$$

式中: P_α 表示角度拓展趋势差异系数; TA_{y-z} 表示根系沿种沟方向上的角度拓展趋势; TA_{x-z} 表示种沟垂直方向上根系的角度拓展趋势。

$$P_L = \left(\frac{TL_{y-z}}{TL_{x-z}} - 1 \right) \times 100\%。 \quad (8)$$

式中: P_L 表示长度拓展趋势差异系数; TL_{y-z} 表示根系沿种沟方向上的长度拓展趋势; TL_{x-z} 表示种沟垂直方向上根系的长度拓展趋势。

1.4 小麦根系垂直根拔力

在小麦达到成熟阶段, 依据“X”形布局挑选出 5 株具有代表性的植株, 这些植株需能全面反映小

区的整体生长状况。随后, 在距离植株地上部分 10 cm 处进行截断处理。利用由北京益康农科技有限公司研发的 ECA-YJ01 型根系拉力测试仪, 将测试仪的固定绳索牢固地绑定在茎的基部。操作时, 缓慢而稳定地旋转测试仪的方向盘, 直至植株被垂直拔出地面。在此过程中, 准确记录下使植株脱离土壤所需的最大力量值 (以 kg 为单位), 这一数值被定义为垂直根拔力。

1.5 土体空间覆盖率

将小麦根系向 $x-y$ 投影面投影, 并将投影面分为 100×100 个边长为 5 mm 的网格 (图 4), 计算种沟内外含有根系的网格数量, 按照公式 (9) 计算根系土体空间覆盖率差异系数。土体空间覆盖率差异系数越小, 说明根系土体空间覆盖越均匀, 越有利于提高作物的抗倒伏性能和根系的养分吸收。

$$P = \left| \frac{N_i}{N_o} - 1 \right| \times 100\%。 \quad (9)$$

式中: P 为土体空间覆盖率差异系数; N_i 为种沟内含有根系的网格数量; N_o 为种沟外含有根系的网格数量。

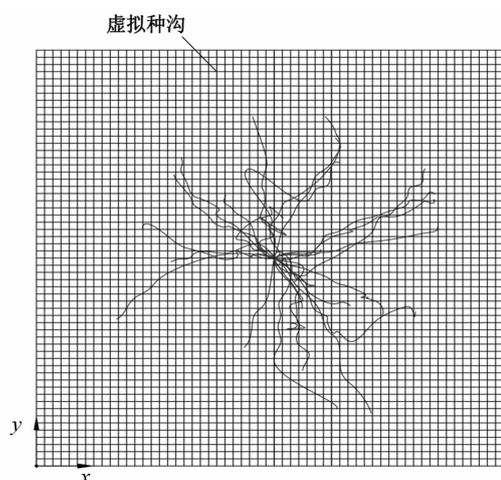


图4 小麦根系投影面网格划分

1.6 产量的测定

在待测的试验田中, 运用随机抽样法, 选取 3 ~ 5 个具有代表性的 1 m^2 样方。样方应均匀分布于试验田不同区域, 涵盖长势好、中、差的位置, 以此保障样方能代表整体小麦生长状况。在每个样方内, 小心收割所有小麦植株, 尽量避免麦穗掉落, 将收割的植株捆绑标记, 带回室内。逐一清点每个样方内小麦植株的麦穗数量, 记录总数。随后, 从每个样方中随机抽取 5 ~ 10 穗, 仔细数出每穗的籽粒数, 计算平均每穗粒数, 进而算出每个样方的总粒

数。把所有样方的籽粒充分混合均匀,随机抓取 3 组 1 000 粒籽粒,分别用天平称重,取这 3 次重量的平均值作为该试验田小麦的千粒重。利用下面的公式进行产量计算:

$$Y = \frac{W \times n}{100}$$

式中:Y 为产量,kg/hm²;W 为千粒重,g;n 为样方总粒数。

1.7 数据处理

将全部数据录入 Excel,依数据特征设表头,据此生成柱状图、折线图等图表辅助分析。随后,把 Excel 数据导入 SPSS 软件,进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式对根条数的影响

由表 1、图 5 可知,全幅耕作(QT)处理下的根

系数量在 2020、2021 年连续 2 年的监测中均处于领先地位,且在不同区域内相同层级的根系数量差异较小。这是由于全幅耕作后,土地得到了全面松土,小麦根系在各个方向生长时遇到的阻力基本相同,根系在空间内分布相对均匀,有利于增强作物的抗倒伏能力。

相比之下,带状耕作(DT)处理的松土主要集中在种沟内,小麦的根系更容易沿着种沟方向生长,导致不同区域内相同层级的根系数量差异较大,根系空间分布不够均匀。免耕(MT)处理由于土壤未经过松土处理,小麦根系在生长初期受到较大的土壤阻力,影响其生长和发育。因此,免耕处理根系数量明显少于带状耕作和全幅耕作处理,根系数量平均少 25%。此外,免耕处理下的根系难以以下扎并向深层生长,导致根系数量减少,分布呈无规律性。

表 1 小麦根系条数统计

年份	耕作处理	根系条数(条)																				根总数(条)
		x~y					x~-y					-x~-y					-x~y					
		1层	2层	3层	4层	5层	1层	2层	3层	4层	5层	1层	2层	3层	4层	5层	1层	2层	3层	4层	5层	
2020	QT	7	8	5	2	3	7	4	3	1	1	6	5	2	2	1	9	7	4	2	1	30
	MT	4	5	4	2	1	6	2	2	2	0	3	5	1	1	1	8	6	0	1	0	22
	DT	8	7	5	4	1	3	2	1	0	0	6	5	2	1	1	10	9	3	2	1	25
2021	QT	8	10	4	3	2	8	5	2	2	1	8	5	3	2	2	9	8	4	1	0	33
	MT	5	3	4	1	1	6	3	2	1	1	4	4	0	2	1	9	5	2	1	0	24
	DT	10	6	3	4	0	4	1	2	1	0	7	4	2	0	0	7	7	5	1	1	28

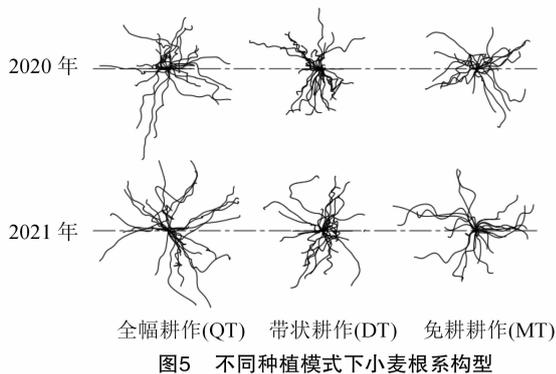


图 5 不同种植模式下小麦根系构型

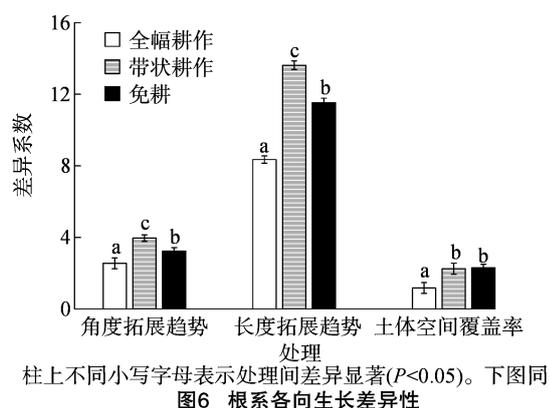
2.2 根系生长趋势

在 y-z 与 x-z 投影面的清晰展示下,图 6 深刻揭示了小麦根系试样在不同耕种条件下土体空间覆盖率的显著差异。从图中可以直观地观察到,小麦根系的生长趋势强烈地受到耕作方式的影响,呈现出多样化的生长模式。全幅耕作处理下的小麦根系,在土体空间中的覆盖率差异系数相较于免耕

处理和带状耕作处理有显著减少,说明全幅耕作中的小麦根系生长方向未受明显限制,因此呈现出较为随机的生长趋势,各向差异不显著。而带状耕作(DT)处理则通过条播种沟引导根系生长,使得根系更倾向于沿种沟平行方向拓展,不仅角度拓展趋势差异系数较免耕、全幅耕作有显著增长(分别高出 22.6%、55.3%),长度拓展也实现了大幅提升(分别高出 18.1%、63.1%)。这种“生长趋势的定向性差异”是带状耕作处理的一个显著特点。

2.3 不同种植方式对根系垂直根拔力的影响

根拔力,作为衡量小麦植株从土壤中垂直拔出所需最大力量的指标,直接映射了小麦根系的发达程度。较高的根拔力预示着小麦具备更强的抗倒伏能力,反之则较弱。通过对比 2 年间的的数据,发现各处理间的根拔力变化趋势保持一致,但年际间的明显差异不容忽视。具体而言,图 7 清晰展示了 2021 年相较于 2020 年,各处理组的根拔力普遍呈



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同

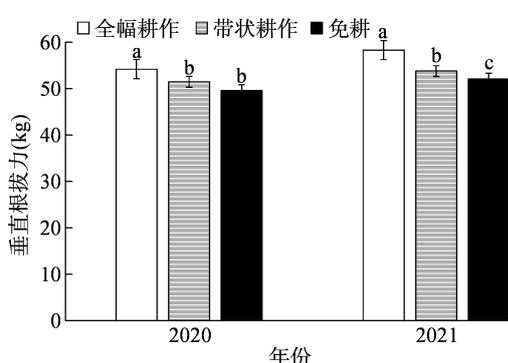


图7 种植方式对根系根拔力的影响

现上升趋势。这一变化可能归因于 2020 年拔根操作前 1 d 出现的降雨,导致土壤湿度增加,从而在一定程度上降低了拔根的阻力。

进一步分析 2021 年不同种植方式的影响,与耕作处理(QT 与 DT)相比,免耕处理的根拔力平均少 7%。这一观察结果与表 1 及图 5 中的试验数据相吻合,揭示了耕作在促进根系发育方面的优势。全幅耕作不仅显著增加了根系的数量,还优化了根系在土体中的空间分布,使其更为均匀合理。带状耕作根系土体空间分布不均导致根拔力比全幅耕作小 10%,抗倒伏能力低于全幅耕作,这种优化的根系结构极大地提升了小麦在土壤中的抓地力,进而有效增强了其抗倒伏的能力。带状耕作在一定程度上促进了根系的生长发育,增加了根系数量,但由于松土仅限于种沟区域,根系在土壤中的空间分布不够均匀。这种不均匀分布影响了根系的垂直拔力,从而在一定程度上削弱了作物的抗倒伏性能。

2.4 产量的影响

图 8 展示了不同种植方式对小麦产量的影响,2020 年产量明显低于 2021 年,这是因为 2020 年收割期间降水量较大,小麦倒伏面积大,直接影响了小麦的产量。深入对比 3 种植处理,结果显

示,全幅耕作(QT)连续 2 年在产量上均显著优于其他 2 种处理方式(DT 与 MT)。这一优势主要归因于全幅耕作下小麦植株的根系更为发达、分布更加均匀合理,从而赋予了小麦更强的抗倒伏能力。相比之下,带状耕作由于根系分布不均影响了抗倒伏能力,相对减产 5%;免耕处理在收割时出现了较为严重的倒伏现象,直接影响了其最终产量。因此,全幅耕作因其卓越的根系特性和抗倒伏能力,在产量上展现出了明显的优势。

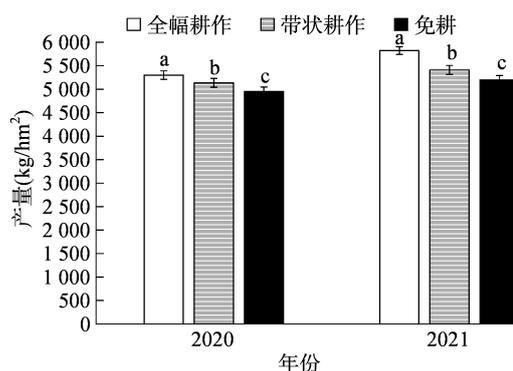


图8 种植方式对小麦产量的影响

3 讨论

作物的抗倒伏能力,作为田间表现的关键指标,不仅直接关联到倒伏程度和面积,更在未发生倒伏时成为品种评估的重要考量。研究表明,根系的多个维度,如根条数、直径、干重及体积,与根倒率存在显著负相关,其中根条数与根直径的影响尤为突出^[14]。特别地,根系生长的方向性,尤其是水平方向上的伸展范围(根幅),对抗倒伏性能有决定性影响,相关系数高达 0.91^[15]。此外,根系的力学特性,如最大垂直根拔力和植株抗拉力,也被证实与抗倒伏能力紧密相关。梁金凤等的研究深入剖析了夏小麦根系特征与其抗倒伏能力的关系,明确指出根条数、根冠比及地上节根条数的增加,是提升作物抗倒伏能力的关键因素^[16]。刘胜群等则通过对比不同耕种方式下的作物表现,进一步验证了高根系数量对于增强作物抗根倒伏能力进而促进产量增加的积极作用^[17]。此外,李永贤等的研究也强调了根系入土角度分布的重要性,指出合理的分布能显著提升根系的垂直根拔力,从而进一步增强作物的抗倒伏性能^[4]。

本研究聚焦于小麦,通过分析根系形态(条数、生长角度、长度及土体覆盖率)及力学特性,探索其作为抗倒伏性评价指标的可行性。不同耕作方式

下,小麦根系的形态与力学特性表现出显著差异,进而影响其抗倒伏能力和最终产量。全幅耕作(CS)因根系发育良好、分布合理且未受条播边界限制,展现出更强的抗倒伏能力和更高的产量。这一结果支持了根系发育状况对抗倒伏性能的正向影响。进一步分析显示,种植年份间的产量差异与气候条件紧密相关。杨杨等的研究明确指出,日降水量是作物倒伏的主要驱动力,其增多直接导致土壤松软,进而削弱根系固定力,使得倒伏风险与日降雨量呈正相关增长^[18]。此外,短时雷雨大风等极端气候的叠加,特别是伴随强降水时,会极大地扩展作物倒伏的范围,加剧小麦倒伏的程度^[4]。本研究结果显示,2020年收割期的大量降雨导致土壤变得松软,使得根系固定能力显著下降,进而加剧了作物的倒伏现象,最终对产量产生了不利影响。倒伏不仅影响了机械收割的效率,还导致产量损失。根系在土壤中的分布情况是影响倒伏的重要因素之一。通常,根系在土壤中的分布越均匀,作物的抗倒伏能力越强。在全幅耕作处理下,小麦的根系分布较为均匀且数量较多,展现出优异的抗倒伏能力,这不仅减少了倒伏风险,也显著提高了作物产量。与此相比,带状耕作和免耕处理的小麦根系数量相对较少,且分布不均匀,导致抗倒伏能力较弱,产量相对较低。这表明根系的构型及其在土壤中的空间分布对作物的抗倒伏性能和产量具有决定性影响。

4 结论

本研究通过构建三维根系可视化模型,深入分析了免耕(MT)、带状耕作(DT)和全幅耕作(QT)3种不同耕作方式对小麦根系构型及抗倒伏能力的影响。结果表明,耕作方式对小麦根系的土体空间分布、根系数量、根拔力及产量均有显著影响。具体而言,全幅耕作(QT)处理下的根拔力最高,比带状耕作(DT)和免耕(MT)分别高出8%、11%。此外,带状耕作促进了根系沿种沟方向的生长,角度拓展趋势较免耕和全幅耕作有显著增长,分别高出22.6%和55.3%,长度拓展趋势也实现了大幅提升,分别增加了18.1%和63.1%。然而,由于带状耕作的松土集中于种沟区域,根系分布不够均匀,导致抗倒伏能力较全幅耕作略低。免耕处理下,根系数量明显减少,根拔力和产量均低于耕作处理,

揭示了土壤松动对根系发育的重要性。

本研究不仅验证了不同耕作方式对小麦根系形态及抗倒伏能力的影响,还突出强调了根系形态和力学特性对作物抗倒伏性能的综合作用。研究结果为优化耕作方式、提高作物抗倒伏能力、增产增效提供了宝贵的科学依据和参考方向,特别为作物品种选育和田间管理提出了新的思路。

参考文献:

- [1] 耿端阳,康云友,王文丽,等. 小麦宽苗带高速排种系统设计与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(10):17-24.
- [2] 陈高华,李京,印伟力,等. 小麦种子穗萌对发芽率的影响及建议[J]. 上海农业科技,2024(5):59-60.
- [3] 杨艳山,吴凡,赵亚平,等. 耕作部件对带状旋耕耕作质量的影响研究[J]. 中国农机化学报,2022,43(12):184-189.
- [4] 李永贤,周世永,吴伯志. 耕作方式对玉米根系构型及抗根倒伏能力的影响[J]. 玉米科学,2022,30(2):112-120.
- [5] 邱红波,何腾兵,龙友华,等. 免耕栽培对玉米根系性状及其产量的影响[J]. 贵州农业科学,2011,39(9):55-57.
- [6] 杨喜田,董惠英,山寺喜成. 土壤硬度对播种苗和栽植苗根系发育的影响[J]. 中国水土保持科学,2005,3(4):60-64,69.
- [7] 王聚辉,程子祥,修文雯,等. 玉米茎叶夹角与根系入土角度相关性研究[J]. 华北农学报,2015,30(增刊1):173-178.
- [8] 苑雅俊,冯家兴,杨启帆,等. 黄淮海平原北部不同熟性夏玉米品种抗倒伏能力研究[J]. 中国农业科技导报,2023,25(7):21-28.
- [9] 张静,王洪章,任昊,等. 夏玉米根系构型与抗根倒性能间的关系[J]. 作物学报,2023,49(1):188-199.
- [10] 陈信信,丁启朔,李毅念,等. 南方稻麦轮作系统下小麦根系的三维分形特征[J]. 中国农业科学,2017,50(3):451-460.
- [11] Imhoff S, Kay B D, da Silva A P, et al. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach[J]. Soil and Tillage Research,2009,106(2):303-310.
- [12] Mei L, Sheng O, Peng S, et al. Growth, root morphology and boron uptake by citrus rootstock seedlings differing in boron-deficiency responses[J]. Scientia Horticulturae,2011,129(3):426-432.
- [13] 杨艳山,丁启朔,赵亚平,等. 耕作方式对小麦根系构型及生长趋势的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(14):214-218.
- [14] 凌莉,裴文东. 种植密度对不同熟期玉米茎秆抗倒伏特性及产量的影响[J]. 玉米科学,2024,32(2):106-113.
- [15] 郑丕尧. 《作物的形态与机能》[J]. 世界农业,1985(9):62.
- [16] 梁金凤,齐庆振,贾小红,等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. 生态环境学报,2010,19(4):945-950.
- [17] 刘胜群,殷殿文,庄文君,等. 春玉米节根抗拉能力对耕作措施的影响[J]. 土壤与作物,2019,8(3):288-292.
- [18] 杨扬,杨建宇,李绍明,等. 玉米倒伏胁迫影响因子的空间回归分析[J]. 农业工程学报,2011,27(6):244-249.