



丁启朔,付琳倩,汪小昆,等.基于多维度指标的小麦种子田间分布质量评价方法研究[J].江西农业大学学报,2024,46(4):841-855.

DING Q S,FU L Q,WANG X C,et al.Evaluation of field distribution quality of wheat seeds based on multidimensional indicators[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(4):841-855.

基于多维度指标的小麦种子田间 分布质量评价方法研究

丁启朔,付琳倩,汪小昆,何瑞银,徐高明

(南京农业大学 工学院/江苏省智能化农业装备重点实验室,江苏 南京 210031)

摘要:【目的】精确播种技术是创建作物合理群体、保障作物增产丰产的重要技术途径。针对精确播种质量的测试评价方法仍然十分缺乏,尤其缺少种子在田间分布质量评价以及精确播种质量与作物出苗率、产量及构成因素间响应关系的定量研究。【方法】以原位激光种子位测试仪、3D数字化和Python等信息技术构建一套基于多维度指标的精确播种质量评价方法,其指标包含一维评价指标(种子直线度)、二维评价指标(种子散布度)、三维评价指标(种-土均质营养利用率);后使用小区精密播种试验台架开展了为期2年的稻茬麦精确播种试验,采用播种行距20 cm,播种粒距×播种深度相组合的9种处理,即1.5 cm×2 cm(A₁B₁)、1.5 cm×3 cm(A₁B₂)、1.5 cm×6 cm(A₁B₃)、3 cm×2 cm(A₂B₁)、3 cm×3 cm(A₂B₂)、3 cm×6 cm(A₂B₃)、4.5 cm×2 cm(A₃B₁)、4.5 cm×3 cm(A₃B₂)、4.5 cm×6 cm(A₃B₃),用于该精确播种质量评价新方法的验证。【结果】2年度种子直线度在A₂B₃处理较优,其变异系数 δ 分别为28.63%、32.67%;2年度种子散布度在A₂B₁处理较优,其变异系数 γ 分别为28.17%、30.14%;种-土均质营养利用率在A₂B₁处理(2021—2022年)取得最大值,为91.33%。种-土均质营养利用率与作物出苗率、单株产量、单株总结实粒数、千粒质量之间均在0.01水平显著相关。【结论】基于种子直线度、种子散布度、种-土均质营养利用率等多维度指标构建的精确播种质量综合评价方法,可准确解析播后种子在田间的分布质量,同时种-土均质营养率与作物出苗率、单株产量及产量构成因素之间的响应关系分析方法,也有利于建立精确播种技术与作物生长之间的联系并促进农机-农艺融合发展。

关键词:小麦;精确播种;评价方法;多维度指标;种子分布;作物生长

中图分类号:S512.1;S23-0 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)04-0841-15



Evaluation of field distribution quality of wheat seeds based on multidimensional indicators

DING Qishuo, FU Linqian, WANG Xiaochan, HE Ruiyin, XU Gaoming

(College of Engineering, Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipments of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

收稿日期:2024-03-16 修回日期:2024-04-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2300304)

Project supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFD2300304)

作者简介:丁启朔,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤-植物-机器系统科学研究,orcid.org/0000-0003-4628-3870,qsding@njau.edu.cn.

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [Objective] Precision seeding technology is one of the key ways to achieve reasonable crop group and ensure the increase of crop yield. However, there is a lack of the methods for testing and evaluating the precision of seeding quality as well as the methods of quantitatively evaluating the spatial distribution of post-sowing seeds in soil volume, and the response of crop emergence rate, yield, and its components to different precision sowing technologies. [Method] A precise seeding quality evaluation method based on multi-dimensional indicators was constructed using information technologies such as in-situ laser seed position tester, 3D digitization, and Python. The indicators included one-dimensional evaluation indicators (seed straightness), two-dimensional evaluation indicators (seed dispersion), and three-dimensional evaluation indicators (seed homogeneous nutrient utilization rate). Afterwards, a 2-year precision sowing experiment on wheat was conducted using a precision sowing test bench in a residential area. Nine treatments were used, including a row spacing of 20 cm, and a combination of seed spacing×sowing depth of 1.5 cm×2 cm (A_1B_1), 1.5 cm×3 cm (A_1B_2), 1.5 cm×6 cm (A_1B_3), 3 cm×2 cm (A_2B_1), 3 cm×3 cm (A_2B_2), 3 cm×6 cm (A_2B_3), 4.5 cm×2 cm (A_3B_1), 4.5 cm×3 cm (A_3B_2), and 4.5 cm×6 cm (A_3B_3). This experiment was conducted to verify the quality evaluation method of this sowing. [Result] The experimental results showed that the seed straightness was better in the A_2B_3 treatment for 2 years, with coefficients of variation of 28.63% and 32.67%, respectively; The seed dispersion was better in the A_2B_1 treatment for 2 years, with coefficients of variation of 28.17% and 30.14%, respectively; The seed homogeneous nutrient utilization rate reached its maximum value of 91.33% in A_2B_1 treatment (2021—2022). There was a significant correlation at the 0.01 level between the seed homogeneous nutrient utilization rate and crop emergence rate, yield per plant, total number of grains per plant, and thousand grain weight. [Conclusion] A precise comprehensive evaluation method for seeding quality based on multi-dimensional indicators such as seed straightness, seed dispersion, and seed homogeneous nutrient utilization rate can accurately analyze the distribution quality of seeds in the field after sowing. In addition, the analysis method of the response relationship between seed-soil homogeneous nutrition rate and crop emergence rate, yield per plant and yield components is also conducive to establishing the relationship between precise seeding technology and crop growth and promoting the integrated development of agricultural machinery and agronomy.

Keywords: wheat; precision seeding; assessment method; multidimensional indicators; distribution of seed; crop growth

【研究意义】精确播种技术是创建作物合理群体、保障作物增产丰产的一个关键技术路径,其播种质量涉及种子在田间的分布,直接影响着作物的出苗质量及单产水平^[1-2]。因此,科学合理地对待播后种子的分布特征进行定量评价,不仅对精播农艺要求制定和机具优化设计至关重要,也对精确播种技术的发展具有重要的指导意义^[3-7]。【前人研究进展】已有诸多学者提出并使用重播指数、漏播指数、播种粒距合格指数、播种精度等指标用于表征播后种子分布均匀性^[8-11]。如刘选伟等^[4]设计了种子在行向与行深方向均值指标用于评价覆土部件作业性能;张燕青等^[5]采用粒距合格率指标评价了种子行向分布特征;俞凤芳等^[12]采用单位面积株数指标定量了作物在水平面的分布及对后续产量的影响;Celik等^[13]使用漏播指数、种子间距均匀性指标评价了种子在土壤深度方向分布均匀性;Karayel等^[14]采用种子分布面积等指标定量不同触土部件导致的种子分布状态。虽然基于单粒精播法实现种子位精确控制的创新技术研究成果较多^[15-19],但适用于此类精确播种技术的作业质量评价方法仍不完善。

【本研究切入点】近年来,随着精确播种技术的不断发展,涌现出了立体匀播^[20-22]、宽苗带精播^[23-24]、单粒等距线播^[25-27]等诸多新型精确种植技术。而目前可用的重播指数、漏播指数、播种粒距合格指数、播种精度表征种子行向分布均匀性等评价指标难于满足这些新型精播技术播种质量的综合定量与科学评价要求。此外,在论证精确播种技术促成高产群体构建、保障产量、提高效益及改善生态等效应方面,也鲜见针对播种后种子空间分布及其与作物生长状态间关系的报道。【拟解决的关键问题】研究拟利用原位激光种子位测试仪、3D数字化和Python等信息技术构建一套多维度指标(种子直线度、种

子散布度、种-土均质营养利用率)的精确播种质量评价方法,并基于种子营养球模型探讨精确播种质量与作物出苗率、单株产量及产量构成因素之间的联系,从而为精确播种质量的测试评价与农机-农艺的融合发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验方法

1.1.1 种子一维及二维分布评价指标设计

XOY 坐标平面为种子田间分布的二维平面(图1),即平行于地表水平面且与播种行重合的平面。 X 轴为播种行中心轴,与播种方向一致; Y 轴为播种行间方向,种子的二维坐标为 (x_i, y_i) 。

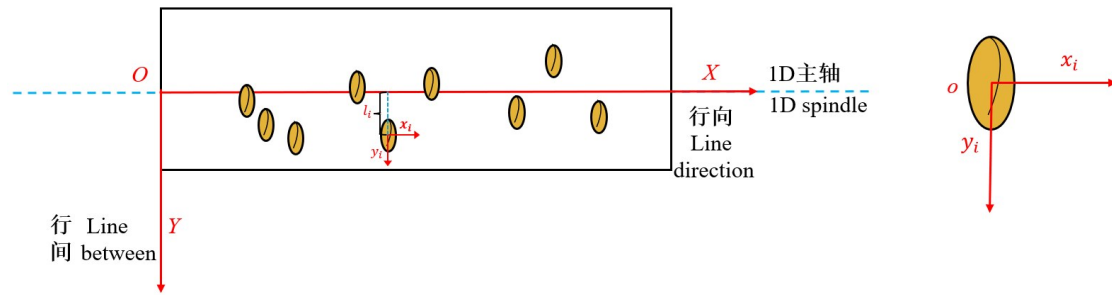


图1 种子田间原位二维平面 XOY 分布示意

Fig.1 Schematic diagram of XOY distribution in situ two-dimensional space in seed fields

传统播种质量评价常采用播种粒距均值、标准差、播种粒距合格指数等统计性指标,无法对精播后每一粒种子的空间坐标进行准确定量。为此,建立针对条播及单粒精播方式下的评价方式^[27-30]。条播与单粒精播方式下要求种子精准落入种沟内,落在沟壁或未落入种沟可能会造成种子裸露在地表,导致苗期缺苗^[31-34]。因此,针对上述两种播种模式设计一维评价指标:种子直线度。使用种子1D分布变异系数 δ 表征种子直线度,种子1D分布变异系数越小,表明种子直线度越好。种子1D分布变异系数 δ 计算公式如式1:

$$\begin{cases} \bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \\ S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (l_i - \bar{L})^2} \\ \delta = \frac{S}{\bar{L}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 l_i 为种子到1D主轴(l_i 见图1)的垂直距离,mm, $i>1$; n 为处理所测种子数量,个; \bar{L} 为种子到主轴距离的平均值; S 为种子到主轴距离的标准差; δ 为种子1D分布变异系数, δ 值越小,表明种子直线度越好,种子在 XOY 平面内更倾向于直线,种子落于种沟的概率越大。

有别于条播及单粒精播的种子分布特征,撒播及苗带播种等播种技术模式主要目标是创建二维平面 XOY (图1)内种子间的等种距^[35-36]。因此,基于评价原理和播种技术的适配性原则,需要为其建立种子散布特点的定量指标。以种子散布度表征二维平面 XOY 内种子行间与行向分布离散程度及均匀性,使用种子2D分布变异系数 γ 表征种子散布度,种子2D分布变异系数 γ 越小,表明种子散布度越好。计算公式如式2。此2D指标具备向下兼容性原则,同样也适用于条播与单粒精播技术模式下的播种质量评价。

$$\begin{cases} d_i = (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 \\ \bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \\ S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{D})^2} \\ \gamma = \frac{S}{\bar{D}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 x_i 为第 i 粒种子在行向 X 方向的横坐标, mm; x_{i+1} 为第 $i+1$ 粒种子在行向 X 方向的横坐标, mm; y_i 为第 i 粒种子在行间 Y 方向的纵坐标, mm; y_{i+1} 为第 $i+1$ 粒种子在行间 Y 方向的纵坐标, mm; d_i 为二维平面 XOY 内相邻最近种子间距离, mm; \bar{D} 为区域内种子距离均值; S 为区域内种子距离的标准差; γ 为种子 2D 分布的变异系数。 γ 值越小, 表明种子在二维平面 XOY 内行向与行间分布越均匀。

1.1.2 种子三维分布评价指标设计

$O-XYZ$ 立体空间为种子在田间分布的三维空间(图 2), X 轴为播种行中心轴, 与播种方向一致; Y 轴为播种行间方向; Z 轴为播种行深方向。种子的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) 。

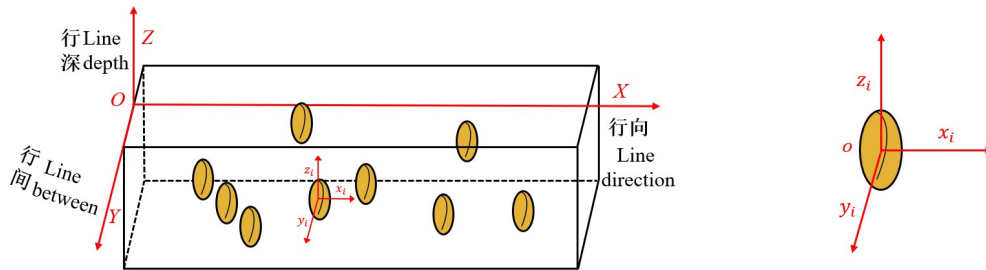


图 2 种子田间原位三维平面 $O-XYZ$ 分布示意

Fig.2 Schematic diagram of $O-XYZ$ distribution in situ three-dimensional space in seed fields

土壤空间资源的个体植株均匀分配是精确播种及作物群体精确管控的核心策略之一, 追求精播条件下种子的均匀分布主要是为每粒种子提供均匀的根系营养体^[37]。以此为切入点, 提出用于衡量因种子分布差异造成的单粒种子可用的土壤营养体变化模型, 定义为种子营养球模型。其设计思路为将所有取样种子占有的三维土体营养空间平均分配给每粒种子, 且每粒种子可用的营养空间用以种子为球心的球状模型表示。利用种子营养球模型设计基于三维空间的种子分布三维评价指标: 种-土均质营养利用率。

首先将种子三维坐标 (x_i, y_i, z_i) 通过 Excel 进行数据处理, 然后将所测种子三维坐标 (x_i, y_i, z_i) 导入 Python 软件, 构建种子营养球模型并运用蒙特卡洛积分算法计算包络体体积(各个种子营养球体积总和)及交汇体积(各个种子营养球交汇体积总和), 两者差值为种子无营养竞争的体积(Q 值)。最后根据式(3)计算种-土均质营养率(N 值)。 Q 值计算流程如图 3 所示, 该流程各关键技术环节在 python 中编程实现。种子营养球模型及空间分布效果如图 4 所示。

$$\begin{cases} N = \frac{Q}{V} \\ V = BLH \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 Q 为种子之间无营养竞争的体积, mm^3 ; V 为 i 粒种子三维 $O-XYZ$ 空间(图 2)内取样体积, mm^3 ; B 为 i 粒种子的行间 Y 土体长度, mm; L 为 i 粒种子的行向 X 土体长度, mm; H 为 i 粒种子的行向 Z 土体长度, mm; N 为种-土均质营养利用率, %。 N 值越大, 表示种子在田间分布越均匀, 对均质土壤条件的利用程度越高。

1.2 试验设计

为验证基于种子直线度、种子散布度、种-土均质营养利用率等多维度指标的精确播种质量评价方法的有效性与准确性, 进行田间试验设计。田间试验地点位于南京市六合区八百桥农场($32^{\circ}42'N, 118^{\circ}93'E$), 2 个季度的试验时间分别为 2021 年 11 月 7 日与 2022 年 11 月 14 日。试验点四季分明, 年平均气温 $15^{\circ}C$, 年平均降水量 1 048 mm。试验田土壤砂粒、壤粒、粘粒质量分数分别为 35.6%、24.0%、40.4%, 有机质含量为 23 g/kg。土壤容重为 $1.38 g/cm^3$, 含水率为 31.07%, 孔隙度为 48.06%。选用“宁麦 13”作为试验材料。影响播种质量的主要因素为: 粒距、播深^[38-40], 因此, 试验因素选为播种粒距与播种深度。依据参考文献[27], 行距设定为 20 cm, 播种粒距选取 1.5, 3.0, 4.5 cm (A_1, A_2, A_3); 播种深度选取为 2.0, 3.0, 6.0 cm (B_1, B_2, B_3), B_1 为浅播^[41]、 B_2 为适播^[42-43]、 B_3 为深播^[44](表 1)。使用小区精密播种试验台架(图 5)进行田间播种, 具体播种操作方法见文献[45]。

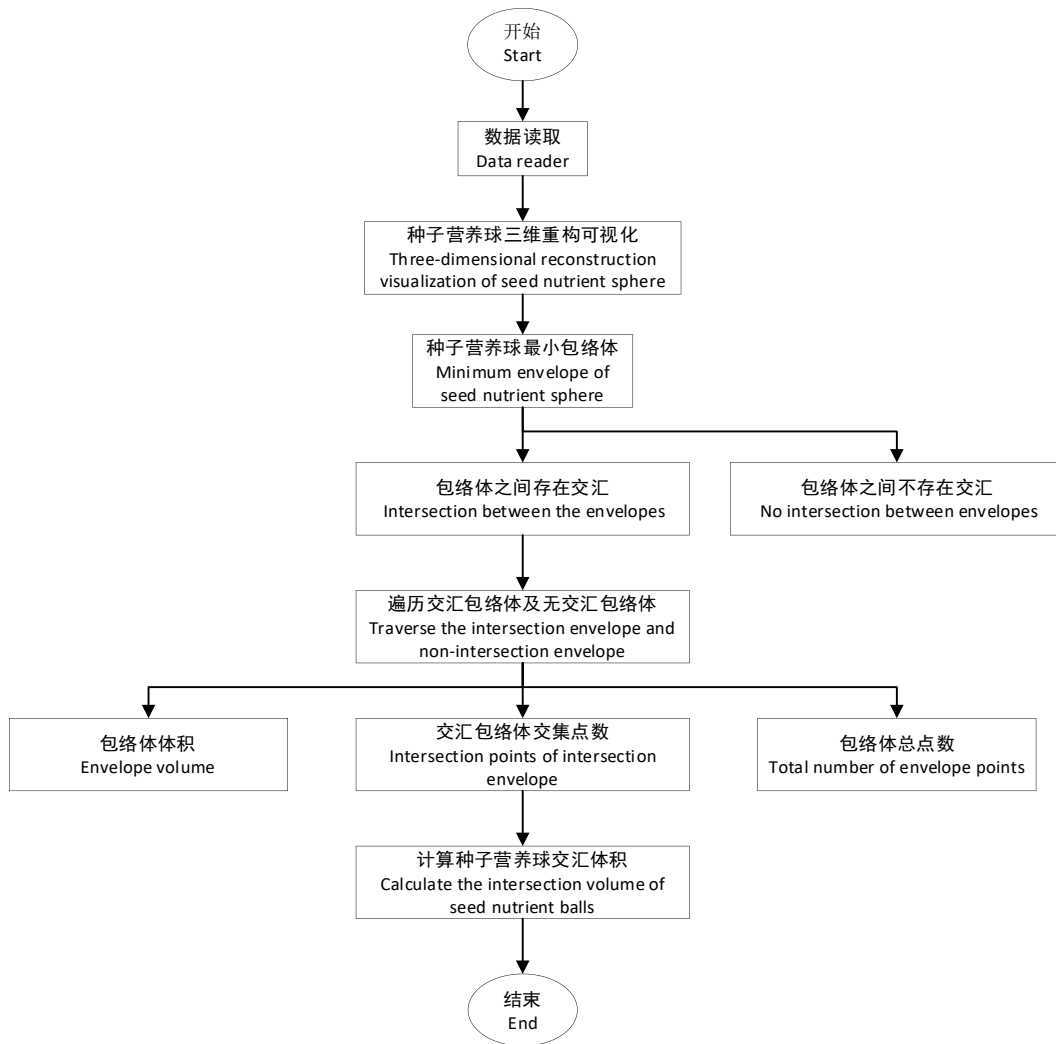
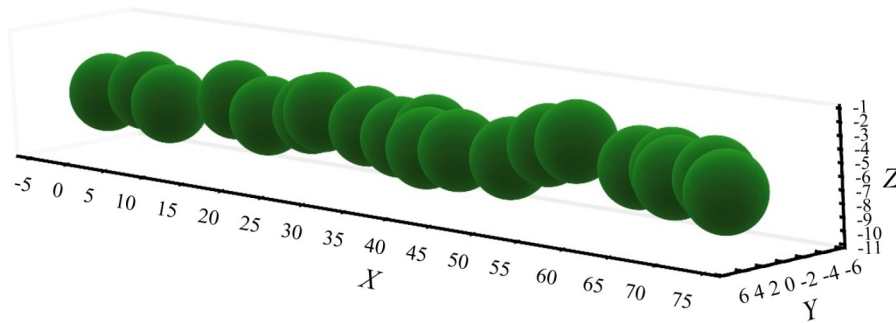


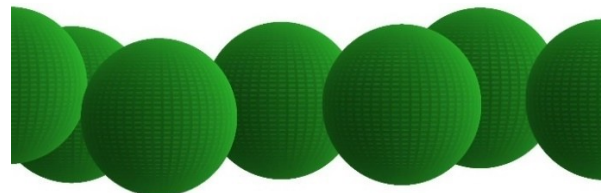
图 3 种子无营养竞争的体积计算的程序

Fig.3 Program block diagram for calculation of no competition volume of seed nutrient sphere model



(a) 种子营养球空间分布

(a) Spatial distribution of seed nutrient spheres



(b) 种子营养球模型

(b) Seed nutrient sphere model

图 4 3D 种子营养球模型分布与计算

Fig.4 Distribution and calculation of 3D seed vegetative body model in three-dimensional space

表1 试验因素水平表
Tab.1 Test factors and levels

水平 Level	因素 A Factor A		因素 B Factor B	
	播种粒距/cm Sowing spacing		播种深度/cm Sowing depth	
1	1.5		2.0	
2	3.0		3.0	
3	4.5		6.0	

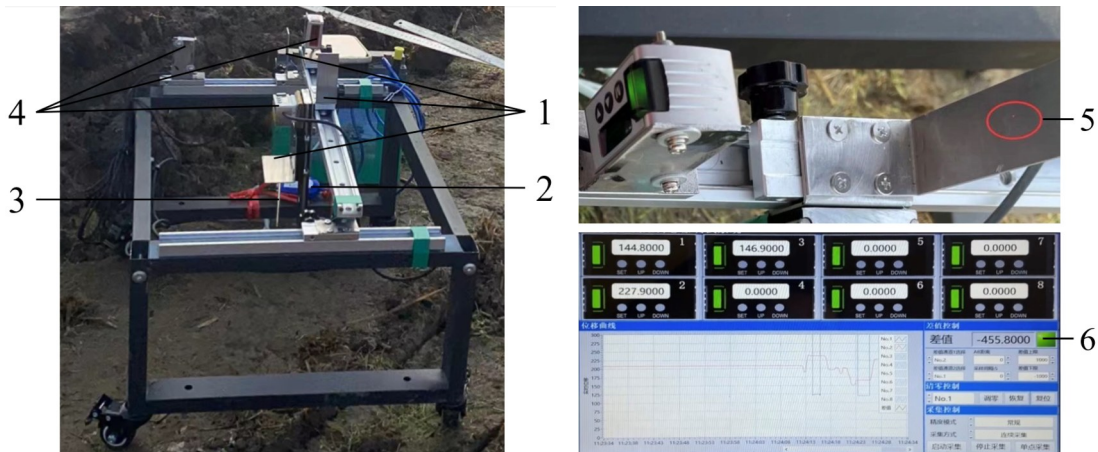


图5 小区精密播种试验台架
Fig.5 Plot precision seeding test bench

1.3 测定项目及方法

1.3.1 种子三维坐标值(x_i, y_i, z_i)

播后使用原位激光种子位测试仪(图6)获取田间种子位置。该仪器主要由激光点位接收板、数据传输器、探针、激光测距传感器等构成。其测试原理为:在滑动探针尖头接触种子时,先通过激光测距传感器与激光点位接收板获取探针的三维位置信息,然后由数据采集系统进行转换后计算出种子三维坐标值。



1:激光点位接收板;2:数据传输器;3:探针;4:激光测距传感器;5:测试点位;6:数据采集系统。

1: Laser spot receiver board; 2: Data transmitter; 3: Probe; 4: Laser distance sensor; 5: Test points; 6: Data acquisition system.

图6 原位激光种子位测试仪

Fig.6 In-situ laser seed position tester

种子三维坐标的具体测试方法:于小麦播种期,先在各不同处理小区随机选取小麦播种行,然后固定原位激光种子位测试仪的横轴在行向X方向、纵轴在行间Y方向,再滑动探针在X、Y、Z 3个方向移动并锁至种子位处,激光传感器测量X、Y、Z 3个方向移动距离,电脑端操控抓取状态值并同步传输至电脑端生成种子三维坐标值(x_i, y_i, z_i),依次完成播种行内种子三维坐标值测量。每个小区3次重复。

1.3.2 出苗率

于小麦苗期,各处理沿行向选取1.0 m群体样本,每小区5次重复。

1.3.3 籽粒产量及构成因素

于小麦成熟期收获测产。选取不同处理各小区群体样本,每小区3次重复。将样本内小麦使用单穗脱粒机进行脱粒处理,测定单株穗粒数、结实籽粒数、千粒质量及产量。

1.4 数据处理

使用Excel进行数据整理,Python进行种子营养球模型计算(蒙特卡罗积分),SPSS软件进行统计分析、处理间显著性检验(Duncan's)、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 种子一维及二维分布质量评价与分析

不同播种粒距及播深下的种子一维及二维分布质量如表2所示。试验结果表明,2年度种子直线度在A₂B₃处理较优,其变异系数 δ 分别为28.63%、32.67%。在同一播种粒距下,种子1D分布变异系数 δ 在播深B₁时显著大于其他播深处理。且2年度均在A₂B₁时取得最大值,分别为70.40%和78.87%。这表明播深B₁时种子流呈直线效果差,产生此结果的原因可能是浅播的种沟沟型成型较差,种子落入种沟时易发生行间Y方向弹跳。2年度在播种粒距A₁内,播深B₂与B₃处理的种子直线度优于播深B₁处理的种子直线度;在播种粒距A₃时,也呈现出相同规律。这也说明完整的沟型楔面使种子落入种沟形成直线的可能性更大。

表2 不同播种粒距及播深下的种子一维及二维分布质量

Tab.2 Evaluation of one-dimensional and two-dimensional uniformity of seeds under different sowing spacing and sowing depth

播种粒距/cm Sowing spacing	播种深度/cm Sowing depth	2021—2022		2022—2023	
		1D分布变异系数/%	2D分布变异系数/%	1D分布变异系数/%	2D分布变异系数/%
		δ	γ	δ	γ
A ₁	B ₁	68.63 ^{Aa}	79.96 ^{Aa}	58.83 ^{Ab}	80.77 ^{Aa}
	B ₂	53.39 ^{Ba}	61.07 ^{Ba}	44.60 ^{Ba}	61.25 ^{Ba}
	B ₃	41.46 ^{Cab}	61.16 ^{Ba}	42.38 ^{Bab}	60.97 ^{Ba}
A ₂	B ₁	70.40 ^{Aa}	28.17 ^{Bc}	78.87 ^{Aa}	30.14 ^{Bc}
	B ₂	62.79 ^{ABa}	38.53 ^{Ab}	50.60 ^{Ba}	43.31 ^{Ab}
	B ₃	28.63 ^{Bb}	41.87 ^{Ab}	32.67 ^{Cb}	46.20 ^{Ab}
A ₃	B ₁	64.54 ^{Aa}	45.90 ^{Ab}	63.17 ^{Ab}	43.25 ^{Ab}
	B ₂	48.68 ^{Ba}	36.89 ^{Bb}	46.63 ^{Ba}	40.44 ^{ABb}
	B ₃	43.85 ^{Ba}	28.46 ^{Cc}	47.67 ^{Ba}	30.31 ^{Bc}

A₁、A₂、A₃分别表示播种粒距为1.5、3.0、4.5 cm; B₁、B₂、B₃分别表示为播种深度为2.0、3.0、4.5 cm;不同大写字母表示同一播种粒距下播种深度间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一播种深度下播种粒距间差异性显著($P<0.05$)。

A₁, A₂ and A₃ indicate that the sowing spacing is 1.5, 3.0, 4.5 cm, respectively; B₁, B₂ and B₃ are indicated as sowing depths of 2.0, 3.0, 4.5 cm, respectively; Different capital letters indicate significant differences between seeding depths at the same spacing ($P<0.05$). Different lowercase letters indicated significant differences between seeding spacing at the same sowing depth ($P<0.05$).

试验结果表明,2年度种子散布度在A₂B₁处理较优,其变异系数 γ 分别为28.17%、30.14%。在同一播种深度下,种子2D分布变异系数 γ 在播种粒距A₁时显著大于其他播种粒距处理。且2年度均在A₁B₁时取得最大值,分别为79.96%和80.77%。这表明播种粒距A₁时种子在二维空间内分布较杂乱无序。2年度在播深B₂时,播种粒距A₂与A₃处理的种子散布度相近,表明种子在二维空间内分布均匀性较为一致。

双因素互作效应分析表明,播种粒距与播种深度互作对种子直线度存在显著影响,播种深度的影响高于播种粒距(表3)。播种粒距与播种深度互作对种子散布度也存在显著影响,但播种粒距的影响高于

播种深度(表3)。综合来看,种子直线度主要衡量种沟成型效果及播种深度对种子一维分布质量的影响,而种子散布度衡量排种稳定性及播种粒距对种子二维分布质量的响应。

表3 直线度与散布度方差分析

Tab.3 Analysis of variance for straightness and dispersion

指标 Index	变异来源 Effect size	平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F值 F value	P值 P value
种子直线度/% Seed straightness	A	55.33	2	27.66	2.36	0.123
	B	1 174.57	2	587.29	50.00	<0.000 1***
	A×B	353.17	4	88.29	7.52	0.001***
种子散布度/% Seed dispersion	A	1 760.02	2	880.01	158.46	<0.000 1***
	B	60.11	2	30.06	5.41	0.014**
	A×B	513.18	4	128.29	23.10	<0.000 1***

A: 播种粒距主效应; B: 播种深度主效应; A×B: 播种粒距与播种深度交互效应; *, ** 分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著。

A: Main effect of sowing spacing; B: Main effect of sowing depth; A×B: interaction effect between sowing spacing and sowing depth; *, ** indicates a significant difference at the levels of 0.05 and 0.01.

2.2 种子三维分布质量评价与分析

采用种子营养球模型可以进一步评价种子在田间三维的分布质量,其评价指标为种-土均质营养利用率。当种-土均质营养利用率越大时,种子在田间三维分布越均匀,其三维分布质量也越好。不同播种粒距及播深下的种子三维分布质量如表4所示。试验结果表明,不同处理间存在显著性差异,在同一播种粒距下,种-土均质营养利用率随播种深度增大呈减小趋势(表4)。2021—2022年,种-土均质营养利用率在A₂B₁时取得最大值,为91.33%,在A₃B₁时取得较大值,为89.69%;2022—2023年,在A₃B₁时取得最大值,为90.52%,在A₂B₁时取得较大值,为87.95%;2年度均在A₁B₃时取得最小值,分别70.22%和73.51%(表4)。主要原因可能为播种粒距较小或播种深度较深时,种子在田间分布易出现“同位多粒”或“多位缺粒”的现象,导致种子营养球互相干扰区域增大。

表4 不同播种粒距及播深下的种子三维分布质量

Tab.4 Three-dimensional distribution quality of seed-soil under different sowing spacing and sowing depth

播种粒距/cm Sowing spacing	播种深度/cm Sowing depth	2021—2022	2022—2023
		种-土均质营养利用率/% Seed homogeneous nutrient utilization rate	
A ₁	B ₁	75.20 ^{Ab}	75.05 ^{Ab}
	B ₂	74.01 ^{Ab}	73.88 ^{Ac}
	B ₃	70.22 ^{Bb}	73.51 ^{Ab}
A ₂	B ₁	91.33 ^{Aa}	87.95 ^{Aa}
	B ₂	80.92 ^{Bb}	78.90 ^{Bb}
	B ₃	74.70 ^{Cb}	76.62 ^{Bab}
A ₃	B ₁	89.69 ^{Aa}	90.52 ^{Aa}
	B ₂	88.81 ^{Aa}	84.26 ^{Aa}
	B ₃	82.94 ^{Aa}	83.41 ^{Aa}

A₁、A₂、A₃ 分别表示播种粒距为 1.5、3.0、4.5 cm; B₁、B₂、B₃ 分别表示为播种深度为 2.0、3.0、4.5 cm; 不同大写字母表示同一播种粒距下播种深度间差异显著(P<0.05); 不同小写字母表示同一播种深度下播种粒距间差异性显著(P<0.05)。

A₁, A₂ and A₃ indicate that the sowing spacing is 1.5, 3.0, 4.5 cm, respectively; B₁, B₂ and B₃ are indicated as sowing depths of 2.0, 3.0, 4.5 cm, respectively; Different capital letters indicate significant differences between seeding depths at the same spacing (P<0.05). Different lowercase letters indicated significant differences between seeding spacing at the same sowing depth (P<0.05).

2.3 种子三维评价指标与单株出苗率及产量相关性

本研究所建立的种子一维、二维及三维分布评价指标均可实现对种子田间分布效果的评价,但种子三维评价指标(种-土均质营养利用率)是基于土壤均质环境下因种子分布效果导致单粒种子可用土体营养差异的指标,且已有研究^[26,46-50]表明,占有较大土壤空间的种子会分泌物质以抑制相邻种子生根发芽,造成苗期缺苗、弱苗并最终影响作物成熟期产量及产量构成因素。因此主要探究种子三维评价指标(种-土均质营养利用率)与单株出苗率和产量的关系。

表 5 不同播种粒距及播种深度下小麦出苗率

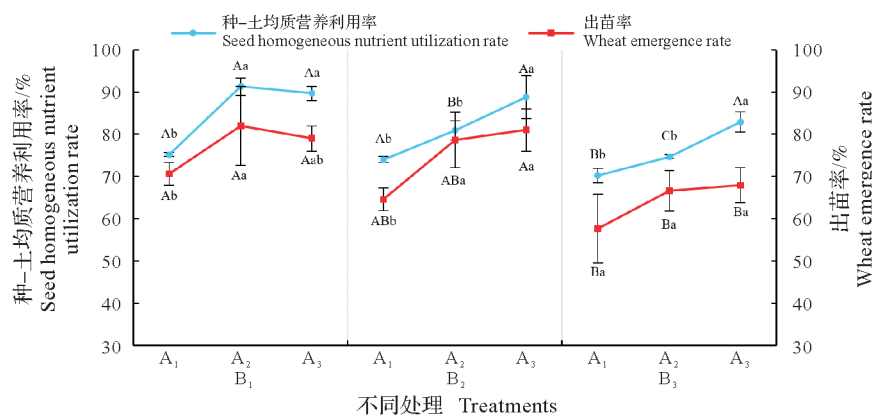
Tab.5 Wheat emergence rate under different seed spacing and sowing depth

播种粒距/cm Sowing spacing	播种深度/cm Sowing depth	出苗率/% Wheat emergence rate	
		2021—2022	2022—2023
A ₁	B ₁	70.67 ^{Ab}	71.00 ^{Ab}
	B ₂	64.67 ^{ABb}	65.00 ^{ABb}
	B ₃	57.67 ^{Ba}	60.00 ^{Ba}
A ₂	B ₁	82.00 ^{Aa}	78.00 ^{Aab}
	B ₂	78.67 ^{ABa}	76.67 ^{Aab}
	B ₃	66.67 ^{Ba}	68.00 ^{Aa}
A ₃	B ₁	79.00 ^{Aab}	80.00 ^{Aa}
	B ₂	81.00 ^{Aa}	78.00 ^{Aa}
	B ₃	68.00 ^{Ba}	73.00 ^{Aa}

A₁、A₂、A₃分别表示播种粒距为 1.5, 3.0, 4.5 cm; B₁、B₂、B₃分别表示为播种深度为 2.0, 3.0, 4.5 cm; 不同大写字母表示同一播种粒距下播种深度间差异显著(P<0.05); 不同小写字母表示同一播种深度下播种粒距间差异性显著(P<0.05)。

A₁, A₂ and A₃ indicate that the sowing spacing is 1.5, 3.0, 4.5 cm, respectively; B₁, B₂ and B₃ are indicated as sowing depths of 2.0, 3.0, 4.5 cm, respectively; Different capital letters indicate significant differences between seeding depths at the same spacing (P<0.05). Different lowercase letters indicated significant differences between seeding spacing at the same sowing depth (P<0.05).

不同播种粒距及播种深度下小麦出苗率如表 5 所示。结果表明, 2021—2022 年, 出苗率在 A₂B₁ 时取得最大值, 为 82%, 2022—2023 年, 出苗率在 A₃B₁ 时取得最大值, 为 80%; 2 年度出苗率均在 A₁B₃ 时取得最小值, 分别仅为 57.67% 和 60%。出苗率与种-土均质营养利用率在各年度内表现出相同变化趋势(图 7、图 8)。综合来看, 种-土均质营养利用率是基于三维空间的复合性指标, 不仅可以用于评价种子田间分布均匀性, 而且可以解析因此差异产生的作物生理生态变化。

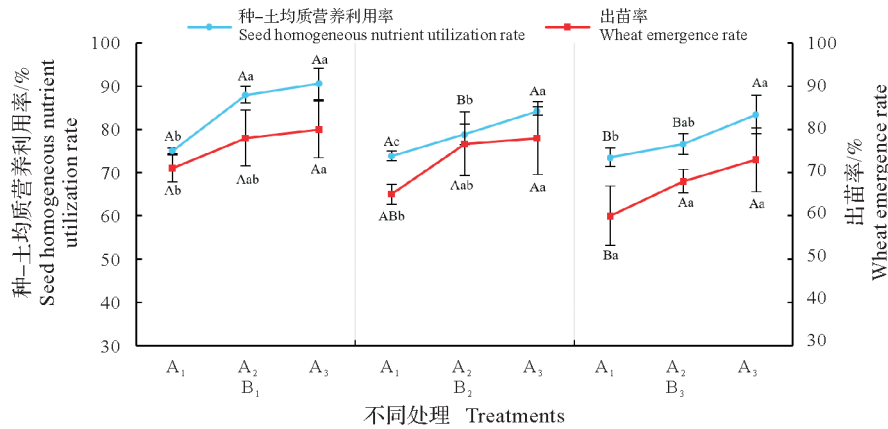


A₁、A₂、A₃分别表示播种粒距为 1.5, 3.0, 4.5 cm; B₁、B₂、B₃分别表示为播种深度为 2.0, 3.0, 4.5 cm; 不同大写字母表示同一播种粒距下播种深度间差异显著(P<0.05); 不同小写字母表示同一播种深度下播种粒距间差异性显著(P<0.05)。

A₁, A₂ and A₃ indicate that the sowing spacing is 1.5, 3.0, 4.5 cm, respectively; B₁, B₂ and B₃ are indicated as sowing depths of 2.0, 3.0, 4.5 cm, respectively; Different capital letters indicate significant differences between seeding depths at the same spacing (P<0.05). Different lowercase letters indicated significant differences between seeding spacing at the same sowing depth (P<0.05).

图 7 2021—2022 年度不同播种深度及播种粒距下种-土均质营养利用率与出苗率趋势

Fig.7 Trends in nutrient utilization efficiency and emergence rate of seed soil homogenization under different sowing depths and spacing during the period of 2021—2022



A₁、A₂、A₃分别表示播种粒距为1.5,3.0,4.5 cm; B₁、B₂、B₃分别表示为播种深度为2.0,3.0,4.5 cm;不同大写字母表示同一播种粒距下播种深度间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示同一播种深度下播种粒距间差异性显著(P<0.05)。

A₁, A₂ and A₃ indicate that the sowing spacing is 1.5, 3.0, 4.5 cm, respectively; B₁, B₂ and B₃ are indicated as sowing depths of 2.0, 3.0, 4.5 cm, respectively; Different capital letters indicate significant differences between seeding depths at the same spacing (P<0.05). Different lowercase letters indicated significant differences between seeding spacing at the same sowing depth (P<0.05).

图8 2022—2023年度不同播种深度及播种粒距下种-土均质营养利用率与出苗率趋势
Fig.8 Trends in nutrient utilization efficiency and emergence rate of seed soil homogenization under different sowing depths and spacing during the period of 2022—2023

2年度在同一播种深度下,单株穗数与单株产量均随播种粒距的增大呈增大趋势(表6)。2021—2022年,除A₂B₂时小麦单株结实总粒数呈现出高于同播种粒距下的另外两深度以外,其他处理在同一播种粒距下,小麦千粒质量、单株总结实粒数、单株产量随播种深度增大呈减小趋势。2022—2023年,在同一播种粒距下,所有处理的小麦单株总结实粒数、单株产量均随播种深度增大呈减小趋势。

表6 不同播种粒距及播深下小麦单株产量和产量构成因素

Tab.6 Different seed spacing and sowing depth on single plant yield and yield composition of wheat

年份 Year	播种粒距/cm Sowing spacing	播种深度/cm Sowing depth	单株穗数/个 Spikes per plant	单株结实粒数/个 Kernels per plant	千粒质量/g 1 000 grain weight	单株产量/g Yield per plant
2021—2022	A ₁	B ₁	4.00 ^{Ba}	147.0 ^{Aa}	32.86 ^{Ab}	4.88 ^{Aa}
		B ₂	5.67 ^{Aa}	119.3 ^{Ab}	30.81 ^{Aa}	3.62 ^{Ab}
		B ₃	2.67 ^{Ba}	84.3 ^{Ab}	30.80 ^{Ba}	2.59 ^{Ab}
	A ₂	B ₁	4.67 ^{Aa}	202.0 ^{Aa}	37.71 ^{Aa}	7.68 ^{Aa}
		B ₂	6.00 ^{Aa}	209.0 ^{Aab}	34.12 ^{Aa}	6.89 ^{Aa}
		B ₃	3.33 ^{Aa}	126.7 ^{Ab}	32.57 ^{Aa}	3.98 ^{Aab}
	A ₃	B ₁	6.33 ^{Aa}	305.0 ^{Aa}	36.33 ^{Aab}	11.08 ^{Aa}
		B ₂	7.00 ^{Aa}	254.0 ^{Aa}	35.62 ^{Aa}	9.29 ^{Aa}
		B ₃	5.33 ^{Aa}	242.3 ^{Aa}	34.19 ^{Aa}	7.98 ^{Aa}
2022—2023	A ₁	B ₁	3.33 ^{Aa}	164.0 ^{Aa}	40.86 ^{Ab}	6.70 ^{Aa}
		B ₂	4.67 ^{Aa}	112.0 ^{ABc}	40.58 ^{Bb}	4.55 ^{ABc}
		B ₃	3.33 ^{Aa}	100.7 ^{Ba}	40.67 ^{Ba}	4.10 ^{Ba}
	A ₂	B ₁	5.67 ^{Aa}	233.0 ^{Aa}	41.11 ^{Aab}	9.51 ^{Aa}
		B ₂	5.00 ^{Aa}	215.3 ^{Ab}	40.85 ^{ABa}	8.79 ^{Ab}
		B ₃	3.67 ^{Aa}	188.0 ^{Aa}	40.56 ^{Ba}	7.62 ^{Aa}
	A ₃	B ₁	6.33 ^{Aa}	347.7 ^{Aa}	41.33 ^{Aa}	14.36 ^{Aa}
		B ₂	6.33 ^{Aa}	292.7 ^{Aa}	40.86 ^{Ba}	11.96 ^{Aa}
		B ₃	5.33 ^{Aa}	275.0 ^{Aa}	40.83 ^{Ba}	11.25 ^{Aa}

A₁、A₂、A₃分别表示播种粒距为1.5,3.0,4.5 cm; B₁、B₂、B₃分别表示为播种深度为2.0,3.0,4.5 cm;不同大写字母表示同一播种粒距下播种深度间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示同一播种深度下播种粒距间差异性显著(P<0.05)。

A₁, A₂ and A₃ indicate that the sowing spacing is 1.5, 3.0, 4.5 cm, respectively; B₁, B₂ and B₃ are indicated as sowing depths of 2.0, 3.0, 4.5 cm, respectively; Different capital letters indicate significant differences between seeding depths at the same spacing (P<0.05). Different lowercase letters indicated significant differences between seeding spacing at the same sowing depth (P<0.05).

2021—2022年单株穗数在 A_3B_2 时取得最大值,为7.00穗;在 A_1B_3 时取得最小值,为2.67穗。2022—2023年,单株穗数在 A_3B_1 、 A_3B_2 时同时取得最大值,为6.33穗,在 A_1B_1 、 A_1B_3 时同时取得最小值,为3.33穗。2年度单株总结实粒数均在 A_3B_1 时取得最大值,分别为305.0粒和347.7粒,在 A_1B_3 时取得最小值,分别为84.3粒和100.7粒。单株产量均在 A_3B_1 时取得最大值,分别为11.08 g、14.36 g,在 A_1B_3 时取得最小值,分别为2.59 g、4.10 g。

种-土均质营养利用率与出苗率、单株总结实粒数、千粒质量、单株产量之间均在0.01水平上显著相关,与单株穗数在0.05水平显著相关(表7)。由此可见,种-土均质营养利用率的变化可以表示由于种子分布差异引起的小麦个体层面相互干扰、竞争的变化。种子发芽期间,如果种子聚集,易造成种内抑制现象,影响种子出苗,削弱产量潜力。综合来说,种-土均质营养利用率不仅可以反映各播种粒距及播种深度组合下种子的田间三维空间分布情况及精确播种质量,在一定程度上,也可以解析单株小麦因种子分布均匀性差异表现出来的作物生长、产量及构成因素差异。

表7 种-土均质营养率与出苗率、产量及产量构成因素相关性分析

Tab.7 Correlation analysis between homogeneous nutrition rate and seedling emergence rate, yield and yield composition factors

项目 Items	种-土均质营养 利用率/% Seed homogeneous nutrient utilization rate	出苗率/% Seeding rate	单株穗数 Spikes per plant	单株总结实 粒数 Kernels per plant	千粒质量/g 1 000 grain weight	单株产量/g Yield per plant
种-土均质营养利用率/% Seed homogeneous nutrient utilization rate	1					
出苗率/% Seeding rate	0.892**	1				
单株穗数/个 Spikes per plant	0.680*	0.693*	1			
单株总结实粒数/个 Kernels per plant	0.881**	0.774*	0.786*	1		
千粒质量/g 1 000 grain weight	0.968**	0.901**	0.514	0.812**	1	
单株产量/g Yield per plant	0.924**	0.818**	0.768*	0.992**	0.864**	1

**在0.01水平显著相关,*在0.05水平显著相关。

** Significant correlation at level 0.01, * Significantly correlated at level 0.05.

3 讨论与结论

3.1 讨论

精确播种技术是现代农业实现高产增产的关键,该技术要求将种子按照准确的播深、粒距和行距进行定点、定量的种植^[51-52]。但现有的重播指数、漏播指数、播种粒距合格指数等评价指标已经无法满足当前精准农业的新要求。另外,不同精确播种方式下的种子分布与作物出苗及产量之间的响应关系也迫切需要解析^[41,53-55]。探明精确播种与作物生理生态效应之间的联系更需要定量不同精确播种方式下的种子个体间的竞争机制及作物生理生态响应;同时,精确播种评价指标及评价技术的规范性与可比性也为精确栽培技术模式设计、农艺措施改进、耕播机具研发创新提供相关参考依据。

本研究采用3D数字化技术和Python蒙特卡洛积分算法计算模块构建的种子分布与精确播种质量测试方法操作规范,所得模型及结果稳定可靠。基于评价指标的规范性和统一性原则,以空间维度为基准,依次提出一维评价指标(种子直线度);二维评价指标(种子散布度);三维评价指标(种-土均质营养利用率)。3种评价指标可以满足当前不同精确栽培技术模式的评价,其中,单粒线播可选用种子直线度检验线播效果;苗带播种可选种子散布度检验种子均布效果;立体匀播可选用种-土均质营养利用率检

验种子田间三维空间分布效果。同时,种子营养球模型实现了将种子田间分布三维评价指标与作物个体生长指标之间的定量关联。田间9种精播处理所得结果反映出:基于空间维度的统一性准则所设计的指标相较于以往繁杂评价指标具有更符合具体生产应用场景的优点,为定量不同原理和实现方法的精播技术模式及效应提供了借鉴。

3D数字化技术和Python计算模块具有强大的数据运算及模型构建能力,将此功能集成化开发利用田间原位精播质量的快速检测,以满足播种机具优化设计、播种方式创新应用、农艺方式因地制宜等生产要求。种子三维评价指标可表达种子田间三维空间分布均匀性,构建精确播种与作物生理生态两大课题之间的联系,从种子分布及精确播种角度出发解析作物产量及产量构成因素。同时,除小麦种子外,理论上可根据不同种子的特点进行模型优化实现多类作物种子多维空间可视化定量评价分析。

3.2 结论

本研究聚焦当前精播技术发展热点及其精播技术评价方法的规范性缺失现状,以空间维度界定设计了3个不同属性的评价指标,并开展田间控制试验进行技术验证,从精播技术评价的角度探讨指标设计的农机-农艺融合议题,所得结论具体如下:

(1)基于多维度指标(种子直线度、种子散布度、种-土均质营养利用率)的精确播种质量评价方法完整且适用,可准确解析播种后种子在田间分布质量。采用种子营养球模型(评价指标为种-土均质营养利用率)能够实现精确播种质量与作物出苗率、单株产量及产量构成因素之间响应关系分析,从而构建精确播种与作物生长之间的延伸关系。

(2)以9种播种粒距及播种深度组合下的种子田间分布质量评价为例,进行田间试验验证了该方法的可靠性。研究表明,不同的播种粒距及播深组合会显著影响种子在田间多维空间的分布效果, A_2B_3 处理的种子直线度较优, A_2B_1 处理的种子散布度较优, A_2B_1 处理的种-土均质营养利用率最高为91.33%。同时,种-土均质营养利用率与作物出苗率、单株产量、单株总结实粒数、千粒质量在0.01水平显著相关,与单株穗数在0.05水平显著相关。

参考文献 References:

- [1] 郭爱兵,路志国,郭鹏飞,等.我国小麦精播技术研究现状及发展趋势[J].现代农业科技,2015,45(6):75-76.
GUO A B, LU Z G, GUO P F, et al. Research status and development trend of wheat refined sowing technology in China[J]. Modern agricultural technology, 2015, 45(6): 75-76.
- [2] 赵凌天,咸云宇,刘光明,等.不同机械化耕播模式对冬小麦幼苗质量和产量的影响[J].农业工程学报,2021,37(17):31-38.
ZHAO L T, XIAN Y Y, LIU G M, et al. Effects of different mechanized tillage and sowing modes on the seedling quality and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(17): 31-38.
- [3] 何瑞银,王建林,徐高明,等.限制充种姿态-正负压式小麦精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(9):39-49.
HE R Y, WANG J L, XU G M, et al. Design and experiment of wheat precise seed metering apparatus with positive and negative pressure with function of limiting seed filling posture[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2022, 53(9): 39-49.
- [4] 刘选伟,金亮,赵亚祥,等.基于均匀设计的双层圆盘式覆土器的试验研究[J].中国农机化学报,2016,37(2):26-28.
LIU X W, JIN L, ZHAO Y X, et al. Experimental research of double-deck disk coverer based on uniform design vibration uniform-seeds device[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(2): 26-28.
- [5] 张燕青,崔清亮,王丰,等.谷子精少量流体排种装置的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(12):20-27.
ZHANG Y Q, CUI Q L, WANG F, et al. Design and test of fluid and small-amount seed metering device for foxtail millet[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(12): 20-27.
- [6] 王磊,廖宜涛,张青松,等.油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J].农业机械学报,2019,50(11):63-73.
WANG L, LIAO Y T, ZANG Q S, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rape-seed and wheat[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(11): 63-73.
- [7] 祝清震,武广伟,陈立平,等.小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J].农业工程学报,2019,35(1):1-11.

- ZHU Q Z, WU G W, CHEN L P, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(1): 1-11.
- [8] KACHMAN S D, SMITH J A. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering[J]. American society of agricultural engineers, 1995, 38(2): 379-387.
- [9] 韩晓娟, 赖庆辉, 赵庆辉, 等. 气吸圆盘式排种器智能设计与优化系统研究[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(2): 467-481.
- HAN X J, LAI Q H, ZHAO Q H, et al. Research on the air suction disc seed metering device's intelligent design and optimization system[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(2): 467-481.
- [10] 齐龙, 谭祖庭, 马旭, 等. 气动振动式匀种装置工作参数的优化及试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(6): 1684-1691.
- QI L, TAN Z T, MA X, et al. Optimization and test of operational parameters of pneumatic vibration uniform-seeds device[J]. Journal of Jilin university(engineering and technology edition), 2014, 44(6): 1684-1691.
- [11] 全国农业机械标准化技术委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Agricultural Machinery of Standardization Administration of China. Testing methods of single seed drills(precision drills): GB/T 6973—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [12] 俞凤芳, 丁成芳. 种植方式和密度对高产玉米产量及相关性状的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(6): 1297-1299.
- YU F F, DING C F. Effect of cultivation methods patterns and plant and density on yield and related traits of maize[J]. Hubei agricultural sciences, 2010, 49(6): 1297-1299.
- [13] CELIK A, OZTURK I, WAY T R. Effects of various planters on emergence and seed distribution uniformity of sunflower[J]. Applied engineering in agriculture, 2007, 23(1): 57-61.
- [14] KARAYEL D, OZMERZI A. Comparison of vertical and lateral seed distribution of furrow openers using a new criterion[J]. Soil tillage research, 2007, 95(1/2): 69-75.
- [15] GAO X, XIE G, LI J, et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize[J]. Biosystems engineering, 2023, 227: 161-181.
- [16] GIERZ L, MARKOWSKI P, CHOSZCZ D, et al. Effect of using deflector in the distributor head of a pneumatic seed drill on the oat seed sowing unevenness[J]. Scientific reports, 2023, 13(1): 15471.
- [17] KARAYEL D, ŠARAUSKIS E, AKTAŞ A. Design and experiment of a helicoidal seed tube to improve seed distribution uniformity of seed drills[J]. Processes, 2022, 10(7): 1271.
- [18] KUCUKERDEM H K, ALTIKAT S. Evaluating effects of post-sowing compaction and sowing speed on soil properties, distribution of seed placement and second crop maize performance[J]. Ama-agricultural mechanization in Asia Africa and Latin America, 2022, 53(1): 46-54.
- [19] MA C C, YI S J, TAO G X, et al. Research on receiving seeds performance of belt-type high-speed corn seed guiding device based on discrete element method[J]. Agriculture, 2023, 13(5): 1085.
- [20] 赵广才. 小麦立体匀播技术 绿色节本高产高效[J]. 农民科技培训, 2016, 15(1): 42-44.
- ZHAO G C. Green, cost saving, high yield, and efficiency of wheat three-dimensional uniform sowing technology[J]. Farmer science and technology training, 2016, 15(1): 42-44.
- [21] 赵广才, 郝德有, 常旭虹, 等. 小麦立体匀播技术[J]. 农业科技通讯, 2015, 44(7): 184-186.
- ZHAO G C, HAO D Y, CHANG X H, et al. Wheat three-dimensional sowing technology[J]. Agricultural science and technology communication, 2015, 44(7): 184-186.
- [22] 张金汕, 贾永红, 李鹏, 等. 立体匀播和密度对冬小麦光合、干物质积累分配及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 438-447.
- ZHANG J C, JIA Y H, LI P, et al. Effect of uniforming sowing pattern and planting density on photosynthesis, dry matter accumulation and distribution and yield of winter wheat[J]. Journal of triticeae crops, 2021, 41(4): 438-447.
- [23] 邵敏敏, 黄玲, 徐兴科, 等. 不同行距与苗带宽度互作对宽幅精播小麦产量形成的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4): 30-34.
- SHAO M M, HUANG L, XU X K, et al. Effects of different line spacing and seedling belt width on yield formation of broad-width fine sowing wheat[J]. Shandong agricultural sciences, 2019, 51(4): 30-34.
- [24] 赵秉强, 余松烈, 李凤超, 等. 带状种植小麦带型-群体-产量相关规律研究[J]. 中国农业科学, 1999, 40(1): 33-39.
- ZHAO B Q, YU S L, LI F C, et al. Study on the correlation law of belt type-group-yield of wheat in strip planting[J]. Scientia agricultura Sinica, 1999, 40(1): 33-39.

- [25] 冯焯,郭峰,李宝龙,等.单粒精播对花生根系生长、根冠比和产量的影响[J].作物学报,2013,39(12):2228-2237.
FENG Y, GUO F, LI B L, et al. Effects of single-seed sowing on root growth, root-shoot ratio, and yield in peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(12): 2228-2237.
- [26] 李海康,丁启朔,孙克润,等.稻茬小麦单粒精播的幼苗密度效应[J].江苏农业学报,2019,35(6):1316-1322.
LI H K, DING Q S, SUN K R, et al. Seedling density effects of post-paddy wheat under precision seeding [J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2019, 35(6): 1316-1322.
- [27] 李佩,何瑞银,汪小昆,等.单株小麦生理生态控制的等距单粒线播法研究[J].中国农业科学,2022,55(2):295-306.
LI P, HE R Y, WANG X C, et al. Uniform distance single seed linear seeding method for control of wheat physiology and ecology [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(2): 295-306.
- [28] 樊高琼,郑亭,陈溢,等.耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦群体质量和产量的影响[J].农业工程学报,2011,27(S2):20-25.
FAN G Q, ZHENG T, CHEN Y, et al. Effects of tillage managements, sowing depth and soil-covering on population quality and yield of mechanical sowing wheat under relay intercropping condition [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2011, 27(S2): 20-25.
- [29] 梁晓艳,郭峰,张佳蕾,等.单粒精播对花生冠层微环境、光合特性及产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3700-3706.
LIANG X Y, GUO F, ZANG J L, et al. Effects of single-seed sowing on canopy microenvironment, photosynthetic characteristics and pod yield of peanut (*Arachis hypogaea*) [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2015, 26(12): 3700-3706.
- [30] 颜丙新,付卫强,武广伟,等.基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J].农业机械学报,2021,52(2):44-54.
YAN B X, FU W Q, WU G W, et al. Seed location prediction method of maize high-height precision planting based on satellite positioning [J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2021, 52(2): 44-54.
- [31] GÜRSOY S. Comparative performance of two different planters modified for no-till planting of wheat on ridge [J]. *The Philippine agricultural scientist*, 2012, 95(4): 400-405.
- [32] 何勋,张景凤,张润,等.小麦宽苗带种沟镇压播种装置研制[J].农业工程学报,2023,39(18):18-29.
HE X, ZHANG J F, ZHANG R, et al. Development of wheat wide seedling belt seed furrow suppression sowing device [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2023, 39(18): 18-29.
- [33] 刘成良,林洪振,李彦明,等.农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J].农业机械学报,2020,51(1):1-18.
LIU C L, LIN H Z, LI Y M. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment [J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2020, 51(1): 1-18.
- [34] 孙群周.小麦机械化播种技术要点[J].种子科技,2024,42(1):119-121.
SUN Q Z. Key points of wheat mechanized sowing technology [J]. *Seed technology*, 2024, 42(1): 119-121.
- [35] 姜萌,刘彩玲,魏丹,等.小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(11):53-62.
JIANG M, LIU C L, WEI D, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter [J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2019, 50(11): 53-62.
- [36] 石玉华,初金鹏,尹立俊,等.宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J].农业工程学报,2018,34(17):127-133.
SHI Y H, CHU J P, YIN L J, et al. Wide-range sowing improving yield and nitrogen use efficiency of wheat sown at different dates [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2018, 34(17): 127-133.
- [37] KARAYEL D, SARAUSKIS E, AKTAS A. Design and experiment of a helicoidal seed tube to improve seed distribution uniformity of seed drills [J]. *Processes*, 2022, 10(7): 1271.
- [38] GRIEPENTROG H W, OLSEN J M, WEINER J, et al. The influence of row width and seed spacing on uniformity of plant spatial distributions [C]//Proceeding 67th international conference on agricultural engineering (Land-Technik AgEng 2009)-innovations to meet future challenges, 2009:265-270.
- [39] KARAYEL D, OZMERZI A. Evaluation of three depth-control components on seed placement accuracy and emergence for a precision planter [J]. *Applied engineering in agriculture*, 2008, 24(3): 271-276.
- [40] 杨文伟,石亚飞,高莲,等.播深和播量对宁夏地区直播稻幼苗素质和产量的影响[J].核农学报,2023,37(1):148-158.
YANG W W, SHI Y F, GAO L, et al. Effects of sowing depth and amount on rice seedling growth and yield in Ningxia Region [J]. *Journal of nuclear agricultural sciences*, 2023, 37(1): 148-158.
- [41] 郑亭,樊高琼,王秀芳,等.耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦苗素质的影响[J].农业工程学报,2011,27(5):164-168.

- ZHENG T, FAN G Q, WANG X F, et al. Effect of tillage managements, sowing depth and soil-covering on the seedlings quality of mechanical sowing wheat under intercropping condition [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2011, 27(5): 164-168.
- [42] 韩永昌, 王泽广, 闫冬梅. 小麦播种过深对出苗、分蘖的影响[J]. *种子世界*, 2000(2): 28.
HAN Y C, WANG Z G, YAN D M. Effect of too deep sowing of wheat on seedling emergence and tillering [J]. *Seed world*, 2000(2): 28.
- [43] 贾树顺, 姜占荣. 赤峰地区冬小麦适宜播期、播深的初步探讨[J]. *内蒙古农业科技*, 1999, 27(2): 16-17.
JIA S S, JIANG Z R. Preliminary discussion on the suitable sowing date and sowing depth of winter wheat in Chifeng Area [J]. *Inner Mongolia agricultural science and technology*, 1999, 27(2): 16-17.
- [44] 闫锦涛, 冯利平, 李扬, 等. 播期和播深对冬小麦越冬前生长性状的影响[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2): 327-335.
YAN J T, FENG L P, LI Y, et al. Effects of sowing date and sowing depth on winter wheat growth before overwintering [J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2022, 53(2): 327-335.
- [45] 李佩. 等距单粒线播方式下稻茬麦群体表型及根系构型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
LI P. Research on population phenotype and root architecture of post-paddy wheat under uniform distance single seed linear seeding method [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.
- [46] CHIU S N, QUINE M P. Central limit theorem for germination-growth models in R^d with non-Poisson locations [J]. *Advances in applied probability*, 2016, 33(4): 751-755.
- [47] 李双. 水氮供应与株间竞争对番茄幼苗生长、生理特性及激素调控的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
LI S. Effects of different water and nitrogen applications and neighbor competition on growth, physiological characteristics and phytohormone controlling of tomato seedlings [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [48] 李福建, 徐东忆, 吴鹏, 等. 机械耕作和播种方式对稻茬小麦光合生产和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 41-49.
LI F J, XU D Y, WU P, et al. Effects of mechanical tillage and sowing methods on photosynthetic production and yield of wheat in rice stubble [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2021, 37(5): 41-49.
- [49] 汤永禄, 李朝苏, 吴春, 等. 播种方式对丘陵旱地套作小麦幼苗质量、产量及效益的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(24): 5089-5097.
TANG Y L, LI C S, WU C, et al. Effects of sowing patterns on establishment quality, grain yield and production benefit of intercropping wheat in hilly countries [J]. *Scientia agricultura Sinica*, 2013, 46(24): 5089-5097.
- [50] 赵庆玲, 孙敏, 林文, 等. 播种方式对旱地小麦土壤水分变化和籽粒蛋白质形成的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3977-3987.
ZHAO Q L, SUN M, LIN W, et al. Effects of sowing modes on soil water dynamics and grain protein formation in dryland wheat [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2021, 32(11): 3977-3987.
- [51] 贾维强, 谭雪明, 李木英, 等. 不同机械直播穴距与播种量对早稻产量形成的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2017, 39(1): 9-17.
JIA W Q, TAN X M, LI M Y, et al. Effects of different hole spaces and seed quantities in machine-direct-seeding on yield formation of early season rice [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39(1): 9-17.
- [52] 罗亢, 曾勇军, 石庆华, 等. 基于增苗减氮技术构建晚籼稻高产氮高效群体[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(5): 961-970.
LUO K, ZENG Y J, SHI Q H, et al. Construction of high yield and high nitrogen efficiency population of late indica rice was constructed by the technology of increasing seedling and reducing nitrogen fertilization [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(5): 961-970.
- [53] LAPINS D, DINABURGA G, KOPMANIS J, et al. Assessment of statistical description, linear relationships and technological optimization for sowing depth of winter wheat as yield affecting factor [C]// *Aict 2010 - applied information and communication technologies, proceedings of the 4th international scientific conference*, 2010: 102-109.
- [54] OZMERZI A, KARAYEL D, TOPAKCI M. Effect of sowing depth on precision seeder uniformity [J]. *Biosystems engineering*, 2002, 82(2): 227-230.
- [55] 张斯梅, 顾克军, 樊平声, 等. 稻秸还田与播种方式影响小麦出苗及产量的大田试验研究(英文)[J]. *Agricultural science technology*, 2017, 18(12): 2357-2361.
ZHANG S M, GU K J, FAN P S, et al. Field experiment for the effects of rice straw returning and seeding pattern on wheat seedling emergence and grain yield [J]. *Agricultural science technology*, 2017, 18(12): 2357-2361.