

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.048

稻茬麦根系构型可视化与三向分型维研究*

陈信信¹ 丁启朔^{1,2} 李毅念¹ 丁为民¹ 田永超²

(1.南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室,南京 210031; 2.南京农业大学国家信息农业工程技术中心,南京 210095)

摘要: 提出一种根系可视化分析方法用于定量稻茬田环境的小麦根系构型。使用根系构型数字化仪测试稻茬麦苗期根系构型,将所测数据导入 Pro/E 平台进行根系构型的 3-D 重构,然后对可视化根系进行 3 向平面投影,计算小麦根系在不同平面的分形维数与分形丰度。结果表明,该方法可以真实反映出田间稻茬麦根系构型的动态变化状况,而根系分形维数与分形丰度随时间逐步递增,正视图面的分形维数和分形丰度总大于左视图面。从播后第 98 天开始,俯视图面的根系构型分形维数与分形丰度出现突增。在 3 个投影面上稻茬麦根系的分形维数与分形丰度都高度相关,二者与根总长也存在一定的相关关系。

关键词: 稻茬麦根系 3-D 构型 根系可视化 三向分型维

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0328-08

Visualization of Post-paddy Wheat Rooting System and 3-D Fractal Dimensions

Chen Xinxin¹ Ding Qishuo^{1,2} Li Yinian¹ Ding Weimin¹ Tian Yongchao²

(1. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Measurement of crop rooting system architecture and the calculation of root fractal dimensions plays an important role in precision crop rooting management. A technique for root visualization and analyzing was proposed to assess field state post-paddy wheat rooting system architecture. The proposed technique applied a root digitizer to measure wheat root system architecture, and changed the root system architecture into 3-D coordinates. The collected root topology data was then transferred to Pro/E platform for 3-D reconstruction. When the virtual root system was reconstructed, it was projected on three coordinate planes. The projected 2-D root architecture was then analyzed to derive fractal dimensions and fractal abundances. Results showed that the method could quantify the dynamics of the field-state wheat root system architecture. Both root fractal dimension and fractal abundance increased over time. Fractal dimension and fractal abundance in the top plane were always higher than that in the right plane. Starting from 98 d after sowing, a rapid increase of fractal dimension and fractal abundance was observed in the front plane. Fractal dimension was, for all the three projections, strongly correlated to fractal abundance. Also, the fractal dimension and fractal abundance were both correlated to total root length.

Key words: Post-paddy wheat rooting system 3-D architecture Root visualization 3-D fractal dimensions

引言

目前,根系研究是进一步提高农林作物生产力

的一个极具潜力的基础学课题^[1],植物根系的优化有利于其高产和优质栽培^[2],植物根系调控不仅是精准作物管理的重要任务,也是优化土壤以及水、

收稿日期:2014-06-04 修回日期:2014-07-25

* 国家自然科学基金资助项目(41371238)和江苏优势学科建设资助项目(PAPD)

作者简介:陈信信,博士生,主要从事数字作物应用技术研究,E-mail: lingyinyu@163.com

通讯作者:丁启朔,教授,博士生导师,主要从事作物生产环境工程与技术研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

肥、光、热等资源综合利用的基础。近年来小麦根系研究的一个重要方向是根构型的合理性,通过控制耕作措施^[3-4]及针对性的水肥处理^[5-9]能够在不同生态环境条件下有效调控小麦的根系构型,建立基于小麦根系构型优化的资源利用策略。针对大田小麦根系构型研究的一个主要指标是不同土层深度的根生物量,该指标虽能反映小麦根系沿土壤深度的分布信息,但无法反映根系在三维土体空间中的拓扑状态。

作物根系的空间形态称为根系构型^[10] (Root system architecture, RSA) 或者拓扑结构^[11],是根系功能特征的主要影响因子,决定根系的多重生理功能^[12]。根系的3-D构型包括根系的拓扑结构和几何特征^[13-14],其中3-D拓扑结构又体现为根系在3维空间的分支和伸展信息,是作物根系贯穿、占据土体空间的能力,决定着根土系统的空间利用效率以及作物株间地下竞争的有效性,且最终影响作物群体对水肥的利用效率,因此,开展小麦根系3-D构型的研究是关键的基础性工作。

当前作物根系3-D构型研究的难点之一是如何获取根系的原位构型数据,以及如何对根系3-D拓扑构型进行定量分析。近年来,数字成像及无损测试技术为根系3-D构型研究提供了方便,此类技术已能用于水培植物根系构型高通量表型筛选^[15],或者在均质土培条件下的作物幼苗期根系动态定量^[16-18],不过这些应用场合对培养基质及基质的均质化要求较高,直接应用于大田实际的作物根系构型研究仍存在较大难度;还有一部分国内外学者研究植物根系的形态建模和可视化模拟^[19-22],但是可视化模拟出的根系构型也只能反映出可调控状况下根系的生长分布,无法真实准确地描述复杂田间环境下根系的构型特征。大田环境下根系3-D构型研究的困难主要来自根际土壤的空间变异性,土壤孔隙、杂物、土壤水等噪声远高于小麦纤细根系的信号,因此无损测试技术无法适用于田间条件,甚至目前尚无定量描述植物根系三维立体几何构型的综合指标^[23]。

本文围绕根系构型的实际应用,针对稻茬麦根系3-D构型的分型维定量,运用自制的根构型数字化仪结合Pro/E工程软件^[24]实现根系构型的可视化,并结合分型理论^[25]与工程制图中的投影理论^[26]定量反映稻茬麦根系在不同方位的分型维变化,以此描述小麦苗期根系构型指标的生长动态。

1 材料与方法

1.1 试验设计

小麦种植地点位于南京农业大学江浦农场,试

验地为黄棕壤质,由多年稻麦轮作发育而成的水稻土。品种为宁麦13,前茬水稻,小区面积12 m² (2 m × 6 m),3次重复。2011年11月中旬播种,水稻收获后清除地表秸秆,免耕与旋耕两种处理方式,均匀精密播种,株距和行距均为50 mm,取田头碎土盖籽,播前施磷酸二铵375 kg/hm²,尿素90 kg/hm²,氯化钾375 kg/hm²,最后使用农膜覆盖小区,农膜四边压封保墒,成苗后清除农膜,小麦田间管理同大田,自然雨养,不设灌溉,小区管理同当地常规管理。

自小麦播种日起,每隔14 d取样一次,取样从2011年11月中旬延续到2012年4月上旬,共取样8次,考虑到取样的工作量和实际情况,依据小子样理论^[27],每次每个小区取2个根系样品即每次取回12个根系样品。因南方水稻土粘性重,犁底层位置在土层10 cm附近,根据经验制作直径160 mm、高200 mm的取样筒,取样时选择地上部长势相近的植株,将取样筒的中心置于所取植株的对中位置,然后用手锤均匀用力将样筒打入土层,最后将取样筒连同植株和土壤一同取出带回实验室检测。

1.2 冬小麦根系3-D构型可视化测试及成像技术

关于虚拟根系的实现目前有2个技术路线,一是使用CT扫描或3-D成像技术获取植物根系的3-D拓扑图像,此类系统需要配备专业的高性能图像分析计算软件且只适合于均质土壤或特殊培养基下生长的根系。根系3-D虚拟技术可参照Iyer-Pascuzzi等^[15]、Flavel等^[16]的方法。二是使用根系数字化仪,以分层处理方法量化根轴坐标,并使用VC编程等方法实现小麦根系构型的3-D可视化^[28-29],或者使用商用大型工程软件进行直接可视化造型重构^[30]。

本文沿用韩秋萍等^[30]和陈信信等^[31]的方法,使用自主设计制作的专用根系构型数字化仪测试根系空间拓扑数据(图1)。测试时将田间取出的根土样品置于数字化仪上,按3~5 mm厚度用尖针分层挑拨并测试暴露出的各根系主轴(即初生根)的空间坐标,自上而下逐层清理测试,直至完整获取一株小麦的主轴根系构型数据,然后将实测数据导入Pro/E平台进行根系3-D拓扑构型可视化重构。

1.3 冬小麦根系虚拟构型技术与分型维计算

按韩秋萍等^[30]和陈信信等^[31]的方法,使用其中一株稻茬麦根系构型实测数据在Pro/E中可视化重构出小麦根系3-D构型(图2),由于根构型数字化仪仍是半自动化产品,而小麦根系是须根系且次生根较多,为保证根系数据的时效性,这里只测量根系初生根的数据,即图2所示为稻茬麦初生根构型图。其中,3个参考坐标平面分别是俯视图面、正视

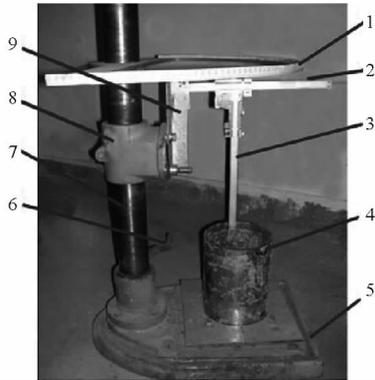


图1 根系构型测量数字化仪结构

Fig.1 Construction of mechanical RSA digitizer

1. 弧形标尺 2. 水平标尺 3. 垂直标尺 4. 取样筒 5. 底座
6. 手柄 7. 立柱 8. 回转座 9. 连接架

图面和左视图面。鉴于根系 3-D 构型的测试过程是逐层清除土壤并测试根系在该层土壤的空间坐标,因此在 Pro/E 中重构的稻茬麦根系空间拓扑图就是稻茬麦根系真实的田间 3-D 构型。工程上使用物体的三视图投影特性说明物体的整体特征,工程图学的最基本理论是实现空间中的三维物体与平面上的二维图形相互映射,用二维平面图形准确表示空间三维物体结构、形状的理论^[28]。本文在构造虚拟根系的基础上,结合工程学基本理论将稻茬麦根系构型分别向俯视图面、正视图面和左视图面 3 个投影面上投影,所得的 3 幅根系投影图就是根系 3-D 构型对应的 3 个方向的非扰动 2-D 构型。从这一技术实现过程可见,该根系构型可视化技术避免了传统洗根法为获得根系 2-D 图像对根系 3-D 构型的扰动。因此,按照本文的 3-D 根系构型可视化重构技术获得的 2-D 根系构型与洗根法有本质区别,2-D 根系构型特征实质上反映的是田间条件下稻茬麦根系构型的真实拓扑信息。

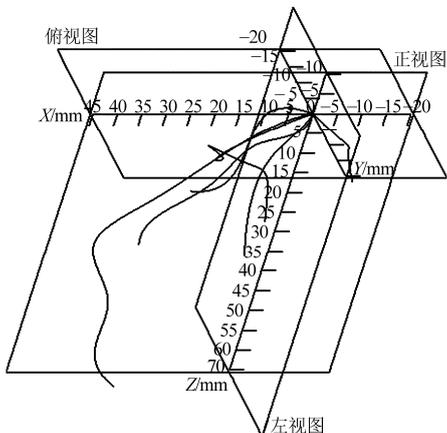


图2 典型小麦植株根系 3-D 重构及空间坐标状态

Fig.2 Typical wheat plant root system of 3-D reconstruction and spatial coordinates

为进一步计算稻茬麦根系构型在 3 个投影面上

的分型维信息,分别对 3 个投影面的 2-D 构型图进行网格分割(图 3),使用不同边长 r 的正方形网格(r 分别为 2.5、5、10、20、40、80 mm)分割小麦根系,进而统计出小麦根系所截交的方格数目 N ,并以 $\lg N$ 为纵坐标, $\lg r$ 为横坐标,进行拟合,拟合线斜率的绝对值即为根系二维分形维数 F , $\lg K$ 为二维分形丰度^[32],拟合公式为

$$\lg N = -F \lg r + \lg K \quad (1)$$

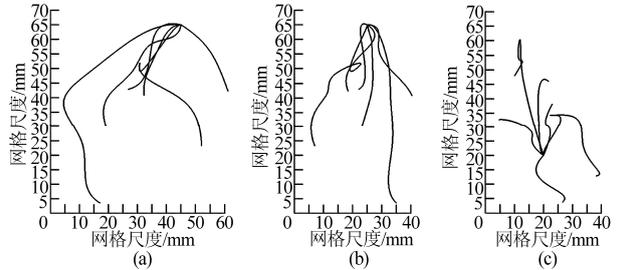


图3 典型根系的 3-D 构型的三向投影及网格化分析

Fig.3 Typical 3-D root system architecture meshed in 2-D projections

- (a) 正视图 (b) 左视图 (c) 俯视图

2 结果与分析

2.1 稻茬田免耕旋耕处理下小麦根系的 3-D 构型动态

植物根系可视化技术能够直观展示小麦生长期不同时间节点的根系构型状态与特征,从免耕与旋耕 2 种措施各时间节点的根系样品中各选择一株根量相近的小麦根系 3-D 构型特征图(图 4)可见,同一时期不同耕作措施植株个体的根系构型变异性较大。从图 4 中也明显看出,在 0~42 d 小麦的根系很浅,根系处于生长越冬期,多限制在 10 cm 的土层中,在 42~70 d,即小麦生长处于返青及分蘖旺期,免耕处理小麦的根系迅速向深层土层伸展,只有少量主根能够超过 15 cm 的土层深度,但拔节期(78~112 d)小麦根系爆发迅速,但总体看都发根较浅,对于旋耕处理而言的小麦根系,集中分布于 0~10 cm 土层中,这可能与旋耕处理的作业深度有很大关系,而长期种植水稻形成的水稻土,土壤易于板结,形成坚实的犁底层。周国勤^[33]的研究说明,稻麦轮作形成的水稻土理化性质差,不易根系生长,且坚实的犁底层会严重限制根系的扎根深度,这与本方法得到的结果是一致的。浅薄的耕作层会对小麦根系构型产生一定的物理限制作用,但是根构型与具体土壤状况之间的相互作用关系还需要进一步探讨。

2.2 小麦根系在 3 个投影面上的分型特征与动态

可视化的根构型可以直观地展示根系的生长动态,为了更好说明小麦根系的构型特征需要相应的

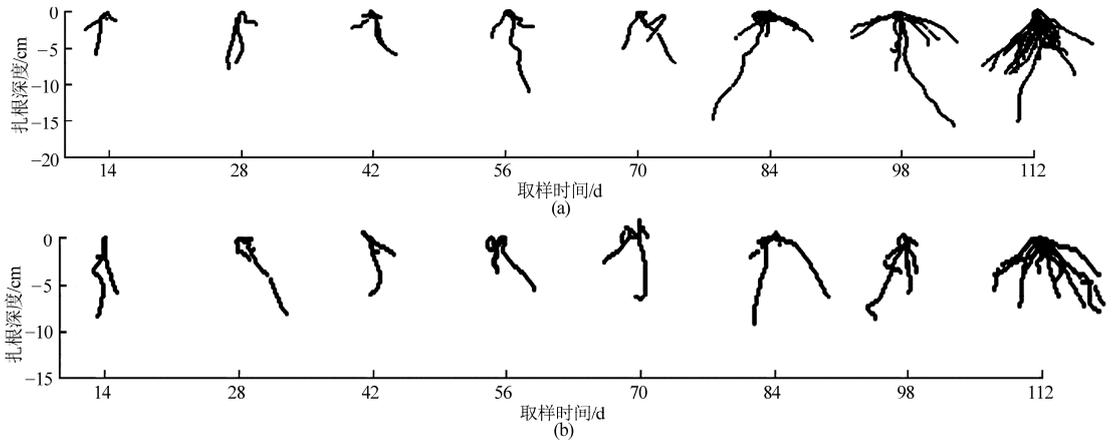


图4 不同耕作措施下各时期小麦根系的3-D构型状态

Fig.4 Wheat root system architecture at each stage under different tillage measures

(a) 免耕 (b) 旋耕

指标加以量化,工程上使用三视图来描述物体的空间形态^[28],本文结合工程制图理论实现根系构型特征的量化。图3显示的是稻茬麦根系样品中的一株小麦根系构型在三向投影面上的2-D根系构型图并进行5 mm 网格化的最终结果,图中可见小麦根系构型在3个方向的2-D投影图形态差异较大。在俯视图中小麦根系沿周向的分布过于集中在下半周(图3c),而且在正视图与左视图中小麦根系构型的差异也十分明显(图3a、3b)。这些根系构型分布的差异性说明,田间状态的小麦根系构型是各种复杂环境综合作用的结果,田间土壤理化状态空间变异、水肥要素的分布不均匀及动态变化等影响根的生态环境因子,决定根系构型分布的复杂性。郭焱等^[34]的研究表明根系空间分布特征可以反映根系不同位置的功能差异,影响田间土壤水肥分布的空间均匀性,因此本文通过不同方位,即使用三视图来研究反映根系的空分布特征。通过对田间根区生态因子的精确调控实现根系构型在各向投影面的均匀分布将是优化根际资源利用效率的重要举措,精准的土壤耕作与田间管理必然也有利于减小根土的空间变异性并增大均质化,进而利于改善根系的土体空间搜寻和资源利用状态。

将每次取样获得的根系逐一分析计算,并分别对根系在各投影面上所得的分形维数与分形丰度进行均值处理,得到小麦在各生长节点处根系三向投影平面分形维数及分形丰度的动态变化趋势图,见图5、6,将其最高值和最低值列于表1,以数据直观展示根系在各时间节点的变异范围,以此对分型维指标的变化趋势图进行补充说明。同时也根据根构型分析计算出各取样时期根系总长,并给出相应的根长动态变化图(图7)。

图5与图6都表明小麦根系3-D构型存在显著

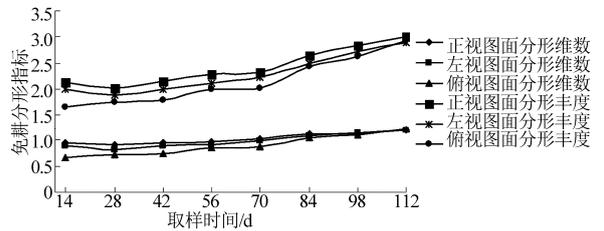


图5 免耕小麦根系三投影面投影分形维数与分形丰度随时间的变化曲线

Fig.5 Dynamics of fractal dimensions and fractal abundance of no-tillage wheat root system in three projections

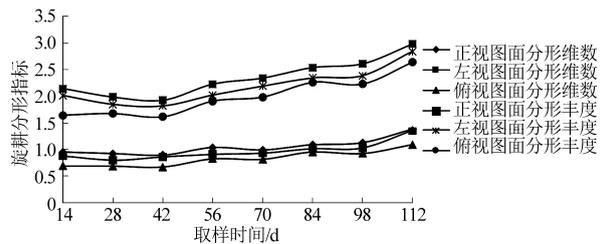


图6 旋耕小麦根系三投影面投影分形维数与分形丰度随时间的变化曲线

Fig.6 Dynamics of fractal dimensions and fractal abundance of rotary-tillage wheat root system in three projections

的方向性,表1的数据变化范围也体现了田间根系分布不均的特点,在数值上,根系的分形丰度明显大于分形维数,与根系在正视图面与左视图面的投影相比,所有单株小麦的根系在俯视图面的投影所获得的分形维数都最小,这表明向地性是影响小麦根系向性生长的主导性驱动因子,根系的向地性强化了根系向下生长的过程,弱化周向根系拓展,为进一步说明根系的纵向生长特点,对各时间节点多个根系样品在正视图面和左视图面的分型维指标进行差异性检验,结果表明在置信区间内,根构型分型维指标没有差异性,这说明正视图面和左视图面都反映根系纵深方向的生长状况,不过对于单株小麦根系而言,二者在数值上仍然表现出明显差异,这说明根

表1 根系样品在3个投影面的分形维数及分形丰度的变化范围

Tab.1 Variation range of root fractal dimension and root abundance on three projections

耕作方式	投影面	参数	取样时间/d							
			14	28	42	56	70	84	98	112
免耕处理	俯视图面	分形维数	0.514 ~ 0.736	0.486 ~ 0.815	0.548 ~ 0.971	0.680 ~ 1.051	0.792 ~ 1.016	0.883 ~ 1.185	0.989 ~ 1.218	1.194 ~ 1.260
		分形丰度	1.293 ~ 1.887	1.248 ~ 1.998	1.361 ~ 2.302	1.622 ~ 2.312	1.873 ~ 2.309	2.141 ~ 2.770	2.306 ~ 2.978	2.818 ~ 3.078
	正视图面	分形维数	0.819 ~ 1.037	0.623 ~ 1.135	0.760 ~ 1.139	0.844 ~ 1.030	0.973 ~ 1.095	1.084 ~ 1.229	1.048 ~ 1.223	1.096 ~ 1.301
		分形丰度	1.748 ~ 2.396	1.504 ~ 2.329	1.581 ~ 2.655	2.043 ~ 2.600	2.183 ~ 2.530	2.432 ~ 2.965	2.712 ~ 3.039	2.826 ~ 3.218
	左视图面	分形维数	0.826 ~ 0.986	0.567 ~ 1.080	0.677 ~ 1.037	0.801 ~ 1.026	0.940 ~ 1.047	0.922 ~ 1.247	1.045 ~ 1.218	1.156 ~ 1.241
		分形丰度	1.712 ~ 2.178	1.428 ~ 2.484	1.446 ~ 2.394	1.848 ~ 2.437	2.042 ~ 2.421	2.249 ~ 2.741	2.593 ~ 2.807	2.788 ~ 3.083
旋耕处理	俯视图面	分形维数	0.545 ~ 0.825	0.405 ~ 0.962	0.466 ~ 0.853	0.575 ~ 0.984	0.671 ~ 0.957	0.752 ~ 1.112	0.834 ~ 1.014	0.954 ~ 1.196
		分形丰度	1.507 ~ 1.886	1.243 ~ 2.122	1.206 ~ 1.947	1.413 ~ 2.365	1.714 ~ 2.219	1.971 ~ 2.589	2.096 ~ 2.376	2.313 ~ 2.989
	正视图面	分形维数	0.874 ~ 1.052	0.676 ~ 1.214	0.718 ~ 1.107	0.856 ~ 1.202	0.919 ~ 1.074	0.962 ~ 1.185	1.023 ~ 1.225	1.299 ~ 1.464
		分形丰度	2.036 ~ 2.246	1.628 ~ 2.329	1.499 ~ 2.248	1.928 ~ 2.547	2.186 ~ 2.536	2.356 ~ 2.810	2.482 ~ 2.769	2.803 ~ 3.292
	左视图面	分形维数	0.774 ~ 0.981	0.620 ~ 1.015	0.620 ~ 1.015	0.813 ~ 1.048	0.813 ~ 1.048	0.922 ~ 1.088	0.937 ~ 1.175	1.199 ~ 1.490
		分形丰度	1.857 ~ 2.133	1.362 ~ 2.337	1.362 ~ 2.337	1.770 ~ 2.501	1.770 ~ 2.501	2.170 ~ 2.605	2.285 ~ 2.498	2.532 ~ 3.080

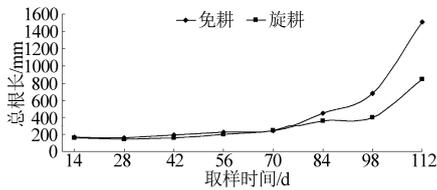


图7 总根长随时间的变化曲线

Fig.7 Dynamics of total root length over time

系并不均匀分布于土体空间,而造成这一状况的原因可能有多个方面,比如作物地下竞争环境的不均匀性、土壤理化状态的空间变异性、水肥供应的空间方向性、种子自身的品种特性等,然而要揭示此类过程机理尚需更为精准的试验设计和庞大的数据量来支撑。免耕和旋耕2种作业模式下,根系各投影面的分形维数与分形丰度的变化趋势也是有区别的,这说明在同样的生长环境中,不同的土壤状况会影响根系的搜索能力,进而影响根分布。图7可以反映小麦播后的动态变化,从播后持续到70d总根长增长缓慢,但在70~98d之间根系开始快速增长,98~112d期间根系呈暴发式增长,根系的生长速率远高于根系的死亡率。从根系的这种动态过程可看出,准确监测根系的动态是实现根际精准管理的基础,田间水肥的精准运筹需要与根系构型动态相匹配才能最大程度地发挥根际资源的利用效率。

从图5~7曲线特征看,根系构型分形维数、分形丰度以及总根长都随时间呈上升变化,因此三者必然存在某种确定性的相关关系,这里对总根长 L 、根系构型分形维数 Y 、分形丰度 X 分别在3个视图中进行拟合分析得到各自的相关函数,如表2所示。从表2中3个指标参数间进行的线性分析可以看出,指标参数彼此之间存在较强的线性关系。

表2 3个投影面上的总根长、根系构型分形维数和分形丰度的相关性分析

Tab.2 Coefficient analysis of total root length, root fractal dimension and root abundance on three projections

耕作方式	投影面	相关函数	相关系数
免耕处理	俯视图面	$Y = 0.439X - 0.043$	0.995
		$L = 1984.34Y - 1340.97$	0.868
	正视图面	$L = 915.49X - 1519.91$	0.907
		$Y = 0.290X + 0.332$	0.983
	左视图面	$L = 3803.53Y - 3486.85$	0.866
		$L = 1150.90X - 2337.73$	0.888
旋耕处理	俯视图面	$Y = 0.357X + 0.174$	0.990
		$L = 2954.14Y - 2483.74$	0.848
	正视图面	$L = 1118.26X - 2111.79$	0.889
		$Y = 0.411X + 0.006$	0.995
	左视图面	$L = 1432.2Y - 870.7$	0.907
		$L = 603.87X - 894.51$	0.928
免耕处理	俯视图面	$Y = 0.423X + 0.047$	0.963
		$L = 1488.3Y - 1236.18$	0.976
	正视图面	$L = 624.65X - 1153.47$	0.932
		$Y = 0.492X - 0.11$	0.996
	左视图面	$L = 1358.29Y - 999.6$	0.992
		$L = 667.27X - 1146.27$	0.957

3 讨论

根系可视化技术需要集成现代工程学的相关理论与方法,需要硬件与软件的集成应用,而将根系可视化技术应用于大田作物生产尚需解决几个方面的瓶颈,一是田间生长作物的根系构型数字化问题,二是用获取的实测根系构型数据进行虚拟3-D重构,三是对可视化的根系进行深度计算分析。本文综合使用机械式作物根系数字化仪、Pro/E软件的根系虚拟重构、3-D根系构型的2-D投影及对2-D根构型的分型维计算,实现了田间土壤中稻茬麦根系构型的可视化与定量分析,进一步体现了根系可视化

技术在大田作物生产精准根管理的潜在应用。

虽然分形维数和分形丰度是描述根系构型的综合指标,但是对于根系 3-D 构型的分型维计算方法及应用仍然少之又少,Walk 等^[35]初次对使用 SimRoot 模拟出的豆科根系的 3-D 图像计算了分型维,但随后一直没有对作物根系 3-D 构型的分型维计算分析的报道。相关的分型维计算多限于 2-D 分型维的计算,而这其中相对较为准确的应是基于钉板法固定原始根系状态后对 2-D 根系构型的分型维计算^[36]。而应用最多的则是洗根法获取 2-D 根系图像的分型维计算,洗根法完全破坏了根系原始的拓扑状态,从而造成根系的 2-D 分型维并不能反映根系的 3-D 分型维信息。

4 结论

(1)基于 Pro/E 而得出的根系构型为作物生产学原位根系可视化提供可靠的保障,而在根系构型的 3-D 再现后进一步对根系构型进行定量化的计算分析更有利于推动根系可视化技术的应用,本文的应用表明这一根系构型的可视化计算分析能够真实再现田间作物的根系构型,同时也能够计算出根系构型的相关综合参数。

(2)针对稻茬麦根系构型的初步研究展示了稻茬麦根系存在显著的构型空间方向性,这一发现需要进一步进行试验研究来说明。俯视图面的 2-D 根系构型分形维数与分形丰度最低,而正视图面则最高,说明稻茬麦根系生长过程中以径向拓展为主,周向拓展次之。根系构型的正视图和左视图体现了稻茬麦根系在空间方向上的不均匀性,这一特征表明田间作物地下部复杂的竞争与生长环境,而本文提供的根系可视化技术和三向投影分形分析则是准确反映定量此类变异性的有效手段。

(3)本研究基于自制的数字化仪实现小麦根系空间坐标的数字化,配合 Pro/E 工程软件实现小麦根系的可视化,然后结合分形理论与工程制图理论量化小麦根系的构型特征,总根长与各投影面分型维的相关分析表明总根长与根系构型在各个面的分型维看似存在确定关系,是否存在相关模型仍需要大量试验数据进行验证。本研究的不足之处是只对一种小麦品种进行了相关研究,不同品种的小麦根系在土壤中的构型状况以及不同品种小麦对于各种环境胁迫的根系构型响应特征需要结合相应的试验设计做进一步的研究说明。

参 考 文 献

- 王继利,贾庆祥,杨新义. 基于坐标变换的玉米根茬三维模型建立[J]. 农业机械学报,2011,42(11):159-163.
Wang Jili, Jia Qingxiang, Yang Xinyi. 3-D modeling of corn root based on the coordinate transformation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):159-163. (in Chinese)
- 冯福学,黄高宝,柴强,等. 不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响[J]. 生态学报,2009,29(5):2499-2506.
Feng Fuxue, Huang Gaobao, Chai Qiang, et al. Effects of different tillage on spatiotemporal distribution of winter wheat root and yield [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5):2499-2506. (in Chinese)
- 王永华,王玉杰,冯伟,等. 两种气候年型下不同栽培模式对冬小麦根系时空分布及产量的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(14):2826-2837.
Wang Yonghua, Wang Yujie, Feng Wei, et al. Effects of different cultivation patterns on the spatial-temporal distribution characteristics of roots and grain yield of winter wheat in two climatic years [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(14):2826-2837. (in Chinese)
- 赵琳,吉春容,李世清,等. 施氮和不同栽培模式对半湿润农田生态系统冬小麦群体特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(12):143-148.
Zhao Lin, Ji Chunrong, Li Shiqing, et al. Effect of nitrogen and planting modes on the colony characteristic of winter wheat in sub-humid farmland ecosystem [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(12):143-148. (in Chinese)
- 张永清,苗果园. 冬小麦根系对施肥深度的生物学响应研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):72-75.
Zhang Yongqing, Miao Guoyuan. Biological response of winter wheat root system to fertilization depth [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4):72-75. (in Chinese)
- 孙海国,张福锁. 缺磷胁迫下的小麦根系形态特征研究[J]. 应用生态学报,2002,13(3):295-299.
Sun Haiguo, Zhang Fusuo. Morphology of wheat roots under low-phosphorus stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3):295-299. (in Chinese)
- 周苏玫,王晨阳,张重义,等. 土壤渍水对冬小麦根系生长及营养代谢的影响[J]. 作物学报,2001,27(5):674-679.
Zhou Sumei, Wang Chenyang, Zhang Chongyi, et al. Effect of waterlogging on the growth and nutrient metabolism of the root system of winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(5):674-679. (in Chinese)
- 王淑芬,张喜英,裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(2):27-32.

- Wang Shufen, Zhang Xiying, Pei Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2):27-32. (in Chinese)
- 9 康利允, 李世清. 分层供水施肥对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(1): 85-92.
Kang Liyun, Li Shiqing. Influence of water supply and phosphorus application in different depth on growth and water use efficiency of winter wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1):85-92. (in Chinese)
- 10 Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995, 109(1):7-13.
- 11 赵春江, 王功明, 郭新宇, 等. 基于交互式骨架模型的玉米根系三维可视化研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9):1-6.
Zhao Chunjiang, Wang Gongming, Guo Xinyu, et al. 3D visualization of corn root system based on interactive framework model [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9):1-6. (in Chinese)
- 12 Loïc Pagès, Gilles Vercambre, Jean-Louis Drouet, et al. Root type: a generic model to depict and analyse the root system architecture [J]. Plant and Soil, 2004, 258(1):103-119.
- 13 Frédéric Danjon, Bert Reubens. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation[J]. Plant and Soil, 2008, 303(1-2):1-34.
- 14 Bert Reubens, Jean Poesen, Frédéric Danjon, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review[J]. Trees - Structure and Function, 2007, 21(4): 385-402.
- 15 Anjali S Iyer-Pascuzzi, Olga Symonova, Yuriy Mileyko, et al. Imaging and analysis platform for automatic phenotyping and trait ranking of plant root systems[J]. Plant Physiology, 2010, 152(3): 1148-1157.
- 16 Flavel Richard J, Guppy Christopher N, Tighe Matthew, et al. Non-destructive quantification of cereal roots in soil using high-resolution X-ray tomography [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(7): 2503-2511.
- 17 罗锡文, 周学成, 严小龙, 等. 基于 XCT 技术的植物根系原位形态可视化研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 104-106, 133.
Luo Xiwen, Zhou Xuecheng, Yan Xiaolong, et al. Visualization of plant root morphology in situ based on X-ray CT imaging technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 104-106, 133. (in Chinese)
- 18 周学成, 罗锡文. 基于 XCT 技术的原位根系三维可视化研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊):203-205.
Zhou Xuecheng, Luo Xiwen. 3-D visualization of root system in situ based on XCT technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):203-205. (in Chinese)
- 19 Adiku S G K, Braddock R D, Rose C W. Simulating root growth dynamics [J]. Environmental Software, 1996, 11(1-3): 99-103.
- 20 Lynch J P, Nielsen K L, Davis R D, et al. SimRoot: modeling and visualization of root systems [J]. Plant and Soil, 1997, 188(1): 139-151.
- 21 管建慧, 刘克礼, 郭新宇. 玉米根系构型的研究进展[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 162-166.
Guan Jianhui, Liu Keli, Guo Xinyu. Advances of research on maize root system architecture[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(6): 162-166. (in Chinese)
- 22 钟南, 罗锡文, 秦琴. 基于生长函数的大豆根系生长的三维可视化模拟[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 151-154.
Zhong Nan, Luo Xiwen, Qin Qin. Modeling and visualization of three-dimensional soybean root system growth based on growth functions [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 151-154. (in Chinese)
- 23 梁泉, 廖红, 严小龙. 植物根构型的定量分析[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 695-702.
Liang Quan, Liao Hong, Yan Xiaolong. Quantitative analysis of plant root architecture [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2007, 24(6): 695-702. (in Chinese)
- 24 二代龙震工作室. Pro/Engineer wildfire 2.0 高级设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005:15-18.
- 25 Michael F Barnsley. Fractals everywhere [M]. 2nd ed. Singapore: Elsevier (Singapore) Pte Ltd., 2009.
- 26 刘朝儒, 吴志军, 高政一, 等. 机械制图[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 27 邹心瑶, 姚若河. 小子样统计理论及 IC 可靠性评估[J]. 控制与决策, 2008, 23(3):242-245, 250.
Zou Xinyao, Yao Ruohu. Small sample statistical theory and IC reliability assessment[J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 242-245, 250. (in Chinese)
- 28 张吴平, 郭焱, 李保国. 小麦苗期根系三维生长动态模型的建立与应用[J]. 中国农业科学, 2006, 39(11):2261-2269.
Zhang Wuping, Guo Yan, Li Baoguo. Development and application of three-dimensional growth model of root system in wheat seedling [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(11):2261-2269. (in Chinese)
- 29 谈峰, 汤亮, 胡军成, 等. 小麦根系三维形态建模及可视化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):137-143.
Tan Feng, Tang Liang, Hu Juncheng, et al. Three-dimensional morphological modeling and visualization of wheat root system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 137-143. (in Chinese)
- 30 韩秋萍, 丁启朔, 潘根兴, 等. 基于 Pro/E 的土壤结构与小麦幼苗期根系关系模拟与分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(22):4598-4604.
Han Qiuping, Ding Qishuo, Pan Genxing, et al. Modeling and analyzing the relationship between soil structure and wheat seedling root with Pro/E [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(22):4598-4604. (in Chinese)
- 31 陈信信, 丁启朔, 丁为民, 等. 基于虚拟植物根系技术的冬小麦根系 3D 构型测试与分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8):1481-1488.

- Chen Xinxin, Ding Qishuo, Ding Weimin, et al. Measurement and analysis of 3D wheat root system architecture with a virtual plant tool kit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(8):1481 – 1488. (in Chinese)
- 32 单立山, 李毅, 任伟, 等. 河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 25 – 31.
Shan Lishan, Li Yi, Ren Wei, et al. Root architecture of two desert plants in central Hexi Corridor of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 25 – 31. (in Chinese)
- 33 周国勤. 信阳稻麦轮作区小麦高产障碍因子及对策研究[J]. *天津农业科学*, 2011, 17(5):63 – 65.
Zhou Guoqin. Study on the countermeasures and limitation factors of wheat high-yield in Xinyang rice-wheat rotation regions[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2011, 17(5):63 – 65. (in Chinese)
- 34 郭焱, 李保国. 虚拟植物的研究进展[J]. *科学通报*, 2001, 46(4): 273 – 280.
Guo Yan, Li Baoguo. Research progress of virtual plants [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(4):273 – 280. (in Chinese)
- 35 Walk T C, Vanerp E, Lynch J P. Modeling applicability of fractal analysis to efficiency of soil exploration by roots[J]. *Annals of Botany*, 2004, 94(1): 119 – 128.
- 36 Wang H, Siopongco J, Wade J, et al. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65(2 – 3): 338 – 344.