

厉翔, 丁启朔, 陈信信, 等. 大田群体小麦根系构型 3D 拓扑表型的参数化[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 936-941.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.018

大田群体小麦根系构型 3D 拓扑表型的参数化

厉翔, 丁启朔, 陈信信, 何瑞银, 汪小昂, 李佩

(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: 大田作物群体根系的生理生态过程及其塑性反应必然决定根系构型特定的 3D 拓扑性状。为了解析大田作物地下部的生理生态过程, 需要探究一种能够保留原位拓扑结构的群体根系构型测试与模型化方法, 以及基于根系构型模型的表型参数设计方法。本研究以宁麦 13 为试验材料, 利用 1.5 cm 等株距免耕精密播种法获取相对准确的行株距和一致的群体, 在完成小麦根系构型的数字化基础上, 使用 Pro-E 软件构建群体根系构型的 3D 拓扑模型, 并进一步设计可供定量解析根系系塑性性状的根系构型拓扑表型参数, 以侧位根长比作为根系构型拓扑表型的专用指标, 使用该指标分别对小麦的幼苗期、分蘖期、拔节期进行等株距条播群体的个体植株根系构型拓扑表型的定量分析。结果表明, 根系构型 3D 拓扑的 Pro-E 模型及本研究构建的表型指标能够初步捕捉到邻株根系构型规避现象, 且该现象在小麦的不同生育期有所差异。在大田环境下本研究所探讨和设计的小麦根系构型的拓扑表型参数及其配套的大田群体精准控制、根系构型数据化、模型化及模型的拓扑表型参数化技术有利于捕捉大田环境群体条件下的个体小麦地下部生理生态过程。

关键词: 根系构型; 拓扑表型; 株间交互; 侧位根长比

中图分类号: S11; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2020)04-0936-06

Parameterization of 3D topological phenotype of wheat root system architecture in field population

LI Xiang, DING Qi-shuo, CHEN Xin-xin, HE Rui-yin, WANG Xiao-chan, LI Pei

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

Abstract: The physiological and ecological processes and related plastic reactions determinate the 3D topological traits of crop root system architecture (RSA). To analyze the physiological and ecological processes in the underground part of field crops, it is necessary to explore a method for measuring, parameterizing and modelling the 3D topologies of crop RSA and the design of phenotypic parameters based on RSA model. In this study, Ningmai13 was used and drilled in row with precise manner, and the plant-to-plant distance was 1.5 cm. Based on the digitization of wheat root system architecture the 3D topological model of population root architecture was constructed by Pro-E software. Furthermore, the topological phenotypic parameters of root architecture were designed for quantitative analysis of plasticity. The side root length ratio

(SRLR) was used as a special index, and the quantitative analysis on topological phenotype of root architecture was carried out at seedling stage, tillering stage and jointing stage of wheat. Results showed that Pro-E model and phenotypic indices constructed in this study could initially capture the avoidance phenomenon, and the phenomenon was different at different growth stages. In the field, topological parameters of wheat root architecture and the corre-

收稿日期: 2020-01-06

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2016YFD0300908); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(17)1002]; 江苏省苏北科技专项(SZ-LYG2017008); 中国博士后基金项目(2018M632314)

作者简介: 厉翔(1994-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事农情信息研究。(E-mail) xiangli100712@163.com

通讯作者: 丁启朔, (E-mail) qsding@njau.edu.cn

sponding techniques are helpful to capture the physiological and ecological processes of individual wheat.

Key words: root system architecture; topological phenotype; inter-plant interaction; side root length ratio

作物根系是水分和养分的主要吸收器官,根际状态影响营养物质的吸收,决定地上部生物量、产量和品质的形成^[1-3]。作物根系生长受大田环境及耕作栽培措施的影响,如水肥运筹^[4-7]、地膜残留量^[8]、品种^[9]、密度^[10-11]等。然而对于分蘖类作物而言,在大田环境且群体条件下,对邻株个体间的交互关系、地下部土壤空间资源的争夺等发生机制以及作物地下部生理生态过程对群体(茎蘖)动态的反馈机制等依然认识不足。

作物根系的塑性是作物为了更好地从土壤中获得养分的生物进化结果,根系的塑性反应令根系在土壤空间中发生形态变化^[12],以一定的空间拓扑角度取向形成特定的根系构型(RSA)^[13]。因此,作物根系构型的拓扑塑性不仅是大田作物群体地下部的个体生理行为,也是不同耕作栽培措施下各类群体条件决定的株间交互的生态历程表象。作物根系构型影响作物产量^[13],因此通过合理配置作物群体根系构型并巧妙利用作物群体的株间竞争(交互机制)是指导耕作栽培和群体构建策略的科学依据^[14],不过田间作物的根系构型研究困难重重^[15-16]。

目前众多的作物根系构型高通量表型分析工具主要针对温室、水培设计^[17],一方面相关研究脱离了大田群体条件下的作物根系构型生态环境,因此研究过程缺少接触真实生理生态过程的机会,另一方面,其所提供的表型测试与定量技术本身也较难应用于田间群体的生理生态及作物-环境互作等领域研究。

近年来涉及作物群体条件及个体间关系的研究较多,作物光竞争^[18]、种间竞争^[19]、种植密度^[11,20]、种植方式^[21-22]等都有报道。不过,多数此类作物生理生态的定量研究基于群体的生物量、株高、茎蘖数等宏观指标,缺乏针对个体、甚至是器官

层面对作物地下部生理生态过程、发生机制和效应的研究。

鉴于大田作物地下部高通量表型技术的重要性和复杂性,近年来基于大田作物个体根系构型的测试、模型化和表型分析得到了突破^[16,23-26]。此类新型工具的技术特征表现为从根系结构的可视化评估^[16],到田间原位的玉米根系构型测试和模型化^[26]以及稻茬麦的根系构型动态定量^[13]和环境因子对稻茬麦根系构型的影响分析^[25]。

考虑到大田环境及群体条件下作物根际生理生态所涉及到的根际塑性、株间交互与根系构型拓扑变异等诸多重要研究领域,本研究拟在现有的作物根系构型及其拓扑表型技术研发成果^[27]的基础上专门开展根系构型的 3D 拓扑表型指标化设计及其针对性应用,通过精确播种技术实现大田环境下免耕稻茬麦的群体一致性控制,获取相对稳定的稻茬麦地下部群体生态条件和根系构型拓扑塑性反应,进而基于现有稻茬麦根系构型数字化、Pro-E 模型化的技术基础,进一步设计拓扑表型的性状参数,探究稻茬麦根系构型拓扑表型指标及其在定量条播小麦根系构型塑性方面应用的可能性。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验小区位于江苏省南京市六合区,地处北纬 32°11'~32°27',东经 118°34'~119°03'。六合区属亚热带季风气候,气候温和,四季分明,雨水适量,年平均气温 15.8℃,全年日照总时数为 2 008 h,年降水量 1 048.6 mm,其中 63.9% 的降水集中在 5-9 月(汛期)。本地以稻麦轮作为主,小麦播种期在 10-11 月。试验地耕层(0~20 cm)土壤情况如表 1 所示。

表 1 供试土壤性质

Table 1 Properties of experimental soil

深度 (cm)	全氮 (g/kg)	速效钾 (g/kg)	全钾 (g/kg)	全磷 (g/kg)	有机质 (g/kg)	速效磷 (g/kg)	碱解氮 (g/kg)
0~10.0	1.382	0.162	11.492	13.910	26.204	0.606	0.114
10.1~20.0	1.206	0.117	11.568	3.674	19.261	0.561	0.881

1.2 试验设计

试验材料选用宁麦 13, 分别于 2015 年 11 月中旬、2017 年 11 月中旬播种(2016 年连续阴雨错过冬前播种期)。鉴于精确的栽培技术控制是获得田间小麦一致的群体条件和相对稳定的农艺性状的前提, 田间小区用等孔距栅条精播板进行单粒精播, 田间小区设置为 3 m×5 m, 3 次重复, 随机区组设计, 播种前清除地表残留秸秆, 播种籽粒间距为 1.5 cm, 播种行距为 20.0 cm^[28]。播前施磷酸二铵 375 kg/hm²、尿素 90 kg/hm²、氯化钾 375 kg/hm², 播后取碎土盖籽。小麦田间管理同大田, 不灌溉^[13]。试验田周边设计 0.5 m 保护行, 小区周边开 0.3 m 排水沟用于防涝。

1.3 小麦根系构型的数字化和 Pro-E 模型构建

使用陈信信等^[13]和韩秋萍等^[29]的单株小麦根系 3D 构型测试方法, 分别于幼苗期、分蘖期、拔节期对稻茬麦进行根系群体取样测试。使用长、宽、高

为 300 mm×200 mm×300 mm 的矩形样桶取样。取样时, 将内壁涂有黄油的样桶放置于待取样本处, 调整样桶位置使得待取样本置于样桶中心位置, 将木块放置于样桶边缘, 然后用锤子均匀用力将样桶打入土层, 用铁锹将样桶掘出, 连同植株群体及土壤带回实验室进行根系数据的测量, 通过根系构型数字化仪获取根系数据, 测试过程为尽量避免取样时样桶对土壤的挤压及保证根系的完整性, 仅对样桶中间 100 mm 范围内的样本进行测试。应用 Microsoft Excel 2016 进行数据的坐标转换。

进一步将实测单株根系构型拓扑数据导入 Pro-E 软件进行实体根系构型拓扑模型的构建, 然后按照各株的相对位置顺序重新将群体根系构型样本组装起来, 获得小麦群体根系 Pro-E 模型, 如图 1 所示, 其中一种颜色的线条代表一株小麦的根系。

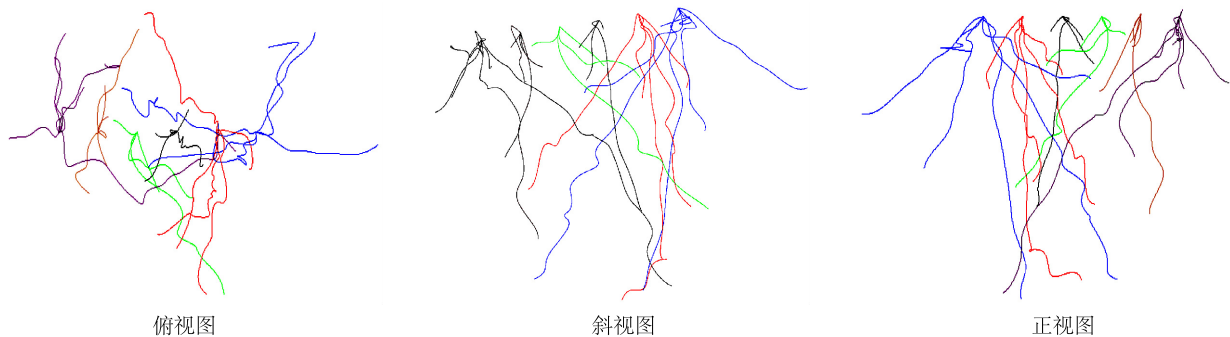


图 1 稻茬麦群体根系 Pro-E 模型

Fig.1 Pro-E model of root in rice stubble wheat

1.4 稻茬麦根系构型 3D 拓扑的表型指标设计

当前已有诸多指标用于定量作物的根系构型, 如总根长、分枝数量、根表面积、根系扎根深度、根系拓展宽度、根系夹角、宽深比、根系拓扑深度等^[30], 但多数指标难于针对作物根系构型的 3D 拓扑塑性、拓扑空间变异性进行定量分析。

鉴于根系构型的拓扑表型及其参数化是解读作物地下部生理生态过程的关键, 而且, 从所得的小麦群体根系构型模型图(图 1)可以看出, 多数单株根系构型表现出明显的空间姿态取向或根系构型拓扑的拓展方向性。为此, 本研究拟为所得群体根系构型 Pro-E 模型设计一个关键的拓扑表型指标——侧位根长比。

侧位根长比(*SRLR*)定义为群体条件单株根系构型的两象限分割区域内各象限包含的根系拓扑总长占该株总根长的比例。*SRLR* 的测量操作如图 2 所示, 在群体条件下稻茬麦根系构型模型向地表平面投影, 设计一个经过种子位(根系基点)且垂直于行向的横向基准面作为分割面, 将所得单株根系构型投影的 2D 拓扑进一步分割为 Z1 和 Z2 2 个区域。进而利用 Pro-E 软件的计算功能对各区域中的根系长度进行统计分析, 获取各区域内根系构型拓扑的长度比例(*SRLR*):

$$SRLR = \frac{TRL_i}{TRL} \quad (1)$$

式中: *SRLR* 为侧位根长比; *TRL_i* 为第 *i* 区域内的根系拓扑总长; *TRL* 为该株根系的总长。

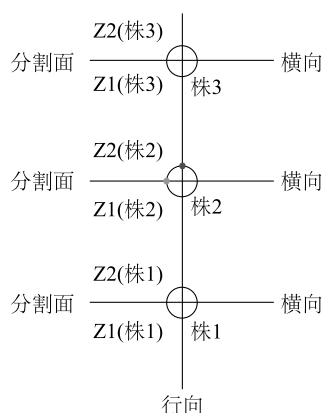


图2 群体条件下分割区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of segmented area under group condition

2 结果与分析

2.1 稻茬麦单株总根长动态

2 个年度的稻茬麦单株总根长具有基本一致的变化趋势(图 3), 11 月至次年 1 月的田间气温较低, 但稻茬麦根系在越冬期间仍然能够缓慢增长。1 月份之后气温逐渐回暖, 分蘖期至拔节期稻茬麦根系呈现快速增长趋势。

作物根系的指标多达数十个, 作为最基本对比目的, 本研究仅从实测根系构型模型中提取了总根长, 总根长指标的年度间及不同生理期的对比虽表达了宏观的根际变化趋势, 但此类宏观指标并不能够反映出大田环境及群体条件下个体株间的交互行为、竞争和塑性以及个体根系构型的 3D 拓扑空间变异等过程、发生机制和效应。

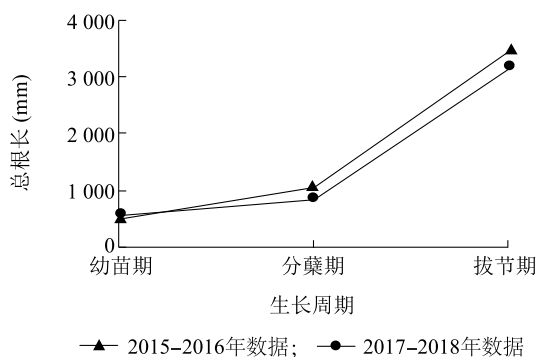


图3 稻茬麦单株根系总根长动态

Fig.3 Dynamics of total root length per plant in rice stubble wheat

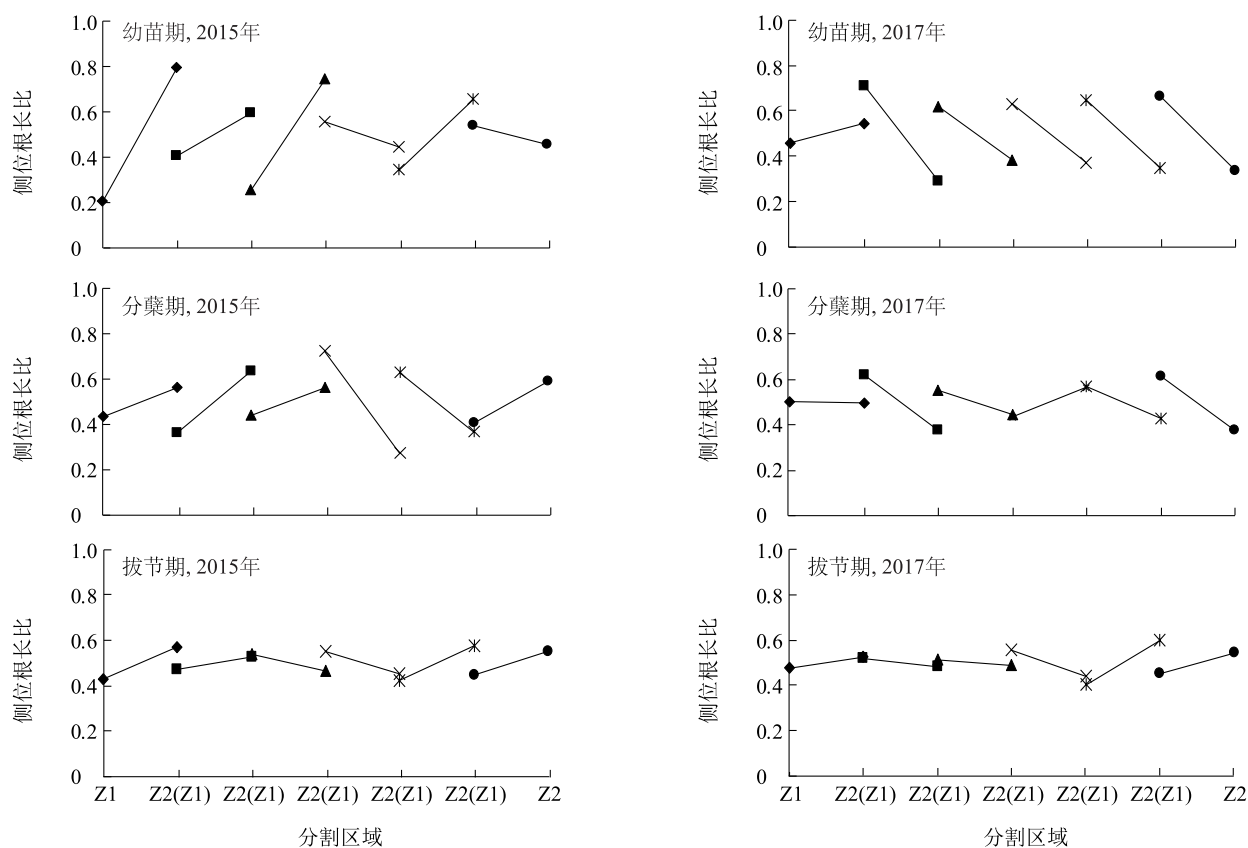
2.2 稻茬麦的侧位根长比动态

图 4 显示了 2 个年度毗邻的 6 株小麦侧位根长比在 3 个生育期内的动态变化。图 4 显示, 多数植株的根系在两侧区域的分布并不均匀, 且表现出协同交替错位的现象, 即前一株的根系构型拓扑在 Z1 侧优势发展时 ($SRLR > 0.5$), 在 Z1 侧的邻株在该侧的侧位根长比更倾向于低于平均值 0.5。这一邻株间根系构型拓扑在侧向发展的交错现象是否具有普遍性目前尚难定论, 一方面的困难来自田间试验及原状根系构型 3D 拓扑数字化及模型化操作过程仍较为繁琐, 所得样本空间较小。另一方面, 所得的 6 株植株的根系构型也并不是完全准确地符合这一特征。但至少, 本研究设计的侧位根长比可以作为一个新的拓扑表型指标, 且具有表达群体内株间交互(竞争、规避、互助等)机制及效应解析的关键表型指标。

2 个作物季的幼苗期两区域内的侧位根长比波动较大, 反映到拓扑表型方面则是侧位根长比更大的波动范围。幼苗期稻茬麦根系较短, 生长速率较慢, 扎根能力较弱, 根系集中在浅土层。再者, 该阶段的根系构型拓展范围较小, 播种的 1.5 cm 种子间距必然进一步加剧株间的土壤空间资源争夺, 相互排挤并获取优势的侧方位土壤空间资源显得尤为重要, 因此这一时期的根系竞争必然较为剧烈。再加上本拓扑表型指标的计算是一个相对量, 因此更能够体现侧位根长比在这一生育期的大范围波动状况。

分蘖期天气回暖, 小麦根系快速生长, 总根长增加, 个体植株的根系构型向深土层发展, 随着植株个体的增大, 植株对于土壤资源的可争夺空间范围增大, 缓解了竞争激烈程度, 因此, 2 个年度都能够表现为该时期侧位根长比指标波动范围的相对压缩。

拔节期小麦的根系数量激增, 根长增长较快, 土壤表层养分耗竭和根系的向地性导致根系向深层土壤搜索生长。因此, 环境、生物和非生物等效应的综合影响使得该时期的侧位根长比反而呈现出最小的波动。表明, 大田群体条件下稻茬麦个体植株间的地下部生理生态过程和主导机制非常复杂, 但基于侧位根长比等拓扑表型指标的解析有可能提供一个独到的技术路径, 用于捕捉个体植株的根系构型及邻株间的交互行为, 这也为开拓土壤空间资源的根际优化利用机理提供一个可靠的技术手段。



其中每条线段代表1株小麦,Z1表示第1株小麦的Z1分割区域;Z2(Z1)表示共同生长区域,既为第 n 株的Z2分割区域,又为第 $n+1$ 株的Z1分割区域;Z2表示最后1株小麦的Z2分割区域;具体分割方法如图2所示。

图4 2015–2016年、2017–2018年稻茬麦群体根系侧位根长比动态

Fig.4 Dynamics of side root length ratio of rice stubble wheat population in 2015–2016 and 2017–2018

2个作物季3个生育期的试验分析结果表明,合理的种植技术有可能成为大田作物有效的群体生态设计及根系构型塑性调控策略,调控小麦的根系生态条件和株间交互过程,进而促进群体内个体间合理的土壤空间资源分配,最终有望推进群体内个体的均衡发展。基于这一理念,近年来相关学者已从生产实践中领悟和摸索出可靠的结论,如空间立体匀播理论及技术^[31-33]。

3 结论

基于根系构型 Pro-E 模型设计出定量作物根系构型拓扑塑性的关键表型参数——侧位根长比,该参数捕捉到等株距条播稻茬麦邻株根系构型表现出拓扑错位规避的现象。

稻茬麦在不同生理期的根系构型塑性表现不尽相同,幼苗期、分蘖期、拔节期的侧位根长比变化程度逐步下降。

稻茬麦大田群体地下部生理生态的高通量表型技术应具备的一些基本技术特征包括:非破坏性原状根系构型数字化、根系构型模型化(Pro-E)、根系构型模型的表型指标化以及结合群体作物地下部生理生态专用设计的根系构型拓扑表型指标。拓扑表型指标的设计要基于大田环境、群体条件、耕作栽培、水肥运筹等要素对作物根系的土体空间搜寻利用的影响机制和效应。

参考文献:

- [1] 田中伟,樊永惠,殷美,等. 长江中下游小麦品种根系改良特征及其与产量的关系[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 613-622.
- [2] 刘金山,戴健,刘洋,等. 过量施氮对旱地土壤碳氮及供氮能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 21(1): 112-120.
- [3] GE Z Y, YAN X L, LUO X W. Simulation models of plant root system architecture and application: a review[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(3): 154-

- 160.
- [4] 庞春花,张紫薇,张永清. 水磷耦合对藜麦根系生长、生物量积累及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(21): 4107-4117.
- [5] 李小炜,孙 权,白春梅. 水肥一体化下不同施肥和灌水量对玉米根系发育及水分生产率的影响[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(1): 1-7.
- [6] 李开峰,张富仓,祁有玲,等. 冬小麦根区土壤水肥空间耦合对根系生长及活力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 48-52.
- [7] 李志勇,陈明灿,王 璞,等. 几种水氮模式处理下冬小麦根系生长的差异[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1031-1035.
- [8] 林 涛,汤秋香,郝卫平,等. 地膜残留量对棉田土壤水分分布及棉花根系构型的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 117-125.
- [9] 董桂春,王余龙,王坚刚,等. 不同类型水稻品种间根系性状的差异[J]. 作物学报, 2002, 28(6): 749-755.
- [10] 陈青青,李德志. 根系隔离条件下的谷子亲缘识别[J]. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1188-1197.
- [11] 王利立,朱永永,殷 文,等. 大麦/豌豆间作系统种间竞争力及产量对地下作用和密度互作的响应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 265-273.
- [12] 王 鹏,牟 溥,李云斌. 植物根系养分捕获塑性与根竞争[J]. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1184-1196.
- [13] 陈信信,丁启朔,丁为民,等. 基于虚拟植物技术的冬小麦根系 3D 构型测试与分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1481-1488.
- [14] LYNCH J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995, 109(1): 7-13.
- [15] 陈 伟,薛 立. 根系间的相互作用——竞争与互利[J]. 生态学报, 2003, 24(6): 1243-1251.
- [16] TRACHSEL S, KAEPLER S M, BROWN K M, et al. Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1/2): 75-87.
- [17] 梁 泉,廖 红,严小龙. 植物根构型的定量分析[J]. 植物学报, 2007, 24(6): 695-702.
- [18] 陈书燕,张甲林,贾 鹏,等. 光竞争条件下邻域效应对植物高生长可塑性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 76-81.
- [19] 张作为,史海滨,刘德平,等. 小麦/向日葵间作群体水盐运移机理及种间竞争能力研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 243-251.
- [20] 董珑丽,魏茶花,马晓娟,等. 春小麦竞争能力与产量的关系[J]. 生态学报, 2006, 27(10): 4203-4208.
- [21] 薛盈文,张英华,黄 琴,等. 窄行匀播对晚播冬小麦群体环境、个体性状和物质生产的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5545-5555.
- [22] 殷 文,赵 财,于爱忠,等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 633-641.
- [23] 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.
- [24] CHEN X X, DING Q S, BLASZKIEWICZ Z, et al. Phenotyping for the dynamics of field wheat root system architecture[J]. Scientific Reports, 2017(1): 37649.
- [25] CHEN X X, LI Y N, HE R Y, et al. Phenotyping field-state wheat root system architecture for root foraging traits in response to environment \times management interactions [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2642.
- [26] WU J, PAGÈS L, WU Q, et al. Three-dimensional architecture of axile roots of field-grown maize[J]. Plant and Soil, 2015, 387(1/2): 363-377.
- [27] 陈信信,丁启朔,李毅念,等. 稻茬麦根系构型可视化与三向分型维研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 328-335.
- [28] 芮超杰. 稻茬麦免耕种植技术模式及其效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [29] 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.
- [30] REUBENS B, POESEN J, FRÉDÉRIC D, 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.
- [31] 常旭虹,王艳杰,陶志强,等. 小麦立体匀播栽培技术体系[J]. 作物杂志, 2019(2): 168-172.
- [32] 赵凯男,常旭虹,王德梅,等. 立体匀播和施氮量对冬小麦产量构成及旗叶光合性能的影响[J]. 作物杂志, 2019(1): 103-110.
- [33] 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(7): 184-186.

(责任编辑:陈海霞)