doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.030

# 不同施氮量下覆膜滴灌玉米相对根长密度模型研究

贾　彪　李振洲　王　锐　孙　权　王掌军　刘根红
(宁夏大学农学院,银川 750021)

**摘要**:为探明施氮量对宁夏引黄灌区覆膜滴灌玉米根长密度(RLD)的影响,设置 5 个施氮水平和 1 个对照(CK,不施氮与不覆膜)进行试验,测定玉米 RLD,建立不同施氮量下相对根长密度(NRLD)模型,并加以检验。结果表明:不同施氮处理的玉米 RLD 分布区域均随土层深度的增加而减小,且大部分集中在 0~20 cm 土层;随着施氮量的增加,RLD 分布区域明显扩大;NRLD 分布满足三阶多项式函数模型,模拟曲线的决定系数 $R^2$ 为 0.951,模型检验结果 $R^2$ 为 0.845,均方根误差(RMSE)为 0.248,拟合效果好,但该多项式模型不能保证 NRLD 在相对取样深度 $Z_r$ 为 1 时达到 0,故对玉米 NRLD 分布多项式模型进行优化。优化模型验证结果显示,各施氮处理 RMSE 不大于 0.308,CK、N0、N1、N2、N3 和 N4 处理的标准化均方根误差分别为 0.242、0.193、0.184、0.226、0.208 和 0.273,$R^2$ 分别为 0.903、0.953、0.920、0.944、0.962 和 0.898,具有较高的拟合度,解决了 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0 的问题。本研究可为宁夏引黄灌区膜下滴灌玉米 NRLD 分布拟合、根系养分吸收和施肥管理提供理论参考。

**关键词**:玉米;膜下滴灌;相对根长密度;空间分布;多项式函数;模型优化
**中图分类号**:S275.6;S143.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)09-0266-08　　**OSID**:

# Effects of Nitrogen Application Rate on Root Length Density of Maize under Drip Irrigation with Mulch

JIA Biao　LI Zhenzhou　WANG Rui　SUN Quan　WANG Zhangjun　LIU Genhong
(*School of Agriculture*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*)

**Abstract**: The objective was to establish the root length density (RLD) distribution relation model of maize at different nitrogen rates, and explore the effects on RLD of maize under drip-irrigation with plastic film in Ningxia. The relationship was improved between the spatial distribution characteristics of maize root system and nitrogen absorption. The interaction was promoted between maize root and soil. The nitrogen fertilizer application rate of maize was optimized under the condition of water and fertilizer integration. There were five nitrogen fertilizer application rates and the treatment of no application of N fertilizer and no mulching as control (CK) in this experiment. The experiment plot was in farm of Pingjibao which was located in Yinchuan City, Ningxia, Northwest China. The RLD of drip irrigated maize was measured. The model of relative root length density (NRLD) was established and verified at different N application rates. The results showed that the RLD distribution of drip-irrigation maize was decreased with the increase of depth of soil layer in the N fertilization treatment. The vertical distribution of root length in the 0~20 cm soil layer was the largest. The RLD distribution range of maize was expanded significantly with the increase of N fertilizer application rate. The NRLD value of maize in all treatments were consistent with cubic polynomial function. The determination coefficient of simulation curve was 0.951. The results of the evaluation showed that determination coefficient of linear relationship between simulated and observed values of NRLD was 0.845, and the root mean square error (RMSE) was 0.248. The fitting result of cubic polynomial function had a good effect. But it should be noted that the polynomial model could not guarantee that the value of NRLD reached zero at the $Z_r$ was equal to 1. Therefore, the cubic polynomial model of NRLD maize was optimized and verified. The verification results of the optimized model showed that RMSE in all nitrogen treatments was not more than 0.308, the

收稿日期:2019-11-18　修回日期:2020-01-12
**基金项目**:宁夏回族自治区自然科学基金项目(2020AAC02012)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BBF03009、2018BBF02004)、国家自然科学基金项目(31560339)、宁夏大学草学一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)和西夏区科技局科技项目(2018XXKJ01)
**作者简介**:贾彪(1979—),男,副教授,博士,主要从事农业信息技术与精准农业研究,E-mail:jiabiao2008@nxu.edu.cn

standardized root mean square error (nRMSE) were 0.242, 0.193, 0.184, 0.226, 0.208 and 0.273, and determination coefficient values were 0.903, 0.953, 0.920, 0.944, 0.962 and 0.898, respectively. It not only had a higher fitting degree, but also solved the problem that the value of NRLD reached zero at the $Z_r$ was equal to 1. It was more suitable to simulate NRLD distribution of drip-irrigation under plastic film of maize for different nitrogen rates. All these results given can also provide a theoretical reference for nutrient absorption and fertilization management of drip-irrigated maize root system in the irrigation area of Ningxia.

**Key words**: maize; drip irrigation under plastic film; normalized root length density; spatial distribution; polynomial function; model optimization

## 0　引言

根系是作物营养吸收的重要器官之一，是植株健康生长、良好发育、氮素吸收和产量形成的重要保证[1-3]。良好的根系构型与根系分布能够促进作物高效获取土壤养分[4-6]、改善品种、提高产量。根系在土壤中的空间分布直接关系到作物水肥的吸收能力[7]，尤其是对氮肥(N)的吸收能力[8]。氮肥对作物根长密度(RLD)、根系构型与根系分布具有重要的调控作用。国内外研究表明，适量施氮与合理施用氮肥能够促进作物根系构型建成、改变作物根系在土壤中时空分布[9]、显著提高细根的 RLD、增加根系吸收面积、延缓根系衰老等[10-11]。反之，不仅会抑制根系的生长及细根的 RLD，而且还会对人类的生存环境带来威胁[12]。因此，深入探讨宁夏滴灌玉米 RLD 与氮肥之间的动态变化关系，准确描述水肥一体化条件下不同氮素水平玉米根长密度的分布规律，构建不同施氮水平下的玉米根长密度模型，对于研究作物生长、分析根系与土壤互作效应等至关重要[13]。

为了说明作物在不同处理、不同生长阶段的 RLD 分布，模拟作物生长与土壤水分、养分运移的关系，制定合理的灌溉施肥制度，WU 等[14]首次提出了归一化根长密度(Normalized root length density，NRLD)概念，用 NRLD 表示作物不同相对深度处的根长分配比例，从而建立豆类、棉花和玉米等作物的 NRLD 分布与相对深度函数关系模型。ZUO 等[15]分析了小麦的 NRLD，成功运用广义函数描述小麦的 RLD 分布规律。邹海洋等[16]基于归一化 RLD 思想，建立了不同水肥组合的春玉米相对根长密度分布多项式函数模型。AHMADI 等[17]应用人工神经网络模拟不同处理下马铃薯的 RLD，得到了很好的拟合效果。以上拟合模型主要分析了不同处理下根长密度分布规律，但对于宁夏引黄灌区水肥一体化新技术种植模式下膜下滴灌玉米的 NRLD 生长模型的构建研究较少。因此，适时掌握根系分布动态状况、研究不同施氮量下宁夏引黄灌区膜下滴灌玉米根系生长分布规律，对于指导西北干旱地区黄河水灌溉的大田玉米生产和覆膜滴灌玉米氮肥精准管理等具有现实意义。

鉴于此，本研究在宁夏农垦平吉堡农场开展两年膜下滴灌玉米试验，研究不同施氮量对玉米根系 RLD 分布的影响，分析 RLD 动态变化规律，揭示滴灌水肥一体化条件下不同氮肥供应量与玉米 RLD 间的关系，构建不同施氮量膜下滴灌玉米根系 NRLD 模型，以期为宁夏地区玉米根系生长模型构建提供科学方法。

## 1　材料和方法

### 1.1　试验设计

试验 1：于 2019 年 4—10 月在宁夏农垦平吉堡农场五队(106°3′E，38°43′N)进行，供试玉米为当地主栽品种“宁吉 198”，前茬作物为玉米。2019 年 4 月 24 日播种，小区面积为 112 $m^2$(20 m×5.6 m)，随机区组排列，3 个重复，种植密度 97 500 株/$hm^2$。设置 5 个施氮水平和 1 个对照处理，分别为 N0：0 kg/$hm^2$，N1：90 kg/$hm^2$，N2：180 kg/$hm^2$，N3：270 kg/$hm^2$，N4：360 kg/$hm^2$，对照(CK)为不施氮肥、不覆膜。采用覆膜滴灌水肥一体化技术，氮肥为尿素(总氮质量分数大于等于 46.4%)，由施肥罐随水施入，共施肥 8 次。具体施肥和灌水情况见表 1。玉米种植方式采用宽窄行播种(宽行 70 cm，窄行 40 cm)，株距 20 cm。1 条滴灌带控制 2 行玉米水肥量，滴灌带布设在窄行中间位置。全生育期灌水总量为 400 mm。

**表 1　玉米不同生育期灌水和施肥情况**

**Tab.1　Irrigation and fertilization status during growing stage of maize**

| 参数 | 苗期 | 拔节期 | 抽雄期 | 灌浆期 | 成熟期 |
|---|---|---|---|---|---|
| 灌水量/mm | 20 | 100 | 140 | 120 | 20 |
| 灌水次数/次 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 |
| 施肥次数/次 | 1 | 3 | 1 | 3 | 0 |
| 施肥比例/% | 10 | 45 | 20 | 25 | 0 |

试验 2：于 2018 年在宁夏农垦平吉堡农场(106°1′47″E，38°28′30″N)进行。供试玉米品种“天

赐 19”,小区面积为 67.5 $m^2$,重复 3 次,随机区组排列。其他覆膜、滴灌、施肥技术和玉米种植模式、田间管理措施等同试验 1。

采用试验 1 数据用于建模,试验 2 数据对所建模型验证。试验田土壤肥力中等,2 年间(0 ~ 20 cm 土层)土壤理化性质见表 2。

**表 2 耕层(0 ~ 20 cm)土壤基本理化性质**

**Tab. 2 Soil basic chemical properties in tillage layer (0 ~ 20 cm)**

| 年份 | pH 值 | 有机质质量比/(g·kg$^{-1}$) | 全氮质量比/(g·kg$^{-1}$) | 全磷质量比/(g·kg$^{-1}$) | 碱解氮质量比/(mg·kg$^{-1}$) | 速效磷质量比/(mg·kg$^{-1}$) | 速效钾质量比/(mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2018 | 7.92 | 11.51 | 0.82 | 0.59 | 37.42 | 19.11 | 102.48 |
| 2019 | 8.12 | 16.71 | 0.78 | 0.44 | 36.64 | 14.36 | 115.32 |

### 1.2 测定项目及方法

根系取样采用土壤剖面法,于拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期取样,每小区选取代表性植株 3 株,以 10 cm 为 1 层,分别取至 60 cm 土层,具体取样样方示意图如图 1 所示。以植株为中心取 60 cm × 40 cm 内全部土壤,装入 40 目网袋,用低压水枪冲洗,快速吸干根系表面水分用于分析。

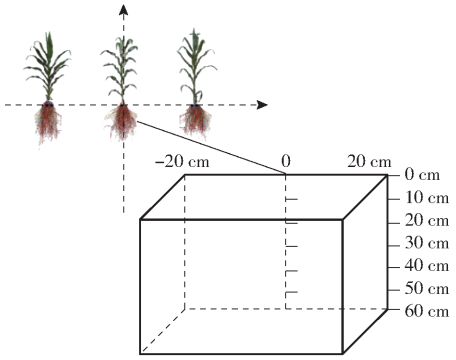


图 1 玉米根系取样样方示意图

Fig. 1 Sketch of sample maize root

采用 Epson Perfection V700 型根系扫描仪获取 Tif 格式高清图像,运用 WinRHIZO (Regent Instruments Inc.,加拿大)图像处理系统分析玉米 RLD 空间分布[18]。然后计算 RLD,计算式为

$$R_{LD} = L/V \tag{1}$$

式中 $R_{LD}$——根长密度,cm/$cm^3$

$L$——根系长度,cm

$V$——土壤体积,$cm^3$

### 1.3 根系模型

运用归一化方法[14,16,19],将玉米根系扎根深度转换为 0 ~ 1 范围内的标准化根深,则 RLD 分布用 NRLD 表示,表达式为

$$L_{nrd}(Z_r) = \frac{L_d(Z_r)}{\int_0^1 L_d(Z_r)\,\mathrm{d}Z_r} \tag{2}$$

式中 $Z_r$——相对取样深度,为 0 ~ 1

$L_d(Z_r)$——在 $Z_r$ 处的根长密度

$L_{nrd}(Z_r)$——相对根长密度

运用三阶多项式模型对不同氮素处理玉米根系相对取样深度($Z_r$)处 $L_{nrd}(Z_r)$ 进行拟合,可得

$$L_{nrd}(Z_r) = d + eZ_r + fZ_r^2 + gZ_r^3 \tag{3}$$

式中 $d$——地表处 NRLD

$e$、$f$、$g$——多项式参数

### 1.4 模型检验与评价

采用决定系数($R^2$)、均方根误差(RMSE)、标准化均方根误差(nRMSE)对模型进行评价。

### 1.5 数据处理分析

采用 Microsoft Excel 2016 整理数据,SPSS 16.0 统计分析与 LSD 显著性检验,Surfer 15.0 (Golden Software Inc.) 绘制根系 RLD 空间分布图,Origin 2018 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮量对玉米 RLD 分布的影响

RLD 可反映玉米根系在土壤中的空间分布状态。以试验 1(2019 年)各施氮处理滴灌玉米抽雄期 RLD 分布为例,如图 2(图中根长密度单位为 cm/$cm^3$)所示。

由图 2 可知,不同施氮处理间玉米根系分布基本相似,不同氮素处理滴灌玉米的 RLD 分布均随土层深度的增加而减小,且大量集中在 0 ~ 20 cm 土层处;各处理玉米 RLD 分布区域随着施氮量增加明显扩大(图 2),尤其高氮(N3 和 N4)水平下的 RLD 分布区域扩大下移至 30 cm 土层,且在 40 cm 土层处少有分布。在 0 ~ 20 cm 土层中,覆膜滴灌条件下 N0、N1、N2、N3、N4 处理玉米 RLD 最大值分别为 0.17、0.24、0.40、0.50、0.42 cm/$cm^3$,其中以施氮量 270 kg/$hm^2$(N3)玉米 RLD 最大,说明适宜的氮素水平对覆膜滴灌玉米 RLD 起到促进作用。20 ~ 60 cm 土层中,不施肥不覆膜种植玉米根系出现老化断层现象,而覆膜条件下不同氮素水平根系断层程度变化小,不明显。说明覆膜条件下施氮可减缓 20 ~ 60 cm 土层中玉米 RLD 降低。

### 2.2 不同施氮量对玉米 NRLD 分布的影响

由玉米 RLD 分布可知,各施氮处理不同土层深

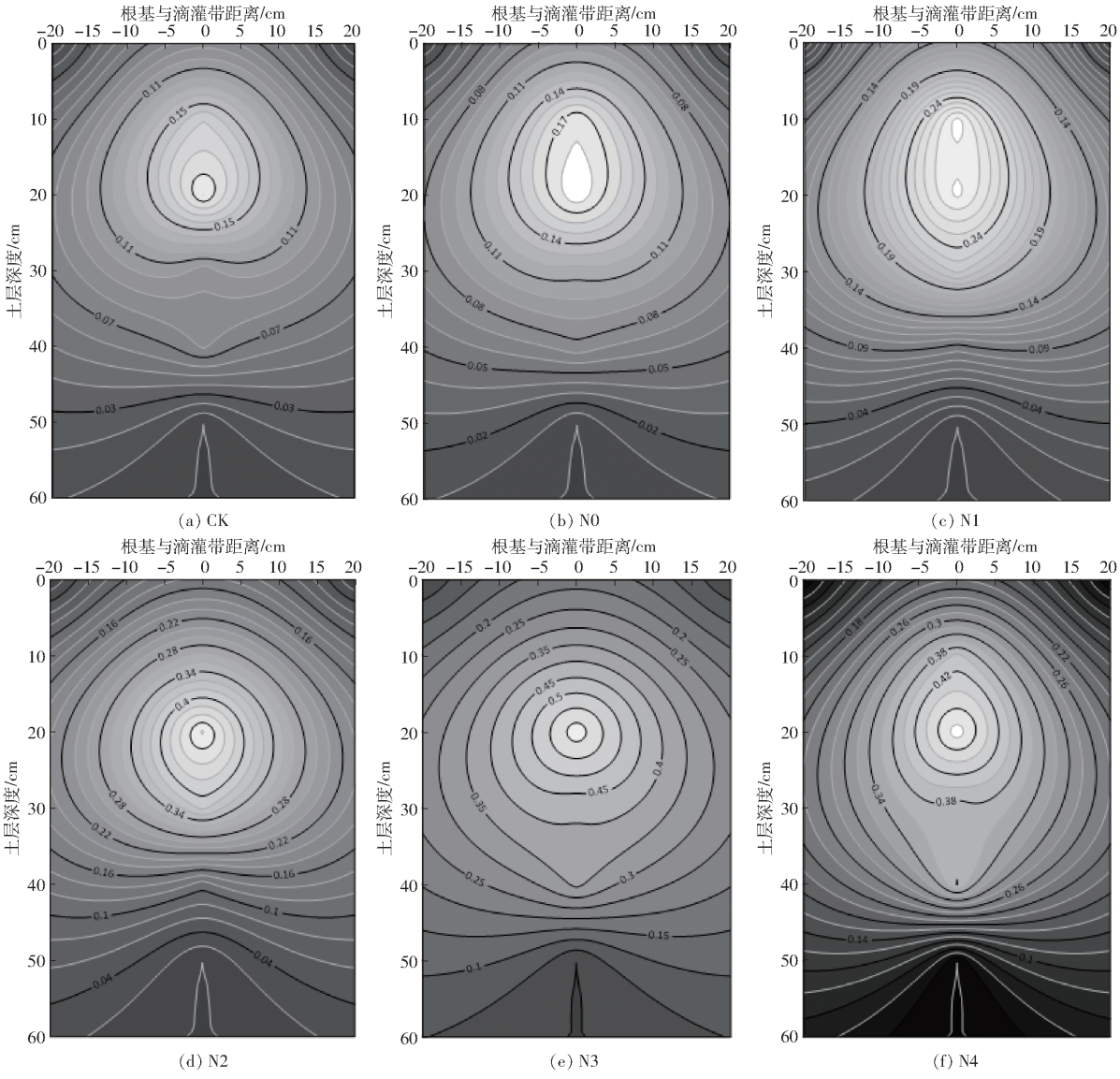


图 2　不同施氮量下玉米抽雄期 RLD 分布

Fig. 2　Distributions of RLD of maize at tasseling stage at different nitrogen application rates

度玉米根系生长差异较大，这与土壤养分分布差异有关。由表 3 可知，不同氮素水平下，相对取样深度（$Z_r$）处的 NRLD 平均值（MN）、标准差（SD）和变异系数（CV）在相对取样深度方向上的分布一致，均在 $Z_r$ 为 0.167 处 MN 最大，随着取样深度的增加表现出减小的趋势；从各处理不同取样深度处（$Z_r$ = 1 除外）标准差可知，SD 最大值为 0.490，平均值为 0.089。变异系数与相对误差成正比，各施氮处理靠近最大扎根深度（$Z_r$ = 1）处的 CV 最小，且 CV 变化范围在 0.018 ~ 0.194 之间。由此可以看出，采用水肥一体化技术的膜下滴灌玉米根系主要生长在土壤上层，越往土壤下层玉米根长密度分布越少。

### 2.3　不同施氮量下玉米 NRLD 分布模型构建与验证

为了估算滴灌玉米的 NRLD 分布，采用较为通用的三阶多项式函数（式（3））对试验 1（2019 年）不同施氮量下玉米 NRLD 进行拟合，由图 3a 可知，拟合曲线的决定系数 $R^2$ 为 0.951；图 3b 采用试验 2（2018 年）分析验证了不同施氮处理玉米 NRLD 分布的实测值与模拟值间的差异，其检验结果 $R^2$ 为 0.845（$P < 0.01$），RMSE 为 0.248。表明模型精确度较高，可以用三阶多项式模型来拟合玉米相对根长密度。

表 4 为各氮素处理（2019 年）三阶多项式拟合的模型系数。从表 4 可看出，各氮素处理三级多项式模拟结果 $R^2$ 不小于 0.978，RMSE 在 0.131 ~ 0.238 之间，拟合效果较好。参数 $e$、$g$ 和 $f$ 表示曲线变化趋势，其中 $e$、$g$ 随施氮量增加先减小后增大，$f$ 随施氮量增加先增大后减小。因此，三阶多项式模型能够较为准确地反映玉米 NRLD 剖面的变化趋势，但多项式模型不能保证 NRLD 在 $Z_r$ = 1 时达到 0，对于模拟作物根系 RLD 分布时带来很大误差。参数 $d$ 表示土壤表面 $Z_r$ = 0 时 NRLD 分布的理论

**表 3 不同施氮处理玉米相同 $Z_r$ 处实测 NRLD**

**Tab. 3 Statistics of NRLD at the same relative depths ($Z_r$) for different nitrogen rates**

| 处理 | 相对取样深度 | 平均值 | 标准差 | 变异系数 | 处理 | 相对取样深度 | 平均值 | 标准差 | 变异系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 0.167 | 2.784 | 0.147 | 0.053 | N2 | 0.167 | 3.032 | 0.138 | 0.046 |
| | 0.333 | 1.445 | 0.026 | 0.018 | | 0.333 | 1.446 | 0.103 | 0.071 |
| | 0.500 | 0.776 | 0.031 | 0.040 | | 0.500 | 0.780 | 0.067 | 0.086 |
| | 0.667 | 0.489 | 0.046 | 0.094 | | 0.667 | 0.451 | 0.087 | 0.194 |
| | 0.833 | 0.248 | 0.033 | 0.132 | | 0.833 | 0.286 | 0.039 | 0.136 |
| | 1.000 | 0 | 0 | 0 | | 1.000 | 0 | 0 | 0 |
| N0 | 0.167 | 2.858 | 0.490 | 0.171 | N3 | 0.167 | 3.442 | 0.143 | 0.041 |
| | 0.333 | 1.481 | 0.081 | 0.055 | | 0.333 | 1.575 | 0.037 | 0.024 |
| | 0.500 | 0.718 | 0.079 | 0.110 | | 0.500 | 1.012 | 0.035 | 0.035 |
| | 0.667 | 0.529 | 0.040 | 0.076 | | 0.667 | 0.710 | 0.017 | 0.025 |
| | 0.833 | 0.236 | 0.036 | 0.155 | | 0.833 | 0.456 | 0.035 | 0.077 |
| | 1.000 | 0 | 0 | 0 | | 1.000 | 0 | 0 | 0 |
| N1 | 0.167 | 2.793 | 0.233 | 0.083 | N4 | 0.167 | 3.136 | 0.151 | 0.048 |
| | 0.333 | 1.251 | 0.146 | 0.117 | | 0.333 | 1.481 | 0.116 | 0.078 |
| | 0.500 | 0.675 | 0.111 | 0.165 | | 0.500 | 1.105 | 0.102 | 0.092 |
| | 0.667 | 0.411 | 0.020 | 0.049 | | 0.667 | 0.824 | 0.016 | 0.019 |
| | 0.833 | 0.212 | 0.017 | 0.081 | | 0.833 | 0.466 | 0.028 | 0.060 |
| | 1.000 | 0 | 0 | 0 | | 1.000 | 0 | 0 | 0 |

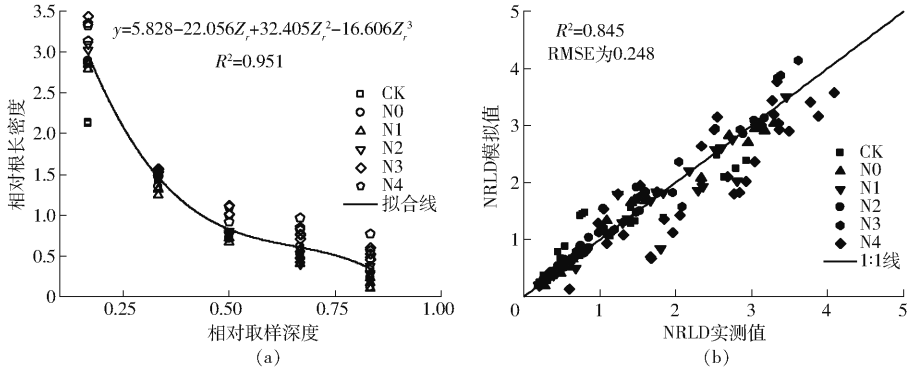


图 3 NRLD 分布三阶多项式模型构建与验证

Fig. 3 Construction and verification of third polynomial model of NRLD distribution

**表 4 不同施氮处理玉米 NRLD 三阶多项式模拟结果**

**Tab. 4 NRLD fitting results of maize of third polynomial for different nitrogen rates**

| 处理 | 参数 | | | | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$ | $e$ | $f$ | $g$ | | |
| CK | 5.138 | −17.736 | 23.736 | −11.392 | 0.996** | 0.182 |
| N0 | 5.193 | −17.371 | 26.867 | −9.702 | 0.995** | 0.176 |
| N1 | 5.649 | −22.081 | 32.316 | −16.390 | 0.994** | 0.131 |
| N2 | 5.813 | −21.130 | 28.873 | −13.784 | 0.997** | 0.208 |
| N3 | 6.588 | −24.266 | 34.060 | −16.408 | 0.991** | 0.192 |
| N4 | 5.822 | −20.960 | −29.233 | −14.957 | 0.978** | 0.238 |

注：** 表示达到极显著水平（$P<0.01$），下同。

值，在实际测量时无限接近土壤表面层无根系存在。

### 2.4 玉米根系 NRLD 模型优化与检验

由于三阶多项式模型不能保证 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0，且无物理意义。因此，有必要对多项式模型进行优化，确保 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0 以及模型的精度，简化多项式模型系数，优化玉米根系 NRLD 分布模型为

$$L_{nrd}(Z_r)=(1-Z_r)(A+BZ_r+CZ_r^2) \quad (4)$$

式中 $A$、$B$、$C$——拟合系数

优化模型与三阶多项式模型相比，模型参数由 4 个减少为 3 个系数，且优化模型具有作物根系生长的生物学意义，可确保 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0。

利用试验 2（2018 年）不同施氮量处理实测值对玉米 NRLD 分布优化模型进行验证，对模拟效果进行评价。由图 4 和表 5 可看出，各施氮处理优化模型模拟值与实测值相对应的 RMSE 在 0.194 ~ 0.308 之间，$R^2$ 分别为 0.903、0.953、0.920、0.944、0.962 和 0.898，不同施氮量下玉米根系 NRLD 模型的 nRMSE 分别为 0.242、0.193、0.184、0.226、0.208 和 0.273，故优化模型的精确度较高。且模型既解决了 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0 的问题，又具有较高

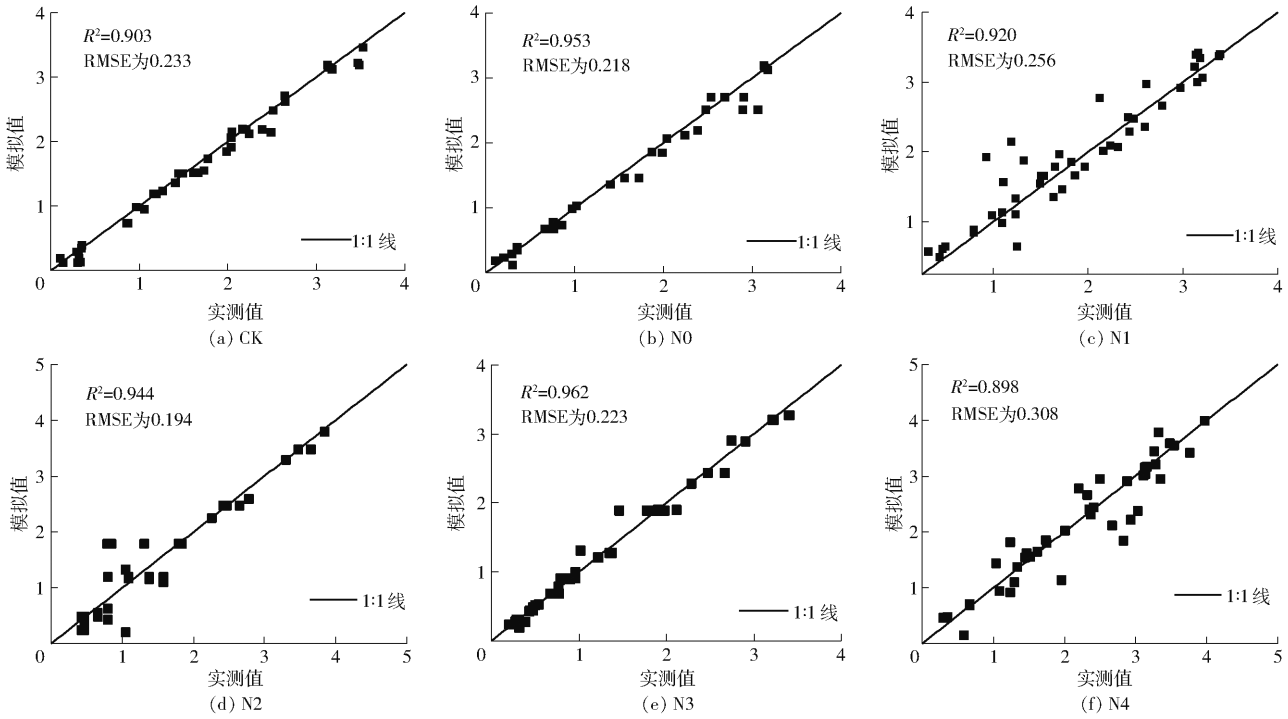


图 4　不同施氮处理膜下滴灌玉米 NRLD 分布优化模型模拟值与实测值

Fig. 4　Simulated and measured values of maize in NRLD optimization model for different N rates

的拟合度和精确度，更适合拟合不同施氮量下玉米 NRLD 分布，其结果具有物理意义和生物学意义。

**表 5　不同施氮处理优化模型参数与性能指标分析**

**Tab. 5　Parameters and performance indicators analysis of different N rates in optimization model**

| 处理 | 系数 | | | RMSE | nRMSE | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *A* | *B* | *C* | | | |
| CK | 4.514 | −9.354 | 11.938 | 0.233 | 0.242 | 0.903 ** |
| N0 | 4.367 | −8.271 | 11.901 | 0.218 | 0.193 | 0.953 ** |
| N1 | 2.915 | −10.079 | 11.311 | 0.256 | 0.184 | 0.920 ** |
| N2 | 4.902 | −11.206 | 10.670 | 0.194 | 0.226 | 0.944 ** |
| N3 | 3.647 | −9.556 | 10.945 | 0.223 | 0.208 | 0.962 ** |
| N4 | 3.286 | −11.939 | 9.041 | 0.308 | 0.273 | 0.898 ** |

## 3　讨论

RLD 反映作物根系数量的多少[20]。本研究表明，在土壤垂直剖面上，RLD 随土层深度的增加而减小，且在 0 ~ 20 cm 土层体现得更明显（图 2）。由此可见，覆膜滴灌条件下玉米根系主要分布于土壤表层，且 0 ~ 20 cm 土层是玉米根系的主要分布层[21]，根长密度所占比例均较高。有研究表明，滴灌玉米 RLD 主要集中在 0 ~ 20 cm 土层，占根系总量的 80% 左右，且随施氮量的增加 RLD 呈上升趋势[22]，施氮量过高则使玉米根系徒长[14,22]。这与本试验结果相似，主要是因为滴灌水肥一体化显著影响玉米 RLD 在土壤中的垂向分布，使表层土壤根系分配比例过大[13,14,22]。但这对玉米生长非常不利，因为在宁夏引黄灌区玉米拔节期至抽雄期多出现大风和高温现象，导致玉米倒伏与倒折。然而有诸多研究与本研究结果恰好相反，认为玉米根系分布主要集中在 0 ~ 40 cm，在 40 cm 以下随土壤深度的增加而减小[10,19]。0 ~ 40 cm 土层中玉米根量占总根量的 80% 以上，到成熟期仍然在 55% 左右[10]。也有研究认为，根系生长的最大扎根深度在 50 ~ 90 cm[8-11]。这主要由于不同的地域气候条件下玉米水肥管理模式不同，干旱条件下玉米整个生育期仅在播种过程中施一次肥，玉米从苗期到拔节前，玉米深根蹲苗，深层土壤 RLD 较高[22-24]。这种形成土壤根系分层明显的原因是滴灌条件下 0 ~ 20 cm 层土壤是施肥的主要场所，表层土壤自身具有一定供氮水平，根系生长对土壤施氮反应明显，且根系自身生长旺盛[25]；另外，氮肥可改善土壤肥力，增加根密度，促进根系生长[26]。

玉米根系结构的关键是根系分布[27]，合理的根系分布可优化土壤层水分和氮素吸收[27]。本研究表明，不同施氮处理下玉米 RLD 分布区域随着施氮量增加明显扩大（图 2），尤其 N3（270 kg/hm$^2$）和 N4（360 kg/hm$^2$）处理 RLD 分布区域扩大下移至 30 cm 土层，且在 40 cm 土层处也有少许分布。施氮量为 270 kg/hm$^2$（N3）玉米 RLD 最大。根系分布存在这种差异的原因是适量氮素可促进根系生长[28]。CK 和 N0 处理不施氮肥，玉米根系相对较小，根系分布密度较集中，而施用氮肥时，根系的分布区域表现出分散趋势，尤其 N3 处理玉米根系表现出覆膜滴灌

条件下的最佳分布。由此可见,在水肥一体化条件下,合理施氮可增加深层土壤根系比例,故 N3 处理可作为宁夏灌区覆膜滴灌玉米较合适的氮肥用量参考。

本研究运用归一化方法[14,16,19,22-23],构建了不同施氮量膜下滴灌玉米 NRLD 分布三阶多项式函数模型(图 3a),其中参数 $e$、$f$、$g$ 较准确地反映了玉米根系生长的拟合趋势(表 4),且决定系数 $R^2$ 不小于 0.978,$d$ 表示土壤表面的 NRLD 值,与 NING 等[22-23]建立的玉米根系模型参数相比,其 $d$ 值较为接近,平均值为 5.70,但明显高于 WU 等[14]拟合的参数($d$ 为 2.15),其原因主要是本文与 NING 等[22-23]研究采用膜下滴灌技术的玉米种植方式,在水肥一体化条件下玉米根系集中于表层土壤生长,且 0~20 cm 间玉米根系较为发达。而 WU 等[14]是在漫灌条件获取的玉米根系 NRLD 分布模型。另外,本研究建立的玉米 NRLD 多项式模型中,不能保证 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0;反过来在模拟 RLD 时,往往会存在误差,导致模型验证时模拟值与实测值之间偏差大。为了避免此类问题并简化模型系数,本文提出了优化多项式模型(式(4)),通过对优化后的模型进一步验证(图 4),其 $R^2$ 不小于 0.898;RMSE 不大于 0.308,nRMSE 不大于 0.273(表 5),本研究用不同处理的 RLD 数据观测玉米的 NRLD 分布,其中 NRLD 在 $Z_r=0$ 处的最大值通常在土壤表层附近,然后随着土壤剖面深度的增加而逐渐减小,并且在最大扎根深度在 $Z_r=1$ 处达到 0,证明了使用拟合模型 NRLD 分布的可行性,进一步说明优化模型更适合模拟膜下滴灌玉米 NRLD。

本研究发现,在玉米或其他作物 RLD 研究中,只需测定出表层土壤的 RLD 平均值和扎根深度,则可以利用 NRLD 分布优化模型来较好地获得作物 RLD 模拟数据,且能够快速地观察到不同处理 RLD 分布与根深的关系,减少了试验成本和所需时间,提高了作物 RLD 分布预测的准确性和评价的高效性。但本研究也存在不足和局限性,本研究通过修正模型仅仅拟合了不同氮素处理下膜下滴灌玉米根系 RLD 动态分布规律,对于不同水分管理、水肥耦合等滴灌条件下土壤水盐的运移、作物吸收水分及养分规律等还需进一步探索。

## 4 结论

(1)不同施氮处理滴灌玉米 RLD 的分布区域均随土层深度的增加而减小,且大部分集中在 0~20 cm 土壤垂直剖面上;随着施氮量的增加,玉米 RLD 分布区域明显扩大;RLD 最大值由大到小依次为 N3、N4、N2、N1、N0、CK。

(2)构建了不同施氮处理玉米 NRLD 分布三阶多项式模型,模拟结果 $R^2$ 均不小于 0.978,RMSE 不大于 0.238,拟合效果较好,但无法保证玉米根系 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0。

(3)优化了玉米 NRLD 分布模型,并加以检验,检验结果显示,各处理 RMSE 不大于 0.308,CK、N0、N1、N2、N3 和 N4 处理 nRMSE 分别为 0.242、0.193、0.184、0.226、0.208 和 0.273,$R^2$ 分别为 0.903、0.953、0.920、0.944、0.962 和 0.898,具有较高的拟合度和精确度,解决了 NRLD 在 $Z_r=1$ 时达到 0 的问题。

## 参 考 文 献


[1] 杨洋, 张亚兰, 苗伟, 等. 基于卷积神经网络的玉米根茎精确识别与定位研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 46-53.
YANG Yang, ZHANG Yalan, MIAO Wei, et al. Accurate identification and location of corn rhizome based on Faster R-CNN [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 46-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20181006&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.006. (in Chinese)

[2] 徐宝山,贾生海,雒天峰,等. 膜下滴灌不同灌水定额对玉米根系生长的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 272-276.
XU Baoshan, JIA Shenghai, LUO Tianfeng, et al. The effect of maize root growth of different irrigation quota under mulch[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 272-276. (in Chinese)

[3] EHDAIE B, MERHAUNT D J, AHMADIAN S. Root system size influences water-nutrient uptake and nitrate leaching potential in wheat[J]. Agronomy and Crop Science, 2010, 196(6): 455-466.

[4] 王启现, 王璞, 杨相勇, 等. 不同施氮时期对玉米根系分布及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12):1469-1475.
WANG Qixian, WANG Pu, YANG Xiangyong, et al. Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12): 1469-1475. (in Chinese)

[5] 王艳, 米国华, 张福锁. 氮对不同基因型玉米根系形态变化的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 69-71.
WANG Yan, MI Guohua, ZHANG Fusuo. Effect of nitrate levels on dynamic changes of root morphology in different maize inbred lines[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 69-71. (in Chinese)

[6] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5):1099-1107.
LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al. Effects of nitrogen application dates on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in super-high yield conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(5): 1099-1107. (in Chinese)

[7] WHITE P J, GEORGE T S, GREGORY P J, et al. Matching roots to their environment[J]. Annals of Botany, 2013, 112(2):

207 – 208.
[8] 刘正，高佳，高飞，等. 综合农艺管理提高夏玉米产量和养分利用效率的潜力[J]. 植物营养与肥料学报，2019，25(11)：1847 – 1855.
LIU Zheng, GAO Jia, GAO Fei, et al. Potential of integrated agronomic practices to increase grain yield and utilization efficiency of fertilizers in summer maize production[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(11): 1847 – 1855. (in Chinese)
[9] 杨云马，孙彦铭，贾良良，等. 磷肥施用深度对夏玉米产量及根系分布的影响[J]. 中国农业科学，2018，51(8)：1518 – 1526.
YANG Yunma, SUN Yanming, JIA Liangliang, et al. Effects of phosphorus fertilization depth on yield and root distribution of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(8): 1518 – 1526. (in Chinese)
[10] 楚光红，章建新，高阳，等. 施氮量对滴灌超高产春玉米根系时空分布及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2018，36(3)：156 – 160.
CHU Guanghong, ZHANG Jianxin, GAO Yang, et al. Effects of nitrogen application rate on temporal and spatial distribution characteristics of super high yield spring maize root and yield under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 156 – 160. (in Chinese)
[11] 宁芳，张元红，温鹏飞，等. 不同降水状况下旱地玉米生长与产量对施氮量的响应[J]. 作物学报，2019，45(5)：777 – 791.
NING Fang, ZHANG Yuanhong, WEN Pengfei, et al. Responses of maize growth and yield to nitrogen application in dryland under different precipitation conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(5): 777 – 791. (in Chinese)
[12] 周顺利，张福锁，王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究Ⅰ. 冬小麦[J]. 生态学报，2001，21(11)：1782 – 1789.
ZHOU Shunli, ZHANG Fusuo, WANG Xingren. Studies on the spatiotemporal variations of soil $NO_3^-$-N and apparent budget of soil nitrogen Ⅰ. Winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1782 – 1789. (in Chinese)
[13] WU Q, WU J, ZHENG B Y, et al. Optimizing soil-coring strategies to quantify root-length-density distribution in field-grown maize: virtual coring trials using 3-D root architecture models[J]. Annals of Botany, 2018, 121(5): 809 – 819.
[14] WU J Q, ZHANG R D, GUI S X. Modeling soil water movement with water uptake by roots[J]. Plant and Soil, 1999, 215(1): 7 – 17.
[15] ZUO Q, ZHANG R, SHI J, et al. Characterization of the root length density distribution of wheat using a generalized function [M]. American Society of Agronomy Publisher, 2013: 93 – 117.
[16] 邹海洋，张富仓，吴立峰，等. 基于不同水肥组合的春玉米相对根长密度分布模型[J]. 农业工程学报，2018，34(4)：133 – 142.
ZOU Haiyang, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Normalized root length density distribution model for spring maize under different water and fertilizer combination[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 133 – 142. (in Chinese)
[17] AHMADI S H, SEPASKHAH A R, ANDERSEN M N, et al. Modeling root length density of field grown potatoes under different irrigation strategies and soil textures using artificial neural networks[J]. Field Crops Research, 2014, 162: 99 – 107.
[18] 顾东祥，汤亮，曹卫星，等. 基于作物图像分析方法的水稻根系形态特征指标的定量分析[J]. 作物学报，2010，36(5)：810 – 817.
GU Dongxiang, TANG Liang, CAO Weixing, et al. Quantitative analysis on root morphological characteristics based on image analysis method in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(5): 810 – 817. (in Chinese)
[19] 贾彪，钱瑾，马富裕. 氮素对膜下滴灌棉花叶面积指数的影响[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(2)：79 – 87.
JIA Biao, QIAN Jin, MA Fuyu. Simulating effects of nitrogen on leaf area index of cotton under mulched drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 79 – 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150213&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.013. (in Chinese)
[20] 漆栋良，吴雪，胡田田. 施氮方式对玉米根系生长、产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学，2014，47(14)：2804 – 2813.
QI Dongliang, WU Xue, HU Tiantian. Effects of nitrogen supply methods on root growth, yield and nitrogen use of maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14): 2804 – 2813. (in Chinese)
[21] 吕国红，谢艳兵，温日红，等. 东北玉米根系生物量模型的构建[J]. 中国生态农业学报，2019，27(4)：572 – 580.
LÜ Guohong, XIE Yanbing, WEN Rihong, et al. Modeling root biomass of maize in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(4): 572 – 580. (in Chinese)
[22] NING S R, CHEN C, ZHOU B B, et al. Evaluation of normalized root length density distribution models[J]. Field Crops Research, 2019, 242: 107604.
[23] NING S R, SHI J C, ZUO Q, et al. Generalization of the root length density distribution of cotton under film mulched drip irrigation[J]. Field Crops Research, 2015, 177: 125 – 136.
[24] NYAKUAYA I W, STROOSNIJDER L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: modelling with AquaCrop[J]. Agriculture Water Management, 2014, 146: 280 – 296.
[25] 胡田田，康绍忠，高明霞，等. 玉米根系分区交替供应水、氮的效应与高效利用机理[J]. 作物学报，2004，30(9)：866 – 871.
HU Tiantian, KANG Shaozhong, GAO Mingxia, et al. Effects and mechanisms of alternate water and nitrogen supply to partial root zone of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(9): 866 – 871. (in Chinese)
[26] AMATO M, RITCHIE J T. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure [J]. Crop Science, 2002, 42(3): 63 – 100.
[27] LYNCH J P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems[J]. Annals of Botany, 2013, 112(2): 347 – 357.
[28] 杨硕，王秀，翟长远，等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(10)：145 – 153.
YANG Shuo, WANG Xiu, ZHAI Changyuan, et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 145 – 153. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20181016&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.016. (in Chinese)