

不同灌溉方式下生菜根系生长模型研究*

刘志刚¹ 王纪章¹ 徐云峰¹ 李萍萍^{1,2}

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 为探明不同栽培方式对蔬菜根系生长的影响, 采用滴灌、微喷灌 2 种灌溉方式和醋糟与草炭复配而成的 4 种栽培基质对生菜根长、根深和根区半径进行了试验研究。结果显示: 不同灌溉方式下可用同一个预测模型; 相同灌溉方式下, 不同基质栽培生菜根系特征值差异不显著 ($P > 0.05$), 可用同一组模型参数来表示。以试验数据为基础, 采用有效积温作为定量发育进程的尺度, 构建了预测生菜根长和根深的动态生长模型; 以根深和有效积温为自变量, 建立了根区半径动态变化模型。运用重复试验数据对所建模型进行验证, 滴灌和微喷灌生菜的根长、根深和根区半径的预测值与实际值之间回归估计标准误差和相对误差最大分别为 290 cm、0.81 cm、0.63 cm 和 15%、12%、13%, 表明所建立的 3 个动态变化模型具有较高的预测精度, 可为节水型设施基质栽培生菜提供理论依据和决策支持。

关键词: 生菜根系 基质 灌溉 动态模型

中图分类号: S275; S604⁺.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0284-05

引言

根系是作物生长中获取水分、养分的重要器官, 但由于作物根系生长环境的不可视性以及测量技术的局限性, 对根系的模拟研究远落后于冠层部分的研究^[1-2]。尽管国内外关于根系模拟的研究越来越多^[3-8], 但对蔬菜根系生长模拟的研究相对较少, 尤其是近年来农业用水问题日益突出以及设施基质栽培蔬菜发展迅速^[9-10], 而与其相对应的蔬菜根系模型研究更是鲜有报道。因此, 建立一个能描述不同灌溉情况下, 基质栽培蔬菜根系动态生长变化的模拟模型, 进而定量地研究蔬菜根系的形态分布特征及变化规律, 对于提高蔬菜的节水灌溉有着重要的指导意义。

针对以上问题, 本文采用滴灌和微喷灌 2 种灌溉方式以及 4 种栽培基质进行试验, 借鉴国外的根系生长模型, 根据试验数据建立基于统计模型与机理相结合的生菜根系生长模型, 促进根系模拟技术的发展, 为基质栽培生菜的根与基质湿润体的匹配研究和基质栽培节水灌溉提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于江苏大学农业工程研究院自控玻璃温室

中进行。

供试生菜品种为意大利耐抽蔓生菜, 穴盘育苗, 生菜在 5 片叶龄时, 在基质栽培槽内定植, 槽长 17.5 m, 宽 0.66 m, 深 0.3 m, 栽培密度为 14 株/m²。试验设置 4 种栽培基质和 2 种灌溉方式共 8 个处理。4 种基质分别是: T1 醋糟, T2 醋糟 50% + 泥炭 50%, T3 醋糟 75% + 泥炭 25%, T4 醋糟 50% + 泥炭 25% + 蛭石 25%, 以上均为体积分数; 2 种灌溉方式分别为滴箭式滴灌和微喷灌, 随机排列。其中, 滴灌流量为 1 L/h, 微喷灌半径为 0.3 m。各试验处理的灌溉量及栽培管理措施均相同。

1.2 测定方法

(1) 根系测定

将长 30 cm、内径 20 cm 的 PVC 管沿中心线纵向剖开, 合在一起用胶带纸将缝隙封禁, 外部用铁丝固定, 以便于分层采集基质和根系样品。选取栽培槽中段的生菜进行试验。每隔 6 d 取样一次, 每次平行取样 3 株, 2 次重复。采样时以生菜为中心, 将 PVC 管插入基质后整体移出, 拆除 PVC 管封禁, 测量根区最大深度, 纵向每 3 cm 测量根区半径并截取带根的基质, 将取回的基质样本用筛冲洗, 捡出生菜根系, 去掉死根和其他杂质, 再用吸水纸吸干根表面水分, 测定鲜质量。样本生菜根系使用扫描仪

收稿日期: 2013-05-05 修回日期: 2013-06-21

* 国家自然科学基金资助项目(31071327)和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXLX12-0659)

作者简介: 刘志刚, 博士生, 主要从事农业生物环境信息检测与节水灌溉研究, E-mail: liuz.g@163.com

通讯作者: 李萍萍, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业与农业生态工程研究, E-mail: lipingping@ujs.edu.cn

(Epson Expression/STD1600 型)扫描成灰阶模式 TIF 图像文件,将获取的 TIF 图像文件用 WinRhizo 图像处理系统分析生菜根长^[11]。扫描后将样本根系放入烘箱于 85℃ 干燥 48 h,称量并记录。

(2) 植株干物质质量测定

试验期间每 6 d 从各槽中选取长势相当的生菜 3 株,称量地上部分鲜质量,然后在烘箱中于 105℃ 杀青 20 min,75℃ 干燥至恒质量,称量干质量(精确到 0.01 g),2 次重复。

(3) 温室环境参数测定

试验过程中用温湿度传感器自动监测温室内环境参数,采集温室内生菜冠层上方的空气温度和湿度,采集频率为每 1 h 一次。

1.3 根长增长模拟模型

Kage 等在研究菜花根长增长速率时提出了一个简洁的数学模型^[12]

$$\frac{dR_L}{dt} = \frac{dw}{dt} f S_{RL} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \frac{dw}{dt} = \frac{dw_s}{dt} + \frac{dw_z}{dt} + \frac{dw_x}{dt} = Q(L_o - L_d P_{AR}) \quad (2)$$

式中 $\frac{dR_L}{dt}$ ——根长增长速率,cm/d

f ——干物质分配指数

S_{RL} ——比根长,cm/g

$\frac{dw}{dt}$ ——菜花干物质增长速率,g/d

$\frac{dw_s}{dt}$ ——菜花地上部分干物质增长速率,g/d

$\frac{dw_z}{dt}$ ——菜花主根部分干物质增长速率,g/d

$\frac{dw_x}{dt}$ ——菜花细根部分干物质增长速率,g/d

Q ——日总光合辐射,MJ/(m²·d)

P_{AR} ——日光合有效辐射,MJ/(m²·d)

L_o 、 L_d ——参数

2 结果与分析

根系的主要功能是吸收水分和养分,而根系对水分和养分吸收能力的强弱主要取决于根长、根深的发育状况和根区的分布情况^[8-9],因此选择这 3 个指标来对其进行模拟。

2.1 生菜根长生长模型

根长是根系生长发育的重要特征,可作为根系生长和吸收方面的衡量指标,单株根长是衡量根系生长能力的重要标志。鉴于蔬菜根长增长动态的相似性,以模型(1)为基础,采用试验数据对模型(2)、干物质分配指数 f 和比根长 S_{RL} 进行改进,建立基于

积温的干物质含量 w 、分配指数 f 和比根长 S_{RL} 的模型。

定植初期,生菜地上、地下部分干物质增长缓慢,生菜生长中后期,干物质增长速度较快,干物质含量和积温呈指数关系,因此用指数模型表达

$$\frac{dw_s}{dt} = a_{w_s} (T_a - T_b) w_s \quad (3)$$

$$\frac{dw_z}{dt} = a_{w_z} (T_a - T_b) w_z \quad (4)$$

$$\frac{dw_x}{dt} = a_{w_x} (T_a - T_b) w_x \quad (5)$$

式中 a_{w_s} 、 a_{w_z} 、 a_{w_x} ——常数

T_a ——日平均温度,℃

T_b ——发育下限温度,℃

w_s ——生菜叶干质量,g

w_z ——主根干质量,g

w_x ——细根干质量,g

分配指数 f 为细根干质量占整株干质量的比例,根据采样期试验数据对分配系数与积温之间进行曲线拟合,可表达为

$$f = a_f D_D^{b_f} + c_f \quad (6)$$

式中 a_f 、 b_f 、 c_f ——常数

D_D ——有效积温,℃

比根长 S_{RL} 为根长与根干质量的比值,根据根长计算公式 $R_L = \frac{w}{\pi r^2 d_1}$ 及细根干、鲜质量的线性关系 $w = 19.36w_x - 0.019R_L^2 = 0.98$,可将比根长 S_{RL} 表示为

$$S_{RL} = \frac{19.36 - \frac{0.019}{w_x}}{\pi r^2 d_1} = \frac{19.36 - \frac{0.019}{w_{x_0} e^{a_{w_x} D_D}}}{\pi r^2 d_1} \quad (7)$$

式中 R_L ——根长,cm

w ——细根鲜质量,g

d_1 ——细根系比重,取 1

r ——细根半径,取 0.012 4 cm

w_{x_0} ——定植时细根干质量,g

对式(1)~(5)进行积分,与式(6)、(7)一同代入式(1)得

$$R_L = (a_f D_D^{b_f} + c_f) \frac{19.36 - \frac{0.019}{w_{x_0} e^{a_{w_x} D_D}}}{\pi r^2 d_1} \cdot (w_{s_0} e^{a_{w_s} D_D} + w_{z_0} e^{a_{w_z} D_D} + w_{x_0} e^{a_{w_x} D_D}) \quad (8)$$

式中 w_{s_0} 、 w_{z_0} ——定植时生菜叶片和主根和细根的干质量,g

其中积温 D_D 可表示为^[13]

$$D_D = \sum T = \begin{cases} 0 & (T_b \geq T_a) \\ T_a - T_b & (T_b \leq T_a < T_m) \\ T_m - T_b & (T_a \geq T_m) \end{cases} \quad (9)$$

式中 T ——发育上限温度, $^{\circ}\text{C}$

2.2 生菜根深生长动态模型

根深关系着作物从栽培基质剖面中获取水分、养分的深度和有效空间。生菜根深与积温具有良好的线性关系^[13], 因此, 基于建立积温的生菜根深模型可表达为

$$\frac{dz}{dt} = b_z(T_a - T_b) \quad (10)$$

对式(7)进行积分得

$$z = z_0 + b_z D_D \quad (11)$$

式中 z_0 ——移栽时根深, cm b_z ——模型参数

2.3 生菜根区半径动态模型

根体积是根系生长发育的重要特征之一, 它与水分、养分的吸收有直接的关系^[14]。本研究认为作物根是对称的, 故对不同深度处根区半径的边际曲线进行积分, 能够反应基质中的根体积。为便于滴灌和微喷灌的设计管理, 实现滴灌和微喷灌基质湿润体与作物根系的有效匹配, 有必要建立简单实用的生菜根区半径边际曲线动态模型来反应基质中的根系体积的变化, 根据生菜根区半径生长与积温和根深之间的关系构建根区半径与根深的三次函数关系为

$$R_x = aR^3 + bR^2 + cR + d \quad (12)$$

式中 R ——根深实测值, cm

R_x ——不同根深处生菜根区半径, cm

a, b, c, d ——系数

a, b, c, d 可表达为

$$y = y_1 D_D^3 + y_2 D_D^2 + y_3 D_D + y_4 \quad (13)$$

式中 y ——待定参数 a, b, c, d

y_1, y_2, y_3, y_4 ——系数

估计值与实测值的拟合优劣判定式为

$$\bar{R} = a + bR \quad (14)$$

式中 \bar{R} ——根深估计值

3 参数确定

3.1 方差分析

试验每次采样的根长、根深和根区半径存在一定差异, 这主要是由灌溉方式和栽培基质不同而引

起的。灌溉方式是通过影响模型参数来影响模型的, 并不影响生菜正常生长规律和模型结构, 因此, 滴灌和微喷灌情况下可以用同一个预测模型。对不同采样期的生菜根长、根深和不同根深处的根区半径进行方差分析, 发现同一灌溉方式下, 最小的 P 值均大于 0.05 (表 1), 没有显著差异性, 可以忽略不同栽培基质对模型的影响, 该情况下根系生长可用同一组模型参数来表示。

表 1 方差分析 P 值

Tab. 1 P for ANOVA

灌溉类型	根长/cm	根深/cm	根区半径/cm
滴灌	0.182	0.077	0.060
微喷灌	0.084	0.072	0.083

3.2 模型参数确定

将 4 种基质、2 种灌溉方式下获得的试验数据 (生菜不同生长时期根长、根深、不同根深处的根区半径和有效积温) 按式 (8)、(11)、(12) 和 (13) 拟合得到模型参数。由于用此方法得到的参数与初始值有关, 为获得较好的一组参数, 首先将各组参数代入各公式, 计算出估计值, 然后将估计值和实测值代入式 (14), 做线性回归, 选取误差较小的那一组参数, 采用上述方法求出各模型参数值如表 2、3 所示。

4 模型验证

采用回归估计标准误差 R_{MSE} 和相对误差 R_E 对模拟值与观察值之间的符合度进行统计分析。 R_{MSE} 和 R_E 越小, 表明模拟值与实际值的一致性越好, 模型的模拟结果越精确可靠^[15]。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_{BS_i} - S_{M_i})^2}{n}} \quad (15)$$

$$R_E = \frac{O_{BS_i} - S_{M_i}}{O_{BS_i}} \times 100\% \quad (16)$$

式中 O_{BS_i} ——实际观测值

S_{M_i} ——模型预测值

n ——样本容量

为提高模型预测准确度, 分别采用重复试验资料对各模型进行检验, 结果表明, 滴灌和微喷灌下, 4 种基质栽培生菜的根长、根深和根区半径的预测值与实际值之间基于 1:1 直线的关系图如图 1 所示,

表 2 生菜根长和根深模型参数

Tab. 2 Parameters of root length and root depth

灌溉类型	a_f	b_f	c_f	a_{w_s}	a_{w_z}	a_{w_x}	w_{s0}/g	w_{z0}/g	w_{x0}/g	z_0/cm	b_z	$T_b/^{\circ}\text{C}$	$T_m/^{\circ}\text{C}$
滴灌	4.523	-0.866	0.0055	0.008	0.0089	0.006	0.025	0.0004	0.002	3	0.014	5	40
微喷灌	18.42	-1.067	0.0049	0.008	0.0086	0.005	0.019	0.0005	0.004	3	0.016	5	40

表3 生菜根区半径模型参数

Tab.3 Parameters of root horizontal direction growth model for lettuce

灌溉类型	参数	y_1	y_2	y_3	y_4
滴灌	a	5.036×10^{-10}	-5.605×10^{-7}	4.244×10^{-5}	7.599×10^{-2}
	b	-1.126×10^{-8}	1.483×10^{-5}	-4.484×10^{-3}	-0.5027
	c	4.686×10^{-8}	-7.259×10^{-5}	2.975×10^{-2}	-0.359
	d	-2.673×10^{-8}	3.577×10^{-5}	-9.952×10^{-3}	-0.4591
微喷灌	a	1.126×10^{-9}	-1.497×10^{-6}	5.262×10^{-4}	-7.699×10^{-3}
	b	-1.105×10^{-8}	1.509×10^{-5}	-5.390×10^{-3}	-0.2111
	c	1.065×10^{-8}	-1.798×10^{-5}	7.394×10^{-3}	2.457
	d	-4.918×10^{-8}	5.842×10^{-5}	-1.582×10^{-2}	0.4375

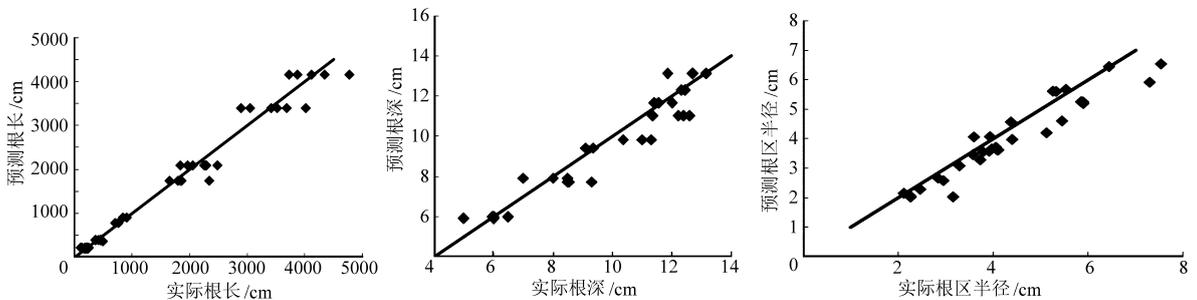


图1 滴灌和微喷灌生菜根长、根深和根区半径的预测值与实际值

Fig.1 Comparison between simulated and measured root length, root depth and root penetration in horizontal direction for lettuce

回归估计标准误差和相对误差最大分别为 290、0.81、0.63 cm 和 15%、12%、13%，可见生菜根系观测值和模拟值相关性较好，变化趋势一致，说明所建立的模型预测效果较好。

5 结论

(1) 以积温作为定量发育进程的尺度，构建了预测生菜根长和根深增长的模拟模型，以积温和根深为自变量，建立了根区半径动态变化模型，积温可由每天温度获得，这考虑到了作物生长环境的差异。模型中虽无时间因素，但积温本身是随时间而变化的，不同时间对应不同的积温，通过模型可以预测生菜生

长阶段根系根长、根深和不同根深处的根区半径。

(2) 滴灌和微喷灌情况下可以用同一个预测模型。同一灌溉方式下，对不同采样期的生菜根长、根深和不同根深处的根区半径进行方差分析，最小的 P 值均大于 0.05，没有显著差异性，可以忽略不同栽培基质对模型的影响，用同一组模型参数来表示。根据试验数据，建立了根长、根深和根区半径的动态模拟模型。重复试验表明，所建模型对滴灌和微喷灌生菜的根长、根深和根区半径的预测值与实际值之间回归估计标准误差和相对误差最大分别为 290、0.81、0.63 cm 和 15%、12%、13%，模型能较好地预测生菜营养生长阶段根系的生长情况。

参 考 文 献

- 1 马新明, 杨娟, 熊淑萍, 等. 烟草根系形态发育模拟模型[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2421-2427.
Ma Xinming, Yang Juan, Xiong Shuping, et al. A model for simulating root morphological development of tobacco[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(12): 2421-2427. (in Chinese)
- 2 李娟, 章明清, 林琼, 等. 水稻根系动态模拟和生长特性研究[J]. 福建农业学报, 2009, 24(3): 217-219.
Li Juan, Zhang Mingqing, Lin Qiong, et al. Dynamic models simulating root length and growth characteristics of rice[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2009, 24(3): 217-219. (in Chinese)
- 3 Coelho M B, Villalobos F J, Maeos L. Modeling root growth and the soil-plant-atmosphere continuum of cotton crops[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 99-118.
- 4 Manschadi A M, Sauerborn J, Stutzel H, et al. Simulation of faba bean (*Vicia faba* L.) root system development under Mediterranean conditions[J]. European Journal of Agronomy, 1998, 9(4): 259-272.
- 5 Qiang Zuo, Feng Jie, Zhang Renduo, et al. A generalized function of wheat's root length density distributions[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(1): 271-277.
- 6 Asseng S, Richter C, Wessolek G. Modelling root growth of wheat as the linkage between crop and soil[J]. Plant and Soil, 1997,

190(2):267-277.

- 7 王继利,贾庆祥,杨新义. 基于坐标变化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)
- 8 周青云,王仰仁,孙书洪. 根系分区交替滴灌条件下葡萄根系分布特征及生长动态[J]. 农业机械学报,2011,42(9):59-63.
Zhou Qingyun, Wang Yangren, Sun Shuhong. Distribution characteristic and growing dynamic of grape vine roots under alternate partial root zone drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):59-63. (in Chinese)
- 9 Michael Raviv, Heinrich Lieth J. Soilless culture: theory and practice[M]. London: Elsevier,2008: 6-7.
- 10 Ola al naddaf, Ioannis livieratos, Aristides stamatakis, et al. Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their impact on cucumber grown on bags[J]. Scientia Horticulturae,2011,129(1):135-141.
- 11 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)
- 12 Kage H, Kochler M, Stutzel H. Root growth of cauliflower under unstressed condition; measurement and modeling[J]. Plant and Soil,2000,223(1-2):131-145.
- 13 Anders Pedersen, Kefeng Zhang, Kristian Thorup-Kristensen, et al. Modelling diverse root density dynamics and deep nitrogen uptake—a simple approach[J]. Plant and Soil, 2010,326(1-2):493-510.
- 14 陆扣萍,谢寅峰,闵炬,等. 不同施氮量对大棚茼蒿根系形态及产量和品质的影响[J]. 土壤,2011,43(4):542-547.
Lu Kouping, Xie Yin Feng, Min Ju, et al. Effects of different N rates on root morphology, yield and fruit quality of lettuce cultivated in plastic greenhouse[J]. Soils,2011,43(4):542-547. (in Chinese)
- 15 胡立勇,刘铁梅,郑小林,等. 油菜发育过程及生育期机理模型的研究[J]. 中国油料作物学报,2004,2(2):51-55.
Hu Liyong, Liu Tiemei, Zheng Xiaolin, et al. A mechanistic model of phasic and phenological development in rape II. Validation and evaluation of the model[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2004,2(2):51-55. (in Chinese)

Root Growth Model of Lettuce under Different Cultivation Substrates and Irrigation Modes

Liu Zhigang¹ Wang Jizhang¹ Xu Yunfeng¹ Li Pingping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To find out the effect of cultivation methods on vegetable root, the lettuce root length, root depth and root width radius were studied in four cultivation substrates under drip and micro-sprinkler irrigation. The result indicated that root characters of lettuce cultivated in different substrates were no significantly different at 0.05 among different irrigation methods. Based on the experimental data of lettuce root, the simulation models for lettuce root length and root depth were established using the scale of effective cumulative temperatures (D_d). The root depth in different layers and D_d were used as the dependent variables to establish the root width radius model. The repeat test data were employed to verify the establishing models. The root mean square error and relative error between simulated and observed values were only 290 cm, 0.81 cm, 0.63 cm and 15%, 12%, 13% for lettuce root length, root depth and root width radius under drip irrigation and micro-sprinkler irrigation.

Key words: Lettuce root Substrates Irrigation Dynamic model