

# 基于 $Cd^{2+}$ 胁迫的小桐子根系生长模型构建与可视化仿真

段晓凡, 刘颖, 文锦芬\* (昆明理工大学现代农业工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要** 为探讨  $Cd^{2+}$  (镉) 胁迫对小桐子根系生长的影响, 通过盆栽试验研究  $Cd^{2+}$  胁迫下小桐子根系生长情况, 结合根系几何拓扑结构及根系几何模型 SimRoot, 构建  $Cd^{2+}$  胁迫下的小桐子根系生长模型, 利用根系生长模拟系统对该模型进行可视化仿真, 用实测结果对仿真结果进行验证, 结果显示该模型可较好地反映小桐子根系在  $Cd^{2+}$  胁迫下的生长情况。

**关键词** 虚拟植物;  $Cd^{2+}$  胁迫; 小桐子根系; 生长模型; 可视化仿真

**中图分类号** S126 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)24-271-03

## Modeling and Visual Simulation of *Jatropha curcas* Root Growth under the $Cd^{2+}$ Stress

DUAN Xiao-fan, LIU Ying, WEN Jin-fen\* (Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500)

**Abstract** In order to investigate the effects of  $Cd^{2+}$  on the growth of *Jatropha curcas* roots, the *Jatropha curcas* roots growth under  $Cd^{2+}$  stress was studied by pot experiment, the roots growth model under  $Cd^{2+}$  stress was constructed by the roots topological structure and the geometric model (SimRoot), the model was simulated by the roots growth simulation system, the simulation results were verified by the experimental results. The results showed that the model can reflect the growth of *Jatropha curcas* roots under  $Cd^{2+}$  stress.

**Key words** Virtual plants;  $Cd^{2+}$  press; *Jatropha curcas* roots; Growth model; Visual simulation

虚拟植物技术是采用计算机仿真技术来模拟植物在三维空间中生长的状况<sup>[1]</sup>, 虚拟植物的研究涉及到植物的根、枝、叶等生长过程<sup>[2]</sup>。根作为植物从土壤环境中吸收水分、养分、矿物质等的重要器官, 研究其生长状况有着非常重要的意义; 但植物根系一般生长于地下, 具有不可见性及复杂性, 不能直接观测到其生长状况, 借助于计算机图形学技术对植物根系生长进行生长<sup>[3-5]</sup>, 可以更好地研究植物根系生长过程。

小桐子也叫麻风树(*Jatropha curcas* L.), 是一种非常有经济价值的生物柴油原料树种。其根系生长旺盛, 有利于缓解土壤退化、沙化以及森林的退化<sup>[6-7]</sup>, 研究其根系生长过程有着非常重要的意义。镉(Cd)是一种重金属, 其浓度对许多植物的生长都有影响<sup>[8-10]</sup>, 同样, 其对小桐子的生长也有一定的影响。笔者为探讨  $Cd^{2+}$  胁迫对小桐子根系生长影响情况, 通过盆栽试验对小桐子根系各参数进行测量和分析, 根据小桐子根系的几何拓扑结构, 应用根系几何模型 SimRoot, 构建  $Cd^{2+}$  胁迫时小桐子根系生长模型, 并应用小桐子根系可视化生长模拟系统进行虚拟仿真实验。

## 1 试验材料及试验方案

**1.1 试验材料** 试验采用盆栽方式, 试验于2013年4月~7月在昆明理工大学现代农业工程学院智能控制温室中进行, 以小桐子幼苗为试验材料。选取大小基本一致的小桐子种子若干, 进行消毒处理后, 置于人工培养箱培养至发芽, 再用水培法培养, 至幼苗期改为盆栽试验, 移栽至温室。培养一个月后, 挑选生长状况基本一致的小桐子进行不同的  $Cd^{2+}$  胁迫处理。盆栽试验使用直径为15 cm, 高为13 cm的塑料花盆, 每盆均控制相同的土壤容重。移栽完成后所有盆内均

浇水至田间持水量。试验期间管理措施保持一致, 培养幼苗30 d, 待其生长稳定后开始盆栽试验。

**1.2 试验方案设计** 试验处理设置4个镉胁迫梯度,  $Cd^{2+}$  溶液用  $CdCl_2$  配制: ①0 mmol/L  $Cd^{2+}$  (即对照实验); ②0.1 mmol/L; ③0.2 mmol/L; ④0.5 mmol/L。

为了保证试验的准确度, 各梯度设10个重复处理。

**1.3 获取测定参数** 从培育的小桐子幼苗中选取200盆长势基本一致的小桐子进行不同浓度的镉胁迫处理。试验处理第一天, 用浓度为0 mmol/L (即蒸馏水)、0.1 mmol/L、0.2 mmol/L 及 0.5 mmol/L 的  $Cd^{2+}$  ( $CdCl_2$  溶液) 浇灌至饱和, 每5 d 对小桐子幼苗进行取样处理, 测量其根长、分根数、根夹角等相关参数进行。

## 2 小桐子根系构型及模型构建

**2.1 小桐子根系构型** 小桐子根系如图1所示。从图中可以看出, 小桐子的根系由主根、侧根组成; 主根较粗壮, 向地下生长, 起固定作用, 除主根外, 小桐子的根系还有向侧面方向生长的一级侧根, 一级侧根上另生长有二级侧根和三级侧根等。二级侧根、三级侧根相对于主根与一级侧根, 较细小, 对植物生长意义不大, 故该研究仅以主根与一级侧根为研究对象。



图1 小桐子根系示意

根据以上分析, 可以确定小桐子的拓扑结构为倒向的树形拓扑<sup>[5]</sup>, 因此在描述小桐子根系的拓扑结构时, 使用倒向放置的树形拓扑结构进行分析。小桐子根系拓扑结构见图

**基金项目** 国家自然科学基金(31460355); 云南省教育厅基金(2014Y061)。

**作者简介** 段晓凡(1976-), 女, 山西临汾人, 讲师, 硕士, 从事农业机械化及其自动化研究。\* 通讯作者, 副教授, 硕士生导师, 从事油料作物研究。

**收稿日期** 2015-06-29

2. 小桐子的拓扑结构由根、主干和旁枝组成,主根由根起始节点开始沿轴向生长,每生长一段距离,会分生一条侧根,经过多次分生后,到根终止节点停止生长。侧根生长规律与主根基本相似,从主根起始节点开始生长,生长期间不断分生二级侧根<sup>[11]</sup>。

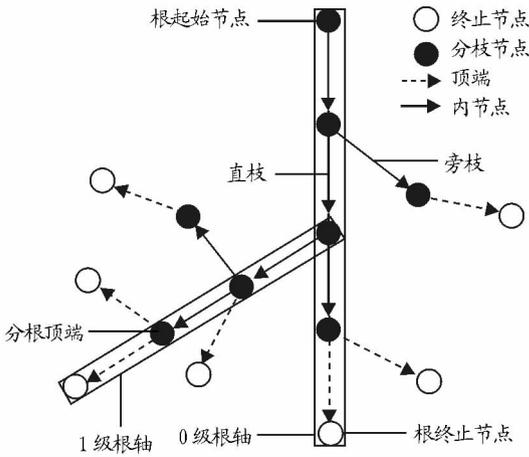


图2 小桐子根系拓扑结构

该研究依据小桐子根系的生长特点,定义了2种类型的根,分别为:0级(主根)、1级(一级侧根)。采用11个参数对拓扑结构和几何结构进行描述:根类型数量,根数、根系类型,首次分根长度,最大分根数目,分根长度间隔,首次分根时间,分根时间间隔,分根与主根的夹角,直径生长参数,是否规则拓扑。

**2.2 小桐子根系模型构建** 根据 SimRoot 模型<sup>[13]</sup>,在构建小桐子根系生长模型时,可以从根的生长 (RootGrowth) 与分根 (Rooting or Branching) 两方面来描述。

**2.2.1 根的生长。**根的生长模型包括:轴向生长、径向生长及根尖生长方向3个参数。据 Lungley 等<sup>[14]</sup>提出的根的生长模型来建立相应数学模型。

轴向生长模型如下:

$$l_{segment} = \alpha \times \Delta T \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 为根轴的轴向生长速率; $\Delta T$ 为时间增量步长。

径向生长模型为:

$$r_{segment} = \alpha \times \sqrt{l} \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 为根径向生长速率; $l$ 为根所求半径位置的根段与根尖之间的距离长度。

根尖生长方向模型为:

$$D_N = D_{N-1} + D_C + D_N \quad (3)$$

式中, $D_{N-1}$ 为上段根尖余弦方向; $D_C$ 为 $\alpha$ ; $D_N$ 为随机方向系数。

**2.2.2 分根。**根据空间几何知识,分根活动可以从分根时机及位置、分根数量、分根的初始生长方向3个方面来确定。

分根时机及位置模型如下:

$$P_{newroot} = P_{thissegment} + [L_{thissegment} - (len - l)] \times D_{thissegment} \quad (4)$$

式中, $P_{newroot}$ 为新根空间坐标向量; $P_{thissegment}$ 为新根在父轴上的那段起始位置的空间坐标向量; $L_{thissegment}$ 为新根在父轴上那段距离基端的长度; $D_{thissegment}$ 为新根在父轴上那段的方向向量; $len$ 为生根位置距离陆父根基部的长度。

分根数量模型为:

$$\begin{cases} k = N, (randbranch = 0) \\ k = N \times rand(), (randbranch = 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $N$ 为最大分根数量。

新根生长方向模型为:

$$\vec{u}'' = R[\vec{u}, \alpha] \times \vec{u}' = R[\vec{u}, \alpha] \times R[\vec{u}, \beta] \times \vec{u} \quad (6)$$

式中, $\alpha$ 为新根生长径向角度; $\beta$ 为新根生长轴向角度。

### 3 Cd<sup>2+</sup>胁迫的小桐子根系可视化仿真

将试验获取的具体数据带入以上模型得到小桐子在各浓度 Cd<sup>2+</sup>胁迫下的生长模型。将模型输入根系模拟系统<sup>[12]</sup>,设定生长时间后,得到 Cd<sup>2+</sup>胁迫下的可视化生长仿真图像。

图3为生长30 d时各浓度 Cd<sup>2+</sup>胁迫下的小桐子根系生长可视化仿真图。

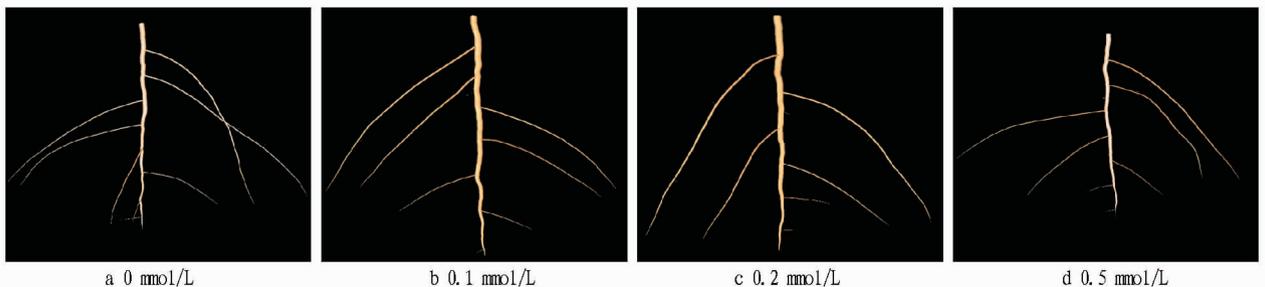


图3 不同浓度 Cd<sup>2+</sup>胁迫下的小桐子根系模拟及仿真(30 d时)

由图3可知,随着 Cd<sup>2+</sup>浓度增加,根系生长速度及分根数量均减小;当 Cd<sup>2+</sup>浓度达到 0.5 mmol/L 时,减小幅度明显。

### 4 模型验证

为了验证模型精度,将可视化仿真结果与培育30 d后各浓度 Cd<sup>2+</sup>胁迫下小桐子根系主根长度进行对比,对模型进行验证。

表1为生长30 d时主根长度仿真结果与实测结果的对比。

由表1可知,模型模拟主根长与实测值相比误差较小,说明该模型可以较好地反映不同浓度 Cd<sup>2+</sup>胁迫下小桐子根系的生长过程。

### 5 结论

该研究通过在不同浓度 Cd<sup>2+</sup>胁迫下对小桐子幼苗进行

表 1 小桐子实测主根长与模拟主根长(30 d 时)

Cd <sup>2+</sup> 浓度//mmol/L	实测值//mm	模拟值//mm	误差//%
0	82	84	2.43
0.1	82	82	0
0.2	81	80	1.23
0.5	75	74	1.33

盆栽试验,测量不同浓度 Cd<sup>2+</sup> 胁迫下的小桐子根系生长参数,结果显示,随着 Cd<sup>2+</sup> 浓度增加,根系生长速度及分根数量均减小;当 Cd<sup>2+</sup> 浓度达到 0.5 mmol/L 时,减小幅度明显;应用根系几何模型 SimRoot,构建了不同浓度 Cd<sup>2+</sup> 胁迫下的小桐子根系生长模型,将该模型输入前期开发的根系可视化模拟系统,设定运行时间为 30 d,对小桐子根系生长进行可视化仿真;将仿真结果与与实测结果进行对比,结果显示,该模型可以较好地反映出 Cd<sup>2+</sup> 胁迫下小桐子根系的生长过程。

#### 参考文献

- [1] ROOM P M, HANAN J S, PRUSINKIEWICZ P. Virtual plants: New perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists[J]. Trends in Plant Science, 1996, 1(1): 33-38.
- [2] 郭焱, 李保国. 虚拟植物的研究进展[J]. 科学通报, 2001(4): 273-280.
- [3] 刘静, 戈振扬, 林文如, 等. 荠菜根系的计算机模拟[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 266-267, 270.

(上接第 254 页)

业、社会保障等方面进行长远考虑,将农牧民纳入城镇社会保障体系。

**3.4 建立多元化的资金保障体系** 目前,宅基地退出所需要的资金均是由政府承担。从自治区城乡建设用地增减挂钩、废弃居民点和工矿废弃地调整利用及生态移民政策在实施过程中所产生的问题来看,单一的资金来源渠道不仅对政府财政造成了很大的负担,同时也是部分地区(如杭锦旗增减挂钩及锡林郭勒盟生态移民等)最终未能按照既定目标实现宅基地退出的主要原因。因此,由政府部门作为宅基地退出的行政主体,负责宅基地退出前期准备、规划及实施的统一安排,用地企业作为实施主体,承担部分或全部宅基地退出过程中所产生的复垦费、补偿费等,剩余用地指标可通过进入土地交易市场进行市场配置、流转的方式获取一定的资金。建立政府主导、企业推动、市场配置的多元化资金来源,不仅解决了宅基地退出资金筹措困难的问题,实现了农村牧区宅基地的节约集约用地,还为急需落地建设的企业腾出了用地指标,增加了当地农牧民的就业机会和经济收入,并通过市场配置,最大限度地体现了农牧民宅基地的财产权益。

#### 4 结论

针对城乡建设用地双增长的不合理现象以及城镇建设用地供需矛盾问题,内蒙古自治区根据本区社会经济发展情况,先后出台了生态移民、城乡建设用地增减挂钩、旗县(市、区)废弃居民点和工矿废弃地复垦调整利用等政策措施,积极探索农村牧区宅基地的退出机制,取得了一定的成效,同时也发现了一些问题。以上政策的实施对农村牧区宅基地退出产生了一定的积极影响,但由于在实际操作过程中没有更详细的法律法规进行规范、资金来源单一、未落实农牧民

- [4] 冯斌,杨培岭. 植物根系的分型及计算机模拟[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 96-99.
- [5] 钟南,罗锡文,严小龙. 植物根系生长的三维可视化模拟[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(5): 516-518.
- [6] 刘永红. 小桐子的利用价值与栽培技术[J]. 经济林研究, 2006, 24(4): 74-76.
- [7] 夏九成,刁毅,韩洪波,等. 麻疯树资源的综合开发利用[J]. 攀枝花科技与信息, 2007, 32(3): 29-34.
- [8] 张颖,高慧慧. 镉胁迫对红三叶种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 西北农业学报, 2007, 16(3): 57-59.
- [9] 于肇端,王丽娜,曹振兴,等. 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响[J]. 云南植物研究, 2009, 31(6): 486-492.
- [10] 汪承润,卢慧,李月云,等. 镉胁迫下稀土镧对蚕豆幼苗根尖细胞分裂和吲哚乙酸氧化酶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 679-684.
- [11] LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interactions in development[J]. Theoret Biol, 1968, 18: 208-315.
- [12] 刘河南. 基于水、盐胁迫的小桐子根系构型建模与可视化仿真[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [13] LYNCH J P, NIELSEN K L, DAVIS R D, et al. SimRoot: Modelling and visualization of root systems[J]. Plant and Soil, 1997, 188(1): 139-151.
- [14] LUNGLEY D R. The growth of root systems: A numerical computer simulation model[J]. Plant and Soil, 1973, 38: 145-159.
- [15] DROUET J L, PAGES L, GRAAL: A model of growth, architecture and carbon allocation during the vegetative phase of the whole maize plant model description and parameterization[J]. Ecological Modelling, 2003, 165(7): 147-173.

就业及社会保障等问题,造成部分牧民重新返回原放牧区进行居住、农牧民上访等社会不稳定因素,为下一步农村牧区宅基地退出机制的建立指明了重点和方向。

农村牧区宅基地退出机制的建立与实施,需要国家层面及自治区层面相关政策的支持。由于自治区在生产劳作方式及生活习惯等方面存在差异,所以,在制定自治区层面的政策时要充分考虑农牧分区对政策实施的影响,根据农区、牧区及农牧交错区的区域划分制定不同的农村牧区宅基地用地面积标准,重点解决牧区牧民退出宅基地后的就业及生活保障问题。

该研究从内蒙古自治区农村牧区宅基地现状入手,分析了自治区农村牧区宅基地的总量、人均宅基地面积,并通过对自治区进行农区、牧区及农牧交错区的分区,得出不同区域人均宅基地面积。在现状的基础上,通过对自治区农村牧区宅基地退出相关政策的分析,总结出自治区在农村牧区宅基地退出过程中所取得的成效及面临的问题,探索自治区基于不同农村牧区宅基地用地标准的、约束机制与补偿激励机制共存的、多元化资金保障的农村宅基地退出机制。

#### 参考文献

- [1] 倪维秋,俞滨洋. 基于城乡统筹的城乡统一建设用地市场构建[J]. 商业研究, 2010(10): 87-90.
- [2] 欧阳安蛟,蔡锋铭,陈立定. 农村宅基地退出机制建立探讨[J]. 中国土地科学, 2009(10): 26-30.
- [3] 于跃龙. 我国农村宅基地退出机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [4] 孙维. 农村宅基地退出补偿标准测算——以温江区为例[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [5] 韩立达,李曼宁. 我国农村宅基地制度演变及改革研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 16012-16014.
- [6] 陈相峰. 农村宅基地限制交易的正当性[J]. 中国土地科学, 2007(4): 44-48.