

单轴散生竹地下根茎并行模拟仿真研究*

张云伟¹ 喻勇¹ 王大龙² 周旋² 王彦钧²

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对竹林地下根茎模拟仿真计算强度高、数据量大,在算法实现中采用基于单路处理器、串行计算的构架难以满足性能要求的问题,提出一种基于网络机群的多节点并行模拟仿真实现机制,构建了单轴散生竹地下根茎并行模拟仿真平台,主要由建模节点、任务管理节点、图形节点和网络交换机组成。以 SimRoot 模型为基础建立单轴散生竹地下根茎生长模型,通过实验观察获取几何构型参数及生长参数。采用功能分解法对根茎生长建模计算进行任务分割,建立了相应的任务调度管理模式,设计了多节点并行生长建模机制。以金竹为例开展多节点并行仿真实验,实验结果表明基于网络机群的多节点并行模拟仿真在降低内存消耗、缩短仿真时间方面效果明显,对于较大规模的散生竹林地下根茎模拟仿真具有较好的适应性。

关键词: 单轴散生竹 地下根茎 并行仿真 生长建模 网络计算机群

中图分类号: TP39; S714.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0271-05

引言

研究表明,植被固土护坡是防止水土流失经济、有效、环保的措施之一。竹林是土壤侵蚀控制的重要植被类型^[1],由于竹林地下根茎纷繁复杂,观察和实验困难,因此通过计算机数值仿真定量分析计算竹林地下根茎固土力学作用具有重要的研究价值。

运用计算机模型开展植物根系生长模拟仿真研究已有较长历史^[2]。早在 20 世纪 70 年代人们就开发了模拟单条根二维生长的计算机模型^[3],此后涌现出许多不同的模型,如 RootMap 模型^[4]、Fitter 模型^[5]、L 系统模型^[6]、SimRoot 模型^[7]等。在国内,采用 L 系统模型结合分形方法的研究较多^[8-11]。

目前,这些根系模拟仿真模型,在计算机算法实现中大多基于单路处理器、串行计算的构架,可以较好地满足单株植物根系模拟仿真需要。但在竹林地下根茎固土力学作用数值仿真中,涉及到大量竹林边坡地下根茎模拟模型,将使数据量和计算量增加,存在计算量大、效率低、实时性差等问题,串行算法难以满足这一需求,而传统的利用多处理器构成的超级计算机过于昂贵。为此,本文基于价格低廉的网络计算机群系统,针对竹林地下多根茎模拟仿真需要,以 SimRoot 模型为基础,研究其并行仿真算法设计、仿真环境资源管理和作业任务分解调度机制

的实现,建立并行化的竹林地下根茎动态仿真平台,充分利用多台计算机的运算能力,提高仿真平台的处理能力和执行效率。

1 单轴散生竹地下根茎生长模型

SimRoot 模型是一种在根系数据结构构建、构型参数生长计算以及三维图形显示方面具有较好性能的根构型计算机模型。这一模型综合考虑了根的拓扑结构、根段的形态和半径、分枝间距和分枝角度等,能模拟根系直径变化。因此,对于单轴散生竹地下根茎生长建模,本文以 SimRoot 模型为基础。

通常,单轴散生竹地下根茎主要由竹鞭和竹鞭节上分出的鞭根构成。竹鞭上分节,鞭根茂密发达,一级鞭根从鞭节处沿径向侧生,并可继续分枝生成下级鞭根。本文以典型单轴散生竹——金竹地下根茎为对象,通过野外自然生长状况下的实验观察(土壤含水率 11%,土壤干密度 1.28 g/cm³,气温 22℃)和查阅资料文献得到的经验统计数据确定其鞭根系统的几何构型参数和生长参数,包括竹鞭节长,竹鞭的轴向生长方向、轴向生长速率和径向生长速率,竹鞭岔鞭角度和岔鞭间距,鞭根的分枝角度和分枝间距、轴向生长方向、生长速率和径向生长速率。通过观察统计得到这些构型参数的平均值及偏差范围,并利用曲线拟合的方法获取竹鞭、鞭根直径与长度的数学关系。然后运用 SimRoot 模型适当改

收稿日期: 2013-10-09 修回日期: 2013-12-16

* 国家自然科学基金资助项目(31060118)和昆明理工大学校人才培养资助项目(2010-07)

作者简介: 张云伟,教授,主要从事精密测控技术研究, E-mail: zhangyunwei72@qq.com

进以反映竹鞭鞭节形状就可以建立单轴散生竹地下根茎生长建模^[12]。

单轴散生竹鞭根系统的生长除了受植物本身特性的影响外,还受到环境因子的影响,如土壤含水率、土壤干密度、土壤 pH 值、氮磷钾等养分含量、气温和光照等。受客观条件的限制,还难以建立各种环境因子对鞭根生长影响的定量数学模型。但考虑到不同环境因子对鞭根系统生长的影响会在其几何构型参数及生长参数方面表现出差异性,因此尽管尚不完善,但通过实际实验观察得到几何构型参数及生长参数,并构建根系生长模拟模型,可以在一定程度上反映当前环境因子对根系生长的影响^[13-14]。如环境因子与当前环境因子不同时,则需针对新的环境因子获取对应的几何构型参数及生长参数。

2 并行模拟仿真平台

2.1 系统总体结构

除了建立鞭根系统生长模型,还需确定其并行模拟仿真的硬件平台。现有的并行计算平台中,机群系统具有拓展性好、易编程、开发周期短、成本低等特点^[15-17],适合作为本文并行仿真的硬件平台。

从计算量和资源消耗来看,模拟仿真最大时间消耗来自鞭根系统生长建模、三维可视化图形绘制渲染和任务调度管理。这 3 部分的任务性质以及对计算机性能要求各不相同,因此首先应将这 3 部分任务分开,分配给不同计算机完成。执行建模计算的节点称为建模节点,执行任务调度管理的节点称为任务管理节点,执行图形绘制渲染任务的节点称为图形节点,通常为配置专业图形加速卡的图形工作站。各节点以交换机相互连接,通过网络通信实现数据及消息的传递。

在硬件方面,并行模拟仿真系统主要由建模节点、任务管理节点、图形节点和网络交换机组成,为保持计算能力平衡,各建模节点计算机软硬件配置相同;在软件方面,该系统主要由用户交互、建模计算、任务调度管理、图形绘制渲染、网络通信 5 个功能模块组成。系统总体结构如图 1 所示。

2.2 运行流程

用户通过用户交互模块登录系统,提出所要完成的仿真任务,并输入全局仿真参数(仿真时间期限、时间步长、植株数量、各植株生长空间起始位置、长度单位),以及鞭根系统的几何构型参数和生长参数,该模块生成任务数据包,传送给任务管理节点。

任务调度管理模块运行于任务管理节点,对仿真任务进行初始化处理,分析并划分建模计算任务,

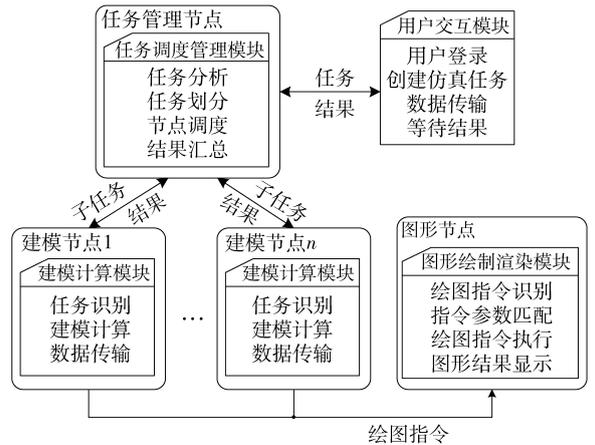


图 1 并行仿真系统总体结构

Fig. 1 Overview of parallel simulation system structure

通过监测评估各建模节点的负荷状态,将子任务合理地分配到各建模节点。建模计算模块运行于建模节点,负责完成分配的子任务,将建模计算结果发送至任务调度管理节点进行汇总分析,并将图形指令发送至图形节点进行三维绘制与渲染,得到可视化的仿真结果(图 1)。图形绘制渲染模块运行于图形节点,工作流程包括绘图指令接收、绘图指令识别、指令参数匹配、绘图指令执行和图形结果显示等,如图 2 所示。

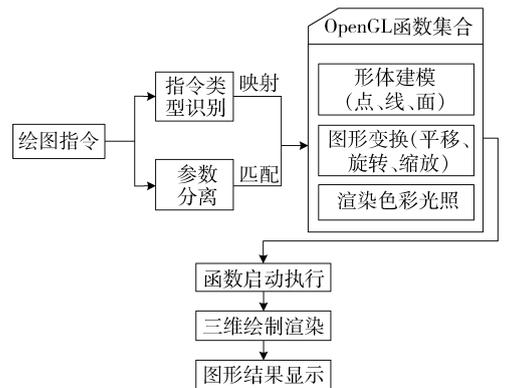


图 2 图形绘制渲染模块运行流程

Fig. 2 Executive process of graphic plotting and rendering module

3 并行生长建模机制

3.1 任务划分模式

对于 SimRoot 生长模型,单条的竹鞭或鞭根的生长是自封闭的,相互之间数据耦合、相交少。因此,为了便于简化算法,采用功能分解法对鞭根系统生长建模计算进行任务分割。任务粒度分为 2 级,以单鞭的生长(包括其下的各级鞭根)为主任务粒度,以鞭根的生长(包括其下的各级子鞭根)为辅助任务粒度。以主任务粒度为单位,把整体建模任务有效分割成若干建模子任务,并分配给不同的建模

节点完成。当机群系统规模较大、空闲建模节点较多时,可以将负荷较大的建模子任务以辅助任务粒度为单位进一步细分为更小的子任务,分配到空闲建模节点上,提高任务的并行效率。

3.2 任务调度管理

为了给任务调度管理提供决策依据,任务调度管理节点建有全局任务管理表,存有各建模节点当前的任务数量、内存资源消耗及 CUP 负荷状况等信息。各建模节点有局部任务管理表,维护本地任务资源。在仿真过程中,由于各建模节点的任务负荷及资源消耗状态是动态变化的,需考虑局部、全局任务管理表之间的同步更新。

不论是以主任务粒度还是以辅助任务粒度为单位,随着鞭根系统的生长,建模子任务的总量将不断增加,这是一个动态的过程,需要对其进行合理的调度管理。为此,采用轮转法设计了一种任务调度管理模式。如果待分配的子任务数量少于或等于建模节点数时,两者间可直接进行映射。当子任务数量大于建模节点数时,便需考虑任务调度与负载平衡的问题,优先分配到任务负荷小的节点,如图 3 所示。

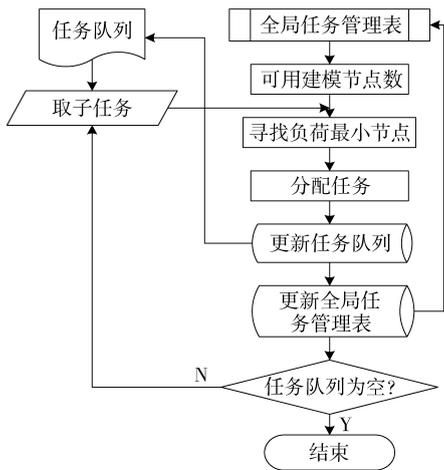


图 3 任务调度管理模式

Fig. 3 Mode of task scheduling

3.3 并行生长建模

根据前面的任务划分及调度管理模式,以 SimRoot 模型为基础的并行生长建模包括以下基本步骤:①任务管理节点根据用户交互模块提供的任务数据包,读取鞭根系统生长模型的几何构型参数及生长参数,设定仿真时限、时间步长、鞭根系统植株数量及其在三维坐标空间的初始生长位置方向,初始化仿真任务,进行任务分解,生成任务队列。②任务管理节点进行任务调度管理,将任务队列中的子任务分配到建模节点。③建模节点接收子任务,根据子任务的类别,创建竹鞭或鞭根对象,将其

加入生长队列。④在建模节点,以仿真时间步长为时序,逐一完成生长队列中竹鞭及鞭根的单位时间生长(包括轴向生长、径向生长)。⑤判断其当前时序下生长队列中各竹鞭及鞭根的生长状态:对于竹鞭,首先判断是否分生出新鞭节,或是继续分生使原节间伸长;其次判断是否满足岔鞭条件,如满足则计算岔鞭参数,并生成建模子任务请求发送给任务调度管理节点进行处理;最后判断是否满足分生鞭根条件,如满足则计算分根参数并创建鞭根对象,将其加入生长队列。对于鞭根,判断是否满足分枝下级鞭根的条件,如满足则计算分根参数并创建下级鞭根对象,将其加入生长队列。⑥建模节点按照时间步长增加仿真时间,进入下一时序,返回到步骤③,直至到达仿真时间终点。按照以上步骤,沿着仿真时序,鞭根系统不断生长,得到单轴散生竹地下根茎在三维空间中的整个拓扑结构和几何形态特征,如图 4 所示。

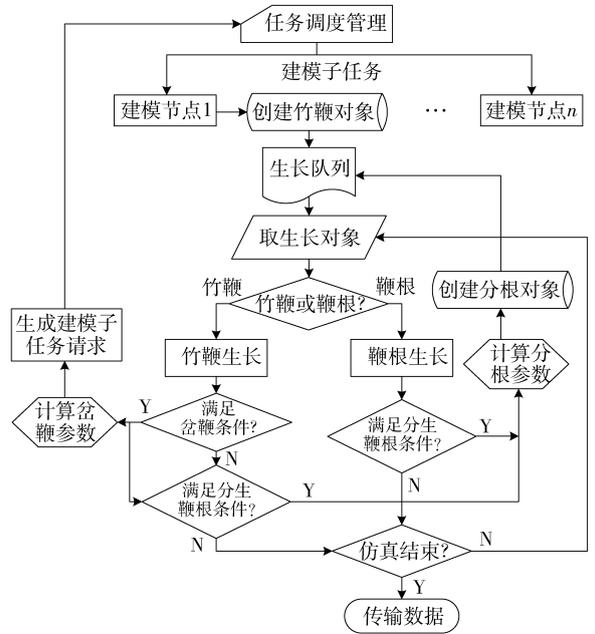


图 4 并行生长建模机制

Fig. 4 Mechanism of parallel growth modeling

4 系统测试和性能分析

4.1 系统测试

将金竹地下根茎的几何构型参数及生长参数输入到计算机模拟程序 BambooRhizome 中(实验数据来自西南林业大学竹林研究所),其三维图形的仿真结果如图 5、6 所示(建模节点计算机配置: Intel 奔腾 G2020 CPU, 主频 2.9 GHz, 2 GB 1 333 MHz DDR3 内存)。

分别对单轴散生竹地下根茎 1、3、5、7 株在不同生长天数及不同规模的并行建模节点下进行模拟仿真

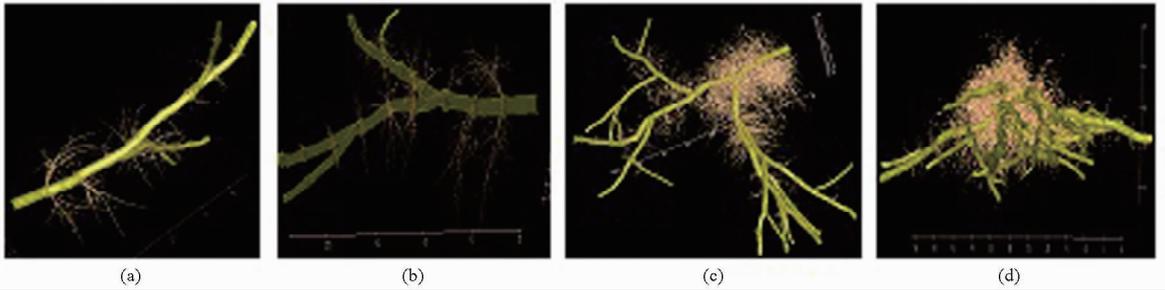


图5 不同生长天数单株单轴散生竹地下根茎不同角度三维视图

Fig.5 Different direction 3-D views of uniaxial scattered bamboo rhizome at different growth days

(a) 200 d 三维实体侧视图 (b) 200 d 三维剖面图 (c) 365 d 三维实体俯视图 (d) 720 d 三维实体侧视图

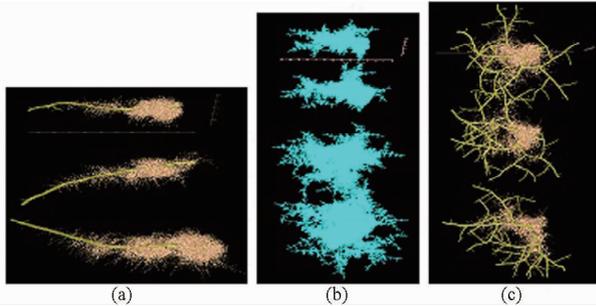


图6 不同规模散生竹地下根茎三维视图

Fig.6 3-D views of simulation for different scale of scattered bamboo rhizome

(a) 3株15节点仿真三维实体图 (b) 4株单节点仿真三维线框俯视图 (c) 4株单节点仿真三维实体俯视图

实验,每一条件重复3次,记录仿真时间(即建模耗时)和计算机内存耗用量等相关数据,求取平均值,并用 Microsoft Excel 进行曲线拟合,实验结果如图7、8所示。

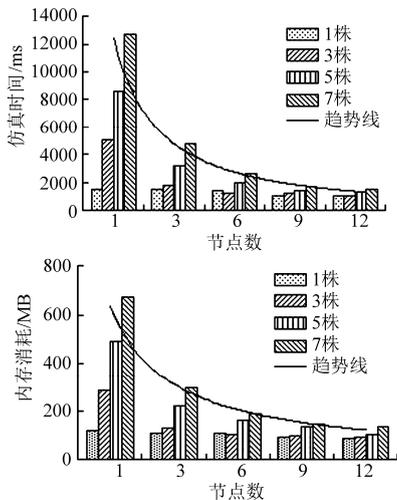


图7 300 d 不同株数根茎单节点及多节点并行仿真
Fig.7 Single node and multi-nodes parallel simulation for different scale of scattered bamboo rhizome at 300 days

4.2 结果分析

在单轴散生竹鞭根系统几何构型参数及生长参数相同的条件下,仿真的复杂程度和总体任务量主要取决于根茎株数和生长时间,株数增加理论上导

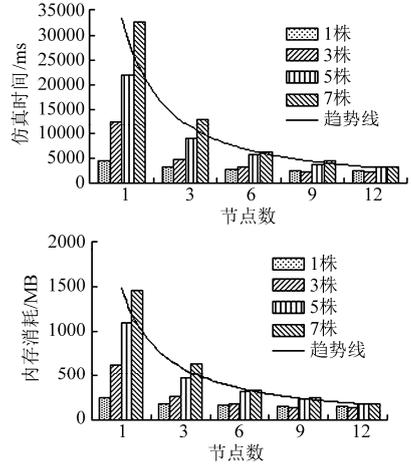


图8 340 d 不同株数根茎单节点及多节点并行仿真
Fig.8 Single node and multi-nodes parallel simulation for different scale of scattered bamboo rhizome at 340 days

致仿真任务量呈比例增加,而生长时间增加导致仿真任务量呈指数增加。对图7、图8实验数据分析可知:

(1)生长株数及建模节点数相同的情况下,生长时间从图7的300 d增加到图8的340 d时,仿真时间及内存消耗急剧增加,说明随着生长时间的增加,仿真任务量快速增加,株数越多时增加越明显。

(2)在同样的生长时间及生长株数下,随着建模节点数量开始增加,仿真任务被有效分解到各建模节点,仿真时间和内存消耗快速下降,多节点并行仿真整体效率明显提高。

(3)建模节点数量增加到一定程度后,虽然仿真时间和内存消耗继续降低,但降幅趋于平缓,整个下降趋势呈幂函数规律(图7、8)。这是因为随着建模节点的不断增加,每个建模节点的任务负荷减轻,仿真任务进一步分解的优势降低,而任务调度管理开支有所增加,导致多节点并行仿真整体效率的提高不明显。

(4)不论是生长时间为300 d(图7)还是340 d(图8),随着建模节点数增加,7株根茎仿真时间和

内存消耗的降幅均最大,表明任务量越大,多节点并行仿真的效率提高越明显。由此也可说明本文提出的基于网络机群系统并行仿真的方法对于较大规模的散生竹林地下根茎模拟仿真具有较好的适应性。

5 结束语

针对单轴散生竹地下根茎生长建模及模拟仿真对计算量、数据量、效率性、实时性等方面的要求,本

文研究了基于网络机群的多节点并行模拟仿真机制,构建了并行仿真平台,为竹林地下根茎固土力学作用的数值仿真计算奠定了基础。仿真实验结果表明所提出的并行模拟仿真方法具有以下优点:缩短仿真时间,提高任务实时性;降低对单个计算机的资源消耗,提高建模计算效率;软硬件成本低,便于应用普及;系统规模具有伸缩性,可适应规模较大的根系模拟仿真任务。

参 考 文 献

- 1 Lin D G, Huang B S, Lin S H. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(8):992 - 1006.
- 2 Prusinkiewicz P. Modeling plant growth and development[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2004, 7(1):79 - 83.
- 3 Lungley D R. The growth of root systems—a numerical computer simulation model[J]. *Plant and Soil*, 1973, 38(1):145 - 159.
- 4 Diggle A J. ROOTMAP—a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems[J]. *Plant and Soil*, 1988, 105(2):169 - 178.
- 5 Fitter A H, Stickland T R, Harvey M L, et al. Architectural analysis of plant root systems 1. Architectural correlates of exploitation efficiency[J]. *New Phytologist*, 1991, 118(3):375 - 382.
- 6 Mech R, Prusinkiewicz P. Visual models of plants interacting with their environment[C] // *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1996:397 - 410.
- 7 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.
- 8 刘桃菊,唐建军,戚昌瀚. 水稻形态的分形特征及其可视化模拟研究[J]. *江西农业大学学报:自然科学版*, 2002, 24(5):583 - 586.
- 9 Liu Taoju, Tang Jianjun, Qi Changhan. A study on the fractal characters and the visual simulation of rice morphology[J]. *ACTA Agriculturae Universitatis Jiangxiensis: Natural Sciences Edition*, 2002, 24(5):583 - 586. (in Chinese)
- 10 秋林,刘晓东,罗爱玲,等. 用L-系统描述植物根系并实现其动态可控生长[J]. *微电子学与计算机*, 2003(11):56 - 59.
- 11 钟南,罗锡文,秦琴. L系统理论在植物根系生长模拟中的应用研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(7):1896 - 1937.
- 12 Zhong Nan, Luo Xiwen, Qin Qin. Simulation of plant root systems growth with L-systems theories[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(7):1896 - 1937. (in Chinese)
- 13 王美丽,何东健. 基于L系统的小麦根系可视化模拟研究[J]. *农机化研究*, 2008(3):36 - 39.
- 14 Wang Meili, He Dongjian. Visualized simulation of wheat roots based on L-system[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(3):36 - 39. (in Chinese)
- 15 徐会杰,张云伟. 竹子地下茎-根的计算机仿真[J]. *计算机工程*, 2009, 35(10):254 - 256.
- 16 Xu Huijie, Zhang Yunwei. Computer simulation of underground stem - root of bamboo[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(10):254 - 256. (in Chinese)
- 17 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.
- 18 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)
- 19 刘晓丽,汪有科,马理辉,等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7):90 - 97.
- 20 Liu Xiaoli, Wang Youke, Ma Lihui, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in dense jujube plantation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7):90 - 97. (in Chinese)
- 21 宋安军,彭勤科,胡保生. 并行计算模型在集群环境下的适应性[J]. *计算机工程*, 2003, 29(18):4 - 6.
- 22 Song Anjun, Peng Qinke, Hu Baosheng. Adaptability of parallel computing model in the nows environment[J]. *Computer Engineering*, 2003, 29(18):4 - 6. (in Chinese)
- 23 计永昶,丁卫群,陈国良,等. 一种实用的并行计算模型[J]. *计算机学报*, 2001, 24(4):1 - 5.
- 24 Ji Yongchang, Ding Weiqun, Chen Guoliang, et al. A realistic parallel computational model[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(4):1 - 5. (in Chinese)
- 25 王小伟,郭力,葛蔚,等. 高性能并行集群计算环境的构建与性能测试[J]. *小型微型计算机系统*, 2004, 25(3):325 - 328.
- 26 Wang Xiaowei, Guo Li, Ge Wei, et al. Construction of high performance computer cluster and its performance evaluation[J]. *Mini-micro Systems*, 2004, 25(3):325 - 328. (in Chinese)

Abstract: Nuclear magnetic resonance (NMR) technique has been broadly used in probing plant water relations. However, the relationship between NMR parameters and photosynthetic traits is still not clear. An NMR system was constructed to perform non-imaging relaxation measurement or magnetic resonance imaging on wheat non-invasively and non-destructively. It was found that from the onset of leaf senescence to the degradation stage, the average T_2 relaxation time ($T_{2,\text{mean}}$) increased gradually and the chlorophyll content decreased, while the amplitude (A) of T_2 relaxation spectrum and water content kept stable. When wheat leaves approached cell death, all of the above mentioned NMR and physiological parameters decreased to its minimum value. It was deduced that A and the water content of wheat leaves were linearly correlated. On the other hand, $T_{2,\text{mean}}$ was related with leaf senescence status. Therefore, non-imaging T_2 relaxation technique was thought a fast and powerful method to estimate the senescence status of wheat leaf. In addition, T_1 weighted imaging and T_2 weighted imaging could represent leaf physiological status directly based on the relaxation property. T_1 weighted imaging was comparatively time-saving, whereas T_2 weighted imaging was much more sensitive to leaf aging.

Key words: Wheat leaf Senescence Nuclear magnetic resonance T_2 relaxation time Magnetic resonance imaging

(上接第 275 页)

Parallel Simulation of Uniaxial Scattered Bamboo Root System

Zhang Yunwei¹ Yu Yong¹ Wang Dalong² Zhou Xuan² Wang Yanjun²

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: During the simulation of bamboo rhizomes, there are some faced difficulties caused by high strength of calculation and large amount of data. Therefore, it is hard to satisfy the simulation performance requirements by using traditional architecture based on single processor and serial computing. In order to solve this problem, a multi-nodes parallel simulation mechanism was proposed based on network compute cluster, and the parallel simulation platform was built for uniaxial scattered bamboo rhizomes. The parallel simulation platform was composed of modeling node, task managing node, graphics node and network switch in hardware. The growth model of uniaxial scattered bamboo rhizomes was constructed on the basis of SimRoot model, whose geometric architecture parameters and growth parameters can be obtained through experimental observation. Function decomposition method was used for dividing integral task of growth modeling into fragments, and the corresponding task scheduling mode was established. Then, multi-nodes parallel growth modeling mechanism was designed. Finally, as an example, multi-nodes parallel simulation experiments for *Phyllostachys parvifolia* were executed. The experimental results show that multi-nodes parallel simulation based on network computer cluster appears to have obvious efficiency in reducing memory demand and simulation time, which has good adaptability to the large-scale simulation of scattered bamboo rhizomes.

Key words: Uniaxial scattered bamboo Underground rhizome Parallel simulation Growth modeling Network computer cluster