

植物侧根对土壤牵引效应的计算机仿真

张云伟^{1,2}, 戈振扬¹, 周 跃³

(1. 昆明理工大学农业工程学院, 昆明 650224; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200030;

3. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 植物侧根对土壤增强和斜坡稳定具有重要作用, 探讨根土作用的机械效应, 建立侧根对土壤牵引效应模型为定量分析植被生态护坡奠定了基础。但多侧根对土壤的牵引效应较复杂且难于分析求解, 使计算机仿真成为有效研究方法。该文分析了多侧根对土壤牵引效应的力学过程, 建立了可用于计算机仿真的多侧根土壤牵引效应模型, 并以 MATLAB 为工具, 建立了仿真系统。通过计算机仿真, 为复杂的多侧根土壤牵引效应的分析提供仿真平台, 不仅可以求解计算模型, 而且还能通过改变模型的输入变量和模型参数对模型的系统行为进行观察和预测。最后, 以云南松侧根为例进行了仿真和试验测试, 结果表明仿真模型具有一定的精度, 所建立的仿真系统是有效的。

关键词: 植物侧根; 牵引效应; 计算机仿真

中图分类号: S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)11-0035-05

张云伟, 戈振扬, 周 跃. 植物侧根对土壤牵引效应的计算机仿真[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 35- 39.

Zhang Yunwei, Ge Zhenyang, Zhou Yue. Computer simulation of traction effect of plant lateral roots on soil[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 35- 39. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

利用植被保护、稳固斜坡已成为实施生态护坡工程的一种重要手段, 其中, 根系对土壤的加强作用是植被稳定土壤、保护坡面的最有效和最普遍的机械途径。从机械效应来看, 植物根系对土壤的加强作用主要由垂直根系和侧向根系两部分组成, 垂直根系可以把根际土层锚固到深层土层上, 增加土体的迁移阻力, 侧向根系可以提高根际土层的整体抗张强度, 从而加固土层, 抑制滑坡。因此, 植物侧根对土壤增强和斜坡稳定具有重要作用。目前人们对根系的斜坡稳定作用开展了一些研究^[1-15], 但对侧根加强土壤的机械作用途径, 特别是植物侧根对土壤牵引效应的研究还十分有限。

文献[13-15]以云南松侧根为例, 建立了具有一定预测精度的根土之间摩擦型根土粘合键破坏模型, 并给出了单根侧向牵引模型。但在实际情况下, 植物侧根对土壤的牵引效应往往是多侧根共同作用的结果, 这种作用不是单根牵引作用的简单叠加, 因此, 要定量研究侧根对土壤的牵引效应并对其潜能进行理论预测, 必须要建立多侧根土壤牵引效应模型。由于多侧根模型较为复杂, 往往难以采用解析求解的方法直接分析求解, 这就使得计算机仿真成为该问题的有效研究方法。为此, 本文将分析多侧根土壤牵引效应的力学过程, 建立可用于计算机仿真的多侧根对土壤牵引效应仿真模型, 并以 MATLAB 为工具, 设计仿真系统。通过计算机仿真, 为

复杂的多侧根土壤牵引效应的分析提供模拟平台, 不仅可以求解计算模型, 而且还能通过改变模型的输入变量和模型参数对模型系统的行为进行仿真实验和预测。最后, 以云南松侧根为例进行仿真和实验测试。这对定量地开展植被生态护坡工程具有指导意义。

1 侧根对土壤牵引效应的计算机仿真模型

1.1 侧根对土壤牵引效应的力学过程分析

在野外自然环境中, 当植物侧根的生长从稳定土壤区域伸延到潜在的滑动土壤区域时, 侧根通过自身的抗张强度和发生在侧根和土壤界面上的根土粘合键, 可以牵拉不稳定的土壤, 从而加固土层, 抑制滑坡, 笔者将这种作用称为侧根对土壤的牵引效应, 其量值为侧根所产生的阻止土壤滑移的最大牵引阻力。

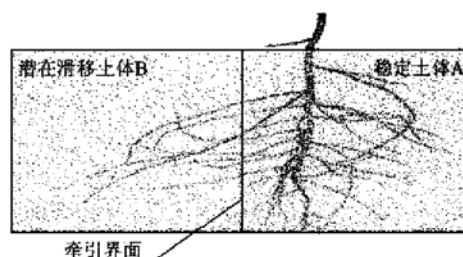


图1 牵引界面

Fig. 1 Traction interface between stable soil and sliding soil

为了便于分析, 将野外根系生长的实际土壤区域, 如分布在云南虎跳峡中段海拔 2000~ 3000 m 峡谷地区的暗红壤, 简化为土体。设 A 为稳定土体, B 为潜在滑移土体, 某植物根系有 n 条侧根穿过土体 A 和土体 B 的牵引界面, 如图 1 所示。假设这 n 条侧根都为直根, 没有分枝, 侧根的截面是圆形, 并且其直径沿着根的长度均匀变化, 用 d_i 表示侧根 i 的最大直径, mm; Δd_i 表示侧根

收稿日期: 2005-10-20 修订日期: 2006-09-08

项目基金: 国家自然科学基金项目(60371047); 云南省自然科学基金项目(2005D0015M、2005YP15)

作者简介: 张云伟(1972-), 男, 云南昆明人, 副教授, 博士生, 主要从事精密测控在农业中的应用研究。昆明市白龙寺村 296 号 昆明理工大学农业工程学院, 650224。Email: zhangyunwei72@gmail.com

i 的最大最小直径差, mm。则侧根 i 在土体 B 中的分布参数有 4 个: l_i —侧根 i 的长度, mm; $z(i)$ —侧根 i 的土壤深度, mm; α_i —侧根 i 的水平夹角, 指侧根 i 在土壤水平面上的投影与牵引方向的夹角(度), 逆时针方向取正, 顺时针方向取负, 如图 2 所示; β_i —侧根 i 的垂直夹角(度), 指侧根 i 在垂直方向与土壤水平面的夹角, 下方取正, 上方取负。

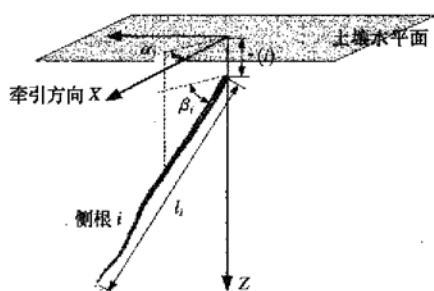


图 2 侧根在土壤中的分布参数

Fig. 2 Distributed parameters of lateral roots in soil

在土体 B 上作用一个垂直于牵引界面的外部牵引力 $P(N)$ 时, A 对 B 产生的牵引阻力是由穿过牵引界面的各条侧根提供的, 这就需要确定各条侧根的受力情况, 这是一个多维超静定的问题。为了使问题简单化, 假设外部牵引力 P 作用时, 土体 B 只能沿牵引方向产生微小位移 $\delta(mm)$, 此时, 各侧根受力产生变形 $\Delta_i(i = 1, \dots, n)$, mm, 由弹性力学有

$$\begin{cases} \Delta_i = \delta \cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i \\ N_i = \frac{\Delta_i E_i A_i}{l_i} \end{cases} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

式中 N_i —侧根 i 的受力, N; E_i —侧根 i 的弹性模量, N/mm²; A_i —侧根 i 的有效横截面积, mm², 即在 $d_i \neq \Delta d_i$ 时, 将侧根 i 等效为长度相同、变形相同的等截面弹性体, 对于截面直径均匀变化的侧根, 可积分得到

$$A_i = \frac{\pi}{4} d_i (d_i - \Delta d_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

根据牵引方向力的平衡条件有

$$\sum_{i=1}^n N_i \cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i = P \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式有

$$\delta = \frac{P}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i A_i \cos^2 \alpha_i \cdot \cos^2 \beta_i}{l_i}} \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式即可得到各侧根的受力

$$N_i = \frac{P E_i A_i \cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i}{l_i \sum_{i=1}^n \frac{E_i A_i \cos^2 \alpha_i \cdot \cos^2 \beta_i}{l_i}} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (5)$$

将(2)式代入(5)式, 并考虑到同一种植物侧根的弹性模量 $E_i(i = 1, \dots, n)$ 相等, 则有

$$N_i = \frac{P d_i (d_i - \Delta d_i) \cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i}{l_i \sum_{i=1}^n \frac{d_i (d_i - \Delta d_i) \cos^2 \alpha_i \cdot \cos^2 \beta_i}{l_i}} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

1.2 仿真模型的建立

由于植物的侧根系是一种特殊材料, 对土壤的斜向牵引作用能力除了受几何性状, 如根长根径比、表面粗糙度、通直程度和在土壤中的生长分布走向等影响外, 还受到侧根本身的力学性能的影响, 主要表现为侧根的抗张强度。

对于侧根 i , 在对土体 B 施加牵引力时, 该侧根能够提供的最大牵引阻力 $F_T(i)$ 是侧根的抗张强度及根土粘合键强度共同作用的结果。如果侧根 i 产生的最大牵引阻力 $F_T(i) \leq N_i$ 时将会引起两种结果。一种是整条侧根的根土粘合键被破坏, 侧根被拔出土壤, 用 $F_o(i)$ 表示侧根 i 的拔出力, N; 另一种是侧根抗张强度不够, 侧根被拉断, 用 $F_b(i)$ 表示侧根 i 的拉断力, N。随着这两种结果中任何一种的出现, 该侧根对土壤的牵引效应消失。对于有较多分枝的侧根, 由于分枝对土壤的剪切作用, 侧根很难被拔出土壤, 此时应主要考虑侧根被拉断的情况, 并可将其简化为无分枝的直根。

侧根的根土粘合键阻碍侧根与土壤之间相互滑动, 其强度与侧根的土壤分布状况及土壤的容重、孔隙度、含水量、坚实度等物理性质有关。根据对侧根根土粘合键破坏模型的研究^[13], 侧根 i 的根土粘合键强度 $\tau(i)$, N/mm², 可由摩擦型根土粘合键强度估算, 则侧根 i 的拔出力 $F_o(i)$ 可沿侧根长度积分后得到

$$F_o(i) = \pi \int_0^{l_i} d(i) \tau(i) dl \quad (i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

式中 $d(i)$ ——侧根 i 沿根长变化的直径, mm。

侧根 i 的拉断力 $F_b(i)$ 可按式计算

$$F_b(i) = A_i \sigma_b(i) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (8)$$

式中 $\sigma_b(i)$ ——侧根 i 的抗张强度, MPa, 与侧根的密度、结构等物理性质有关, 目前还没有理论上的计算模型, 通常采用实验测量的方法得到。

因此, 侧根 i 的最大牵引阻力 $F_T(i)$ 等于其拔出力 $F_o(i)$ 和拉断力 $F_b(i)$ 的最小值, 即

$$F_T(i) = \min(F_o(i), F_b(i)) \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

这样, 各条侧根单独能提供的最大牵引阻力可表示为向量 $T = [F_T(1), F_T(2), \dots, F_T(n)]$ 。随着外部牵引力 P 的增加, 当所有侧根对土壤的牵引作用都被破坏时, P 就等于各侧根共同作用下能提供的最大牵引阻力。

以上分析确定了多侧根对土壤牵引效应计算机仿真模型的结构和参数, 可以采用有关算法和计算机语言将上述模型转化为能在计算机上运行的程序。应该指出的是, 在上述模型当中, N_i 的计算是按照实际参与牵引作用的侧根来计算, 也就是说, 在牵引力按步长增加的过程中, 如果某一侧根已被拔出或拉断, 在之后的牵引中, 其余各侧根的受力 N_i 应剔除该侧根后按照(6)式重新组合计算。

2 仿真模型程序结构分析

为了实现上述多侧根牵引模型的计算机仿真, 我们利用 MATLAB 强大的矩阵运算和数值计算功能设计

了仿真系统。主要由 1 个主程序和 6 个子程序组成。图 3 所示为程序流程图。

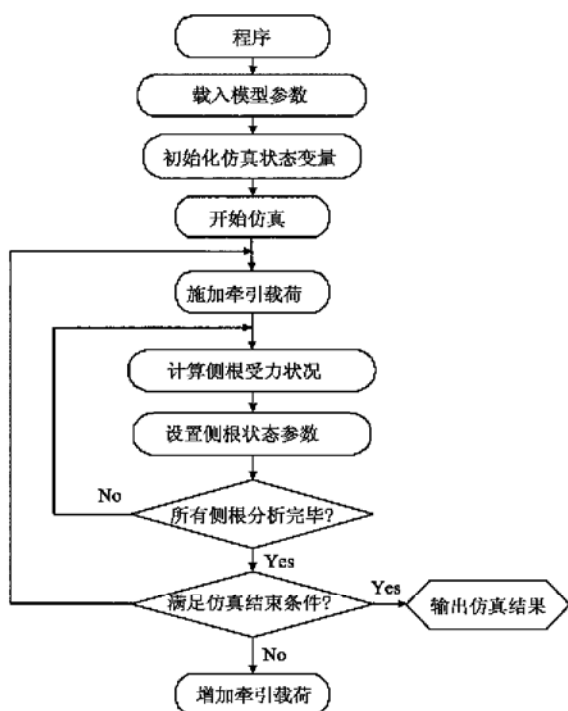


图 3 仿真程序流程图

Fig. 3 Flow chart of simulation program

1) 主程序 RootTracSim。组织控制整个程序的运行流程, 为各子程序的调用提供入口。此外, 主程序还要根据计算机类型和内存容量, 确定程序能够最大模拟的侧根数量。

2) 载入模型数据子程序 ModeDataLoad。从侧根模型数据文件获取模型数据, 作为模型仿真计算的数据源。侧根模型数据文件主要存储着侧根的数量、长度、土壤深度、最大直径、最大最小直径差、水平夹角、垂直夹角等参数。对于实际的侧根根系, 可以将其进行简化后按照侧根模型数据文件的格式做成数据文件, 由该子程序读入后进行计算仿真。编程时, 为了表述方便, 已将这些模型数据存储在一个 $n \times 6$ 维的参数矩阵 A 中, 这样, 矩阵中的每一列是一个参数向量, 在运算的时候, 可以通过矩阵和向量的运算来完成, 使程序简洁、结构清晰。

3) 计算机自动生成侧根模型子程序 AutoGeneration。由计算机按照不同植物根系的生长分布规律自动生成侧根模型中侧根的数量、各根长度、土壤深度、最大直径、最大最小直径差、水平夹角、垂直夹角等各种参数数据, 是为仿真计算提供数据源的另一种途径。

4) 土壤参数设定子程序 SoilSetting。用于设定、修改、保存土壤的容重、含水量、侧压力系数、粘聚力、内摩擦角等土壤参数。

5) 侧根抗拉强度计算子程序 StrengthCalculation。存储有云南松侧根抗拉强度的经验计算公式, 该公式是通过大量的实验样本数据拟合得到的, 对于不同树种的

侧根有不同的计算公式, 通过扩展这些计算公式, 可以使仿真模型应用于不同的树种。

6) 动态仿真子程序 ModelSimulation。这是整个系统的核心模块, 主要用于仿真计算在一定的土壤参数及侧根模型参数条件下, 侧根模型能提供的最大牵引阻力, 实现侧根牵引的模拟实验, 分析牵引时整个动态过程中各侧根的受力状况, 判断各侧根与土之间的相互作用被破坏的先后顺序, 即破坏的原因和状态。

7) 保存模型数据子程序 ModelDataSaving。用于将仿真计算的当前模型的参数数据及仿真结果记录到数据文件中, 如需要查阅时, 可以通过 ModeDataLoad 子程序载入。

3 仿真实例

3.1 模型数据

为了便于进行实试验证, 笔者以侧根形状相对比较规则的云南松根系为测试对象。作为仿真对象的虚拟根系模型参数是根据实际的测试对象生成的, 该模型由 10 根直径长度不同的侧根组成, 模型数据见表 1。

表 1 多侧根模型数据

Table 1 Model data of lateral roots

序号	侧根长度 /mm	土壤深度 /mm	最大直径 /mm	直径差 /mm	水平夹角 $\alpha/(^\circ)$	垂直夹角 $\beta/(^\circ)$
1	480	310	2	0.2	-32	12
2	500	380	9	1.1	-30	11
3	450	336	12	1.8	-29	13
4	300	281	14	2.1	-7	5
5	470	302	9.2	1.3	-21	9
6	600	308	8.9	1.2	-4	7
7	510	409	4	1	2	8
8	500	360	16	2.2	30	4
9	470	303	13	1.9	19	10
10	490	315	14	1.8	29	9

注: 水平夹角 α 的正负取值按前面 1.1 中定义。

3.2 仿真结果

这个仿真实例实际上相当于给定土壤参数、给定模型数据后在计算机上进行一次侧根牵引的模拟实验, 在模拟实验的过程中, 将外部牵引力由 0 N 开始, 缓慢增加, 直到所有的侧根与土壤之间的粘附作用均被破坏, 也就是所有的侧根均被拉断或拔出, 这时出现的峰值牵引力就是这个根系模型的最大牵引阻力。图 4 是仿真系统的一个输出结果。

3.3 试验测试结果

考虑到在野外进行植物根系与土壤的机械效应试验, 不易做到实时分析, 根系与土壤的机械效应(力、位移)渐变过程不能记录, 且测试研究容易受多种因素的影响, 给分析带来不便。为此, 设计了能在室内进行实时测试分析的测试系统和实验台架, 在实验台架上进行实验测试, 测试对象为前述云南松侧根, 测试系统由美国 QUANTECH 公司支持 PCMCIA 插槽的 DAQP-12

高精度便携式数据采集系统构成, 测试结果见表 2。

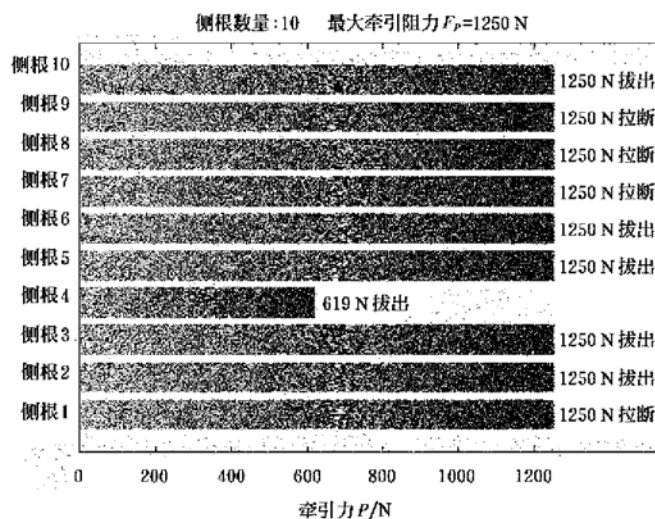


图 4 实例仿真结果

Fig. 4 Simulation results

表 2 试验测试结果

Table 2 Experimental results

最大牵引阻力/N	侧根状况	
	拔出	拉断
1067	7 根	3 根

3.4 结果分析

从图 4 仿真结果可知, 在计算机上通过仿真进行模拟试验时, 侧根的最大牵引阻力为 1250 N, 在 619 N 时, 第 4 根侧根被拔出, 10 根侧根中有 8 根被拔出, 2 根被拉断。从表 2 试验结果来看, 实测最大牵引阻力为 1067 N, 牵引过程中, 有 7 根侧根被拔出, 3 根侧根被拉断。可见, 仿真结果与试验测试结果是吻合的。与实测数据相比, 仿真结果中最大牵引阻力的相对误差为 $(1250 - 1067) / 1067 \times 100\% = 17\%$ 。可见, 在本次试验测试实例中, 仿真结果反映了侧根牵引效应的实际情况和总体变化趋势, 这表明所建立的仿真系统是有效的。

对于计算仿真结果和实测数据之间的差异, 主要有以下几方面的因素:

- 1) 在计算根土粘合键时所作的一些简化和假设;
- 2) 在计算中, 由于算法的需要, 将实际根系简化为形状规则的直根, 导致模型数据和真实数据之间有差异;
- 3) 由于试验的复杂性及可控程度不高, 实测数据也会有一定的误差, 同时, 供模型计算仿真的一些土壤参数的测定也非充分准确。

4 结 语

综上所述, 本文分析了多侧根土壤牵引效应的力学过程, 建立了可用于计算机仿真的多侧根对土壤牵引效应模型, 并以 MATLAB 为工具, 建立了仿真系统。最后, 以云南松侧根为实例, 进行了仿真和试验测试, 结果

表明所建立的仿真系统是有效的, 仿真模型具有一定的精度。

本研究力图建立一套较为完整的、能针对植物侧根牵引机械效应进行研究的技术手段和理论方法, 而不是要获得植物根系与土壤相互作用的精确数据。所进行的模拟仿真结果表明, 本研究所建立理论方法和技术手段具有一定的可靠性, 虽然, 模拟结果与实测数据还有一些差异, 在计算模型中也还有许多地方需要改进, 但由于国内外在这方面的探索较有限, 本文的工作可为今后开展相关研究提供有益的借鉴。

[参 考 文 献]

- [1] Makarova O V, Cofie P, Koolen A J. Axial stress-strain relationships of fine roots of Beech and Larch in loading to failure and in cyclic loading[J]. Soil & Tillage Research, 1998, (45): 175- 187.
- [2] Cofie P, Koolen A J. Test speed and other factors affecting the measurements of tree root properties used in soil reinforcement models[J]. Soil & Tillage Research, 2001, (63): 51- 56.
- [3] Cofie P, Koolen A J, Perdok U D. Measurement of stress-strain relationship of beech roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems [J]. Soil & Tillage Research, 2000, (57): 1- 12.
- [4] Mattheck C, Teschner M, Schafer J. Mechanical control of root growth: a computer simulation[J]. Journal of theoretical Biology, 1997, (184): 261- 269.
- [5] Grimshaw R G. Vetiver grass-its use for slope and structure stabilization under tropical and semi tropical condition [A]. Proc. Conference on Vegetation and Slopes: Stabilization, Protection and Ecology[C]. 1995: 26- 35.
- [6] Wu T H, Riestenberg M M, Flege A. Root properties for design of slop stabilization [A]. Proc. conference on Vegetation and slopes: stabilization, protection and ecology[C]. 1995: 52- 59.
- [7] Goodman A M, Crook M J, Ennos A R. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize[J]. Annals of Botany, 1999, 83(3): 293- 302.
- [8] Zhou Y, Watts D B, Li Y H, et al. A case study of effect of lateral roots of Pinus yunnanensis on shallow soil reinforcement[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 103(2): 107- 120.
- [9] Goodman A M, Crook M J, Ennos A R. Anchorage mechanics of the tap root system of winter-sown oilseed rape[J]. Annals of Botany, 2001, 87(3): 397- 404.
- [10] Tobias S. Shear strength of the soil root bond system [A]. Proc. conference on Vegetation and slopes: stabilization, protection and ecology[C]. 1995: 280- 286.
- [11] Blunt S M, Dorken T C. Erosion of highway slopes in upland Wales: problems and solution[A]. Proc. conference on Vegetation and slopes: stabilization, protection and ecology[C]. 1995: 95- 107.
- [12] 周 跃, 徐 强, 骆华松. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应的研究(1)原理和计算[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 4- 9.
- [13] 张云伟, 刘跃明, 周 跃. 云南松侧根与土壤间根土粘合键

的破坏机制及模型研究[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 628-631.

- [14] 刘跃明, 张云伟, 周 跃. 云南松根系对土壤牵引效应测试系统的设计与实现[J]. 山地学报, 2002, 20(4): 476-

479.

- [15] 刘跃明, 张云伟, 周 跃. 侧根的根土粘合键模型及牵引效应测试系统[J]. 南京林业大学(自然科学版), 2003, 27(1): 50-54.

Computer simulation of traction effect of plant lateral roots on soil

Zhang Yunwei^{1,2}, Ge Zhenyang¹, Zhou Yue³

(1. Faculty of Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China;

2. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

3. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Plant lateral roots play an important role in soil reinforcement and slope stabilization. Investigating the mechanical effect of roots on soil, and establishing the traction effect model of lateral roots on soil may provide a basis contributing to ecological slope protection. However, traction effect of plant lateral roots on soil is intricate to be analyzed, and its model is difficult to be solved. Therefore, computer simulation appears to be a viable solution to this problem. In this paper, the traction effect model of plant lateral roots on soil was established for computer simulation on the basis of analyzing its mechanics process, and the relative computer simulation system was developed in MATLAB to provide a simulation platform for analyzing the traction effect of lateral roots. In this platform, not only the complicated model of traction effect can be solved, but also its behavior can be observed and predicted in modeling simulation by changing the input variables and model parameters. Finally, the simulation and experimental testing were implemented for lateral roots of Yunnan pine. The results show that the proposed simulation model of traction effect is of good precision, and the simulation system is valid and reliable.

key words: plant lateral roots; traction effect; computer simulation

编者按: 本期追踪热点集中报道几篇有关油菜与生物柴油的文章

发展替代能源是保障国家能源安全的一项重要战略举措, 党中央、国务院对此高度重视。发展替代能源已成为近期研究的热点。2006 年 11 月 20 日, 中共中央政治局委员、国务院副总理曾培炎主持召开会议, 研究发展替代能源研究工作。曾培炎指出, 发展替代能源要按照以新能源替代传统能源, 以优势能源替代稀缺能源, 以可再生能源替代化石能源的思路, 逐步提高替代能源在能源结构中的比重。当前, 要重点发展车用燃料和替代石油产品, 搞好煤炭液化, 煤制甲醇、二甲醚、烯烃和煤基多联产技术的试验示范和开发应用; 积极发展燃料乙醇和生物柴油; 大力发展沼气、太阳能、风能、水电、地热等可再生能源, 尽可能降低对化石燃料的依赖, 减少污染物的排放。

在国务院召开的发展替代能源工作会议中, 发展燃料乙醇和生物柴油是替代能源的发展重点之一。由

于油菜种植面积大, 油菜籽的总产量大, 菜籽油出油率高, 油菜籽油转化为生物柴油的转化率高, 因而发展以油菜籽为原料的生物柴油潜力巨大, 前景广阔。为加强这方面的报道, 本刊策划了有关油菜与生物柴油的专题文章, 涉及油菜的生产管理(第一作者: 汤亮, 下同), 酯交换制备生物柴油的工艺(张无敌), 为油菜机械化收获提供基础数据的油菜果裂角力测定(谭小力), 菜籽油压榨数值模拟(郑晓), 生物柴油能耗与排放评价(胡志远), 菜籽饼粕中多糖的酸提取工艺(刘贝贝), 水酶法提取菜籽乳化油的工艺(章绍兵)。同一期集中刊登, 以便于读者参阅使用。由于时间和容量的限制, 本期只刊登了 7 篇相关文章, 以后将继续关注和报道有关替代能源开发工艺技术方面的文章。欢迎参阅引用, 欢迎关注和投稿。

(本刊 王应宽 供稿)