

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 6 月 14 日 (14.06.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/103137 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06Q 10/04 (2012.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/110906
- (22) 国际申请日: 2016 年 12 月 20 日 (20.12.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201611130332.7 2016年12月9日 (09.12.2016) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (72) 发明人: 倪纪恒 (NI, Jiheng); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 刘勇 (LIU, Yong); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 周靖宇 (ZHOU, Jingyu); 中国江

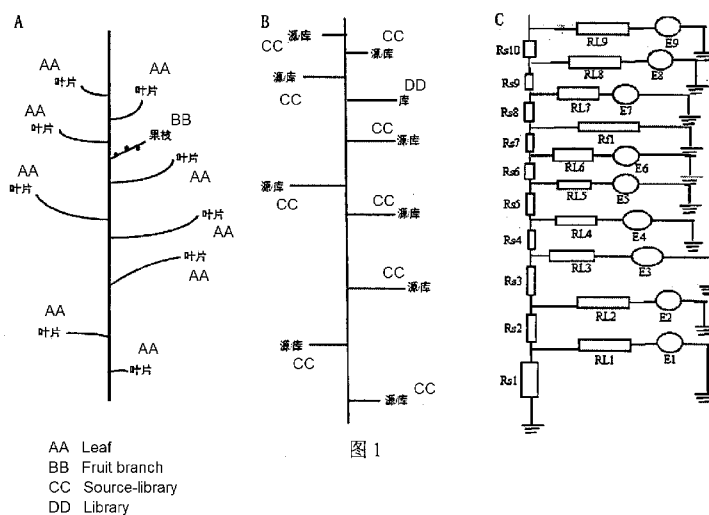
苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
毛罕平 (MAO, Hanping); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 (JW IP LAW FIRM); 中国北京市朝阳区酒仙桥路 14 号 A5 楼 7 层 701, Beijing 100015 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM,

(54) Title: METHOD FOR PREDICTING GREENHOUSE TOMATO FRUIT GROWTH

(54) 发明名称: 一种预测温室番茄果实生长的方法



(57) Abstract: Method for predicting greenhouse tomato fruit growth, comprising the following steps: 1, with the leaves of a tomato plant as sources and libraries and the stems and fruits as libraries, converting into source-library relations; with the sources as power sources and the libraries as resistances, converting the tomato plant into a circuit on the basis of the source-library relations; 2, utilizing relevant conditions in a greenhouse and the circuit in step 1 to determine a leaf voltage, a leaf resistance, an inter-node resistance, and a fruit resistance of the greenhouse tomato plant; 3, in combination with the circuit of step 1, calculating the voltage and current at either end of the fruits on the basis of the determined leaf voltage, leaf resistance, inter-node resistance, and fruit resistance by utilizing the Ohm's law to produce the electric power of the fruits, the value of the electric power of the fruits being the amount of assimilated products acquired by the greenhouse tomato fruits in one day; and 4, converting the produced amount of the assimilated products of the fruits into the diameter of the greenhouse tomato fruits. The method expresses in the form of electricity the inter-plant distribution of greenhouse tomato assimilated products, thus further facilitating greenhouse environment regulation and nutrient solution management.

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种预测温室番茄果实生长的方法, 包括以下步骤: 1、以番茄植株的叶片为源和库, 茎和果实为库, 转化为源库关系; 以源为电源, 库为电阻, 将番茄植株依据源/库关系转化为电路; 2、利用温室内相关条件及步骤1中的电路, 确定温室番茄植株的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻; 3、结合步骤1的电路, 根据确定的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻, 利用欧姆定律, 计算果实两端的电压和电流, 得到果实的电功率, 果实的电功率值即为温室番茄果实一天内获得的同化产物量值; 4、将得到的果实的同化产物量转化为温室番茄果实直径。该方法将温室番茄同化产物在植株间的分配以电的形式体现, 更有利于温室环境调控和营养液管理。

一种预测温室番茄果实生长的方法

技术领域

本技术是采用作物模拟模型方法来预测温室番茄的果实生长，具体为一种预测温室番茄果实生长的方法，属于设施栽培技术领域。

背景技术

温室作物生长模拟模型是温室环境调控和水肥管理的有力工具。温室作物干物质分配子模型是温室作物生长模拟模型的重要组成部分；温室作物的干物质分配直接决定作物产品的产量和品质。但由于对温室作物干物质分配的机理尚不清楚，因此温室作物干物质分配的模拟一直是研究的热点和难点。

目前关于温室作物干物质分配的模拟方法中，占据主要地位的分别是比速生长和源库理论。基于比速生长建立的模型实用性强，所建立的模型普适性差。而基于源库理论建立的模型机理性强，但由于构建模型所需参数多且难以测定，因此限制了模型的应用。

在温室作物生长过程中，叶片吸收光和二氧化碳后，合成有机物并释放出氧气。叶片合成的有机物经茎运输至果实等器官中。同化产物在叶片和果实等器官之间形成梯度差。这与欧姆定律中的电流的运输过程较为一致（虽然同化产物的运输中存在双向运输现象，但总体上同化产物的流向是从叶片到果实等器官）。鉴于此，本发明以叶片为电池，茎为导线，果实为用电器，同化产物流为电流，构建基于欧姆定律的温室番茄生长模型，为提高中国温室生产和环境调控水平提供理论依据。

发明内容

本发明的目的是提供一种预测温室番茄果实生长的方法，提高温室环境控制和水肥管理水平，提高温室作物产量和品质。具体技术方案如下：

一种预测温室番茄果实生长的方法，包括以下步骤：

步骤 1、首先，以番茄植株的叶片为源和库，茎和果实为库，转化为源库关系；然后，以源为电源，库为电阻，将番茄植株依据源/库关系转化为电路；

步骤 2、利用温室内的相关条件以及步骤 1 中得到的电路，确定温室番茄植株的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻；

步骤 3、结合步骤 1 得到的电路，再根据确定的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻，利用欧姆定律，计算果实两端的电压和电流，得到果实的电功率，果实的电功率值即为温室番茄果实一天内获得的同化产物量值；

步骤 4、将得到的温室番茄果实的同化产物量转化为温室番茄果实直径。

所述将番茄植株转化为电路的具体过程为：

当番茄植株是一个 m 叶枝 n 果枝的植株时， m 是 ≥ 1 的自然数， $n=0$ 或是 ≥ 1 的自然数，其转化的电路是：

将 m 叶枝中的每个叶枝均转变为一个叶片电阻 R_L 串接一个叶片电池 E ，共 m 个叶片和 m 个叶片电池， m 个叶片电阻分别记为 R_{L1} 、 R_{L2} 、..... R_{Lm} ， m 个叶片电池的电压分别记为 E_1 、 E_2 E_m ；

将每个果枝转变为一个果实电阻 R_f ，共有 n 个果实电阻， n 个果实电阻分别记为 R_{f1} 、 R_{f2} R_{fn} ；

m 叶枝 n 果枝的植株的茎由 $m+n$ 个节间组成，将每个节间转变为一个节间电阻 R_s ，从根部向上的节间电阻 R_s 依次记为 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm+n} ，再将这 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm+n} 个节电阻依次串联；

每个叶片电阻 R_L 的一端串接一个叶片电池 E ，将每个叶片电阻 R_L 的另一端均连接于不同的每两个节间电阻 R_s 之间，将每个叶片电池 E 的另一端均接地；

将每个果实电阻 R_f 的一端接地，另一端均连接于不同的每两个节间电阻 R_s 之间，使每个果实电阻 R_f 的另一端与每个叶片电阻 R_L 另一端之间串接一个节间电阻 R_s ；

因此，共 m 个叶片电阻的另一端、共 n 个果实电阻的另一端连接于不同的每两个节间电阻 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm+n} 之间。

步骤 2 中，所述叶片电压满足下述公式：

$$E = \sum_{T=1,2,\dots,24} P_{\max} \times \left(1 - e^{\frac{-\varepsilon \times \text{PAR}(T)}{P_{\max}}}\right) \times A \times d,$$

其中， E 为叶片电压， $P_{\max}$ 为该叶片最大光合作用速率（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）， ε 为光转换因子即吸收光的初始光能利用效率（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} / \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ），依据试验观测数据， ε 取值为 0.40（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} / \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）， $P_{\max}$ 取值为 37（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）； $\text{PAR}(T)$ 为 T 时刻叶片吸收的光合有效辐射 PAR （单位： $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）， A 为叶片的叶面积（单位： m^2 ）； d 为植株密度，单位为株/平方米， T 为时刻，单位为小时。

所述叶片的叶面积的确定方法为：

步骤 a1、根据叶序确定叶片的最大叶长和叶片的平均生长速率，所述最大叶长满足下述公式：

$$L_{\max} = \begin{cases} 20 - 24 \times \exp\left(\frac{-i}{3}\right) & i \leq 9 \\ 14 + 8 \times \exp\left(\frac{-i}{20}\right) & i > 9 \end{cases},$$

所述叶片的平均生长速率满足下述公式:

$$V = \begin{cases} 1.2 \times \frac{i}{4+i} & i \leq 9 \\ 0.23 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases},$$

其中, $L_{\max}$ 为叶片的最大叶长, 最大叶长为叶片长成成熟叶时的最大长度; V 为叶片的平均生长速率; i 为叶序, 即从根部开始数所得到的叶片数 i , 此时温室番茄从营养生长进入营养生长与生殖生长并重时期;

步骤 a2、确定叶片的累积有效积温:

首先根据下述公式求得第一真叶展开至任一叶展开后第 n 天所需累积有效积温:

$$G = \sum(T_{\text{mean}} - T_b),$$

再根据下述公式求得第一真叶展开至任一叶展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温:

$$\Delta G_{rj} = G_j - G_r,$$

其中, G 为第一真叶展开至任一叶展开后第 n 天所需累积有效积温; T_{mean} 为一天的日平均温度; T_b 为界限温度, 为公知常识; ΔG_{rj} 为第一真叶展开至任一叶展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温; G_r 为第一真叶展开至任一叶展开后第 r 天所需累积有效积温, G_j 为第一真叶展开至任一叶展开后第 j 天所需累积有效积温;

步骤 a3、根据步骤 a1、a2 得到的叶片的最大叶长、叶片的平均生长速率和累积有效积温确定叶片的叶长, 满足下述公式下述:

$$L = \begin{cases} V \times \Delta G_{rj} & L < L_{\max} \\ L_{\max} & L \geq L_{\max} \end{cases},$$

其中, L 为叶片的叶长, $L_{\max}$ 为叶片的最大叶长, V 为叶片的平均生长速率, ΔG_{rj} 为叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温;

步骤 a4、根据步骤 a3 所得到的叶片的叶长确定叶片的叶面积, 满足下述公式:

$$A = K \times L^2 / 10000,$$

其中, A 为叶片的叶面积, L 为叶片的叶长。

所述叶片吸收的光合有效辐射 PAR 满足下述公式:

$$PAR = PAR_0 \times e^{-kAI},$$

其中, PAR_0 为叶片上方的光合有效辐射值, 属于公知常识; k 为消光系数, 取值 0.8; AI 为叶片上方的叶面积指数, 即以叶片上方叶面积乘以叶片密度。

步骤 2 中, 所述叶片电阻满足下述公式:

$$RL = R_m(T_{25}) \times W \times 2^{\frac{T-25}{10}},$$

其中, RL 为叶片电阻, $R_m(T_{25})$ 为 25℃ 时番茄的维持呼吸系数, $R_m(T_{25})$ 取值 0.015 ($\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM} \cdot \text{d}^{-1}$), W 为叶干重 ($\text{kg DM} \cdot \text{ha}^{-1}$), T 为每日平均温度 (℃)。

所述叶干重满足公式下述:

$$W = A \times S_A,$$

其中, W 为叶干重, A 为叶片的叶面积, S_A 为比叶面积, 取值 $40 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 。

步骤 2 中, 所述节间电阻满足下述公式:

$$R_s = \frac{C \times L_n}{\pi} \times \left(\frac{D_n}{2}\right)^2,$$

其中, R_s 为节间电阻, C 为节间电阻率, L_n 为节间长度, D_n 为节间直径。

所述节间长度的确定方法为:

步骤 b1、确定节间平均生长速率, 所述节间平均生长速率满足下述公式:

$$V_n = \begin{cases} 0.2 \times \frac{i}{8+i} & i \leq 9 \\ 0.01 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases},$$

其中, V_n 为节间平均生长速率, i 为叶序;

步骤 b2、根据步骤 b1 得到的叶片的累积有效积温和节间平均生长速率, 确定节间长度, 所述节间长度满足下述公式:

$$L_n = \begin{cases} V_n \times \Delta Gr_j & L_n \leq 6 \\ 6 & L_n > 6 \end{cases},$$

其中, L_n 为节间长度, V_n 为节间平均生长速率, ΔGr_j 为叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温。

所述节间直径的确定方法为:

步骤 c1、根据叶序确定节间直径的平均生长速率, 所述节间直径的平均生长速率满足下述公式:

$$V_{dn} = \begin{cases} 0.01 \times \frac{i}{8+i} & i \leq 9 \\ 0.002 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases},$$

其中, V_{dn} 为节间直径的平均生长速率, i 为叶序;

步骤 c2、根据叶片的累积有效积温和节间直径的平均生长速率确定节间直径, 所述节间直径满足下述公式:

$$D_n = \begin{cases} V_{dn} \times \Delta Gr_j & D_n \leq 1.5 \\ 1.5 & D_n > 1.5 \end{cases},$$

其中, D_n 为节间直径, V_{dn} 为节间直径的平均生长速率, ΔGr_j 为叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温。

所述节间电阻率的确定方法为:

根据节间直径和节间长度确定节间电阻率, 所述节间电阻率满足下述公式:

$$C = \frac{R_s * \pi \left(\frac{D_n}{2} \right)^2}{L_n},$$

其中, C 为节间电阻率, D_n 为节间直径, L_n 为节间长度。

所述果实电功率的具体推导过程为:

步骤 d1、对番茄植株进行转换: 对于拥有 m 叶枝和 n 果枝的番茄植株, 番茄叶片从根部开始, 向上依次称为叶 1、叶 2.....叶 m , 则叶 1、叶 2.....叶 m 分别为一个一个电池和电阻, 其电压分别为 E_1 、 E_2 E_m , 叶片电阻分别为 R_1 、 R_2 R_m ; 共有 $m+1$ 个节间, 其电阻分别称为 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm} 、 R_{sm+1} ; 有 n 个果枝, 分别称为 R_{f1} 、 R_{f2} R_{fn} ;

步骤 d2、根据叶片的最大叶长、叶片的平均生长速率、叶片展开后第 n 天的有效积温、叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温、叶片的叶长来预测各叶片的叶长, 根据节间电阻、节间平均生长速率、节间长度、节间直径的平均生长速率、节间直径求得各茎的节间长度和节间直径;

步骤 d3、根据叶片吸收的光合有效辐射 PAR 将采集到的温室内每小时的光合有效辐

射值计算出各叶片接受的光合有效辐射值，利用公式 1 计算叶片的电压；然后根据叶片的最大叶长、叶片的平均生长速率、叶片展开后第 n 天的有效积温、叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温、叶片的叶长、叶片的叶面积和叶片电阻计算各叶片的干重，即各叶片的电阻；以模拟出的茎的节间长度和节间直径和步骤 2 中获得的节间电阻率得到各节间电阻；

步骤 d4、利用叠加定理将电路分为 m 个子电路，分别求出 m 个子电路中果实电阻上的电流并求和，即得到可果实电阻上的实际电流，每个子电路中果枝上电流用戴维南定理求解；求出 m 个子电路上 R_f 的电流，然后相加，得到总电流，则果枝上的总功率采用总电流的平方乘以电阻，即可得到果枝在一天中的总电功率，即一天中获得的同化产物量。

步骤 4 中，所述温室番茄果实直径满足下述公式：

$$\text{当天的果实直径} = \sqrt[3]{0.025 \times (\text{前一天的果实直径})^3 + P},$$

$$\text{前一天的果实直径} = \sqrt[3]{0.025 \times (\text{前前一天的果实直径})^3 + P},$$

其中，P 为果实的电功率 P。

有益效果：

与传统的果实预测模型相比，本模型具有以下几个方面的优势：

第一、目前的温室番茄生长模型大多以源库理论来模拟温室番茄果实的生长，源库理论中库强，尤其是营养器官的库强很难以量化。本发明在压力-阻抗理论的基础上，提出了基于欧姆定律的温室番茄果实生长的预测模型，克服了营养器官库强难以量化的不足，为中国温室番茄生产中的环境调控、营养液管理和农艺措施提供理论依据。

第二、传统的温室番茄生长模型以作物生产为核心，而温室环境调控和营养液管理等程序的编写等大多是以电学为基础的来编写，这二者之间由于思维方式不同，造成作物生长模型在应用推广时带来诸多不便。而本发明是将温室番茄同化产物在植株间的分配以电的形式来体现，更有利于温室环境调控和营养液管理等程序编写。

第三、传统的温室番茄果实预测模型是基于番茄的生长过程建立的。而本发明专利是基于农学与电学的交叉的基础上建立的。具有很强的创新性。

附图说明

图 1 为步骤实施例 1 步骤 1 中的示意图，其中，图 A 为 9 叶 1 果的温室番茄植株示意图，图 B 为图 A 的温室番茄植株示意图转化而成的源库关系图，图 C 为由图 B 转化而

成的电路图； $RL_1 \sim RL_9$ 为第 1~9 叶片电阻； $Rs_1 \sim Rs_{10}$ 分别为第 1~10 节间电阻； $E_1 \sim E_9$ 为第 1~9 叶片电池； Rf_1 为第 1 果枝上的果实电阻。

图 2 为实施例 1 中，双杆整枝的番茄植株示意图；

图 3 中，图 A 为实施例 1 中双杆整枝的番茄植株等效电路图，图 B 为图 A 的简化电路图，图 C 为电流流向图；

图 4 中，图 A 为实施例 2 中番茄植株的示意图，图 B 为图 A 的等效电路图。

具体实施方式

下面结合附图和实施例对本发明作进一步描述：

实施例 1：

本发明中，果枝上的番茄果实的数量可以不只 1 个，当果实的数量大于 1 个时，假定所有果实的直径相等。

步骤 1、将番茄植株进行转换；首先将番茄植株依据源/库关系进行转换，即叶片为源和库（温室番茄生产中叶片用于光合作用生产，同时部分光合产物用于维持叶片消耗，即叶片的维持呼吸），茎和果实为库，转化为源库关系图。然后，以源为电源，库为电阻，将番茄植株转化为电路。下面以 9 叶 1 果（9 个叶枝，1 个果枝）温室番茄植株为例，对转化方式进行具体说明；首先选取 9 叶 1 果的温室番茄植株，然后依据源库关系进行转换，叶片均为源/库，茎和果实为库。然后以源为电池，库为电阻对温室番茄植株进行转换。转换后温室番茄植株上的叶片均转变为一个电阻加上一个电池，从根部向上，电阻依次被分别称为 RL_1 、 $RL_2 \sim RL_9$ ，电压依次被称为 E_1 、 $E_2 \sim E_9$ 。9 叶 1 果的温室番茄的茎由 10 个节间组成，则每个节间为一个电阻，从根部向上以此称为 $Rs_1 \sim Rs_{10}$ 。1 个果枝为一个电阻，称为 Rf_1 。本发明为了将这个转换过程做清晰的说明，选取了 9 叶 1 果的温室番茄，其他形式的番茄均可以以此进行转换。

也就是说：当番茄植株是一个 m 叶枝 n 果枝的植株时（ m 是 ≥ 1 的自然数， $n=0$ 或是 ≥ 1 的自然数），其转化的电路是：

将 m 叶枝中的每个叶枝均转变为一个叶片电阻 RL 串接一个叶片电池 E ，共 m 个叶片和 m 个叶片电池， m 个叶片电阻分别记为 RL_1 、 RL_2 、..... RL_m ， m 个叶片电池的电压分别记为 E_1 、 E_2 E_m ；

将每个果枝转变为一个果实电阻 Rf ，共有 n 个果实电阻， n 个果实电阻分别记为 Rf_1 、 Rf_2 Rf_n ；

m 叶枝 n 果枝的植株的茎由 $m+n$ 个节间组成，将每个节间转变为一个节间电阻 Rs ，

从根部向上的节间电阻 R_s 依次记为 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm+n} ，再将这 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm+n} 个节电阻依次串联；

每个叶片电阻 R_L 的一端串接一个叶片电池 E ，将每个叶片电阻 R_L 的另一端均连接于不同的每两个节间电阻 R_s 之间，将每个叶片电池 E 的另一端均接地；

将每个果实电阻 R_f 的一端接地，另一端均连接于不同的每两个节间电阻 R_s 之间，使每个果实电阻 R_f 的另一端与每个叶片电阻 R_L 另一端之间串接一个节间电阻 R_s ；

因此，共 m 个叶片电阻的另一端、共 n 个果实电阻的另一端连接于不同的每两个节间电阻 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm+n} 之间；

如上所述，便形成如图 1 所示的示意图。

步骤 2、利用温室内的相关条件以及步骤 1 中得到的电路，确定温室番茄植株的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻；

2.1、所述叶片电压满足公式 (1)：

$$E = \sum_{T=1,2,...,24} P_{\max} \times \left(1 - e^{\left(\frac{-\varepsilon \times \text{PAR}(T)}{P_{\max}}\right)}\right) \times A \times d \quad (1),$$

其中， E 为叶片电压， $P_{\max}$ 为该叶片最大光合作用速率（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）， ε 为光转换因子即吸收光的初始光能利用效率（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} / \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ），依据试验观测数据， ε 取值为 0.40（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} / \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）， $P_{\max}$ 取值为 37（单位： $\text{kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）； $\text{PAR}(T)$ 为 T 时刻叶片吸收的光合有效辐射 PAR （单位： $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）， A 为叶片的叶面积（单位： m^2 ）； d 为植株密度，单位为株/平方米， T 为时刻，单位为小时。

所述叶片的叶面积的确定方法为：

步骤 a1、根据叶序确定叶片的最大叶长和叶片的平均生长速率，所述最大叶长满足公式 (2)，所述叶片的平均生长速率满足公式 (3)：

$$L_{\max} = \begin{cases} 20 - 24 \times \exp\left(\frac{-i}{3}\right) & i \leq 9 \\ 14 + 8 \times \exp\left(\frac{-i}{20}\right) & i > 9 \end{cases} \quad (2),$$

$$V = \begin{cases} 1.2 \times \frac{i}{4+i} & i \leq 9 \\ 0.23 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases} \quad (3),$$

其中, $L_{\max}$ 为叶片的最大叶长, 最大叶长为叶片长成成熟叶时的最大长度; V 为叶片的平均生长速率; i 为叶序, 即从根部开始数所得到的叶片数 i , 此时温室番茄从营养生长进入营养生长与生殖生长并重时期;

步骤 a2、确定叶片的累积有效积温:

首先根据下述公式求得第一真叶展开至任一叶展开后第 n 天所需累积有效积温:

$$G = \sum (T_{\text{mean}} - T_b) \quad (4),$$

再根据下述公式求得第一真叶展开至任一叶展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温:

$$\Delta G_{rj} = G_j - G_r \quad (5),$$

其中, G 为第一真叶展开至任一叶展开后第 n 天所需累积有效积温; T_{mean} 为一天的日平均温度; T_b 为界限温度, 为公知常识; ΔG_{rj} 为第一真叶展开至任一叶展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温; G_r 为第一真叶展开至任一叶展开后第 r 天所需累积有效积温, G_j 为第一真叶展开至任一叶展开后第 j 天所需累积有效积温;

番茄各生育时期界限温度 T_b 的取值参见表 1:

表 1 番茄各生育时期界限温度 T_b 的取值

生育期	$T_b(^{\circ}\text{C})$
苗期	10
开花期	15
结果期	15
采收期	15

步骤 a3、根据步骤 a1、a2 得到的叶片的最大叶长、叶片的平均生长速率和累积有效积温确定叶片的叶长, 满足公式 (6):

$$L = \begin{cases} V \times \Delta G_{rj} & L < L_{\max} \\ L_{\max} & L \geq L_{\max} \end{cases} \quad (6),$$

其中, L 为叶片的叶长, $L_{\max}$ 为叶片的最大叶长, V 为叶片的平均生长速率, ΔG_{rj} 为叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温;

步骤 a4、根据步骤 a3 所得到的叶片的叶长确定叶片的叶面积, 满足公式 (7):

$$A = K \times L^2 / 10000 \quad (7),$$

其中, A 为叶片的叶面积; K 为比例系数, 无量纲; L 为叶片的叶长。

所述叶片吸收的光合有效辐射 PAR 满足公式 (8):

$$PAR = PAR_0 \times e^{-kAI} \quad (8),$$

其中, PAR_0 为叶片上方的光合有效辐射值, 属于公知常识; k 为消光系数, 取值 0.8; AI 为叶片上方的叶面积指数, 即以叶片上方叶面积乘以叶片密度。

2.2、叶片电阻 RL 的计算:

所述叶片电阻满足公式 (9):

$$RL = Rm(T_{25}) \times W \times 2^{\frac{T-25}{10}} \quad (9),$$

其中, RL 为叶片电阻, $Rm(T_{25})$ 为 25°C 时番茄的维持呼吸系数, $Rm(T_{25})$ 取值 $0.015 (\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM} \cdot \text{d}^{-1})$, W 为叶干重 ($\text{kg DM} \cdot \text{ha}^{-1}$), T 为每日平均温度 ($^\circ\text{C}$)。

所述叶干重满足公式 (10):

$$W = A \times S_A \quad (10),$$

其中, W 为叶干重, A 为叶片的叶面积, S_A 为比叶面积, 取值 $40 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 。

2.3、节间电阻 Rs 的计算:

所述节间电阻满足公式 (11):

$$Rs = \frac{C \times Ln}{\pi} \times \left(\frac{Dn}{2}\right)^2 \quad (11),$$

其中, Rs 为节间电阻, C 为节间电阻率, Ln 为节间长度, Dn 为节间直径。

所述节间长度的确定方法为:

步骤 b1、确定节间平均生长速率, 所述节间平均生长速率满足公式 (12):

$$V_n = \begin{cases} 0.2 \times \frac{i}{8+i} & i \leq 9 \\ 0.01 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases} \quad (12),$$

其中, V_n 为节间平均生长速率, i 为叶序;

步骤 b2、根据步骤 b1 得到的叶片的累积有效积温和节间平均生长速率, 确定节间长度, 所述节间长度满足公式 (13):

$$Ln = \begin{cases} V_n \times \Delta Gr_j & Ln \leq 6 \\ 6 & Ln > 6 \end{cases} \quad (13),$$

其中, Ln 为节间长度, V_n 为节间平均生长速率, ΔGr_j 为叶片展开后从第 r 天至第 j

天的累积有效积温。

所述节间直径的确定方法为：

步骤 c1、根据叶序确定节间直径的平均生长速率，所述节间直径的平均生长速率满足公式 (14)：

$$V_{dn} = \begin{cases} 0.01 \times \frac{i}{8+i} & i \leq 9 \\ 0.002 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases} \quad (14),$$

其中， V_{dn} 为节间直径的平均生长速率， i 为叶序；

步骤 c2、根据叶片的累积有效积温和节间直径的平均生长速率确定节间直径，所述节间直径满足公式 (15)：

$$D_n = \begin{cases} V_{dn} \times \Delta Gr_j & D_n \leq 1.5 \\ 1.5 & D_n > 1.5 \end{cases} \quad (15),$$

其中， D_n 为节间直径， V_{dn} 为节间直径的平均生长速率， ΔGr_j 为叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温。

2.4、节间电阻率 C 和果实电阻 R_f 的确定：

节间电阻率 C 和果实电阻 R_f 采用试验来确定。

2.4.1 试验设计

试验在温室中进行，供试温室作物为番茄，采用栽培桶栽培，栽培基质为珍珠岩。采用霍格兰营养液灌溉。番茄采用双杆整枝，分别为 A 杆和 B 杆。选取具代表性的植株 3 株进行测定。具体如下：

A 杆上留 4 片叶，在 B 杆第二节间处留果枝 1 个，果枝上留果实 2 个；B 杆不留叶片，如图 2 所示。

2.4.2 测定项目和方法

处理后第三天开始每天测定 A、B 杆中各节间长度、节间直径；叶片长度，果实直径。环境因子：所需要的温室和辐射资料由温室控制系统自动采集。

2.4.3 数据分析

(a) 首先利用测定的番茄双杆上的叶片长度，利用公式 (2)： $A = K \times L^2 / 10000$ ，计算温室番茄的单叶面积 A ，再利用公式 (11)： $W = A \times S_A$ ，计算出叶干重 W ，利用式 (1)：

$$E = \sum_{T=1,2,\dots,24}^{T=1,2,\dots,24} P_{\max} \times \left(1 - e^{\left(\frac{-\varepsilon \times \text{PAR}(T)}{P_{\max}}\right)}\right) \times A \times d \quad \text{计算出各叶片电压 } E, \text{ 利用公式}$$

(10): $RL = R_m(T_{25}) \times W \times 2^{(T-25)/10}$, 计算出各叶片电阻 RL 。

(b) 将试验中各处理进行转换, 将各处理转化为电路图模式。

(c) 依据测定的节间长、叶长和果实直径, 计算出节间干重、叶干重和果实干重。

节间干重 = 节间长度 $\times 0.11$ (16),

果实干重 = $0.025 \times \text{果实直径的立方}$ (17),

节间长度和果实直径可以通过直接测定获得。

(d) 依据公式 (7)、(16)、(17) 得到茎、叶、果干重减去前一天的茎、叶、果干重, 即可得到茎、叶、果的日增长量, 节间干重即茎的节间干重。

(e) 利用茎、叶、果日增长量为茎叶果的电功率, 求解果实电阻 R_f 和茎上各节间的电阻。

2.4.4 具体计算过程

测定的温室番茄叶长分别为 25、29、35、33cm, 叶片上方的光合有效辐射值和温度值见表 2, 利用公式 (1), 计算出每日的同化产物量 (即电压), 则在一天中的番茄各叶片的光合产物量分别为 7.31, 7.43, 8.01, 5.19 $\text{Kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。利用公式 (9) 计算出叶片维持呼吸量分别为 0.010, 0.0122, 0.018, 0.016 $\text{Kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (即叶片电阻)。则第 1、2、3、4 片叶的电压分别为 7.31, 7.43, 8.01, 5.19, 电阻分别为 0.010, 0.0122, 0.018, 0.016, 茎、叶、果日增长量分别为 6.25、7.25 和 10.75 Kg DM ha^{-1} , 则茎、叶、果的电功率为 6.25、7.25 和 10.75。其中四片叶片的增长量分别为 2.01、2.3、1.94 和 1 (实测值), 则四片叶片电功率分别为 2.01、2.3、1.94 和 1。

表 2 温室番茄光合有效辐射和温度

日期	时间	光合有效辐射 W/m^2	温度	日期	时间	光合有效辐射 W/m^2	温度
2015/5/9	1:00	0.0	17.7	2015/5/9	13:00	62.7	25.8
2015/5/9	2:00	0.0	17.8	2015/5/9	14:00	77.2	28.1
2015/5/9	3:00	0.0	17.8	2015/5/9	15:00	74.3	29.5
2015/5/9	4:00	0.0	17.7	2015/5/9	16:00	52.8	29.0
2015/5/9	5:00	0.0	17.5	2015/5/9	17:00	27.2	26.8
2015/5/9	6:00	0.9	17.6	2015/5/9	18:00	12.5	25.3
2015/5/9	7:00	5.0	17.9	2015/5/9	19:00	2.7	23.2

2015/5/9	8:00	21.6	19.4	2015/5/9	20:00	0.0	21.0
2015/5/9	9:00	33.2	20.9	2015/5/9	21:00	0.0	19.9
2015/5/9	10:00	52.7	23.7	2015/5/9	22:00	0.0	19.2
2015/5/9	11:00	46.9	25.1	2015/5/9	23:00	0.0	18.4
2015/5/9	12:00	41.8	24.9	2015/5/9	23:00	0.0	18.0

根据图 3 中的图 A 所示的等效电路图以及图 B 得到的简化电路图, 得到:

$$R' = (R_{S5} + R_f) / (R_{S6} + R_{S7} + R_{S8}) + R_{S1};$$

对于图 3 所示的电路图, 已知有: U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 R_{L1} 、 R_{L2} 、 R_{L3} 、 R_{L4} 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_f 、 P_s ; 求解, R_{S1} 、 R_{S2} 、 R_{S3} 、 R_{S4} 、 R_{S5} 、 R_{S6} 、 R_{S7} 、 R_{S8} 和 R_f ; 其中, $R_{L1} \sim R_{L4}$ 分别为 4 个叶片的叶片电阻, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 分别为 4 个叶片的电功率, P_f 为果实电功率, P_s 节间电功率。

$$\text{解: } I_1 = \sqrt{P_{R_{L1}} / R_{L1}}; \quad I_2 = \sqrt{P_{R_{L2}} / R_{L2}}; \quad I_3 = \sqrt{P_{R_{L3}} / R_{L3}}; \quad I_4 = \sqrt{P_{R_{L4}} / R_{L4}},$$

$$I_{S3} = I_3 + I_4 = \sqrt{P_{R_{L3}} / R_{L3}} + \sqrt{P_{R_{L4}} / R_{L4}},$$

$$I_{S2} = I_{S3} + I_2 = \sqrt{P_{R_{L2}} / R_{L2}} + \sqrt{P_{R_{L3}} / R_{L3}} + \sqrt{P_{R_{L4}} / R_{L4}},$$

$$I' = I_{S2} + I_1 = \sqrt{P_{R_{L1}} / R_{L1}} + \sqrt{P_{R_{L2}} / R_{L2}} + \sqrt{P_{R_{L3}} / R_{L3}} + \sqrt{P_{R_{L4}} / R_{L4}},$$

$$R_{S4} = U_{R_{S4}} / I_4 = \frac{U_4 - U_3 + I_4 \cdot R_{L4} - I_3 \cdot R_{L3}}{I_4},$$

$$R_{S3} = U_{R_{S3}} / I_{S3} = \frac{U_3 - U_2 + I_3 \cdot R_{L3} - I_2 \cdot R_{L2}}{I_{S3}},$$

$$R_{S2} = U_{R_{S2}} / I_{S2} = \frac{U_2 - U_1 + I_2 \cdot R_{L2} - I_1 \cdot R_{L1}}{I_{S2}},$$

$$R' = \frac{U_{R'}}{I'} = \frac{U_1 + I_1 \cdot R_{L1}}{I'} ;$$

将已知的 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 R_{L1} 、 R_{L2} 、 R_{L3} 、 R_{L4} 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的值代入上述公式中，即可得到 R_{s2} 、 R_{s3} 、 R_{s4} ，分别为 0.092、0.052、0.096。利用测定得到的第 2、3、4 节间的节间直径和节间长度，利用下面公式 (18) 计算第 2、3、4 节间的电阻率。

$$C = \frac{R_s * \pi \left(\frac{D_n}{2} \right)^2}{L_n} \quad (18),$$

其中， C 为节间电阻率， D_n 为节间直径， L_n 为节间长度。

然后取平均值，得到节间的平均电阻率。依据得到的平均电阻率和节间 1、5、6、7、8 的节间长度和节间直径，再根据公式 (11) 计算出节间 1、5、6、7、8 的节间电阻。然后计算出的 R' 的值，最终计算出果实电阻 R_f 。

表 3 为依据环境因子计算出的温室番茄电参数：

表 3 依据环境因子计算出的温室番茄电参数

	电参数			
叶序	1	2	3	4
电压	7.307267941	9.832659741	10.82321422	9.621616562
电阻	0.009088934	0.012230069	0.01781431	0.015836558
电功率	3	2.25	1	1
节间长度	0.06	0.06	0.04	0.06
节间直径	0.015	0.013	0.011	0.013
叶片电流	18.167876	13.56365702	7.492305784	7.946384922
茎电流	18.167876	22.93099649	15.43869071	7.946384922
茎节间电阻	0.110163099	0.110163099	0.06206098	0.152172912
茎节间电阻率	0.000242473			
果实电阻	0.1448			

步骤 3、利用确定的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻，利用欧姆定律，计算果实两端的电压和电流，得到果实的功率。

对于 m 叶枝、 n 果枝的番茄植株，依据转化后的电路图。首先利用温度和辐射计算出叶片电压和叶片电阻，然后利用有效积温计算出各节间的长度和直径，利用步骤 2 中得到的节间电阻率，计算出各节间电阻值和果实电阻。然后求出各果枝的电流，计算各果枝电流的电功率。各果枝电流的电功率即为果枝获得的日同化产物量。进而推导出果实的鲜重的日增长量，最终得到果实的直径和鲜重的日增长量。

其中, 果实鲜重 $=0.5 \times$ 果实直径的立方。

具体如下:

对番茄植株进行转换。对于拥有 m 叶枝和 n 果枝的番茄植株, 番茄叶片从根部开始, 向上依次称为叶 1、叶 2.....叶 m , 则叶 1、叶 2.....叶 m 分别为一个一个电池和电阻, 其电压分别为 E_1 、 E_2 E_m , 叶片电阻分别为 R_1 、 R_2 R_m 。共有 $m+1$ 个节间, 其电阻分别称为 R_{s1} 、 R_{s2} R_{sm} 、 R_{sm+1} 。有 n 个果枝, 分别称为 R_{f1} 、 R_{f2} R_{fn} 。

利用公式 (2) ~ (6) 预测各叶片的叶长, 利用公式 (11) ~ (15) 求得各茎的节间长度和节间直径。

利用公式 (8) 将采集到的温室内每小时的光合有效辐射值计算出各叶片接受的光合有效辐射值, 利用公式 1 计算叶片的电压。然后利用公式 (2) ~ (7) 和 (9) 计算各叶片的干重, 即各叶片的电阻。以模拟出的茎的节间长度和节间直径和步骤 2 中获得的节间电阻率利用公式 (11) 得到各节间电阻。

利用叠加定理将电路分为 m 个子电路, 分别求出 m 个子电路中果实电阻上的电流并求和, 即得到可果实电阻上的实际电流, 每个子电路中果枝上电流用戴维南定理求解。求出 m 个子电路上 R_f 的电流, 然后相加, 得到总电流, 则果枝上的总功率采用总电流的平方乘以电阻, 即可得到果枝在一天中的总电功率, 即一天中获得的同化产物量。

步骤 4、利用步骤 3 得到的果实的电功率 P , 即温室番茄果实一天中所得到的同化产物量。然后依据果实得到的同化产物量求得果实直径。具体如下:

果实鲜重 $=0.5 \times$ 果实直径立方,

当天的果实直径 $=\sqrt[3]{0.025 \times (\text{前一天的果实直径})^3 + P}$,

前一天的果实直径 $=\sqrt[3]{0.025 \times (\text{前前一天的果实直径})^3 + P}$,

其中, P 为果实的电功率 P 。

结果第一天的果实直径取值为 1.5 厘米。

实施例 2:

对实施例 1 中的步骤 3 进行举例, 如图 4:

对番茄植株进行转换。为简化起见, 选取 3 叶 1 果 (3 个叶枝和 1 个果枝) 的温室番茄植株, 番茄叶片从根部向上分别为叶 1、叶 2、叶 3。则叶 1、叶 2、叶 3 分别为一个电池和电阻, 其电压分别为 E_1 、 E_2 、 E_3 , 叶片电阻分别为 R_{L1} 、 R_{L2} 、 R_{L3} 。共有 4 个节间, 其电阻分别称为 R_{s1} 、 R_{s2} 、 R_{s3} 和 R_{s4} , 果枝为一个电阻, 称为 R_f 。

依据模型预测得到的叶片长度分别为 25、29、35cm，依据公式 (1)、(3) 和 (8)，光合有效辐射和温度依然采用表 2 中的环境数据，再结合表 4 中的数据得到叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻 R_f 。

表 4 温室番茄植株电参数

电参数			
叶序	1	2	3
叶电压	7.307267941	9.832659741	10.82321422
叶电阻	0.009088934	0.012230069	0.01781431
节间长	0.06	0.06	0.04
节间直径	0.015	0.013	0.011
茎电阻	0.082368747	0.109662533	0.102110017
果实电阻	0.1448		

权 利 要 求 书

1.一种预测温室番茄果实生长的方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1、首先，以番茄植株的叶片为源和库，茎和果实为库，转化为源库关系；然后，以源为电源，库为电阻，将番茄植株依据源/库关系转化为电路；

步骤 2、利用温室内的相关条件以及步骤 1 中得到的电路，确定温室番茄植株的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻；

步骤 3、结合步骤 1 得到的电路，再根据确定的叶片电压、叶片电阻、节间电阻和果实电阻，利用欧姆定律，计算果实两端的电压和电流，得到果实的电功率，果实的电功率值即为温室番茄果实一天内获得的同化产物量值；

步骤 4、将得到的温室番茄果实的同化产物量转化为温室番茄果实直径。

2.根据权利要求 1 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法，其特征在于，所述将番茄植株依据源/库关系转化为电路的具体过程为：

当番茄植株是一个 m 叶枝 n 果枝的植株时， m 是 ≥ 1 的自然数， $n=0$ 或是 ≥ 1 的自然数，其转化的电路是：

将 m 叶枝中的每个叶枝均转变为一个叶片电阻 RL 串接一个叶片电池 E ，共 m 个叶片和 m 个叶片电池， m 个叶片电阻分别记为 $RL1$ 、 $RL2$ 、..... RLm ， m 个叶片电池的电压分别记为 $E1$ 、 $E2$ Em ；

将每个果枝转变为一个果实电阻 Rf ，共有 n 个果实电阻， n 个果实电阻分别记为 $Rf1$ 、 $Rf2$ Rfn ；

m 叶枝 n 果枝的植株的茎由 $m+n$ 个节间组成，将每个节间转变为一个节间电阻 Rs ，从根部向上的节间电阻 Rs 依次记为 $Rs1$ 、 $Rs2$ $Rsm+n$ ，再将这 $Rs1$ 、 $Rs2$ $Rsm+n$ 个节电阻依次串联；

每个叶片电阻 RL 的一端串接一个叶片电池 E ，将每个叶片电阻 RL 的另一端均连接于不同的每两个节间电阻 Rs 之间，将每个叶片电池 E 的另一端均接地；

将每个果实电阻 Rf 的一端接地，另一端均连接于不同的每两个节间电阻 Rs 之间，使每个果实电阻 Rf 的另一端与每个叶片电阻 RL 另一端之间串接一个节间电阻 Rs ；

因此，共 m 个叶片电阻的另一端、共 n 个果实电阻的另一端连接于不同的每两个节间电阻 $Rs1$ 、 $Rs2$ $Rsm+n$ 之间。

3.根据权利要求 1 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法，其特征在于，步骤 2 中，所述叶片电压满足下述公式：

$$E = \sum_{T=1,2,\dots,24} P_{\max} \times (1 - e^{\frac{-\varepsilon \times \text{PAR}(T)}{P_{\max}}}) \times A \times d,$$

其中, E 为叶片电压, $P_{\max}$ 为该叶片最大光合作用速率; ε 为光转换因子; $\text{PAR}(T)$ 为 T 时刻叶片吸收的光合有效辐射 PAR ; A 为叶片的叶面积; d 为植株密度; T 为时刻。

4. 根据权利要求 3 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法, 其特征在于, 所述叶片的叶面积的确定方法为:

步骤 a1、根据叶序确定叶片的最大叶长和叶片的平均生长速率, 所述最大叶长满足下述公式:

$$L_{\max} = \begin{cases} 20 - 24 \times \exp\left(\frac{-i}{3}\right) & i \leq 9 \\ 14 + 8 \times \exp\left(\frac{-i}{20}\right) & i > 9 \end{cases},$$

所述叶片的平均生长速率满足下述公式:

$$V = \begin{cases} 1.2 \times \frac{i}{4+i} & i \leq 9 \\ 0.23 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases},$$

其中, $L_{\max}$ 为叶片的最大叶长; V 为叶片的平均生长速率; i 为叶序;

步骤 a2、确定叶片的累积有效积温:

首先根据下述公式求得第一真叶展开至任一叶展开后第 n 天所需累积有效积温:

$$G = \sum (T_{\text{mean}} - T_b),$$

再根据下述公式求得第一真叶展开至任一叶展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温:

$$\Delta G_{rj} = G_j - G_r,$$

其中, G 为第一真叶展开至任一叶展开后第 n 天所需累积有效积温; T_{mean} 为一天的日平均温度; T_b 为界限温度, 为公知常识; ΔG_{rj} 为第一真叶展开至任一叶展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温; G_r 为第一真叶展开至任一叶展开后第 r 天所需累积有效积温, G_j 为第一真叶展开至任一叶展开后第 j 天所需累积有效积温;

步骤 a3、根据步骤 a1、a2 得到的叶片的最大叶长、叶片的平均生长速率和累积有效积温确定叶片的叶长, 满足下述公式下述:

$$L = \begin{cases} V \times \Delta G_{rj} & L < L_{\max} \\ L_{\max} & L \geq L_{\max} \end{cases},$$

其中, L 为叶片的叶长;

步骤 a4、根据步骤 a3 所得到的叶片的叶长确定叶片的叶面积, 满足下述公式:

$$A=K \times L^2 / 10000,$$

其中, K 为比例系数。

5. 根据权利要求 3 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法, 其特征在于, 所述叶片吸收的光合有效辐射 PAR 满足下述公式:

$$PAR=PAR_0 \times e^{-kAI},$$

其中, PAR₀ 为叶片上方的光合有效辐射值; k 为消光系数; AI 为叶片上方的叶面积指数。

6. 根据权利要求 1 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法, 其特征在于, 步骤 2 中, 所述叶片电阻满足下述公式:

$$RL = Rm(T_{25}) \times W \times 2^{\frac{T-25}{10}},$$

其中, RL 为叶片电阻, Rm(T₂₅) 为 25℃ 时番茄的维持呼吸系数; W 为叶干重; T 为每日平均温度;

所述叶干重满足公式下述:

$$W=A \times S_A,$$

其中, A 为叶片的叶面积; S_A 为比叶面积。

7. 根据权利要求 1 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法, 其特征在于, 步骤 2 中, 所述节间电阻满足下述公式:

$$Rs = \frac{C \times Ln}{\pi} \times \left(\frac{Dn}{2}\right)^2,$$

其中, Rs 为节间电阻; C 为节间电阻率; Ln 为节间长度; Dn 为节间直径。

8. 根据权利要求 7 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法, 其特征在于, 所述节间长度的确定方法为:

步骤 b1、确定节间平均生长速率, 所述节间平均生长速率满足下述公式:

$$Vn = \begin{cases} 0.2 \times \frac{i}{8+i} & i \leq 9 \\ 0.01 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases},$$

其中, Vn 为节间平均生长速率; i 为叶序;

步骤 b2、根据步骤 b1 得到的叶片的累积有效积温和节间平均生长速率，确定节间长度，所述节间长度满足下述公式：

$$L_n = \begin{cases} V_n \times \Delta Gr_j & L_n \leq 6 \\ 6 & L_n > 6 \end{cases},$$

其中， L_n 为节间长度； V_n 为节间平均生长速率； ΔGr_j 为叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温；

所述节间直径的确定方法为：

步骤 c1、根据叶序确定节间直径的平均生长速率，所述节间直径的平均生长速率满足下述公式：

$$V_{dn} = \begin{cases} 0.01 \times \frac{i}{8+i} & i \leq 9 \\ 0.002 \times \frac{i}{i-9} & i > 9 \end{cases},$$

其中， V_{dn} 为节间直径的平均生长速率， i 为叶序；

步骤 c2、根据叶片的累积有效积温和节间直径的平均生长速率确定节间直径，所述节间直径满足下述公式：

$$D_n = \begin{cases} V_{dn} \times \Delta Gr_j & D_n \leq 1.5 \\ 1.5 & D_n > 1.5 \end{cases},$$

其中， D_n 为节间直径； V_{dn} 为节间直径的平均生长速率； ΔGr_j 为叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温；

所述节间电阻率的确定方法为：

根据节间直径和节间长度确定节间电阻率，所述节间电阻率满足下述公式：

$$C = \frac{R_s * \pi \left(\frac{D_n}{2} \right)^2}{L_n},$$

其中， C 为节间电阻率； D_n 为节间直径； L_n 为节间长度。

9. 根据权利要求 1 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法，其特征在于，步骤 3 中，所述果实电功率的具体推导过程为：

步骤 d1、对番茄植株进行转换：对于拥有 m 叶枝和 n 果枝的番茄植株，番茄叶片从根部开始，向上依次称为叶 1、叶 2……叶 m ，则叶 1、叶 2……叶 m 分别为一个一个电池和电阻，其电压分别为 E_1 、 E_2 …… E_m ，叶片电阻分别为 R_1 、 R_2 …… R_m ；共有 $m+1$ 个节间，其电阻分别称为 R_{s1} 、 R_{s2} …… R_{sm} 、 R_{sm+1} ；有 n 个果枝，分别称为 R_{f1} 、

Rf2.....Rfn;

步骤 d2、根据叶片的最大叶长、叶片的平均生长速率、叶片展开后第 n 天的有效积温、叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温、叶片的叶长来预测各叶片的叶长，根据节间电阻、节间平均生长速率、节间长度、节间直径的平均生长速率、节间直径求得各茎的节间长度和节间直径；

步骤 d3、根据叶片吸收的光合有效辐射 PAR 将采集到的温室内每小时的光合有效辐射值计算出各叶片接受的光合有效辐射值，利用公式 1 计算叶片的电压；然后根据叶片的最大叶长、叶片的平均生长速率、叶片展开后第 n 天的有效积温、叶片展开后从第 r 天至第 j 天的累积有效积温、叶片的叶长、叶片的叶面积和叶片电阻计算各叶片的干重，即各叶片的电阻；以模拟出的茎的节间长度和节间直径和步骤 2 中获得的节间电阻率得到各节间电阻；

步骤 d4、利用叠加定理将电路分为 m 个子电路，分别求出 m 个子电路中果实电阻上的电流并求和，即得到可果实电阻上的实际电流，每个子电路中果枝上电流用戴维南定理求解；求出 m 个子电路上 Rf 的电流，然后相加，得到总电流，则果枝上的总功率采用总电流的平方乘以电阻，即可得到果枝在一天中的总电功率，即一天中获得的同化产物量。

10.根据权利要求 1 所述的一种预测温室番茄果实生长的方法，其特征在于，步骤 4 中，所述温室番茄果实直径满足下述公式：

$$\text{当天的果实直径} = \sqrt[3]{0.025 \times (\text{前一天的果实直径})^3 + P},$$

$$\text{前一天的果实直径} = \sqrt[3]{0.025 \times (\text{前前一天的果实直径})^3 + P},$$

其中，P 为果实的电功率 P。

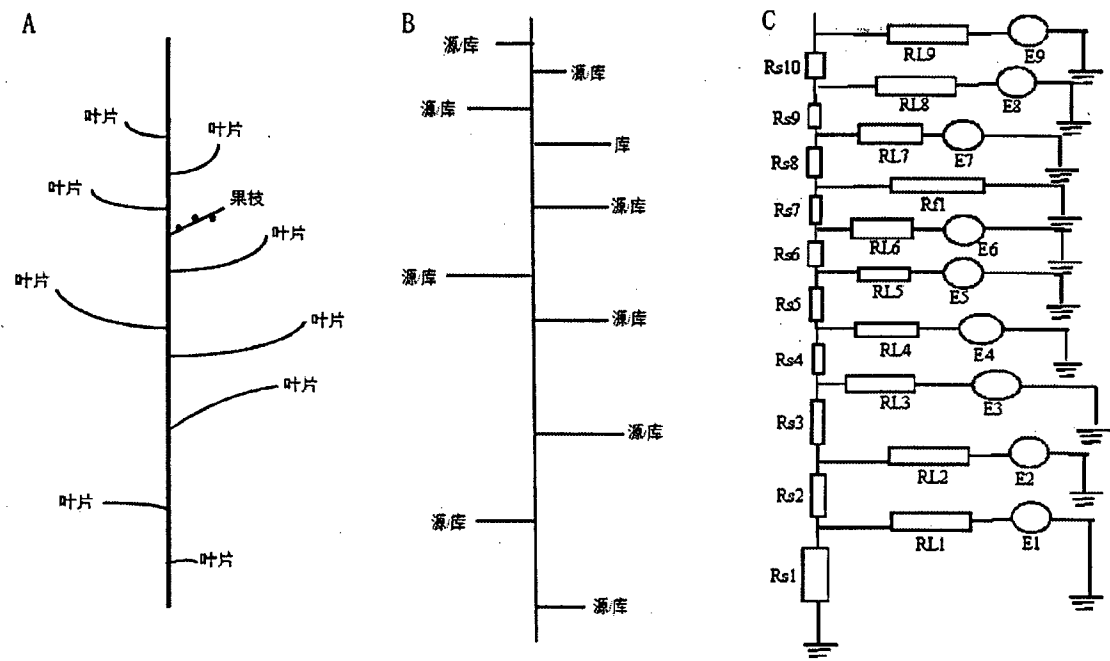


图 1

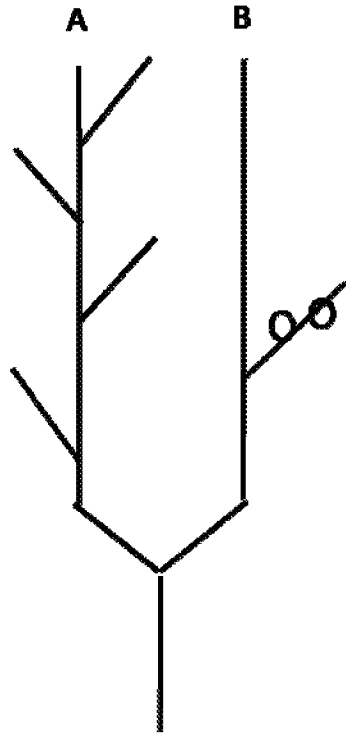


图 2

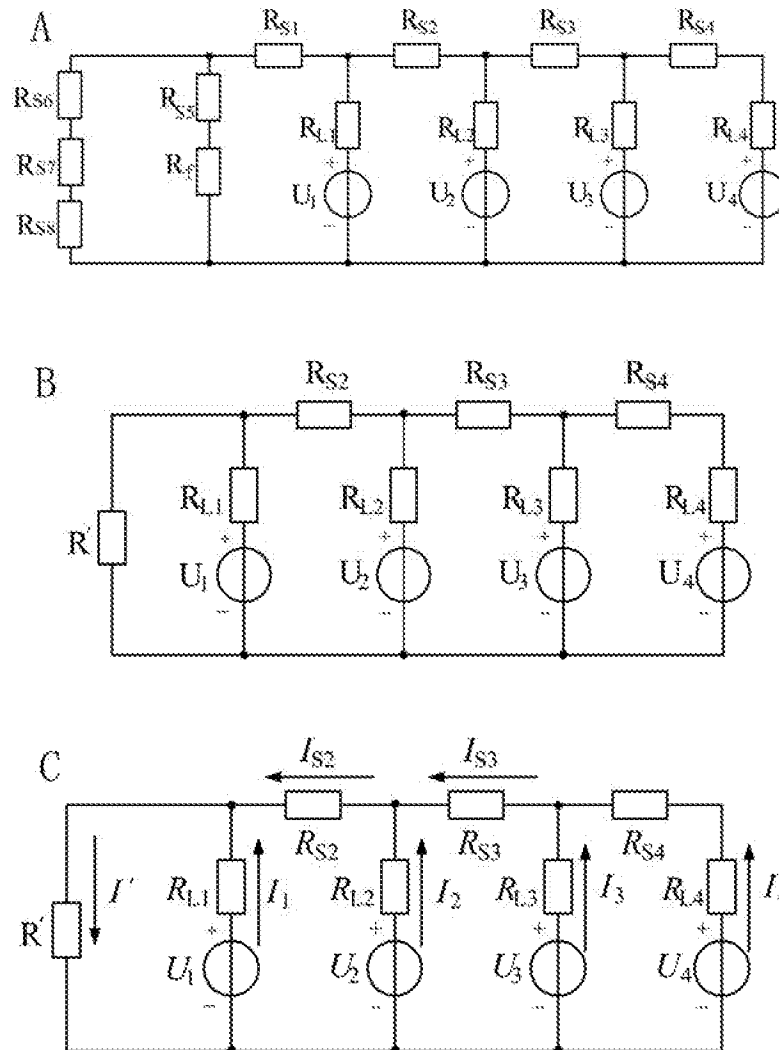


图 3

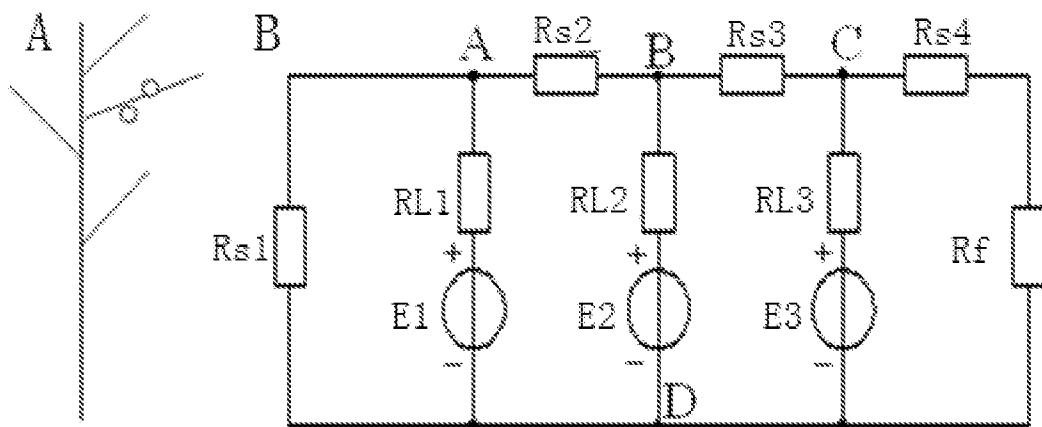


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/110906

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06Q 10/04 (2012.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06Q; G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 预测, 模拟, 植物, 植株, 番茄, 果实, 生长, 源库, 叶片, 电源, 电阻, 电功率, predict+, simulat+, model+, vegetable, tomato, fruit, growth, source, sink, leaf, leaves, resistance?, electric power

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	朱晋宇等. 基于源库生长单位的温室番茄干物质生产-分配模拟. 生态学报. 31 December 2009 (31.12.2009), 29(12), ISSN: 1000-0933, pages 6527-6533. (ZHU, Jinyu et al. Simulation of dry matter production and partitioning based on source-sink growth unit in greenhouse tomato. Acta Ecologica Sinica.)	1-10
A	CN 101950321 A (SHENYANG AGRICULTURAL UNIVERSITY) 19 January 2011 (19.01.2011), entire document	1-10
A	CN 104268387 A (NANJING UNIVERSITY OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOG) 07 January 2015 (07.01.2015), entire document	1-10
A	CN 105912884 A (JIANGSU UNIVERSITY) 31 August 2016 (31.08.2016), entire document	1-10
A	E. HEUVELINK. Evaluation of A Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development. Annals of Botany. 01 April 1999 (01.04.1999), 83(4), ISSN: 0305-7364, pages 413-422	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 07 August 2017	Date of mailing of the international search report 30 August 2017
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer LIN, Wanjuan Telephone No. (86-10) 82246854

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2016/110906

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 101950321 A	19 January 2011	None	
CN 104268387 A	07 January 2015	None	
CN 105912884 A	31 August 2016	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/110906

A. 主题的分类 G06Q 10/04 (2012.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06Q, G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 预测, 模拟, 植物, 植株, 番茄, 果实, 生长, 源库, 叶片, 电源, 电阻, 电功率, predict+, simulat+, model+, vegetable, tomato, fruit, growth, source, sink, leaf, leaves, resistance?, electric power																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>朱晋宇 等. "基于源库生长单位的温室番茄干物质生产-分配模拟" 生态学报, 第29卷, 第12期, 2009年 12月 31日 (2009 - 12 - 31), ISSN: 1000-0933, 第6527-6533页</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 101950321 A (沈阳农业大学) 2011年 1月 19日 (2011 - 01 - 19) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104268387 A (南京信息工程大学) 2015年 1月 7日 (2015 - 01 - 07) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105912884 A (江苏大学) 2016年 8月 31日 (2016 - 08 - 31) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>E. HEUVELINK. "Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development" Annals of Botany, 第83卷, 第4期, 1999年 4月 1日 (1999 - 04 - 01), ISSN: 0305-7364, 第413-422页</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	朱晋宇 等. "基于源库生长单位的温室番茄干物质生产-分配模拟" 生态学报, 第29卷, 第12期, 2009年 12月 31日 (2009 - 12 - 31), ISSN: 1000-0933, 第6527-6533页	1-10	A	CN 101950321 A (沈阳农业大学) 2011年 1月 19日 (2011 - 01 - 19) 全文	1-10	A	CN 104268387 A (南京信息工程大学) 2015年 1月 7日 (2015 - 01 - 07) 全文	1-10	A	CN 105912884 A (江苏大学) 2016年 8月 31日 (2016 - 08 - 31) 全文	1-10	A	E. HEUVELINK. "Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development" Annals of Botany, 第83卷, 第4期, 1999年 4月 1日 (1999 - 04 - 01), ISSN: 0305-7364, 第413-422页	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
A	朱晋宇 等. "基于源库生长单位的温室番茄干物质生产-分配模拟" 生态学报, 第29卷, 第12期, 2009年 12月 31日 (2009 - 12 - 31), ISSN: 1000-0933, 第6527-6533页	1-10																		
A	CN 101950321 A (沈阳农业大学) 2011年 1月 19日 (2011 - 01 - 19) 全文	1-10																		
A	CN 104268387 A (南京信息工程大学) 2015年 1月 7日 (2015 - 01 - 07) 全文	1-10																		
A	CN 105912884 A (江苏大学) 2016年 8月 31日 (2016 - 08 - 31) 全文	1-10																		
A	E. HEUVELINK. "Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development" Annals of Botany, 第83卷, 第4期, 1999年 4月 1日 (1999 - 04 - 01), ISSN: 0305-7364, 第413-422页	1-10																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																				
国际检索实际完成的日期 2017年 8月 7日		国际检索报告邮寄日期 2017年 8月 30日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		受权官员 林婉娟 电话号码 (86-10) 82246854																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/110906

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	101950321	A	2011年 1月 19日	无	
CN	104268387	A	2015年 1月 7日	无	
CN	105912884	A	2016年 8月 31日	无	