

# 名优绿茶仿生采摘指研制

## Development of a bionic plucking finger for high-quality green tea

郝淼 陈勇 潘志刚 孙烨

HAO Miao CHEN Yong PAN Zhi-gang SUN Ye

(南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

(Nanjing Forestry University, College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

**摘要:**提出了一种能够模仿人工“提手采”动作的仿生采摘指结构,并完成了采摘指的结构设计。为了提高采摘指的灵巧性和结构紧凑性,对采摘指进行了运动学和静力学分析,通过遗传算法对结构几何参数进行了优化,使得驱动力的传递效率提高了 26.6%。在此基础上制作了采摘指原理样机,并完成了气力驱动与控制系统的的设计,室内初步试验结果表明:采摘成功率近 70%,能够实现预期动作。

**关键词:**名优绿茶;仿生采摘;遗传算法;运动学分析;气动控制

**Abstract:** Presents a kind of bionic end-effector which can imitate the human hand to pluck tea flushes. The mechanical structure of the bionic plucking finger is designed. Dynamic and static analysis are carried out to improve the dexterity and compactness. Genetic algorithm is employed to optimize the geometric parameters. The transmission efficiency of driving force is increased by 26.6%. Then, the prototype of the bionic plucking fingers is made, and the design of pneumatic drive and control system is completed. The indoor tests show that the success rate of plucking is about 70%, which can realize the expected action.

**Keywords:** high-quality green tea; bionic plucking; genetic algorithm; dynamic analysis; pneumatic control

高档名优绿茶对所选取的芽叶非常讲究,其鲜叶的采摘标准一般为一芽一叶、一芽两叶,而且还要保证叶片的完整性。现有的采茶机均基于剪切式原理工作,这种采摘方式对新梢嫩芽没有选择性,机采后鲜叶匀整度较差,不符合名优绿茶生产的要求。因此,制作名优绿茶的鲜叶国内外目前无一例外地只能靠人工采摘。但是人工采茶劳动强度大、工作效率低,而且采摘不及时会严重地影响茶叶质量和茶树下一

轮新梢的生长<sup>[1]</sup>。如何解决名优茶生产中的采摘难是茶叶生产中最为迫切的问题<sup>[2]</sup>。自动化采摘是茶园亟需的一种工作效率高,又能适用于采摘制作高档名优绿茶鲜叶的采摘模式。实现自动化采茶,首先必须解决的是茶树新梢的智能化识别与高速仿生采摘等关键问题。

近年已有学者开始了基于计算机视觉的新梢智能识别研究,四川农业大学<sup>[3-5]</sup>研究了基于颜色和区域生长的茶叶嫩芽识别方法,在 HSI 空间研究了结合颜色和区域生长的茶叶图像分割算法。浙江大学<sup>[6-7]</sup>研究了名优茶机采分级技术,并对茶叶新梢生育过程中的节间和展叶角度变化进行了研究。南京林业大学<sup>[8-10]</sup>基于新梢颜色、形态等特征,综合应用机器视觉、光栅投影三维测量、并联机器人等技术,结合茶园农艺研发了对新梢嫩芽有选择性采摘的机器人。浙江工业大学<sup>[11-12]</sup>开展了基于机器视觉的乘用式采茶机研究,利用茶叶绿色最大差别法获取 RGB 阈值进行机器视觉采摘的研发。由于新梢只是同一植株的不同部位,而且茶园自然背景极其复杂,所以新梢识别尚处于探索阶段。另外,文献检索表明,目前国内外尚无适用于名优绿茶智能化采茶的末端执行器研究报道。

基于高档名优绿茶采摘要求,本研究创新性地设计了用于采茶机器人的、能够模仿人工“提手采”动作的仿生采摘指。该仿生采摘指的工作原理是通过定位、固定、提拉等动作将新梢嫩芽的茎拉断,并由气力驱动。基于新梢嫩芽形态与力学特性,不仅要求采摘指各杆件之间力的传递效率高,而且要求采摘指结构紧凑、小巧,因此本设计拟采用遗传算法对采摘指结构进行优化设计。

## 1 仿生采摘指设计模型

### 1.1 仿生采摘指设计模型

根据对龙井 43(江苏鑫品茶业有限公司)新梢形态与力学参数测量,确定第一节间距(图 1 中 A、B 两点间距)为 4~6 mm。基于“提手采”动作要领分析以及新梢形态与力学参数测量结果,本研究设计了仿生采摘指的三维模型,如图 2 所示。

**基金项目:**国家重点研发计划(编号:2016YFD0701501)

**作者简介:**郝淼,女,南京林业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**陈勇(1965—),男,南京林业大学教授,博士生导师,博士。

E-mail:chenyongjsnj@163.com

**收稿日期:**2018-06-22

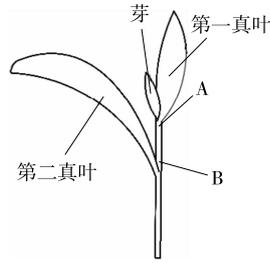


图1 茶叶新梢

Figure 1 The tea shoot

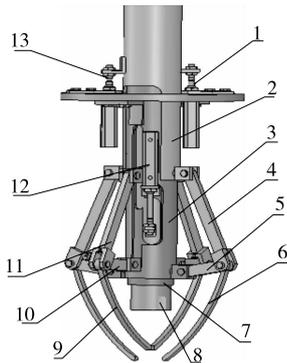


图2 仿生采摘指的三维模型

Figure 2 The three-dimensional model of the bionic plucking fingers

在仿生采摘指中,上连杆4、内连杆5、下连杆6组成支链1;上连杆11、内连杆10、下连杆9组成支链2。2个支链1组成夹指1;2个支链2组成夹指2。仿生采摘指对A、B2点的夹持则由2个夹指完成,2夹指垂直分布。

仿生采摘指的工作过程为:B点夹持气缸带动外层套运动驱动夹指1实现对新梢上B点的夹持,A点夹持气缸带动里层套运动驱动夹指2实现对新梢上A点的夹持,提拉气缸驱动芯轴运动,使得被夹紧的A点向上移动,从而实现一芽一叶的采摘。

### 1.2 支链结构参数设定

基于茶园测量新梢的力学特性以及形态特征参数确定:夹紧力设定为40 N能够保证采摘时既不打滑又不将新梢的茎夹断;支链指端距采摘指轴线最小距离 $\delta_{min}=1$  mm,最大距离 $\delta_{max}=20$  mm,支链工作区间如图3所示;支链的设计尺寸参数初步设定为: $L_1=72$  mm, $L_2=38$  mm, $L_3=87$  mm, $\theta_0=60^\circ$ ,如图4所示。

## 2 支链分析与计算模型

### 2.1 支链运动学分析

为了使得采摘指结构更加紧凑,采摘力传递效率更高,采用遗传算法对采摘指的支链进行优化。因2对支链工作原理相同,现取1对支链进行分析。又根据对称原则,仅取1对支链的左半部分分析,如图5所示。支链在整个运动范围内,中间参数 $\theta$ 转角变化范围是 $[\theta_{begin}, \theta_{end}]$ 。当支链处于工

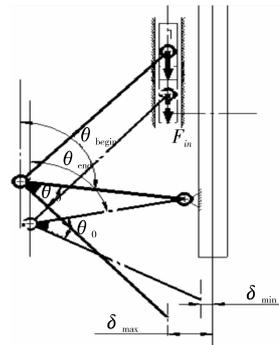


图3 支链工作区间分析

Figure 3 Analysis of the working interval

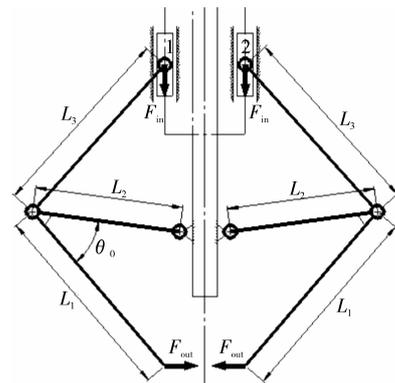


图4 支链的结构参数

Figure 4 The structure parameters of the branch of the branch

作区间的边界位置时,由支链工作区间分析与图5所示支链简图分析可得:

$$\theta_{begin} = \pi - \theta_0 - \arcsin\left(\frac{L_3 \sin\theta_2 - \delta_{min}}{L_1}\right), \quad (1)$$

$$\theta_{end} = \pi - \theta_0 - \arcsin\left(\frac{L_3 \sin\theta_2 - \delta_{max}}{L_1}\right). \quad (2)$$

对连杆滑动机构进行运动学分析。如图6所示:

$$L_2 \times e^{-i\theta} + L_3 \times e^{-i\theta_2} = S + L_3 \sin\theta_2 \times e^{-\pi/i}. \quad (3)$$

采用欧拉公式变换为:

$$L_2 \times \cos\theta + L_3 \cos\theta_2 = S, \quad (4)$$

$$L_2 \sin\theta = L_3 \sin\theta_2. \quad (5)$$

求解得:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{L_2 \sin\theta}{L_3}\right), \quad (6)$$

$$S = L_2 \times \cos\theta + L_3 \cos\theta_2. \quad (7)$$

为了避免遗传算法未知参数过多,由式(7)可得到 $\theta_2$ 的表达式,以此作为替换未知约束参数,S则为支链优化模型约束条件。

### 2.2 支链受力分析

对左半部分支链整体分析,如图7所示。

可以将 $F_{ext}$ 移到C点处,并增加力矩 $M_{ext}$ ,由于 $F_{ext}$ 与 $M_{ext}$ 具有线性关系, $M_{ext} = F_{ext} \times L_1 \cos\beta$ 。则可以通过求解滑块机构对 $F_{ext}$ 进行求解,如图8所示。

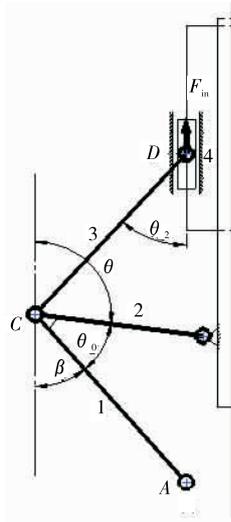


图 5 支链简图

Figure 5 The schematic drawing of the branch analysis

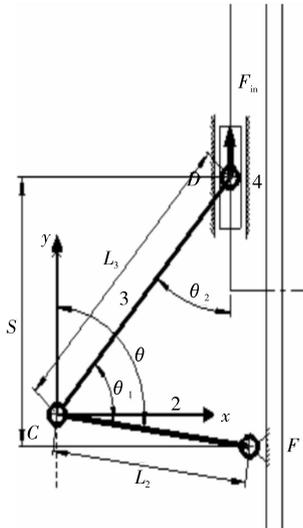


图 6 支链运动学分析

Figure 6 The kinematics of the branch

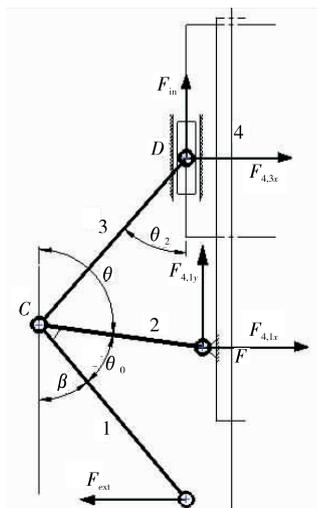


图 7 支链整体受力分析

Figure 7 The force analysis of the whole branch

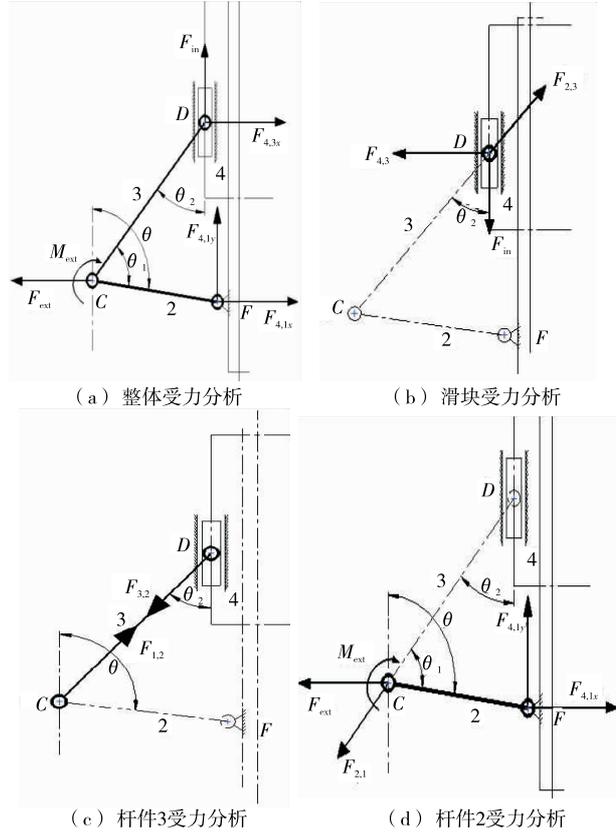


图 8 支链各杆件受力分析

Figure 8 The force analysis of the branch's each bar

按照力的传递的顺序,根据受力平衡,依次对滑块、杆件 3 以及杆件 2 进行受力分析。

(1) 滑块受力分析:

$$F_{2,3} \times \cos\theta_2 - F_{in} = 0, \tag{8}$$

$$F_{2,3} \times \sin\theta_2 - F_{4,3} = 0. \tag{9}$$

(2) 杆件 3 受力分析:

$$F_{3,2} - F_{1,2} = 0. \tag{10}$$

(3) 杆件 2 受力分析:

$$\vec{F}_{4,1} + \vec{F}_{2,1} + \vec{F}_{ext} = 0, \tag{11}$$

$$F_{4,1y} \times L_2 \times \sin\theta = M_{ext} + F_{4,1x} \times L_2 \times \cos\theta. \tag{12}$$

从以上各式求得:

$$F_{in} = \frac{(L_1 \cos\beta + L_2 \cos\theta) \cos\theta_2}{L_2 \sin\theta_1} F_{ext} = \frac{(L_1 \cos\beta + L_2 \cos\theta) \cos\theta_2}{L_2 \sin\theta_1} \times 40. \tag{13}$$

类似的,可求得右半部分所需要的驱动力。

根据左右支链整合后的驱动力表达式:

$$F'_{in} = \frac{(L_1 \cos\beta + L_2 \cos\theta) \cos\theta}{L_2 \sin\theta} \times 80. \tag{14}$$

### 3 支链杆件优化

采用遗传算法对采摘指的支链进行优化时,需设置设计变量  $X$ ,根据待优化结构参数,则有支链杆件优化模型的设计变量为:

$$X = [X_1, X_2, X_3, X_4] = [L_1, L_2, L_3, \theta_0]. \tag{15}$$

支链优化模型目标函数设计:

根据此前求解的驱动力表达式(14),定义驱动系数为:

$$k_1 = \frac{(L_1 \cos\beta + L_2 \cos\theta) \cos\theta_2}{L_2 \sin\theta_1} \quad (16)$$

式中:

$k_1$ ——驱动力与夹持力大小之间的系数,驱动系数越大,说明同样的夹持力下,所需要的驱动力较大,即驱动效率较低;反之,驱动系数越小,说明同样的夹持力下,需要的驱动力较小,驱动效率较高。

$\theta$  在连续的工作范围 $[\theta_{begin}, \theta_{end}]$ 内,取等间距 $\delta_\theta$ 的大小为 $\pi/360^\circ$ 的一系列离散状态,假设可以分为 $n$ 个这样的区间,则目标函数代表在工作范围内的平均驱动效率。表示:

$$obj = \frac{||k_1||_1}{n} \quad (17)$$

支链优化模型约束条件为:

由机械原理,形成滑块机构的约束条件为: $L_2 + L_3 > S$ 。

根据支链各杆件的原始设计参数,设置设计变量取值范围为: $62 \text{ mm} \leq L_1 \leq 82 \text{ mm}$ ,  $28 \text{ mm} \leq L_2 \leq 48 \text{ mm}$ ,  $77 \text{ mm} \leq L_3 \leq 97 \text{ mm}$ ,  $40^\circ \leq \theta_0 \leq 80^\circ$ 。

设计遗传算法优化过程如图9所示。

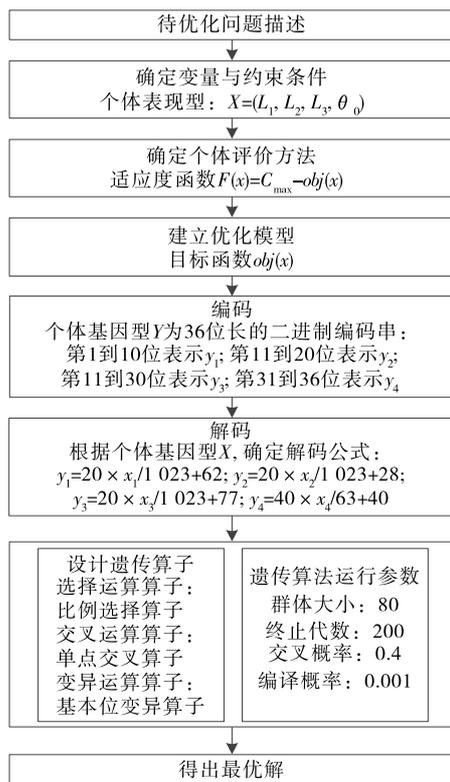


图9 遗传算法优化过程

Figure 9 The progress of genetic algorithm optimization

根据上述遗传算法优化过程进行优化,得知适应度的平均值和最大值随着进化代数的增加呈波动式增长,逐步优化收敛于最优解。经遗传算法优化后的参数为: $L_1 = 82 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 28 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 77 \text{ mm}$ ,  $\theta_0 = 46.09^\circ$ 。所选取优化后的目标值为 5.416,而优化前目标值为 7.383,相当于在同等夹持力要求下,优化后采摘指比优化前省力 26.6%,且结构更趋近

紧凑,优化效果较明显。根据优化后的参数制作了如图10所示的仿生采摘指样机,基于气力驱动的控制系统<sup>[13]</sup>如图11所示。其中自主研发的嵌入式控制器通过光电耦合器和继电器控制电磁换向阀,进而控制采摘指上面3个微型气缸以实现对新梢茎的定位、固定、提拉动作,完成一芽一叶的采摘。



图10 仿生采摘指样机

Figure 10 The composition of the pneumatic bionic plucking finger system



1. 开关电源 2. 气动三联件 3. 空气压缩机 4. 嵌入式控制器  
5. 电磁换向阀 6. 节流阀 7. 仿生采摘指样机

图11 气动仿生采摘指系统组成

Figure 11 The prototype of the bionic plucking finger

## 4 试验与分析

2018年4月底,分2次从江苏鑫品茶业有限公司采摘了龙井43新梢的一芽四叶,每组样本量为30个,并及时返回实验室进行一芽一叶的采摘试验。因现阶段用于新梢嫩芽识别的计算机视觉装置与仿生采摘指尚未集成为一个完整的系统,所以由人工拿着从茶园现场采集来的新梢样本逐个放入采摘指进行试验,以测试采摘指的仿生效果。结果如表1所示,采摘指样机对一芽一叶采摘的成功率约为70%。

部分新梢一芽一叶的采摘试验结果如图12所示。在60个样本中采摘失误数为19个,具体分析原因如表2所示。

由表2可知,样机机械加工误差所导致的夹爪闭合时发

表1 仿生采摘指的采摘试验统计结果

Table 1 The experiment statistical results of the bionic plucking finger

序号	样本量	采摘成功数	采摘成功率/%
第一次	30	20	66.67
第二次	30	21	70.00



图 12 部分采摘试验后的样本

Figure 12 The partial samples after plucking tests

表 2 仿生采摘指采摘失误原因统计

Table 2 Statistics of failure causes of bionic plucking finger

失误类型	失误数	失误原因
一芽一叶不完整	4	部分新梢叶片的叶展角较大
错采一芽两叶	3	部分新梢第一节间距较短(夹爪的指尖有一定的宽度);部分新梢叶片的叶展角较小
采摘的新梢未能与茎秆发生分离,但新梢的茎秆部分发生夹损	12	夹爪闭合时发生错位,采摘指机械结构存在一定的加工误差

生错位是采摘成功率不高的主要因素。后续研究中,一方面要提高采摘指机械加工精度,减少夹爪闭合时的错位;另一方面,将在采摘指夹爪指尖增加柔性材料,改善指尖与新梢茎的接触状态。

## 5 结论

通过分析人工采茶时手指的动作要领,并基于在茶园开展的新梢形态及力学特征参数测量试验,本研究提出并设计了模仿人工“提手采”的仿生采摘指。采摘指在气力驱动下,通过定位、夹紧、提拉等动作实现对新梢嫩芽的选择性采摘。基于支链结构运动学分析和遗传算法优化了采摘指结构参数,使得力的传递效率提高了26.6%,室内采摘试验成功率

约为70%。后续研究将进一步提高采摘成功率,并与视觉识别系统集成开展茶园现场试验。

## 参考文献

- [1] 周智修,段文华,吴海燕,等.我国名优茶发展现状与趋势[J].茶叶科学,2013,33(2):171-178.
- [2] 段学艺,胡华建,忘家伦,等.茶叶3种采摘方式的效益比较[J].贵州农业科学,2011,39(5):79-80.
- [3] 汪建.结合颜色和区域生长的茶叶图像分割算法研究[J].茶叶科学,2011,31(1):72-77.
- [4] 汪建,杜世平.基于颜色和形状的茶叶计算机识别研究[J].茶叶科学,2008,28(6):420-424
- [5] WANG Jian, ZENG Xian-yin, LIU Jian-bing. Three-dimensional modeling of tea-shoots using images and models[J]. Sensors, 2011(11): 3 803-3 815.
- [6] 骆耀平,宋婷婷,文东华,等.茶树新梢节间与展叶角度生长变化及对名优茶机采的影响[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2009,35(4):420-424.
- [7] 张兰兰,董迹芬,唐萌,等.名优茶机采鲜叶分级技术研究[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2012,38(5):593-598.
- [8] 韦佳佳,陈勇,金小俊,等.自然环境下茶树嫩梢识别方法研究[J].茶叶科学,2012,32(5):377-381.
- [9] JIN Xiao-jun, CHEN Yong, ZHANG Hao, et al. High-quality tea flushes detection under natural conditions using computer vision[J]. JDCTA: International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2012, 6(8): 600-606.
- [10] 张浩,陈勇,汪巍,等.基于主动计算机视觉的茶叶采摘定位技术[J].农业机械学报,2014,45(9):61-78.
- [11] 汤一平,王伟羊,朱威,等.基于机器视觉的茶院识别与采茶机导航方法[J].农业机械学报,2016,47(1):45-50.
- [12] 汤一平,韩旺明,胡安国,等.基于机器视觉的乘用式智能采茶机设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(7):15-20.
- [13] 潘志刚.名优绿茶仿生采摘指控制系统研究[D].南京:南京林业大学,2018:39-47.
- [14] 王金斌,白蓝,李文,等.同步检测动物源性成分的五重PCR的条件优化和检出限分析[J].核农学报,2018,32(3):506-514.
- [15] 夏青青.动物源细菌对四环素类药物耐药基因三重PCR检测试剂盒研制[D].成都:四川农业大学,2008:19-53.
- [16] 方志超,刘书超,林雅,等.鸭源致病性大肠杆菌四环素类耐药基因检测[J].中国兽医杂志,2015,51(7):79-81.
- [17] 李姝.市售鸡肉与鸡场中耐药菌污染特征初探[D].上海:上海海洋大学,2017:19-25.
- [18] NG L K, MARTIN I, ALFA M, et al. Multiplex PCR for the detection of tetracycline resistant genes[J]. Molecular and Cellular Probes, 2001, 15(4): 209-215.
- [19] PARK S H, JUN L J, CHO K T, et al. Characterization of *tet(M)* and *tet(G)* genes among tetracycline-resistant *Aeromonas* spp. isolated from imported ornamental fishes[J]. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2012, 45(3): 238-245.
- [20] LI Xiao-jing, WANG Hua. Tetracycline resistance associated with commensal bacteria from representative ready-to-consume deli and restaurant foods[J]. Journal of Food Protection, 2010, 73(10): 1 841-1 848.
- [21] 夏乐先,孙文娟,沈振,等.煮沸裂解法和试剂盒法提取侵矿菌基因组DNA的比较[J].现代生物医学进展,2014,14(1):31-35.
- [22] 刘宗保.肉食品加工链多重耐药菌及耐药基因分布与传播研究[D].广州:华南理工大学,2015:25.
- [23] 许立奎,潘彬荣,岳高红,等.抗白粉病糯性小麦的多重PCR分子鉴定技术[J].核农学报,2014,28(7):1 203-1 207.
- [24] GAO Min, JIA Rui-zhi, QIU Tian-lei, et al. Size-related bacterial diversity and tetracycline resistance gene abundance in the air of concentrated poultry feeding operations[J]. Environmental Pollution, 2017, 220(Part B): 1 342-1 348.
- [25] ABAIHACHESOO B, KHOSHBAKHT R, SHARIFIVAZDI H, et al. Tetracycline resistance genes in *Campylobacter jejuni* and *C. coli* isolated from poultry carcasses[J]. Jundishapur Journal of Microbiology, 2014, 7(9): e12129.