

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.005

# 3D 鱼糜打印机结构设计及样机研制

王明伟<sup>1,2</sup>, 王德强<sup>1,2</sup>, 吕凯<sup>1,2</sup>, 陶学恒<sup>1,2</sup>

(1. 大连工业大学 辽宁省海洋食品加工技术装备重点实验室, 辽宁 大连 116034;  
2. 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁 大连 116034)

**摘要:**针对目前加工鱼糜精细食品存在成型困难和成本昂贵等问题,提出了3D鱼糜打印机。打印机的支撑平台顶面和底面采用等边三角形结构,并以3根铝型材与之相连,整体呈三棱柱形状;通过同步带传动加直线导轨将步进电机的旋转运动转化为与并联臂相连接的滑块运动,带动打印平台移动;通过螺杆和铜螺母配合将步进电机的旋转运动转换为直线运动,由铜螺母相连接的压块向下运动从而压缩活塞,实现物料的挤出。通过3D鱼糜打印机样机的试制表明:所设计的3D鱼糜打印机结构简单,制造成本低,可打印出精细的鲍鱼和鲅鱼等实体模型。

**关键词:**3D打印技术;鱼糜;等边三角形结构;并联臂

中图分类号:TS203 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)06-0022-06

## Structural Design and Prototype Development of 3D Surimi Printer

WANG Mingwei<sup>1,2</sup>, WANG Deqiang<sup>1,2</sup>, LÜ Kai<sup>1,2</sup>, TAO Xueheng<sup>1,2</sup>

(1. Liaoning Seafood Processing Technology and Equipment Key Lab, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China;  
2. National Engineering Research Center of Seafood, Dalian, Liaoning 116034, China)

**Abstract:** In view of the current processing of surimi fine food production difficulties and the cost of expensive and other issues, a 3D surimi printer was proposed. The top and bottom of the support platform of the printer adopted equilateral triangular structure and connected with three aluminum profiles. The whole was triangular prism. The rotary motion of the stepping motor was converted into a slider movement connected to the parallel arm by the synchronous belt drive plus a linear guide, and it drove the printing platform to move. Through the screw and copper nut with the rotation of the stepper motor into a linear motion, the copper nut was connected to the pressure block down to compress the piston, and it achieved the extrusion of materials. The trial of the 3D surimi printer prototype shows that the designed 3D surimi printer has a simple structure and low manufacturing cost, and it can print out the solid model of abalone and mackerel.

**Keywords:** 3D printing technology; surimi; equilateral triangular structure; parallel arm

3D打印技术,其原理是“分层制造,逐层叠加”,即通过逐层增加材料来生成三维实体模型,属于快速成型技术<sup>[1-2]</sup>。随着科学技术的不断进步,3D打印技术被应用到航天、医学生物和食品等研究领域。目前,巧克力等易于成型的食材和饼干等快速熟化产品的研究相对成熟,然而大部分食材的打印仍处于实验研究阶段,尤其是水果、肉类等食品打印处在设计研发阶段,制作精细漂亮的食品模型非常困难,并且制造成本

昂贵<sup>[3]</sup>。目前,国外在食品3D打印机领域发展较快,如德国科技公司Biozoon最近推出了一种叫“Smoothfood”的3D打印食品,此种食品的制作方法:将食品原料液化并凝结成胶状物,再通过3D打印技术制造出各种各样的食物。这些食品为进食困难的老年人带来福音<sup>[4]</sup>。英国埃克塞特大学的研究人员开发出世界第一款“3D巧克力打印机”,可以打印出既有食用功效又不乏食用价值的巧克力日用品<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2017-03-02;修回日期:2017-08-30

基金项目:国家海洋食品工程技术研究中心资助项目(2012FU125X03);辽宁省高等学校重大科技平台资助项目(辽教发[2011]191号);大学生创新创业计划训练项目(201510152006)。

第一作者简介:王明伟(1976),男,辽宁大连人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为材料加工过程数值模拟。E-mail:wangmw@dpu.edu.cn

国内食品 3D 打印研究滞后于国外,如浙江大学于 2016 年研制出 3D 食品打印机,但是只能完成简单的造型<sup>[6]</sup>。鱼肉营养价值高、易被消化吸收利用,深受广大人民群众喜爱。然而鱼的处理以及制作较为复杂,且有些鱼多刺,在食用时也会影响美食的品尝<sup>[7]</sup>。对于老年人与婴幼儿而言,鱼肉粒度较大,不适合直接食用,因此将鱼肉制作成鱼糜,使鱼糜与 3D 打印技术结合,便可作出既好吃又好看的个性化食品,同时也可以提高鱼肉的商品价值。综上所述,将 3D 打印技术应用到鱼糜制品的制作中具有一定的研究价值。因此,本课题组结合鱼糜材料的特性以及食品 3D 打印成型理论,提出以鱼糜为材质的 3D 打印机。课题组设计了支撑平台结构、并联臂结构、运动结构及挤出机构等部件,并试制了鱼糜 3D 打印机试验样机,验证设计的结构是否合理及装置是否能按预期完成鱼糜制品的制造加工。

## 1 3D 鱼糜打印机组成结构与工作原理

### 1.1 组成结构

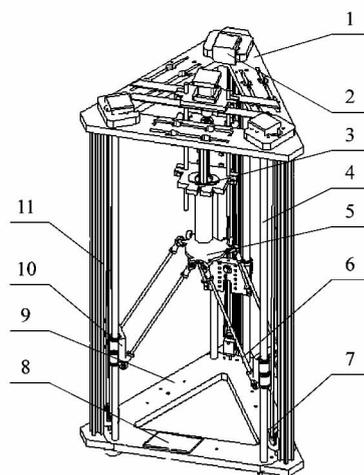
3D 鱼糜打印机如图 1 所示,整体结构由支撑平台、运动结构、挤出结构和控制系统等 4 部分组成。其中支撑平台部分包括:顶面 1、底面 9 与支撑铝型材 11。顶面和底面均为三角形,使整体结构具有较高的稳定性。运动结构部分包括:步进电机 2、直线导轨 4、打印平台 5、并联臂 6、同步带 7 及滑块 10。运动结构部分为打印机的主体部分,模型的路径由此部分完成。挤出结构包括挤出装置 3,主要完成将物料定量的从料筒中挤出。

### 1.2 工作原理

1) 首先利用 ATOS 三维扫描仪和逆向重构方法,对实物(如鲍鱼等)进行扫描获得实物三维数字化模型,建立模型库。

2) 将模型库的 3D 模型代码传输给上位机,并进行打印参数设定,上位机控制器进行分析、分层并生成执行 G 代码。

3) 上位机再将执行 G 代码传给主控板下位机,下位机控制器发送指令驱动打印平台上的步进电机转动,从而驱动同步带轮;同步带轮带动同步带运动,进而带动与皮带相连的滑块沿竖直直线导轨运动,滑块带动并联臂运动,从而驱动打印平台移动。直线导轨的一端安装限位滑块,当滑块碰到限位开关时,系统进行响应。同时下位机上的控制器也发出控制指令控制挤出装置上的步进电机旋转,步进电机通过联轴器与螺杆相连,螺杆在步进电机的带动下做回转运动,铜螺



1—顶面;2—步进电机;3—挤出装置;4—直线导轨;5—打印平台;6—并联臂;7—同步带;8—主控板;9—底面;10—滑块;11—支撑铝型材。

图 1 鱼糜 3D 打印机结构图

Figure 1 3D printer structure diagram of surimi  
母与螺杆配合且铜螺母与压块固定,铜螺母做直线运动,压块下压活塞杆,注射器料筒中的物料被挤出即完成了打印工作。

## 2 3D 鱼糜打印机结构设计

### 2.1 支撑平台结构设计

支撑平台整体呈三棱柱形状,由上下 2 个等边三角形与 3 根铝型材构成,其顶、底部等边三角形整体尺寸计算如图 2 所示。图中圆  $O$  即为设计成型区域的投影,圆  $O$  为等边  $\triangle ACE$  内切圆,其中  $OF = OB = OD = 85 \text{ mm}$ ,则  $AE = EC = CA = AD/\sin 60^\circ \approx 300 \text{ mm}$ ,即顶面和底面边长取值为 300 mm。在实际制作中,顶面由 3 根长度均为 240 mm 的 2020 铝型材与上角件组成,在上角件侧边设计 4 个小孔,用  $M4 \times 10$  的螺栓将铝型材与上角件紧固,组装完成的顶面结构为等边三角形,边长为 300 mm,如图 3 所示。底面由 6 根长度均为 240 mm 的 2020 铝型材与下角件组成,安装方式与顶面相同,底面由 2 组三角形结构构成,增加了整体结构的稳定性。3 台步进电机安装在顶面,通过螺丝固定在上角件上。

### 2.2 运动结构设计

#### 2.2.1 并联臂结构设计

鱼糜 3D 打印机共由 6 根长度相等的并联臂组成,并联臂的一端与打印平台相连接,另一端与滑块相连,并联臂三维结构如图 4 所示。

##### 1) 并联臂的长度取值

当运动机构中的 6 根并联臂处于极限位置时,并

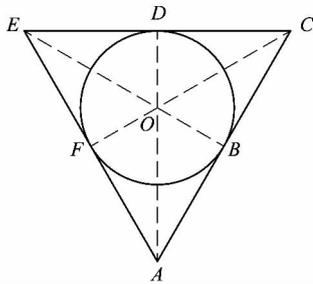


图2 顶、底部三角形尺寸计算图  
Figure 2 Size calculation diagram of top and bottom triangular

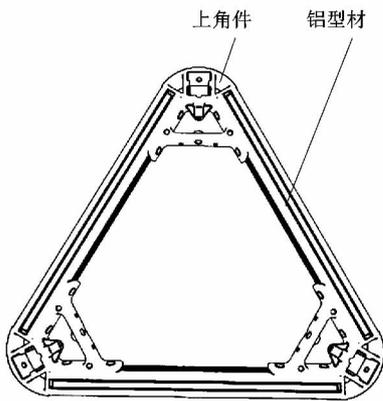


图3 顶部结构图  
Figure 3 Top structure diagram



图4 并联臂结构图

Figure 4 Structure diagram of parallel arm

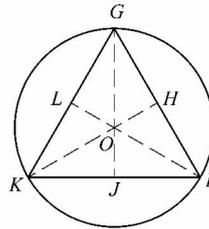
并联臂取得极值。如图5所示,图5(a)为处于6根并联臂共面的情况,此时并联臂取得最小值;图5(b)为滑块位于打印机最底端,打印平台置于最高处,此时,杆的长度有最大值。并联臂处于图5(a)所示状态时,忽略打印平台的体积,则GO, KO, IO为3根并联臂的长度,图中△GKI为等边三角形,GI, IK, KG为打印机底面支撑的边长,即|GI|=|IK|=|KG|=300 mm, O为△GKI的中心。所以|IO|=|KO|=|GO|=2/3|GJ|=2/3×|GI|sin 60°=2/3×300×sin 60°≈173.2 mm。故取并联臂长度最小值为173.2 mm。

当处于图5(b)所示状态时,并联臂的长度有最大值,此时RT的高度即为理论成型的最大高度,RT取150 mm, TS的长度等于图5(a)中IO的长度,RS即为

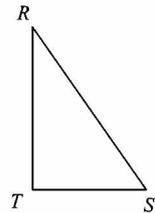
所求并联臂的最大值。△RST为直角三角形,故:

$$|RS| = \sqrt{|RT|^2 + |TS|^2} = \sqrt{150^2 + 173.2^2} \approx 229.1 \text{ mm}。$$

综上,并联臂的长度理论计算范围为173.2~229.1 mm。设计中要求有尽量合理的打印空间,所以取并联臂的长度为200 mm。



(a) 6根并联臂共面图



(b) 并联臂理论成型最大高度位置

图5 并联臂的极限位置

Figure 5 Limit position of parallel arm

### 2) 并联臂的强度校核

并联臂是连接打印平台与传动部分的结构,必须具有一定的强度。并联臂在运动的过程中会受到拉伸与压缩,其所受到的力来自于打印平台的重力以及传动部分传输的牵引力。并联臂只在两端受力,且力大小相等,方向相反,为二力杆。杆的设计直径为6 mm,材料为碳纤维,所有力折合到杆上,两端所受的力均为30 N,方向沿杆。由轴向拉压公式可得:

$$\sigma_b = F / \left( \frac{\pi}{4} d^2 \right)。$$

式中: $\sigma_b$ 为许用应力,MPa; $F$ 为端部受力,N; $d$ 为杆的直径,mm。

代入数据可得:

$$\sigma_b = F / \left( \frac{\pi}{4} d^2 \right) = 4 \times 30 \div (3.14 \times 6^2) \approx 1.05 \text{ MPa}。$$

查手册,CFP-II-1012/1014型号的碳纤维杆满足设计要求,因此选择直径6 mm,长度为200 mm的碳纤维杆作为并联臂。

### 2.2.2 传动结构设计

并联臂的运动依靠步进电机的旋转运动实现的。将步进电机的旋转运动转化为与并联臂相连接的滑块的直线运动,以达到实际运动需要。因同步齿形带传动的优点是移动响应速度快、结构简单、噪声小、系统平稳<sup>[8]</sup>,因此本文采用同步带传动加直线滑台的方式保证以上功能要求,三维实体模型如图6所示。

### 2.3 挤出装置结构设计

挤出装置整体结构如图7所示,由驱动电机1、电机支撑板2、联轴器3、铜螺母4、压块5、底部料筒托架

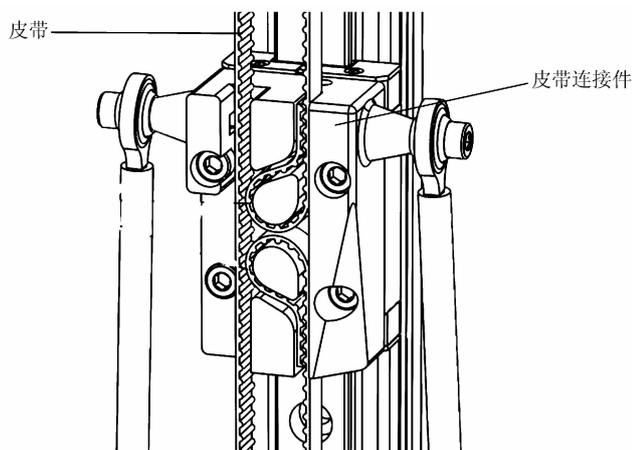
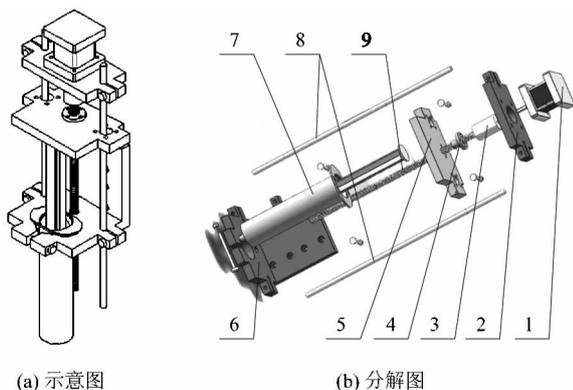


图6 同步带连接方式图

Figure 6 Connection diagram of timing belt

6、活塞注射料筒7、光杆8、螺杆9等组成。因步进电机的价格远远低于伺服电机,也更易于控制,因此选择步进电机作为活塞挤出机构的电机,选择的步进电机型号为J-5718HB3401,扭矩 $P$ 为 $2.02\text{ N}\cdot\text{m}$ ;料筒为标准注射器料筒,活塞长度为 $120\text{ mm}$ ,活塞行程为 $100\text{ mm}$ ;因轴端需连接联轴器、设置预留量和安全距离等因素,取螺杆总长度 $L$ 为 $250\text{ mm}$ 。螺杆材料为45钢,梯形螺纹的螺距为 $2\text{ mm}$ ,直径为 $8\text{ mm}$ ;螺母为T8铜螺母。



1—驱动电机;2—电机支撑板;3—联轴器;4—铜螺母;5—压块;  
6—底部料筒托架;7—活塞注射料筒;8—光杆;9—螺杆。

图7 活塞挤出装置

Figure 7 Piston extrusion device

鱼糜是一种黏度很高的流体,作为打印材料时,为了能够流畅的挤出,应该尽量减小挤出的阻力,且流道的过渡应尽量平滑,故喷嘴设计成带圆柱端的锥形喷嘴或斜式喷嘴,2种喷嘴的尺寸如图8所示。由于喷嘴内部流体流动状态难以直观观测,本节采用FLUENT进行数值模拟分析2种喷嘴的性能<sup>[9]</sup>。采用SIMPLE算法控制方程进行数值求解,入口速度为 $4$

$\text{mm/s}$ ,流体为鱼糜,黏度值取 $30.2\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ 。其FLUENT模拟计算如图9~12所示。对比图9~10中2种喷嘴的压力云图,可以看出斜式喷嘴入口处的压力明显小于带圆柱端的锥形喷嘴,物料在进入喷嘴时可以更小的力挤出,能量损失较小。对比图11和图12可知2种喷嘴在出口处的速度相差不大,带圆柱端的锥形喷嘴在圆柱段有段加速阶段,而斜式喷嘴速度较均匀。因考虑到物料从喷嘴挤出时,应尽量减小能量损失,所以斜式喷嘴更加适合于作为鱼糜3D打印的喷嘴。

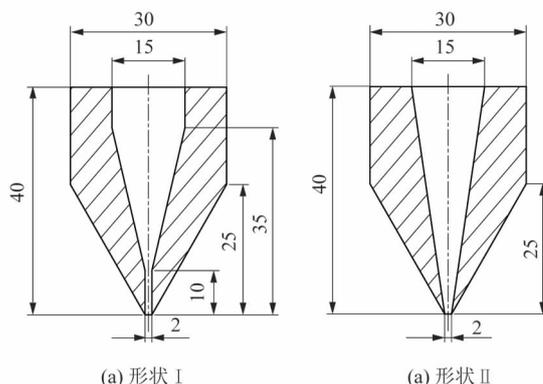


图8 2种喷嘴尺寸图

Figure 8 Dimension diagram of two kinds of nozzles

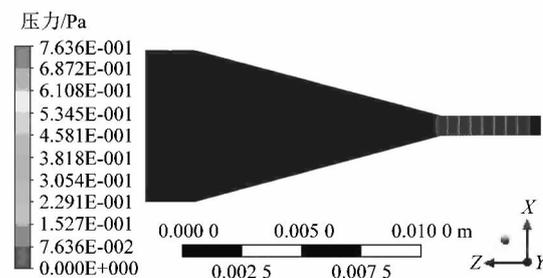


图9 带圆柱端的锥形喷嘴压力云图

Figure 9 Pressure cloud of conical nozzle with cylindrical end

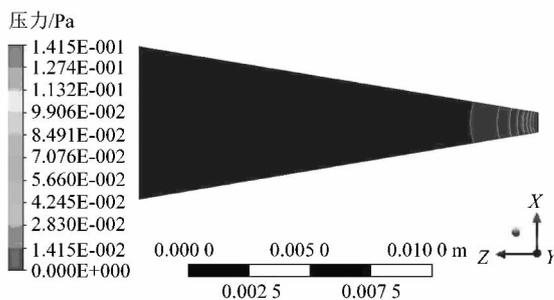


图10 斜式压力云图

Figure 10 Pressure cloud of oblique

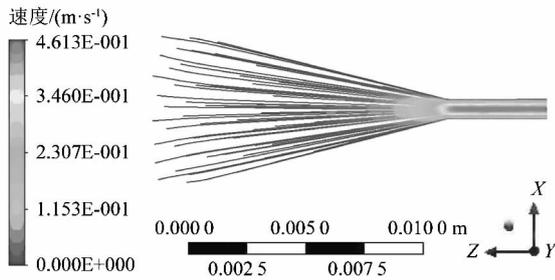


图 11 带圆柱端的锥形喷嘴流场流线图

Figure 11 Flow chart of tapered nozzle with cylindrical end

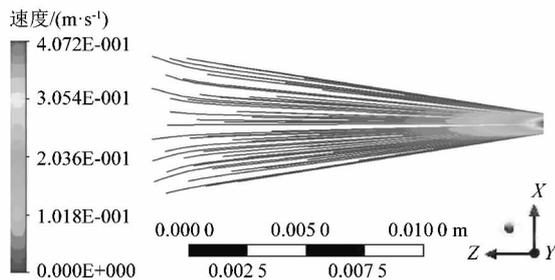


图 12 斜式喷嘴流场流线图

Figure 12 Flow chart of inclined nozzle

### 3 鱼糜 3D 打印机样机制造

根据设计的方案完成实验样机制造,实验样机如图 13 所示。对实物(如鲍鱼,鲑鱼等)进行扫描,得到了实物的三维数字化模型,将扫描所得的模型删减次要的特征,建立起模型库如图 14(a)、(b)所示。再设置机器的各项参数:挤出电机取 120 r/min,打印速度为 70 mm/s,喷嘴与平台的距离选择 2.5 mm,然后用实验样机打印鲍鱼和鲑鱼实物模型,打印结果如图 14(c)、(d)所示,可以看出打印出的模型与原模型库模型基本相同。

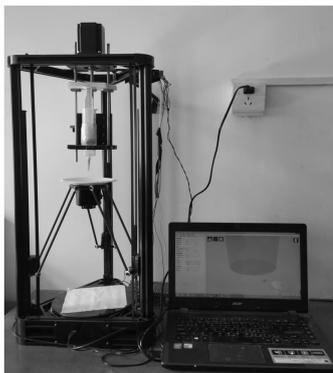


图 13 鱼糜 3D 打印机实验样机图

Figure 13 3D printer experimental prototype photo of surimi

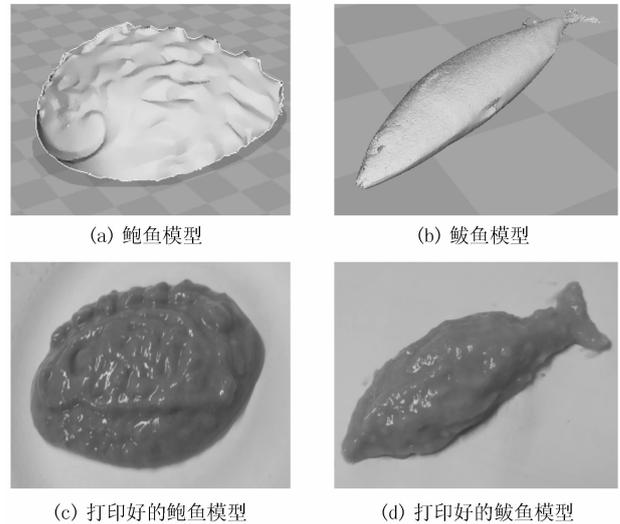


图 14 样机打印出的实体模型图

Figure 14 Physical model printed out by prototype

### 4 结论

根据对 3D 打印机的实际需求以及目前的生产制造状况,本课题组基于 3D 打印技术和鱼糜流变特性,自主研发设计了一种鱼糜 3D 打印机。该打印机平台支撑结构是由三角形的顶面、底面与 3 根型材组成,在其内部能形成一个圆柱体空间(即 3D 打印机的打印空间),具有结构稳定和占用空间小等优点。运动结构通过并联臂将三轴并联的方式实现运动,具有控制精度高的特点,并且传动部分采用同步带传动加直线导轨的方式将步进电机的旋转运动转化为与并联臂相连接的滑块运动,以此带动打印平台移动。由螺杆和铜螺母配合的机构将步进电机的旋转运动转换为直线运动,通过与铜螺母相固定的压块压缩活塞杆将物料挤出,挤出物料流量与螺杆的导程和步进电机转速密切相关,并且成正相关;该挤出方式不受挤压材料影响、具有通用性和精确定量挤出的优点。根据现有设计的实验方案制造实验样机,并验证实际鱼糜的打印效果,结果表明打印出的实物模型与原三维库模型基本相同,验证了 3D 鱼糜打印机设计的合理性与可靠性。该 3D 打印机具有占用空间小和实用性强等优点,适合在食材加工制造领域推广使用。

### 参考文献:

[1] 张鸿海,朱天柱,曹澍,等. 基于喷墨打印机的三维打印快速成型系统开发及实验研究[J]. 机械设计与制造,2012(7):122-124.  
 [2] 洪腾蛟,丁凤娟,孟凡盛,等. 多头熔融沉积成型 3D 打印机设计[J]. 安徽科技学院学报,2016,30(6):94-98.  
 [3] 李光玲. 食品 3D 打印的发展及挑战[J]. 食品与机械,2015(1):231-234.

(下转第 31 页)