

本文引用: 颜旖萌, 欧阳志强, 江丽青, 等. 三维有限元分析在正畸生物力学中的应用及研究进展[J]. 医学研究与教育, 2023, 40(4): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1674-490X.2023.04.004.

· 临床医学 ·

三维有限元分析在正畸生物力学中的应用及研究进展

颜旖萌¹, 欧阳志强¹, 江丽青², 刘薇¹

(1. 南昌大学附属口腔医院正畸科, 江西 南昌 330000; 2. 九江学院附属口腔医院正畸科, 江西 九江 332000)

摘要: 通过回顾历年关于三维有限元在口腔正畸方向应用的文献, 从而解析三维有限元模型的构建和转换, 数据处理及在口腔正畸生物力学中的临床应用。结果显示三维有限元分析在固定矫治、功能矫治、隐形矫治中都有临床应用价值, 在模拟牙齿移动、颞下颌关节和上下颌骨改建方面都有其独特的优势, 在正畸生物力学研究中具有良好的应用前景。然而, 目前的三维有限元分析仍存在一定的局限性, 需要更多有针对性的医学研究和探索。

关键词: 有限元分析; 正畸矫治器; 生物力学; 固定矫治器; 功能性矫治器; 颌骨; 牙列; 颞下颌关节

DOI: 10.3969/j.issn.1674-490X.2023.04.004

中图分类号: R78

文献标志码: A

文章编号: 1674-490X(2023)04-0025-06

Application and research progress of three-dimensional finite element analysis in orthodontic biomechanics

YAN Yimeng¹, OUYANG Zhiqiang¹, JIANG Liqing², LIU Wei¹

(1. Department of Orthodontics, Affiliated Stomatological Hospital of Nanchang University, Nanchang 330000, China; 2. Department of Orthodontics, Affiliated Stomatological Hospital of Jiujiang University, Jiujiang 332000, China)

Abstract: By reviewing the literature on the application of three-dimensional finite element in orthodontics over the years, the paper analyzes the construction and transformation of three-dimensional finite element model, data processing and clinical application in orthodontic biomechanics. The results of literature review show that three-dimensional finite element analysis has its clinical application value in fixed correction, functional correction and invisible correction. It has unique advantages and good application prospect in simulating tooth movement and skeletal reconstruction. However, the current three-dimensional finite element analysis still has some limitations. More targeted medical research and exploration are needed in three-dimensional finite element analysis.

Key words: finite element analysis; orthodontic appliance; biomechanics; fixed appliance; functional appliance; jaw; dentition; temporomandibular joint

有限元分析 (finite element analysis, FEA) 是正畸生物力学分析中被广泛应用的一种研究方法。它可以通过建立结构模型, 并对模型施加受力条件, 从而分析其力学性能, 模拟临床效果。20 世纪 70 年

收稿日期: 2022-09-06

基金项目: 江西省科学技术厅应用研究培育计划项目 (S2021YYYJPYG0058); 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2021-S172)

第一作者: 颜旖萌 (1996—), 女, 江西抚州人, 医师, 主要从事口腔正畸及三维有限元方向研究。

通信作者: 欧阳志强 (1973—), 男, 江西赣州人, 副主任医师, 硕士生导师, 主要从事口腔正畸临床及教学相关研究。

E-mail: oyangzhiqiang@126.com

代 Thresher 等^[1]首次将有限元法引入口腔医学领域,因其具有非侵入性,实验数据可重复使用,应力分析无可比拟等优点在口腔领域各个方向得到广泛应用。随着循证医学的发展,口腔正畸学也逐渐从基于经验的实践主义转变为基于证据的实践主义^[2]。任何治疗方式都要有科学的理论基础,但由于正畸加力的独特方式,细胞实验或动物实验并不能完全模拟临床上实际的正畸牙齿移动和颌骨的生长改良,因此,有限元分析在这方面展现了独特的优势,它可以根据数据条件分析应力和位移。其中包括3个基本步骤:前处理、处理和后处理。前处理包括几何模型的构建、模型材料数据的转换、设定接触关系、构建坐标系、定义边界条件和设置载荷。处理即为有限元模型中的数据分析过程,包括求解线性代数方程组。后处理包括对结果的解释及临床应用^[3]。

1 前处理——有限元模型的构建和转换

切片、磨片法是最早建立牙颌组织数字模型的方法,但这种建模方法要求使用特殊的实验设备,人力物力消耗大,效率低,并且属于破坏性的建模方法,可能会改变原有的生物学结构,对于复杂细微的结构显示常不清晰,目前已经较少采用^[4]。随着数字成像系统(CT和MRI)的发展,可以将个体特定的骨骼几何数据输入到有限元模型中,并且不损坏原物体结构,可根据需要调节扫描间距,扫描获得的数据信息可重复应用,每个断面的解剖结构清晰可辨,能较真实地代表原物体的结构,很好地改善了切片、磨片法的不足之处,而其中近年来出现的锥体束计算机断层扫描技术(cone beam computer tomography, CBCT),无论在速度或是精确度上都有明显的提高,分辨率甚至可以达到微米(μm)级别,以往的测量是在两条直线之间进行的,而CBCT成像提供了在两个平面之间进行测量的可能性,从而有助于重建和理解三维模型中的骨骼、牙齿和软组织皱襞之间的关系,因此逐渐被广泛应用^[5]。在获得CBCT扫描得到的数据后,使用美国放射学会和国家电子制造商协会联合颁布的医学数字成像和通讯的标准——DICOM格式对数据进行存储,有研究表明,以DICOM格式作为存储格式的图像处理软件,除了可以直接读入CT机输出的数据,同时可以改善CT图像的质量^[6]。常见进行数据读取与处理的软件有Mimics Medical、Geomagic Studio、Unigraphics NX、Solidworks等。Mimics可以读入DICOM格式的数据,并转化为初始的三维结构,Geomagic Studio通过对模型进行加工处理、质量提升,生成清晰完整的三维有限元模型,并通过Unigraphics NX以及Solidworks等进行模型的组合与装配。

2 处理——有限元模型中的数据分析

大致分为如下3个步骤^[7]:(1) 网格划分,将预求解的模型区域划分为有限个单元网格,在三维模型中,单元网格往往为四面体或者多面体,单元间的连接点为节点,也即为单元的顶点,单元、节点和节点连线构成整体的模型网格。(2) 单元分析,也就是建立每个单元中节点位移和节点力之间的关系,其中节点位移为基本变量,先通过给单元内部节点位移确定一个近似表达式,然后建立节点位移和节点力之间的关系式。(3) 整体分析,对模型区域整体进行分析,将之前得到每个单元中位移与力之间的关系式,进行数据代入,从而揭示整体负载与整个模型之间的关系。较常用于有限元模型数据分析的软件有Ansys、Abaqus等。

3 后处理——有限元分析在口腔正畸生物力学中的应用

3.1 用有限元方法构建正畸矫治器模型

3.1.1 固定正畸矫治器

严拥庆等^[8]通过有限元方法获得下颌牙列、托槽和方丝模型,初步建立了用三维有限元法对唇侧固定矫治技术进行全牙列分析的基础。直丝弓矫治器用托槽定位牙齿,简化了临床操作,使牙齿定位更加精准迅速,因而得到发展。相亚宁等^[9]建立了颞下颌关节、上下颌骨及带有直丝弓矫治器牙列的三维有限元模型,从而有利于研究直丝弓矫治器的力学特性。随着患者对美学的要求越来越高,越来越多的患者选择定制的舌侧正畸矫治器,因此作为临床医生,有必要了解舌侧正畸中有关牙齿运动的生物力学^[10]。Hernández-Vázquez等^[11]利用三维有限元法对舌侧正畸矫治技术中所用的2种不同类型的正畸弓丝做了力学分析,从而发现蘑菇形正畸弓丝所带来的应力更大。

3.1.2 功能矫治器

除了传统的固定正畸矫治器,临床上还常使用功能矫治器,早期的有限元分析法主要是在二维层面开展,Singh等^[12]利用有限元尺度分析法证明了Twin-block矫治器对软组织侧貌改善的有效性。这之后,林铭等^[13]建立了导下颌向前的Twin-block矫治器三维有限元模型,从而帮助推进对Twin-block矫治机制的研究。Chaudhry等^[14]通过三维有限元应力分析法评估固定功能矫治器——Forsus抗疲劳装置对下颌骨的影响,结果显示安装有Forsus抗疲劳装置的下颌骨模型有更多的应力集中区,其中下颌皮质骨和髁突区域的最大主应力及von Mises应力均增加了2倍以上。

3.1.3 隐形矫治器

近年来,隐形矫治技术也逐渐成熟,由于它所具有的美学效果,吸引了越来越多寻求正畸治疗的成年患者。起初,隐形矫治器常用于治疗轻度或中度前牙拥挤的简单病例^[15-16],但随着计算机技术的发展和人们对矫治器材料生物力学特性的认识加深,隐形矫治技术已显示出治疗更复杂病例的能力,例如拔牙病例。通过三维有限元法可以模拟隐形矫治中牙齿位移模式,从而有利于分析隐形矫治技术的有效性。Jiang等^[17]设计了拔除第一前磨牙后采用隐形矫治的三维有限元模型,模拟前后牙的位移模式,结果显示,前后牙均表现出不同程度的倾斜角度,从而意识到在隐形矫治中牙齿移动的复杂性。曾红等^[18]利用三维有限元法研究了隐形矫治器中附件的不同放置位点对矫治效果的影响。

3.2 用有限元方法研究牙体组织的负载和位移

在有限元方法中,牙体组织常因非均质各向异性的生物材料特性而使得分析过程十分复杂,经过研究表明,在进行牙体组织的静力分析和形变量小时,可以对材料特性进行假设,使其简化为均匀、连续、各向同性的线弹性材料^[19-21]。利用此方法,李志华等^[22]通过有限元方法建立了上颌第一磨牙共4 983个节点、4 281个单元的三维有限元模型,为上颌第一磨牙在正畸作用下的生物力学分析提供了一个良好的数字模型。

3.2.1 上颌牙列

阻力中心被视作预测牙齿移动的基本参考点,Luu等^[23]对患者CBCT图像进行处理,以提取与测定相关的三维生物结构,并将其转化为一个由四面体组成的虚拟网格,然后施加载荷条件,模拟系统上的应力和应变,帮助定位上颌牙齿的阻抗中心,从而为准确预测牙齿移动打下基础。Kawamura等^[24]研究上颌牙列在不同受力角度作用下的牙齿移动情况时发现,牙齿移动方式与施力的角度有关,当对上颌第二磨牙施加3N的近中力,受力角度与殆平面成28°时,作用力刚好通过上颌全牙列的阻力中心。

3.2.2 下颌牙列

对于下颌牙列,Chae等^[25]通过三维有限元模拟,阐明不同施力角度对下颌牙齿移动模式影响的力

学机制,得出结论:力的角度可以影响牙列的运动模式,当力的作用线在阻力中心下方或上方时,整个牙列是顺时针或逆时针旋转的,选择性地使用不同的施力角度可以实现下颌全牙列的远移。Lombardo 等^[26]通过三维有限元建立了下颌中切牙模型,并对该模型施加不同载荷,从而分析不同载荷条件下下颌中切牙受到的生物力学效应,研究显示,当对下颌中切牙施加舌向压低力时可以使下颌中切牙接近整体移动,而当施加唇向压低力时,会使下颌中切牙发生唇侧倾斜,这种改变,对于设计治疗计划至关重要。除此之外,下颌第三磨牙阻生常常影响正畸治疗疗效的稳定性,Oenning 等^[27]建立了有限元模型来评估阻生的第三磨牙对第二磨牙牙根的生物力学影响。

3.3 用有限元方法模拟颌面部的生物力学行为

3.3.1 颞下颌关节

颞下颌关节是一对高度复杂并且可移动的滑膜关节,同时具有转动和滑动的双重运动特点,在日常活动中,颞下颌关节总是通过分散载荷来减少应力峰值,促进下颌运动。同时,颞下颌关节又是一个承载关节,在咀嚼过程中需要传递力,因此,研究整个口腔功能必须考虑到颞下颌关节的生物力学^[28]。颞下颌关节紊乱是临床中一种常见的疾病,虽然该疾病病因尚不明确,但微创伤和关节内应力被视为是颞下颌关节紊乱的一些主要原因,以往由于关节结构复杂,传统的生物力学研究往往会对关节造成损伤且实验不可重复,从而限制了颞下颌关节生物力学的研究^[29]。有限元分析可以用于研究不同的口腔运动、不同载荷条件下颞下颌关节的生物力学行为。Shu 等^[30]根据 CBCT 图像数据重建下颌骨、关节盘和上颌骨的三维打印模型,然后利用具有高度相似性的三维打印模型对有限元模型进行验证,发现用有限元模型来模拟颞下颌关节和上下牙列之间的相互作用是准确的。Lai 等^[31]通过有限元模型发现在颞下颌关节紊乱患者中,髁突、关节盘和下颌骨的应力值均高于正常侧关节。

3.3.2 上下颌骨

临床中骨性错颌常分为骨性Ⅱ类、骨性Ⅲ类错颌畸形。其中骨性Ⅱ类错颌畸形表现为上颌发育过度、下颌发育不足或二者兼而有之。Akiş 等^[32]研究固定式功能矫治器结合微种植钉矫治以下颌后缩为主要特征的骨性Ⅱ类错颌畸形时显示,下颌髁突颈部有很高的应力值,结合使用微种植钉,可以降低上颌效应,增加下颌效应。骨性Ⅲ类错颌畸形同样分为上颌发育不足、下颌发育过度或二者兼而有之。Buyukcavus 等^[33]对骨性Ⅲ类、上颌发育不足患者扫描获得的颅骨模型采用2种不同的治疗方案,方案一为微型钛板配合面具前牵引装置,方案二为微型钛板配合Ⅲ类弹性牵引,并进行有限元分析,结果显示这2种方法都可以诱导新骨形成,有利于纠正上颌发育不足。对于上颌发育不足导致的牙弓狭窄。王梦含等^[34]通过建立 Hyrax、Haas 及种植体支抗辅助上颌快速扩弓3种螺旋扩弓器的有限元模型,分析对上颌骨扩弓效果的影响,结果显示与 Hyrax 扩弓器相比,Haas 扩弓器具有一些优势,但种植体支抗辅助上颌快速扩弓带来的骨骼效应最为显著。

4 发展前景

正畸治疗主要是通过各种不同类型的矫正装置来协调口腔颌面部骨骼、牙齿、神经肌肉之间的关系以达到口颌系统的平衡、稳定和美观。因此,在研究牙颌组织受力后的应力分布和移动趋势方面,三维有限元分析有其独特的优势,在正畸生物力学研究中有良好的应用前景。然而,三维有限元分析也有一定的局限性。

4.1 需要进行临床验证

由计算机分析得出的力学数值目前只能为临床操作及结果预测提供一定的参考,并不能完全模拟口腔内的实际临床状况,其实际应用效果需要更多的临床验证。

4.2 优化建模的材料属性

由于牙颌组织非均质各向异性、粘弹性等的生物材料特性复杂,使得目前三维有限元实现精确建模难度较大,分析时往往使其简化为均匀、连续、各向同性的线弹性材料,这也就意味着一定程度上的信息丢失,从而有可能影响到整个模型的几何及力学特性。

4.3 实现动态建模

现有的三维有限元模型大多还是静态模型,而人类的生理活动本身是动态的,如矫治过程中发生的槽骨改建等。并且随着矫治技术的提高,静磁场和生物学电传导等作用会随着时间的推移而发生力值的改变。在未来,三维有限元建模应该要致力实现从静态模型到动态模型的转化,以实现真正的生物仿真。

可以预见,通过更多的医学研究探索,在不久的将来,三维有限元分析一定可以逐步克服自身的瓶颈,实现生物力学的精确模拟,从而推动整个正畸事业的发展。

参考文献:

- [1] THRESHER R W, SAITO G E. The stress analysis of human teeth[J]. J Biomech, 1973, 6(5): 443-449. DOI: 10.1016/0021-9290(73)90003-1.
- [2] SARMAH A, MATHUR A K, GUPTA V, et al. Finite element analysis of dental implant as orthodontic anchorage[J]. J Contemp Dent Pract, 2011, 12(4): 259-264. DOI: 10.5005/jp-journals-10024-1044.
- [3] FEIZBAKHS M, KADKHODAEI M, ZANDIAN D N, et al. Stress distribution in maxillary first molar periodontium using straight pull headgear with vertical and horizontal tubes; a finite element analysis[J]. Dent Res J (Isfahan), 2017, 14(2): 117-124. DOI: 10.4103/1735-3327.205795.
- [4] 魏洪涛, 张天夫, 曾晨光, 等. 牙颌三维有限元模型生成方法的探讨[J]. 白求恩医科大学学报, 2000, 26(2): 150-151. DOI: 10.13481/j.1671-587x.2000.02.024.
- [5] 狄婧, 孙哲, 尹新芹, 等. 基于 CBCT 图像构建下颌第一前磨牙三维有限元模型[J]. 临床口腔医学杂志, 2013, 29(9): 530-533.
- [6] HEO K H, LIM Y J, KIM M J, et al. Three-dimensional finite element analysis of the splinted implant prosthesis in a reconstructed mandible[J]. J Adv Prosthodont, 2018, 10(2): 138-146. DOI: 10.4047/jap.2018.10.2.138.
- [7] 张婉君, 李金源, 马永平, 等. 口腔正畸中三维有限元法的发展[J]. 医学研究与教育, 2015, 32(3): 75-81. DOI: 10.3969/j.issn.1674-490X.2015.03.017.
- [8] 严拥庆, 阎贺庆, 蔡中, 等. 方丝弓矫治器三维有限元力学模型的建立[J]. 上海口腔医学, 2005, 14(3): 301-305. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7248.2005.03.024.
- [9] 相亚宁, 胡敏, 郭克峰, 等. 包括 TMJ 上下颌骨及牙列的 MBT 直丝弓矫治器三维有限元模型的建立[J]. 中国实用口腔科杂志, 2008, 1(3): 151-153. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1595.2008.03.008.
- [10] 徐子卿, 王特, 蒋健羽, 等. 个性化舌侧上颌前牙滑动内收三维有限元构建与分析[J]. 上海口腔医学, 2022, 31(2): 162-166. DOI: 10.19439/j.sjos.2022.02.009.
- [11] HERNÁNDEZ-VÁZQUEZ R A, MARQUET-RIVERA R A, MASTACHE-MIRANDA O A, et al. Comparative numerical analysis between two types of orthodontic wire for the lingual technique, using the finite element method[J]. Appl Bionics Biomech, 2021, 2021: 6658039. DOI: 10.1155/2021/6658039.
- [12] SINGH G D, CLARK W J. Soft tissue changes in patients with Class II Division 1 malocclusions treated using Twin Block appliances: finite-element scaling analysis[J]. Eur J Orthod, 2003, 25(3): 225-230. DOI: 10.1093/ejo/25.3.225.
- [13] 林铭, 符志锋, 陈涛, 等. Twin-block 矫治器系统三维有限元模型的建立[J]. 华南国防医学杂志, 2014, 28(1): 30-33.
- [14] CHAUDHRY A, SIDHU M S, CHAUDHARY G, et al. Evaluation of stress changes in the mandible with a fixed functional appliance: a finite element study[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2015, 147(2): 226-34. DOI: 10.1016/j.ajodo.2014.09.020.

- [15] 施则安, 夏恺, 罗良语, 等. 无托槽隐形矫治器联合微种植体内收并压低上前牙的三维有限元分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2022, 40(5): 589-596. DOI: 10.7518/hxkq.2022.05.013.
- [16] 余箐, 赵刚, 叶之慧, 等. 不同弹性模量的热压膜材料远移上颌磨牙的有限元分析[J]. 实用口腔医学杂志, 2022, 38(4): 450-454. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2022.04.006.
- [17] JIANG T, WU R Y, WANG J K, et al. Clear aligners for maxillary anterior en masse retraction: a 3D finite element study[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 10156. DOI: 10.1038/s41598-020-67273-2.
- [18] 曾红, 王超, 周建萍, 等. 无托槽隐形矫治不同控根附件对磨牙近中移动力学影响的三维有限元分析[J]. 上海口腔医学, 2018, 27(2): 139-145. DOI: 10.19439/j.sjos.2018.02.006.
- [19] HEMANTH M, RAGHUVeer H P, RANI M S, et al. An analysis of the stress induced in the periodontal ligament during extrusion and rotation movements: a finite element method linear study part I[J]. J Contemp Dent Pract, 2015, 16(9): 740-743. DOI: 10.5005/jp-journals-10024-1750.
- [20] HEMANTH M, RAGHUVeer H P, RANI M S, et al. An analysis of the stress induced in the periodontal ligament during extrusion and rotation movements- part II: a comparison of linear vs nonlinear FEM study[J]. J Contemp Dent Pract, 2015, 16(10): 819-823. DOI: 10.5005/jp-journals-10024-1763.
- [21] ZENO K G, MUSTAPHA S, AYOUB G, et al. Effect of force direction and tooth angulation during traction of palatally impacted canines: a finite element analysis[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2020, 157(3): 377-384. DOI: 10.1016/j.ajodo.2019.04.035.
- [22] 李志华, 陈天云, 刘剑, 等. 上颌第一磨牙的三维有限元模型的建立[J]. 实用临床医学, 2001, 2(1): 31-33. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8194.2001.01.010.
- [23] LUU B, CRONAUER E A, GANDHI V, et al. A finite element approach for locating the center of resistance of maxillary teeth[J]. J Vis Exp, 2020(158): e60746. DOI: 10.3791/60746.
- [24] KAWAMURA J, PARK J H, KOJIMA Y, et al. Biomechanical analysis for total mesialization of the maxillary dentition: a finite element study[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2021, 159(6): 790-798. DOI: 10.1016/j.ajodo.2020.02.021.
- [25] CHAE J M, PARK J H, KOJIMA Y, et al. Biomechanical analysis for total distalization of the mandibular dentition: a finite element study[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2019, 155(3): 388-397. DOI: 10.1016/j.ajodo.2018.05.014.
- [26] LOMBARDO L, STEFANONI F, MOLLICA F, et al. Three-dimensional finite-element analysis of a central lower incisor under labial and lingual loads[J]. Prog Orthod, 2012, 13(2): 154-163. DOI: 10.1016/j.pio.2011.10.005.
- [27] OENNING A C, FREIRE A R, ROSSI A C, et al. Resorptive potential of impacted mandibular third molars: 3D simulation by finite element analysis[J]. Clin Oral Invest, 2018, 22(9): 3195-3203. DOI: 10.1007/s00784-018-2403-4.
- [28] 罗良语, 刘钧. 颞下颌关节动态三维有限元模型构建的研究进展[J]. 口腔医学研究, 2022, 38(8): 715-717. DOI: 10.13701/j.cnki.kqxyj.2022.08.003.
- [29] 邵冰莓, 刘展. 颞下颌关节紊乱综合征患者咀嚼过程中的颞下颌关节有限元接触应力分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 322.
- [30] SHU J H, LUO H T, ZHANG Y L, et al. 3D printing experimental validation of the finite element analysis of the maxillofacial model[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2021, 9: 694140. DOI: 10.3389/fbioe.2021.694140.
- [31] LAI L F, HUANG C Y, ZHOU F, et al. Finite elements analysis of the temporomandibular joint disc in patients with intra-articular disorders[J]. BMC Oral Health, 2020, 20(1): 93. DOI: 10.1186/s12903-020-01074-x.
- [32] AKIŞ H, DORUK C. Dentofacial effects of fixed functional appliances with or without mini screw anchorage in the treatment of class II division I malocclusion: a finite element analysis[J]. Turk J Orthod, 2018, 31(1): 7-12. DOI: 10.5152/TurkJOrthod.2018.17026.
- [33] BUYUKCAVUS M H, KALE B. Effects of different types of maxillary protraction on maxilla with finite element analysis[J]. J Pak Med Assoc, 2021, 71(3): 877-882. DOI: 10.47391/JPMA.1087.
- [34] 王梦含, 葛振林, 田黎, 等. 三种上颌快速扩弓方式扩弓效果的三维有限元分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2017, 52(11): 6. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2017.11.006.

(责任编辑: 高艳华)