

基于三维有限元评价种植体不同倾斜角度在上颌后牙区骨量不足的应力分析

李希光^{1,2} 邱克谦² 高岭² 张博² 周民战² 肖林京^{1*}

(1. 山东科技大学机械电子工程学院 山东 青岛 266590;

2. 青岛大学附属医院西海岸院区口腔颌面外科/种植科 山东 青岛 266555)

[摘要] **目的:**研究采用三维有限元分析手段评价在上颌后牙区骨量不足情况下不同的骨质类型下种植体植入角度的改变对周围骨组织的应力分析。**方法:**使用 SolidWorks 2015 软件建立上颌骨、种植体、基台、牙冠模型。将上颌骨模型定义为 D2、D3 两类骨质类型,每种类型的上颌骨按种植体植入的角度分为垂直种植、30°倾斜种植、45°倾斜种植三类,其中垂直种植时为模拟上颌窦底提升在上颌骨模型下建立人工骨块。建立装配体,在其顶部施加一个与冠中央呈 45°角、大小为 150 N 的力,分析周围骨组织的应力分布。**结果:**D3 类骨质模型中的应力高于 D2 类骨质模型。在皮质骨中,垂直种植模型中的应力最小,其次是 45°倾斜模型,30°倾斜模型中的应力最大。**结论:**在骨量不足的上颌后牙区,倾斜种植对周围骨组织的应力要高于垂直种植,采取上颌窦底提升术与种植体垂直植入术为首选治疗方案;对于倾斜种植,采取 45°种植体植入角度比 30°更具优势。

[关键词] 骨量不足 倾斜种植体 骨质类型 上颌窦底提升 三维有限元分析

[文献标识码] A **[文章编号]** 1671—7651(2019)07—0671—05

[doi] 10.13701/j.cnki.kqxyj.2019.07.013

Stress Analysis of Different Implant Tilt Angles in Insufficient Bone Mass in Maxillary Posterior Region Based on Three Dimensional Finite Element Analysis. LI Xiguang^{1,2}, ZHI Keqian², GAO Ling², ZHANG Bo², ZHOU Minzhan², XIAO Linjing^{1*}. 1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. The Affiliated Hospital of Qingdao University of West Coast District, Qingdao 266555, China.

[Abstract] **Objective:** To evaluate the stress analysis of the surrounding bone tissue caused by the change of implant angle under different bone types in the case of insufficient bone mass in the maxillary posterior region by using three dimensional finite element analysis. **Methods:** SolidWorks 2015 software was used to establish the models of maxillary, implant, abutment, and dental crown. The maxillary model was defined as two bone types, D2 and D3. Each type of maxillary was classified into three categories according to the angle of implant placement, including vertical implant, 30 degree tilted implant, and 45 degree tilted implant. In the vertical implant, artificial bones were built under the maxillary model to simulate sinus floor elevation. The assembly was established, a force of 150N was applied at the top of the dental crown, with an angle of 45 degrees to the center. The stress distribution of surrounding bone tissue was analyzed. **Results:** The stress in D3 bone model was higher than that in D2 bone model. In the cortical bone, the stress in the vertical implant model was the minimum, followed by the 45 degree tilted model, and the maximum stress was in the 30 degree tilted model. **Conclusion:** In the maxillary posterior region with insufficient bone mass, the stress of tilted implant on surrounding bone tissue was higher than that of vertical implant. Sinus floor elevation and implant vertical implantation surgery was the preferred treatment. The 45 degree tilted implant was more advantageous than 30 degree one when tilted implant was undertaken.

[Key words] insufficient bone mass tilted implant bone type sinus floor elevation three dimensional finite element analysis

基金项目 国家自然科学基金(编号:81472520、81502354)

作者简介 李希光(1994~),男,山东东营人,汉,硕士在读,主要从事细胞力学及骨组织工程方面的研究。

* 通信作者 肖林京, E-mail: xiaojl2008@126.com

种植义齿由于其可靠的性能和优良的美学效果

已经成为广大缺齿患者的首选治疗方法。据报道,下颌骨和上颌骨种植义齿修复的成功率分别为95%和90%^[1]。种植义齿修复的成功率与颌骨解剖,骨质量,种植体形态,外科手术等因素有关。在骨量不足的上颌后牙区,由于骨质量差、接近上颌窦等原因,不可能植入标准长度的种植体^[2],因此,骨移植或上颌窦底提升手术是此区域的替代治疗方法,倾斜植入标准长度的种植体也是此区域的另一种治疗选择。种植体在不同骨质类型下不同的植入角度及其对周围骨组织的应力值变化将会影响种植体的长期稳定。本研究的目的在于用三维有限元的方法评估在不同骨质类型下不同的种植体倾斜角度对植体周围皮质骨和松质骨的应力值,为骨量不足的上颌后牙区种植方案的选择提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备 计算机:Lenovo Y400N,四核CPU 2.6 GHz,内存8 G;种植体:ITI种植体(美国Straumann公司,ITI implant,4.1 mm×10 mm);建模软件:SolidWorks 2015(Dassault Systèmes,美国);有限元分析软件:Ansys 15.0(美国Ansys公司)。

1.2 方法

1.2.1 建立三维模型 使用SolidWorks 2015建立上颌骨简化模型,建立腰长7.2 mm、顶长16 mm、底长24 mm、高6 mm的梯形骨块的二维纵向剖面图,然后应用旋转功能生成骨块的实体模型(内部为松质骨,外部包绕着皮质骨),其中D2类骨质窝底侧皮质骨厚度为1 mm,牙槽嵴侧皮质骨厚度为1.5 mm;D3类骨质窝底侧皮质骨厚度为0.5 mm,牙槽嵴侧皮质骨厚度为0.75 mm^[3]。另外,在垂直种植的骨块模型的底部建立5 mm高的梯形骨块模拟骨粉以满足种植体的植入。本研究使用Straumann的标准螺纹实心的柱形种植体,尺寸直径4.1 mm、长度10.0 mm、螺纹深度0.3 mm、螺距0.8 mm,基台直径为3 mm,绘制种植体模型和3组不同角度的基台模型。牙冠模型上端为长10 mm、宽10 mm、高3.4 mm的立方体(四周圆角化处理),下端为顶长10 mm、底长5 mm、高4 mm的倒圆台形。进行零件装配之前,在SolidWorks 2015的零件制作界面导入各模型文件,运用移动/复制命令将零件移动到合适的位置,通过布尔运算完成零件的组合。将上颌骨模型、种植体模型、基台模型、牙冠模型导入SolidWorks 2015的装配环境,通过移动、约束等命令完成整体模型的建立并检查

有无干涉。最后,将所有模型文件保存为.xt格式文件并导入Ansys 15.0中。如图1所示,2-1、2-2、2-3分别为D2类骨质下垂直种植、30°种植、45°种植模型;3-1、3-2、3-3分别为D3类骨质下垂直种植、30°种植、45°种植模型。

1.2.2 实验假设条件和材料性质 假设模型中各种材料均为连续、线性、各向同性的弹性材料,种植体与周围骨组织之间为100%的骨性结合,在力的作用下各部位之间不发生相对滑动。各部位的具体材料力学参数见表1^[4]。

表1 材料力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of the material

材料	弹性模量(E)/MPa	泊松比/ ν
牙冠	3000	0.35
皮质骨	13700	0.30
松质骨	1370	0.30
钛	103400	0.35
骨粉	3450	0.31

1.2.3 模型的网格划分 在Ansys 15.0中,采用Ansys自适应网格划分功能对每个模型进行四面体单元的智能尺寸网格划分,其单元数和节点数见表2。

表2 各组模型的网格划分情况

Tab. 2 Meshing of each group of models

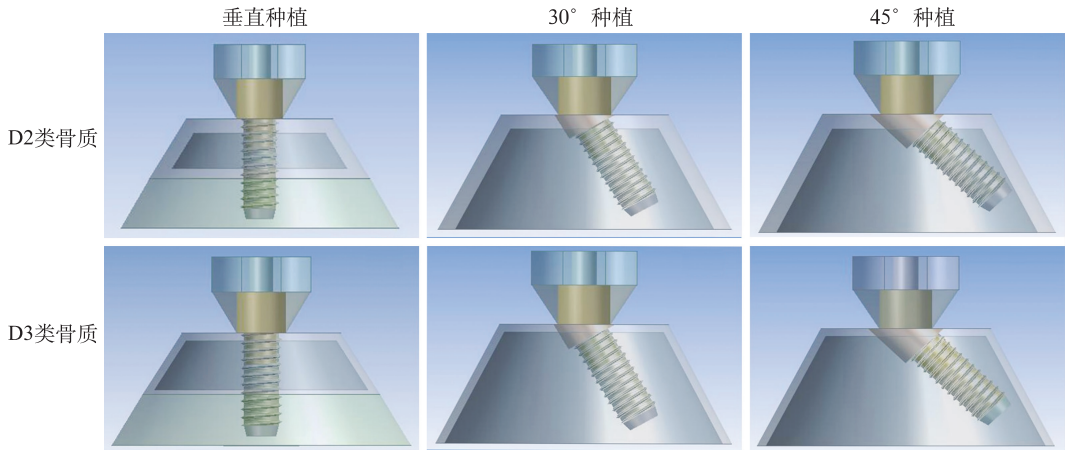
项目	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
单元数	41151	37582	36489	40190	34276	33805
节点数	71288	65006	63453	70963	61075	60349

1.2.4 负荷加载 根据中国人的平均咀嚼力大小,其范围约为30~300 N。在牙冠顶端施加一个与冠中央呈45°角的力,大小为150 N^[5],斜向载荷平均加于牙冠的功能尖斜面。

1.2.5 结果处理 使用Ansys 15.0软件进行求解,并对结果进行后处理,输出种植体周围骨组织的应力云图及Von-Mises应力最大值,分析在不同的骨质类型和不同的种植体倾斜角度的条件下皮质骨和松质骨中的应力值。

2 结果

2.1 皮质骨内应力变化 经Ansys 15.0求解,上颌骨模型的皮质骨中的Von-Mises应力分布如图2所示。在所有模型中,最大Von-Mises应力集中在围绕种植体颈部的皮质骨中。上颌骨模型的皮质骨中的最大Von-Mises应力远高于松质骨,D3类骨质模型中的最大Von-Mises应力高于D2类。



1a、1b、1c 分别为 D2 类骨质下垂直种植、30°种植、45°种植模型；1d、1e、1f 分别为 D3 类骨质下垂直种植、30°种植、45°种植模型
图 1 不同骨质类型和种植体倾斜角度的种植义齿三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element model of implant denture with various bone types and implant tilt angle.

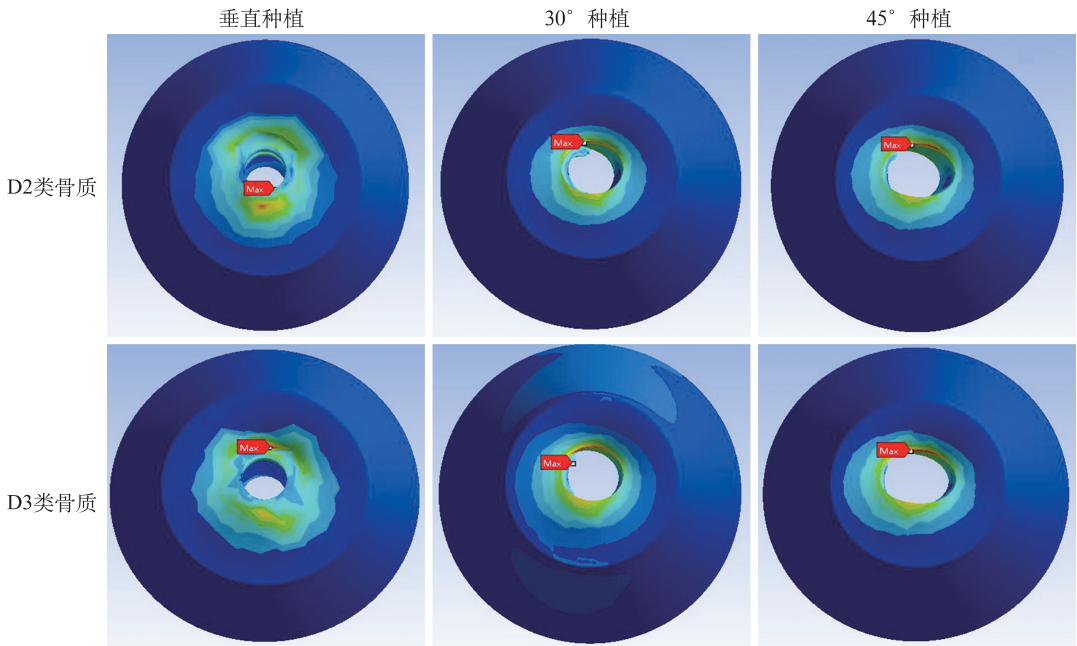


图 2 上颌骨模型的皮质骨中的 Von-Mises 应力分布图

Fig. 2 Von-Mises stress distribution in cortical bone of maxillary model.

D2 类骨质模型的皮质骨中，在模型 2-1 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 41.42 MPa，模型 2-2 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 48.38 MPa，与模型 2-1 相比，应力增加了 16.80%。模型 2-3 中的最大 Von-Mises 应力值为 43.53 MPa，与模型 2-2 相比，应力降低了 10.01%。模型 2-3 中计算的最大 Von-Mises 应力比模型 2-1 中计算的最大 Von-Mises 应力增大了 5.10%。

D3 类骨质模型的皮质骨中，在模型 3-1 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 47.09 MPa，模型 3-2 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 53.17 MPa，与模型 3-1 相比，应力增加了 12.92%。模型 3-3 中的

最大 Von-Mises 应力值为 49.86 MPa，与模型 3-2 相比，应力降低了 6.22%。模型 3-3 中计算的最大 Von-Mises 应力比模型 3-1 中计算的最大 Von-Mises 应力增大了 5.89%。

2.2 松质骨内应力变化 经 Ansys 15.0 求解，上颌骨模型的松质骨中的 Von-Mises 应力分布如图 3 所示。在松质骨中，两种类型的骨质中检测到应力值随着种植体的倾斜角度的增加而减少，其结果如表 3 所示。

D2 类骨质模型的松质骨中，在模型 2-1 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 5.086 MPa，模型 2-2 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 4.880 MPa，与

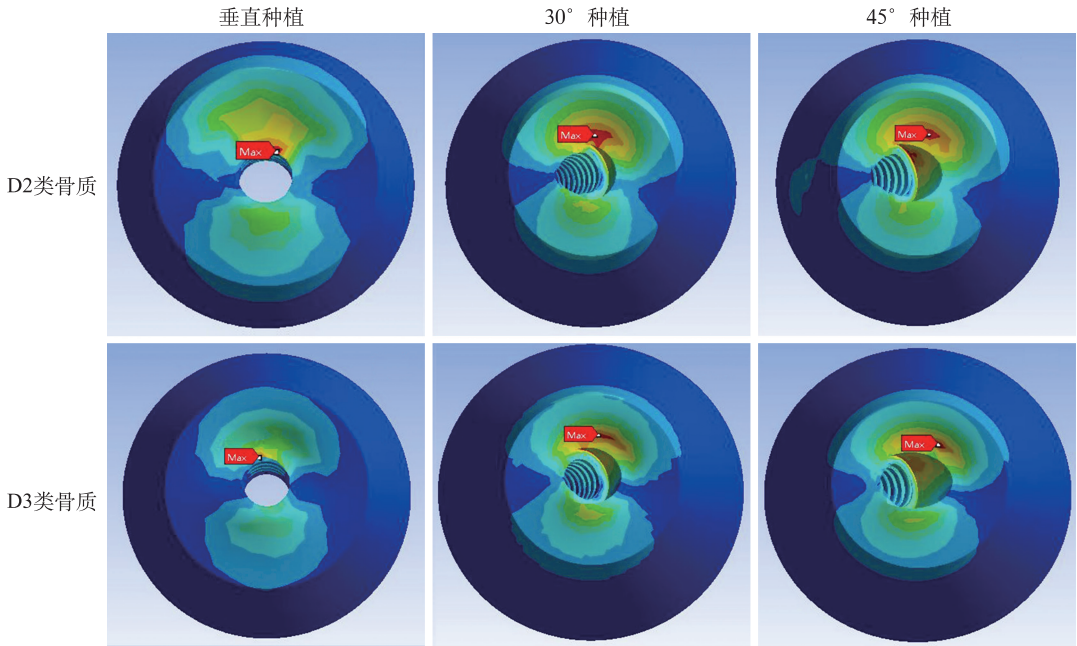


图3 上颌骨模型的松质骨中的 Von-Mises 应力分布图

Fig. 3 Von-Mises stress distribution in cancellous bone of maxillary model

表3 各组模型的 Von-Mises 应力峰值

Tab. 3 Von-Mises stress peaks for each model

模型编号	骨质类型	种植体倾斜角度/(°)	皮质骨应力峰值/MPa	松质骨应力峰值/MPa
2-1	D2	0	41.42	5.086
2-2	D2	30	47.38	4.880
2-3	D2	45	43.53	4.516
3-1	D3	0	47.09	9.283
3-2	D3	30	53.17	6.607
3-3	D3	45	49.86	6.569

模型 2-1 相比,应力减少了 4.05%。模型 2-3 中的最大 Von-Mises 应力值为 4.516 MPa,与模型 2-2 相比,应力降低了 7.46%。模型 2-3 中计算的最大 Von-Mises 应力比模型 2-1 中计算的最大 Von-Mises 应力减小了 11.20%。

D3 类骨质模型的松质骨中,在模型 3-1 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 9.283 MPa,模型 3-2 中计算出的 Von-Mises 应力最大为 6.607 MPa,与模型 3-1 相比,应力减少了 28.83%。模型 3-3 中的最大 Von-Mises 应力值为 6.569 MPa,与模型 3-2 相比,应力降低了 0.58%。模型 3-3 中计算的最大 Von-Mises 应力比模型 3-1 中计算的最大 Von-Mises 应力减小了 29.23%。

3 讨论

在一些研究中已经表明有限元分析方法由于其独特的优势可适用于牙科生物力学的分析^[6]。该方法利用三维模型模拟人体解剖结构,做简化处理并进行网格划分,通过特定的载荷施加方式计算其应

力分布情况,计算结果可通过应力分布云图直观的反映出来。由于将人体解剖结构模型化较为复杂、实验假设条件过于理想化^[7]等因素,有限元分析方法只能得出近似的结果,但该结果的准确性可由大量的单元和节点来改善。因此本研究通过对实验结果进行分析,所得结论在一定程度上对临床具有指导意义。

3.1 骨质类型的影响 在临床实践中,骨质类型是种植义齿是否成功的一个重要因素。有文献指出,在 D4 类骨质中进行种植义齿手术的失败率较高,较适合进行种植体植入骨质类型为 D1, D2 和 D3 类骨质^[8]。本研究中我们模拟了两类适合种植体植入的骨质类型: D2 和 D3 类骨质。结果提示:在相同条件下, D3 类骨质模型与 D2 类相比所得出的应力值更高,所有模型中最大应力集中在围绕种植体颈部的皮质骨中。这也就证明了种植体颈部周围骨质应力不同是皮质骨厚度改变的结果。

有文献做了关于皮质骨厚度对种植体稳定性影响的研究,提出种植体稳定性与皮质骨厚度之间存在显著的相关性^[9,10]。据 Holmes 和 Loftus 报道,皮质骨厚度的增加可以减少种植体的移动,从而降低骨水平界面的应力^[11]。这些研究提示,皮质骨厚度的变化会影响颌骨所受的压力,决定了种植体对周围骨组织的应力分布。

3.2 种植体倾斜角度的影响 上颌骨的增龄性改变或牙周病等病理性改变均会引起上颌后牙区的垂

直骨量不足,为减小创伤或简化手术操作,倾斜种植通常被作为上颌窦底提升术的替代方案,避免上颌窦底提升术所致的上颌窦粘膜穿孔等潜在风险^[12]。目前也有文献报道认为上颌后区行倾斜种植术后种植体也可获得良好的稳定性^[13],然而如何选择合适的种植体植入角度及其不同角度下种植体与周围骨质的受力分析目前相关报道甚少。本研究中对 3 种不同的角度进行了模拟,分别是:0°、30°、45°,结果发现:垂直种植模型种植体上端皮质骨中的应力值比倾斜种植模型低,该应力值的降低不仅受到角度的影响,而且种植体根端上颌窦底皮质骨也会降低垂直种植体上端的应力值。上述研究提示,采用上颌窦底提升术的种植体垂直角度植入方案可作为上颌后牙区骨量不足患者进行种植体植入的首选方案。

同时,本研究发现在松质骨中,随着种植体倾斜角度的增加,松质骨中的应力逐渐减小。这是由于倾斜种植体释放的大部分应力集中在种植体颈部区域的皮质骨中。在皮质骨中,垂直种植模型中的应力值最小,其次是 45°倾斜模型,30°倾斜模型中的应力最大。在倾斜模型中,应力分布最合理的角度是 45°,该结果提示,种植体植入角度的选择并非越小越好,合理的选择植入角度,将有效减少种植体对周围骨质所产生的不良应力,减小骨质吸收,延长种植体的长期稳定性。

综上所述,在种植义齿之前应着重考虑骨质类型。对于骨量不足的上颌后牙区,采取上颌窦底提升术与种植体垂直植入术为首选治疗方案。若采用倾斜种植,种植体 45°倾斜植入的效果优于 30°倾斜植入。

参考文献

- [1] Ogawa T, Dhaliwal S, Naert I, et al. Impact of implant number, distribution and prosthesis material on loading on implants supporting fixed prostheses [J]. *J Oral Rehabil*, 2010, 37(7): 525-531.
- [2] Lemos CA, Ferro-Alves ML, Okamoto R, et al. Short dental implants versus standard dental implants placed in the posterior jaws: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Dent*, 2016, 47: 8-17.
- [3] 马猛,沈洪洲,黄圣运,等.骨质量对上颌窦提升术后植入种植体稳定性影响的三维有限元分析[J].*中国口腔颌面外科杂志*,2016,14(3): 209-212.
- [4] Chang SH, Lin CL, Hsue SS, et al. Biomechanical analysis of the effects of implant diameter and bone quality in short implants placed in the atrophic posterior maxilla [J]. *Med Eng Phys*, 2012, 34(2): 153-160.
- [5] Cho CM, You HK, Jeong SN. The clinical assessment of aggressive periodontitis patients [J]. *J Periodontal Implant Sci*, 2011, 41(3): 143-148.
- [6] 姚春燕,张伟,李矿伟,等.基于有限元分区式多孔种植体设计研究[J].*口腔医学研究*,2017,33(9): 913-915.
- [7] 葛奕辰,蒋少康,李轻如,等.“All-on-4”在不同骨质条件下应力分布的三维有限元分析[J].*口腔医学研究*,2016, 32(12): 1252-1256.
- [8] Lindh C, Oliveira GHC, Leles CR, et al. Bone quality assessment in routine dental implant treatment among Brazilian and Swedish specialists [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2014, 25(9): 1004-1009.
- [9] Wang R, Eppell SJ, Nguyen C, et al. Relative contribution of trabecular and cortical bone to primary implant stability: an *in vitro* model study [J]. *J Oral Implantol*, 2016, 42(2): 145-152.
- [10] Marquezan M, Mattos CT, Sant'anna EF, et al. Does cortical thickness influence the primary stability of miniscrews?: A systematic review and meta-analysis [J]. *Angle Orthod*, 2014, 84(6): 1093-1103.
- [11] Del Fabbro M, Bellini CM, Romeo D, et al. Tilted implants for the rehabilitation of edentulous jaws: a systematic review [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2012, 14(4): 612-621.
- [12] Li X, Cao Z, Qiu X, et al. Does matching relation exist between the length and the tilting angle of terminal implants in the all-on-four protocol? stress distributions by 3D finite element analysis [J]. *J Adv Prosthodont*, 2015, 7(3): 240-248.
- [13] Gumrukcu Z, Korkmaz YT, Korkmaz FM. Biomechanical evaluation of implant-supported prosthesis with various tilting implant angles and bone types in atrophic maxilla: A finite element study [J]. *Comput Biol Med*, 2017, 86: 47-54.

[收稿日期:2018-10-31]

(本文编辑 李四群)