

重载铁路隧道基底结构疲劳寿命研究

张 航, 冯建文, 杨士鉴

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2022年10月15日; 录用日期: 2022年11月5日; 发布日期: 2022年11月16日

摘 要

由于重载铁路隧道基底结构因列车的反复长期性动荷载的施加, 导致基底结构大量出现疲劳损伤的现象, 严重危及列车安全。介绍疲劳寿命的预测方法, 详细说明每个疲劳寿命预测方法的优点与不足, 讲述疲劳计算原理, 引入专业疲劳计算软件, 可用于不同因素条件下的基底结构的寿命计算。

关键词

重载铁路隧道, 基底结构, 疲劳损伤

Study on Fatigue Life of Base Structure of Heavy-Haul Railway Tunnel

Hang Zhang, Jianwen Feng, Shijian Yang

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

Received: Oct. 15th, 2022; accepted: Nov. 5th, 2022; published: Nov. 16th, 2022

Abstract

Due to the repeated long-term dynamic load of the train, the base structure of the heavy haul railway tunnel has a lot of fatigue damage, which seriously endangers the safety of the train. The fatigue life prediction methods are introduced, the advantages and disadvantages of each fatigue life prediction method are explained in detail, the fatigue calculation principle is described, and the professional fatigue calculation software is introduced, which can be used to calculate the life of the base structure under different factors.

Keywords

Heavy Haul Railway Tunnel, Base Structure, Fatigue Damage

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,重载铁路已成为运送货物的重中之重,其影响意义对于各个国家的外贸发展有着深刻含义,重载铁路的运输发展成为各国主要研究方向。由于重载列车具有质量大,轴重大,且隧道结构由于施工阶段的技术以及施工条件与地质环境的阻碍,隧道的基础结构在施工中,难以避免会产生初始的应力与损伤缺陷。如若是在静荷载的作用下,这类初始的应力与损伤缺陷不会对隧道的基底结构产生安全隐患,但是通过列车的动荷载且长期反复作用下,这种对基底结构的损伤会呈几何增长,并且会将损伤应力不断累计,结果导致整个基底结构甚至隧道结构出现裂缝,最终导致整个结构的承载力不足,隧道崩坏。目前,我国正在服役营运的重载铁路隧道中已经有一部分隧道出现了不同程度的疲劳损伤,关于隧道在营运期间的基底结构损伤下整体结构的疲劳损伤寿命研究比较匮乏,隧道产生的疲劳损伤在整治的过程中采取的措施与病害治理措施同出一辙,不具有针对性,不经济。基于此,研究重载铁路隧道在营运期间的动荷载下的基底结构疲劳损伤和分析判断出整体结构的适用寿命关系到人民的人身安全与财产安全已成为当下的关键重点。施成华[1]等结合地层模型与理论分析,通过对铁路隧道基底结构的应力分析及基底疲劳损伤累计破损研究,提出隧道病害产生原因,并提议病害防治措施。彭立敏[2]等通过试验与模型分析,采用局部应力应变法对基底结构的疲劳寿命进行计算,得出加厚基底结构和钢筋的形式会显著延长基底结构的寿命,最佳为铺设20 cm厚度C25的混凝土的寿命为59~60年;刘宁[3]等采用有限元软件建立隧道-围岩-耦合三维计算模型,在考虑基底脱空与软化的条件下,得出结构拉应力与压应力最大值在仰拱中心处、连接处的底部,在基底结构损伤的条件下,脱空程度增加一米则基底服役寿命下降50%。牛亚彬[4]通过有限元软件建立围岩压力-列车荷载-轨道自重,现场实测之后,得出30吨轴重列车在70 km/h速度下,营运标准为100列/天,100节/列条件下,III、IV、V级围岩下基底机构疲劳寿命为6.8年、4.3年、1.5年。上述疲劳寿命研究都是基于一种预测方法,实际上随着前面学者的研究,目前在基底结构疲劳寿命预测过程中,有许多的影响因素,控制这些影响因素也就形成了不同的疲劳寿命的预测方法。本文将介绍各个方法的优缺点以及基底结构具体影响因素的疲劳损伤分析。

2. 疲劳寿命预测方法

2.1. 名义应力法

名义应力法简单来说,通过构件疲劳寿命曲线和疲劳极限强度这两种概念综合提炼出来的一种疲劳寿命预测手段,也是自构件疲劳概念产生后出现的的第一种测算疲劳寿命的方法,通常是在金属的材料中应用。它的原理是,通过获取结构关键易疲劳部位的应力集中系数和名义应力,通过疲劳损伤累计的理论分析和材料的疲劳寿命的曲线来预测结构的疲劳寿命,且主要适用于高周疲劳寿命估算。且该方法的控制条件是构件或者结构因为疲劳失去作用时的危险点的名义应力,即在构件的一定横截面的净面积

上的内力也即平均应力。在测算不同的结构时，只需要看组成结构的材料、结构承受的荷载谱及应力集中系数相同即可。利用此方法去预测结构的疲劳寿命分五步走：

- 1) 将动荷载谱应用在结构上，得出结构的名义应力谱；
- 2) 确定结构中疲劳损伤的部位，以及该处的名义应力谱；
- 3) 通过试验的数据，建立构件疲劳曲线方程；
- 4) 将疲劳损伤部位的名义应力带入疲劳曲线方程就得出疲劳寿命；
- 5) 对于多幅或变幅荷载下还需要结合累计损伤的研究。

2.2. 局部应力应变法

局部应力应变法是整合整体结构产生的应变幅与疲劳寿命的关系进而产生的一种疲劳寿命预测的方法。方法的原理是虽然结构不同，但是只要在疲劳损伤部位的结构的应力应变时程相同时，两个构件就具有了一样的疲劳寿命程度。在具体的试验中还需结合材料之间的循环应力应变曲线，通过有限元计算才更为准确地得到疲劳损伤部位的应力应变谱，以此来估算构件的疲劳寿命，且局部应力应变法将材料的塑形变形以及荷载的加载顺序都考虑进去了。

2.3. 应力场强法

若构件存在较为明显的缺口时，那么缺口的位置就是整个结构的关键控制条件，应力场强法就是采用场强表示构件缺口处的受力情况，表达式如下：

$$\sigma_{FI} = 1/V \int_{\Omega} f(\sigma_{ij}) \varphi(r) dv \quad (1-1)$$

式中， σ_{FI} ——缺口场强度；

Ω ——缺口破坏区；

V —— Ω 的体积；

$f(\sigma_{ij})$ ——破坏应力函数；

$\varphi(r)$ ——权函数。

2.4. 能量法

能量法是相当于在局部应力应变法延伸出来的一种疲劳寿命预测的方法。此方法将材料的弹塑性变形也考虑进来，原理在于此方法认为当采取不同结构的塑形应变能相同，即可认为它们各自的疲劳寿命相同。适用于低周疲劳寿命预测。

3. 疲劳累计损伤理论

3.1. 线性疲劳累计损伤理论

线性疲劳累计损伤理论简单来讲就是，每次应力单独的循环次数独自消耗，且只有独自消耗的循环应力循环的次数才与疲劳损伤相关，最终的疲劳损伤即为各个应力循环疲劳损伤线性之和。简称为 Miner 理论。

3.2. 非线性疲劳累积损伤理论

非线性疲劳累计损伤理论就是在线性疲劳累积损伤理论上进行更接近实际的修正，将低于疲劳的极限应力与加载顺序考虑进去。在大量的实验中，Miner 理论采取最广泛，而非线性疲劳累积损伤理论更适合实际的测算。

4. Fe-Safe 疲劳寿命计算原理

简单来讲, Fe-safe 是目前疲劳计算最重要的工具, 根据 ANSYS 等有限元软件初步计算的数据结果, 完整导入进此软件, 此软件的后处理程序会自动处理这结果。Fe-safe 软件具有最新的算法程序, 既可以计算弹性阶段, 又能计算弹塑性阶段的应力, 并在计算之初能添加很多初始影响因素, 比如应力奇异、应力集中、弱弹簧效应、初始应力等多种基础实用的功能, 且 Fe-safe 软件有大量的材料数据库, 不需要用户自己去添加材料特性, 使起更能满足用户需求。

Fe-safe 使用简单直接, Fe-safe 的基本分析过程是首先在有限元软件中进行建模, 然后进行受力分析, 得到的数据结果, 将起导入进 Fe-safe, 在 Fe-safe 中定义疲劳荷载、材料的疲劳参数、以及初始应力等影响因素, 结合累积损伤理论进行疲劳寿命计算, 结果显示结构的疲劳寿命以及安全等级计算数据。

5. 重载铁路隧道基底结构疲劳寿命分析

5.1. 不同影响因素下基底寿命分析

在有限元中通过建模分析, 模拟与实际情况相符的列车通过隧道的情况, 将应力的重复循环数设置

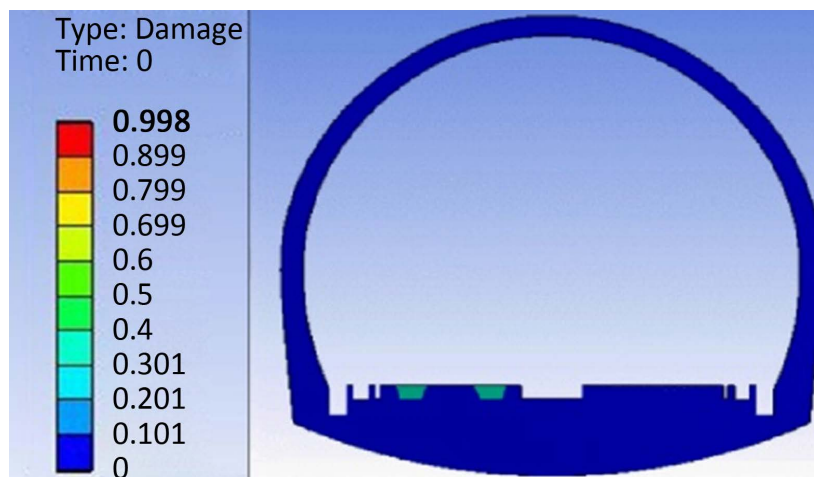


Figure 1. Damage distribution of compact base structure after five years of operation
图 1. 运行五年密实基底结构损伤分布

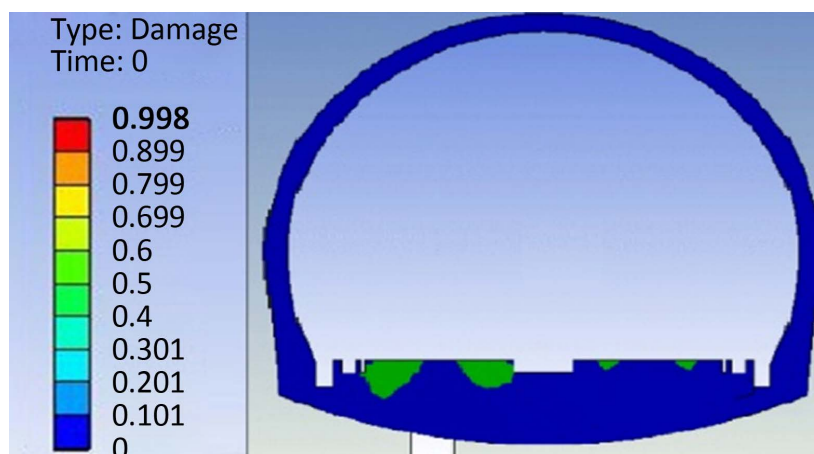


Figure 2. Damage distribution of local empty base structure after five years of operation
图 2. 运行五年局部脱空基底结构损伤分布

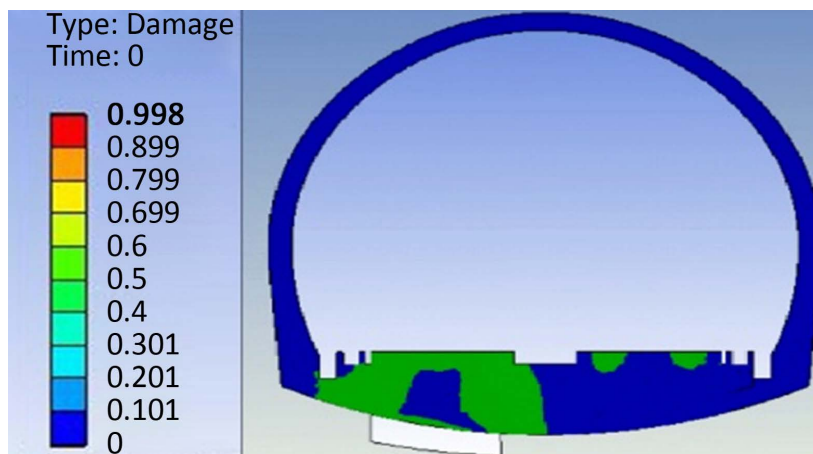


Figure 3. Damage distribution of hollow through basement structure after five years of operation

图 3. 运行五年脱空贯通基底结构损伤分布

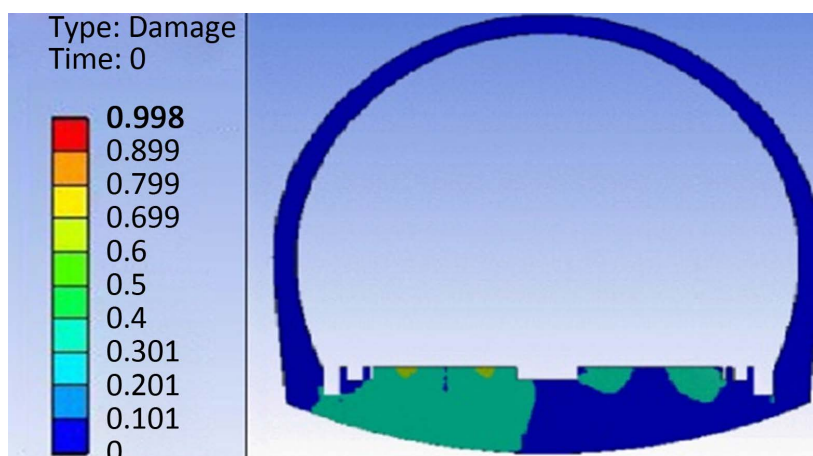


Figure 4. Damage distribution of compact basement structure after 20 years of operation

图 4. 运行 20 年密实基底结构损伤分布

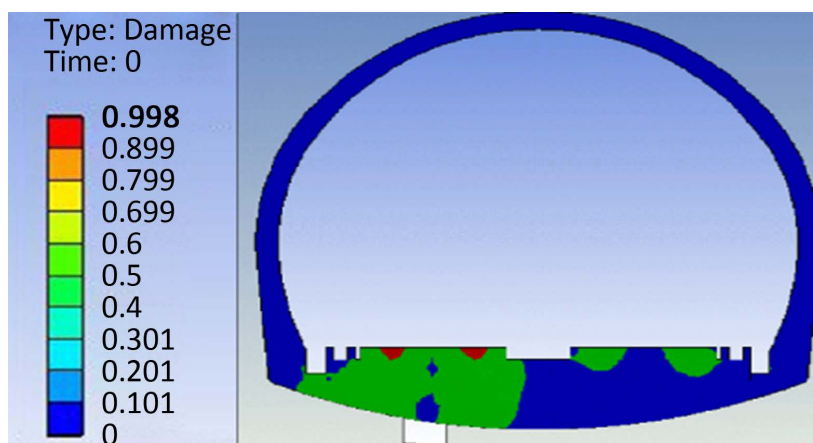


Figure 5. Damage distribution of local empty basement structure after 20 years of operation

图 5. 运行 20 年局部脱空基底结构损伤分布

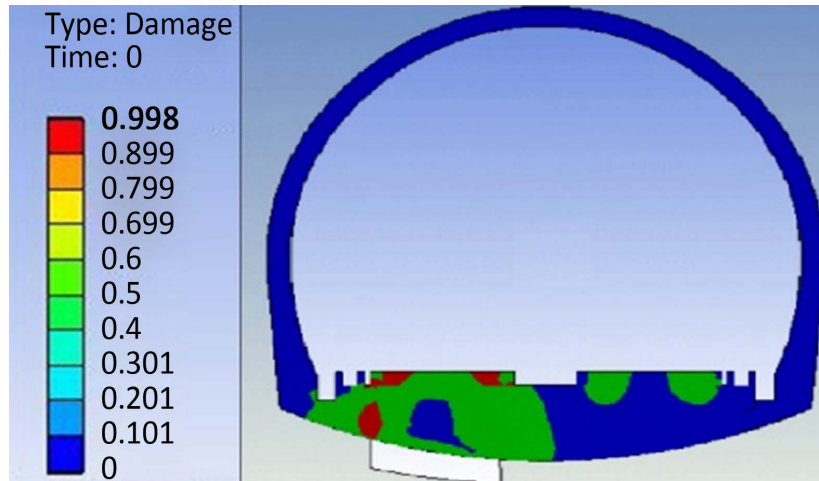


Figure 6. Damage distribution of hollow through basement structure after 20 years of operation

图 6. 运行 20 年脱空贯通基底结构损伤分布

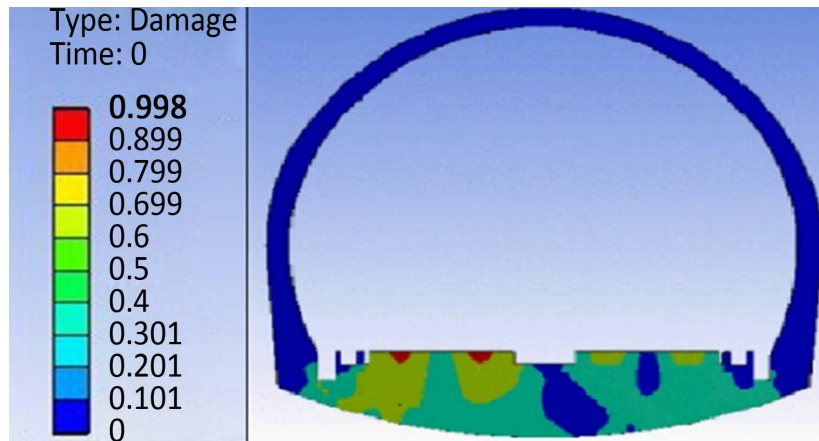


Figure 7. Damage distribution of compact basement structure after 80 years of operation

图 7. 运行 80 年密实基底结构损伤分布

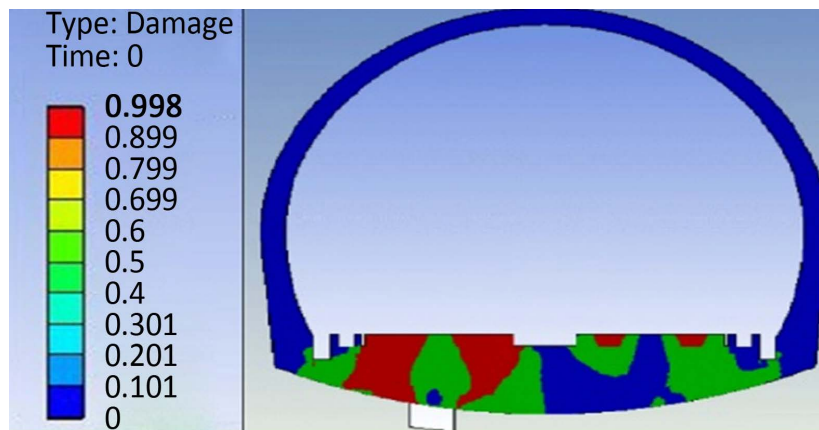


Figure 8. Damage distribution of local empty basement structure after 80 years of operation

图 8. 运行 80 年局部脱空基底结构损伤分布

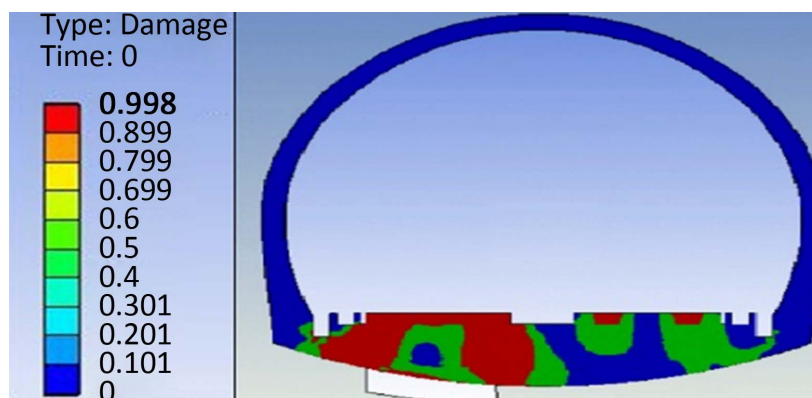


Figure 9. Damage distribution of hollow through basement structure after 80 years of operation

图 9. 运行 80 年脱空贯通基底结构损伤分布

为 40 次左右，模拟完整的列车通过的条件。将现场实测的动力响应分析结果导入进 Fe-safe 软件，即可得出不同仰拱矢跨比条件下重载铁路隧道基底结构疲劳寿命[5]。由此计算步骤，可分别得出运行 5 年、20 年、80 年基底结构疲劳损伤规律。如图 1~9 所示。

5.2. 分析结果

由仿真结果表明不同仰拱矢跨比的情况下，隧道衬砌结构的疲劳寿命分布的规律大致相同，边墙及以上部位的结构疲劳寿命比较大，隧道基底结构的疲劳寿命比较小，即说明隧道基底结构在重载列车动荷载下的动力响应更为明显，基底结构所承载的荷载比隧道其他结构承载的更大，所处的环境也更危险。

5.3. 预测方法对比分析

名义应力法的不足在于[6]，没有考虑试验的构件与实际构件的疲劳特性必定有一定的差异；加载顺序以及缺口部位的塑性变形影响；不同应力水平下的疲劳寿命曲线有很大差别。局部应力应变法优点在于可以通过测量来确定应变，即将测量的疲劳损伤部位的应力应变值结合材料的本身的应变疲劳曲线来计算结构的疲劳寿命。但是不足之处在于没有添加应力梯度，只能应用于低周疲劳寿命的预测。应力场强法相比于局部应力应变法将疲劳损伤部位的应力场与应力梯度考虑进去，这与材料的疲劳破坏的原理相符合，同时适用于高周与低周疲劳寿命分析。不足之处在于此方法的计算非常复杂。

6. 结论

1) 疲劳寿命程度预测方法有名义应力法、局部应力应变法、场强法、能量法等，名义应力法以名义应力谱为计算基础，综合疲劳寿命曲线和疲劳累积损伤理论，适用于高周疲劳寿命预测；局部应力应变法以局部应力应变谱为基础，适用于低周疲劳寿命计算。重载铁路隧道基底疲劳损伤适用于名义应力法来进行寿命预测。

2) 混凝土疲劳寿命预测曲线可通过材料试验获得，目前通过单轴拉压试验得出的疲劳寿命曲线能将最大应力水平和最小应力水平与疲劳寿命的关系考虑进去。

3) 线性疲劳累积损伤不考虑不同应力损伤之间的相互影响，总损伤由各个应力的循环累积线性相加即可，操作简单直接，便于使用。非线性疲劳累积损伤从疲劳破坏机理出发，能够兼顾各种初始影响因素，但是使用复杂，预测精度不够，两种疲劳累积损伤在铁路隧道结构疲劳寿命预测中均有应用。

参考文献

- [1] 施成华, 彭立敏, 黄娟. 铁路隧道基底病害产生机理及改善措施[J]. 中国铁道科学, 2005(4): 62-67.
- [2] 彭立敏, 施成华, 黄娟. 列车荷载作用下隧道铺底结构疲劳寿命分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(1): 82-85.
- [3] 刘宁, 彭立敏, 施成华. 基岩软化条件下仰拱结构疲劳寿命的预测分析[J]. 振动工程学报, 2016, 29(5): 936-944.
- [4] 牛亚彬. 重载铁路隧道病害机理及整治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.
- [5] 王风, 刘聪, 彭立敏, 雷明锋, 施成华. 基底脱空条件下重载铁路隧道铺底结构疲劳性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(10): 2688-2693. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20201102>
- [6] 邹文浩, 马超峰, 尹成斐, 等. 重载铁路隧道基底病害锚注一体化复合整治技术[J]. 中国铁路, 2015(12): 63-67. <https://doi.org/10.19549/j.issn.1001-683x.2015.12.016>