

文章编号: 1674—8247(2024)03—0034—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 03. 007

# 基于轮轨非 Hertz 接触的货运铁路钢轨磨耗研究

杨玉明

(新长铁路有限责任公司, 南京 210018)

**摘 要:**随着铁路运营的发展,货车车辆轴重不断增加,钢轨磨耗异常严重。本文采用 UM 动力学软件,建立了三维铁路钢轨磨耗模型,计算了红柠铁路专用线部分线路条件下的钢轨磨耗情况。结果表明:(1)线路直线段内外钢轨的磨耗程度相近且较轻;(2)缓和曲线段内轨的磨耗集中分布在距离轮轨作用边轨头约 10 mm 的走行面处,而外轨磨耗集中分布在外轨内侧半径为 80 mm 的弧段曲线上;(3)圆曲线段外轨磨耗严重,主要分布在轨头内侧半径为 80 mm 的弧段上,半径为 300 mm 的弧段上也有明显磨耗;(4)内轨磨耗主要分布在轨头半径为 300 mm 的弧段上,半径为 80 mm 的弧段上磨耗较轻。

**关键词:**钢轨磨耗;三维铁路钢轨磨耗模型;外轨磨耗;内轨磨耗

中图分类号: U213. 4<sup>+</sup>2

文献标志码: A

## Study on Rail Wear of Freight Railways Based on Non-Hertzian Wheel-rail Contact

YANG Yuming

(Xinyi-Changxing Railway Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

**Abstract:** With the development of railway operations, the increasing axle loads of freight vehicles have led to severe rail wear. This study employed the UM dynamics software to establish a three-dimensional model of rail wear for freight railways. Calculations were conducted for rail wear under specific track conditions along a private siding of Hongliulin-Shemmuxi Railway. The results reveal that: (1) Wear on the inner and outer rails along straight sections is comparably minor, with little difference observed between them. (2) In transition curves, wear on the inner rail is predominantly concentrated within a distance of approximately 10 mm from the running surface near the rail edge under wheel-rail interaction, whereas outer rail wear is mainly distributed along 80 mm radius arc section on the inner side of the rail. (3) For outer rails in circular curves, wear is severe, primarily occurring on the inner-side arc sections with a radius of 80 mm, with noticeable wear also present on arc sections of 300 mm radius. (4) Inner rail wear is primarily focused on arc sections with 300 mm radius at the rail head, while wear on 80 mm radius arc sections is relatively light.

**Key words:** rail wear; three-dimensional model of rail wear; outer rail wear; inner rail wear

随着铁路车辆速度与轴重的增加,铁路运输中存在大量钢轨磨耗问题。车辆轮对与钢轨的磨耗,改变了轮轨接触形式,严重影响行车安全<sup>[1]</sup>。通过钢轨磨

耗预测演化,可掌握磨耗发展规律,优化钢轨廓形,合理安排打磨周期,降低运营维护成本<sup>[2-3]</sup>。采用仿真模拟轮轨磨耗,定量分析其发生机理和作用过程,可

收稿日期:2023-10-26

作者简介:杨玉明(1969-),男,高级工程师。

引文格式:杨玉明. 基于轮轨非 Hertz 接触的货运铁路钢轨磨耗研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3):34-38.

YANG Yuming. Study on Rail Wear of Freight Railways Based on Non-Hertzian Wheel-rail Contact[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3):34-38.

用来指导铁路养护维修。Olofsson<sup>[4]</sup>根据轮轨接触几何关系,利用 Archard 磨耗模型计算磨耗量,成为现今轮轨磨耗计算的重要参考;Lewis<sup>[5]</sup>将摩擦功作为轮轨磨耗的评价指标,用 ADAMS/Rail 动力学软件建模,根据 Kalker 简化理论和 Archard 磨耗理论,对轮轨磨耗进行研究计算;王璞<sup>[6]</sup>等引入了数值方法模拟重载货车的车轮磨损演变,该方法包括车辆的空间耦合动力学和轨道、轮轨的三维滚动接触分析、Specht 的材料磨损模型,对外轮的磨耗进行了详细研究;杨新文<sup>[7]</sup>等利用 ANSYS 有限元计算软件,结合材料磨耗模型建立了重载铁路钢轨磨耗模型,分析评估了曲线外轨超高对钢轨磨耗的影响。

本文利用 UM 动力学模型中的 Input 软件建立货车-轨道模型,转入到 Simulation 仿真模块分析计算轮轨接触斑上的接触力;采用 Archard 材料磨耗模型计算轮轨接触斑钢轨磨耗深度分布和磨耗量值;通过将仿真得到钢轨的最大磨耗值与现场实测值换算比较,验证了模型的可靠性和准确性。

1 钢轨磨耗模型

1.1 钢轨磨耗计算流程

钢轨实际磨耗根据钢轨的垂直磨耗和侧面磨耗来综合体现,即总磨耗等于垂直磨耗 + 1/2 侧面磨耗。钢轨垂直磨耗指在钢轨顶面宽 1/3 处(距标准工作边)测量的磨耗量,钢轨侧面磨耗指在钢轨踏面(按标准断面)下 16 mm 处测量的磨耗量<sup>[8]</sup>。

利用 UM 中的 Input 软件建立货车轨道空间耦合动力学模型,用多体动力学 UM 软件中的 Simulation 模块计算轮轨接触力等参数值;最后,根据材料磨损模型,计算钢轨磨耗值。模拟中设定磨耗深度 0.1 mm 进行型面更新迭代,依次重复进行,直到货车运量达到设定限值时迭代终止条件停止,计算流程如图 1 所示。

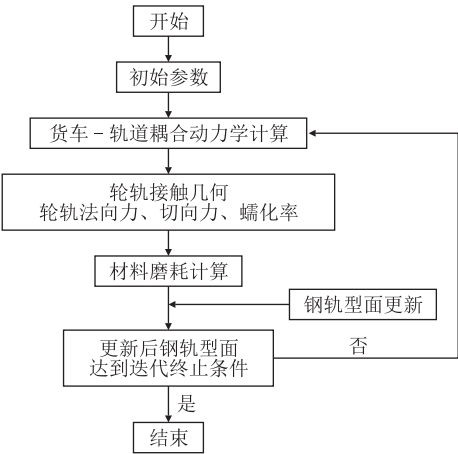


图 1 计算流程图

1.2 货车轨道耦合模型

C80 车主要由车体、转向架、制动装置、连缓装置等部分组成。C80 车体为双浴盆式、铝合金铆接结构,主要由底架、浴盆、侧墙、端墙和撑杆等组成。转 K6 型转向架为铸钢三大件式货车转向架。采用 B 级钢摇枕,弹性下交叉支撑装置;一系悬挂采用轴箱橡胶弹性剪切垫;二系悬挂采用带变摩擦减振装置的中央枕簧悬挂系统,二级刚度摇枕弹簧;下心盘采用含油尼龙心盘磨耗盘;装用 25 t 轴重 150 mm × 250 mm × 160 mm 型双列圆锥滚子轴承、RE2 A 型 50 钢车轴及 HEZB 或 HESA 型轻结构车轮;中拉杆式单侧闸瓦基础制动装置、组合式制动梁。C80 车体参数如表 1 所示。

表 1 C80 车体参数表

项目	数值
载重/t	80
自重/t	≤ 20
轴重/t	25
车辆长度/mm	12 000
车辆定距/mm	8 200
车辆最大高度/mm	3 793
车辆最大宽度/mm	3 184
车体内长/mm	10 728
车体内宽/mm	2 946
车轮直径/mm	840

根据 C80 货车参数,建立转 K6 型转向架和 C80 货车-轨道模型,如图 2、图 3 所示。

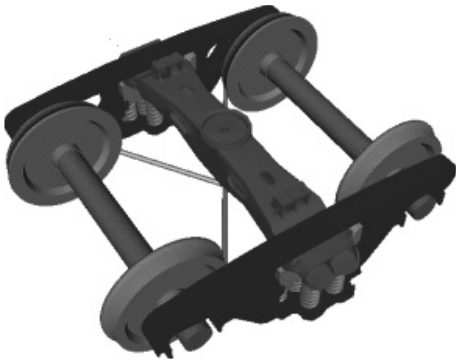


图 2 转 K6 型转向架图

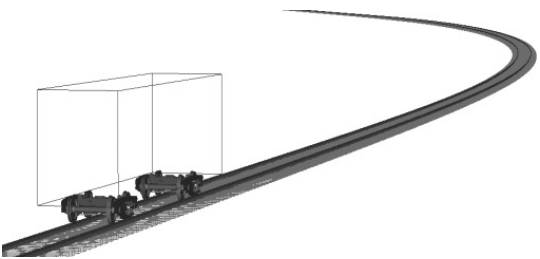


图 3 货车-轨道耦合动力学模型图

1.3 轮轨接触应力计算

1.3.1 计算法向应力

Kalker<sup>[9]</sup> 利用弹性力学余能原理,在弹性半空间的假设下,把轮轨接触斑进行矩形网格离散,求出三维轮轨非 Hertz 滚动接触的精确解,如图 4 所示。

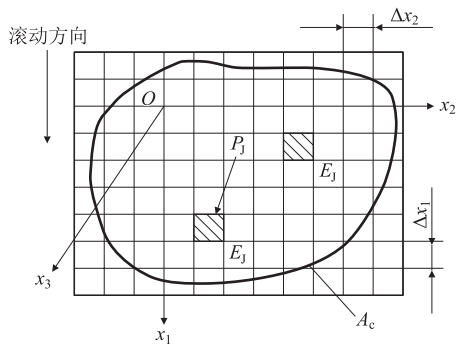


图 4 接触斑矩形网格离散图

余能原理离散形式表达为:

$$\begin{cases} \min_{P_{j3}} C = \frac{1}{2} P_{i3} A_{i3j3} P_{j3} + (h_j - q) P_{j3} A_0 \\ s. t. P_{j3} \geq 0 \quad \forall X \in A_c \\ A_0 \sum_j^M P_{j3} = F_N \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{i3}$ 、 $P_{j3}$ ——分别作用在离散单元  $i$  和单元  $j$  上的法向应力 (Pa);

$A_{i3j3}$ ——影响系数;

$F_N$ ——轮轨接触斑法向力 (N);

$M$ ——离散单元总数 (个)。

根据铁路标准 LM 型车轮轮对踏面和 60 kg/m 钢轨型面,建立轮轨型面三维模型,网格在接触区域加密如图 5 所示。

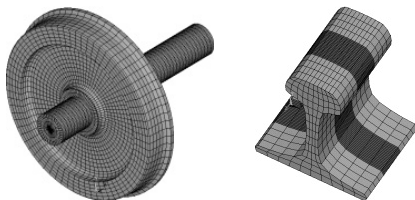


图 5 轮轨有限元模型图

1.3.2 计算切向应力

Kalker 在分析轮轨接触的研究中,得出两个弹性体滚动接触的线性理论,但此理论基于 Hertz 理论,适用于椭圆接触斑。后来, Kalker 在线性理论的基础上,对椭圆接触斑进行离散,提出了简化理论 (Fastsim 算法),此理论适用于不规则接触斑。因此,轮轨滚动接触切向应力可以用简化理论 (Fastsim 算法) 来

求解。

1.4 Archard 磨耗模型

Archard 磨耗模型论述了轮轨接触斑发生磨耗现象是由于轮轨接触斑上的蠕滑力或者摩擦力造成<sup>[10]</sup>。Archard 磨耗模型计算公式为:

$$V_w = K_A \times \frac{ND}{H} \quad (2)$$

式中:  $V_w$ ——钢轨接触斑磨耗体积 (m<sup>3</sup>);

$K_A$ ——磨耗系数;

$D$ ——车轮滑动距离 (m);

$N$ ——法向压力 (N);

$H$ ——钢轨的材料硬度 (MPa)。

2 计算结果

根据红柠铁路专用线的实际情况,采取以下仿真条件:

- (1) C80 货车。

(2) 轴重 25 t。

(3) 车速 60 km/h。

(4) 60 kg/m 钢轨。

(5) 新 II 型混凝土枕。

(6) 碎石道床。

选取 K 23 + 030.562 ~ K 23 + 902.692 里程段,轨道不平顺采用美国五级轨道谱<sup>[11]</sup>,如图 6 所示。

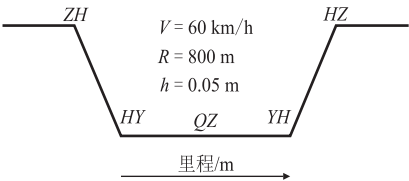


图 6 曲线参数图

2.1 直线段磨耗

直线段钢轨磨耗型面更新如图 7 所示,内外轨磨耗量如图 8 所示。

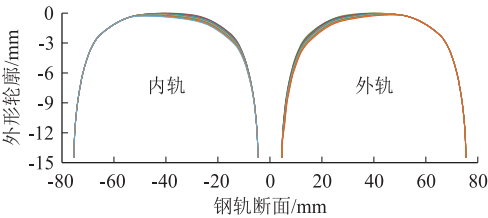
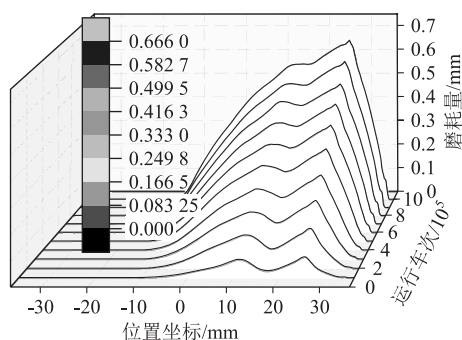
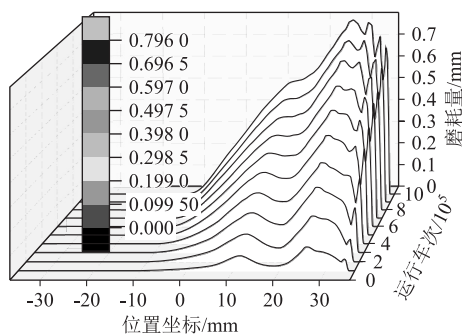


图 7 直线段钢轨型面更新图

由图 8 可知,直线段垂直磨耗和侧面磨耗均呈现较小值,大都发生在轮轨接触面名义滚动圆附近。

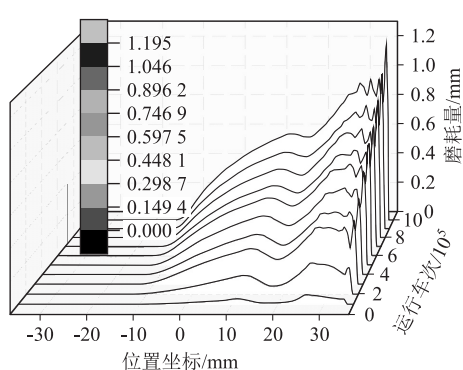


(a) 内轨

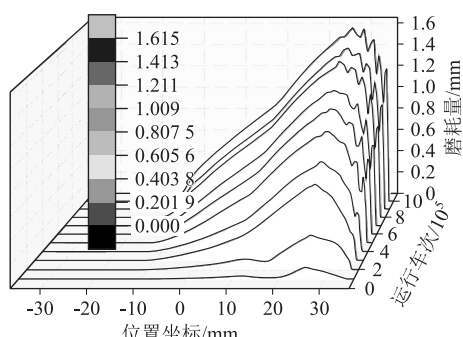


(b) 外轨

图8 直线段内外钢轨磨耗量图



(a) 内轨



(b) 外轨

图10 缓和曲线段内外钢轨磨耗量图

取钢轨通过货运量总重  $10^6$  t 下, 直线段内、外钢轨垂直磨耗和侧面磨耗最大磨耗量与实测内、外钢轨垂直磨耗和侧面磨耗量进行对比。

在相同车辆通过货运总重  $10^6$  t 情况下, 内轨垂直磨耗模拟、实测分别为 0.665 mm、0.684 mm, 相差 2.86%; 内轨侧面磨耗模拟、实测分别为 0.125 mm、0.128 mm, 相差 2.4%; 外轨垂直磨耗模拟、实测分别为 0.712 mm、0.707 mm, 相差 -0.7%; 外轨侧面磨耗模拟、实测分别为 0.138 mm、0.144 mm, 相差 4.35%。

## 2.2 缓和曲线段磨耗

缓和曲线段钢轨磨耗型面更新如图 9 所示, 内外轨磨耗量如图 10 所示。

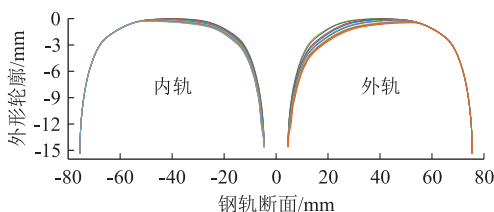


图9 缓和曲线段钢轨型面更新图

由图 10 可知, 缓和曲线段内轨磨耗主要分布在距轨头中部 10 mm 左右走行面处, 外轨内侧和轨肩存在较为明显的磨耗。

取钢轨通过货运量总重  $10^6$  t 下, 缓和曲线段内、

外钢轨垂直磨耗和侧面磨耗最大磨耗量与实测内、外钢轨垂直磨耗和侧面磨耗量进行对比。在相同车辆通过货运总重  $10^6$  t 情况下, 内轨垂直磨耗模拟、实测分别为 1.191 mm、1.248 mm, 相差 4.79%; 内轨侧面磨耗模拟、实测分别为 0.876 mm、1.114 mm, 相差 27.2%; 外轨垂直磨耗模拟、实测分别为 1.613 mm、1.642 mm, 相差 1.8%; 外轨侧面磨耗模拟、实测分别为 1.658 mm、1.682 mm, 相差 1.45%。

## 2.3 圆曲线段的磨耗

圆曲线段钢轨磨耗型面更新如图 11 所示, 内外轨磨耗量如图 12 所示。

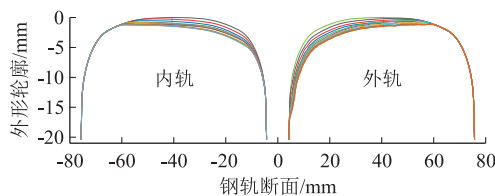


图11 圆曲线段钢轨型面更新图

由图 12 可知, 圆曲线段内轨磨耗主要发生在钢轨轨顶中部走行面, 垂直磨耗严重, 侧面磨耗相对较小。轮缘与轨距角发生紧密接触时, 法向应力大, 摩擦系数剧增, 造成外轨的侧磨量大于垂磨量。

取钢轨通过货运量总重  $10^6$  t 下, 缓和曲线段内、



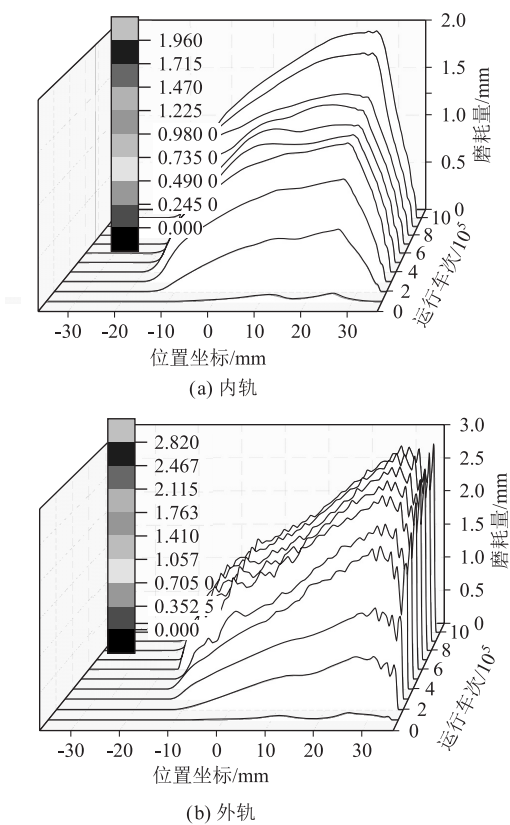


图 12 圆曲线段内外钢轨磨耗量图

外钢轨垂直磨耗和侧面磨耗最大磨耗量与实测内、外钢轨垂直磨耗和侧面磨耗量进行对比。在相同车辆通过货运总重  $10^6$  t 情况下,内轨垂直磨耗模拟、实测分别为 1.965 mm、1.812 mm,相差 - 7.79% ;内轨侧面磨耗模拟、实测分别为 0.872 mm、0.983 mm,相差 12.73% ;外轨垂直磨耗模拟、实测分别为 1.142 mm、1.164 mm,相差 1.93% ;外轨侧面磨耗模拟、实测分别为 2.864 mm、2.538 mm,相差 - 11.38%。

3 结论

根据模型对直线段、缓和曲线段和圆曲线段的磨耗仿真分析,得到主要结论如下:

- (1) 在相同车辆以 60 km/h 车速通过时,圆曲线段中点处外轨的侧面磨耗量大于垂直磨耗量。
- (2) 在线路直线段上,内、外钢轨磨耗量相近,且主要分布在轮轨作用边轨头半径为 300 mm 的弧段上。
- (3) 在线路缓和曲线段上,内轨的磨耗主要集中在距离轮轨作用边轨头约 10 mm 的走行面处,而外轨磨耗分布在外轨内侧半径为 80 mm 的弧段曲线上。

(4) 线路圆曲线段的外轨磨耗尤为严重,主要分布在轨头内侧半径为 80 mm 的弧段上,半径为 300 mm 的弧段上也有明显磨耗;内轨磨耗主要分布在轨头半径为 300 mm 的弧段上,半径为 80 mm 的弧段上磨耗相对较轻。

参考文献:

[1] 马敬武,段晓峰. 货运铁路专用线直线段钢轨磨耗仿真分析[J]. 山西建筑, 2019, 45(17): 114 - 116.  
MA Jingwu, DUAN Xiaofeng. Simulation Analysis of Rail Wear of Straight Section in Freight Dedicated Railway [J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(17): 114 - 116.

[2] 张逸飞,王保成. 基于动力学分析的更高速度轮轨高速铁路线路平面参数研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 39 - 45.  
ZHANG Yifei, WANG Baocheng. Study on the Planar Parameters of Higher-speed Wheel-rail High-speed Railway Based on Dynamic Analysis [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 39 - 45.

[3] 陈浩. 基于动力分析的高速铁路钢轨磨耗预测方法研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 17 - 22.  
CHEN Hao. Study on Prediction Method of Rail Wear of High-speed Railway Based on Dynamic Analysis [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 17 - 22.

[4] OLOFSSON U, ANDERSSON S, BJÖRKLUND S. Simulation of Mild Wear in Boundary Lubricated Spherical Roller Thrust Bearings [J]. Wear, 2000, 241(2): 180 - 185.

[5] LEWIS R, OLOFSSON U. Mapping Rail Wear Regimes and Transitions [J]. Wear, 2004, 257(7/8): 721 - 729.

[6] WANG Pu, GAO Liang. Numerical Simulation of Wheel Wear Evolution for Heavy Haul Railway [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(1): 196 - 207.

[7] 杨新文,姚一鸣,周顺华,等. 基于修正的轮轨非 Hertz 接触的重载铁路曲线超高对钢轨磨耗的影响分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 22 - 29.  
YANG Xinwen, YAO Yiming, ZHOU Shunhua, et al. Influence of Curve Superelevation of Heavy Haul Railway on Rail Wear Based on Revised Wheel/Rail Non-Hertz Contact [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 22 - 29.

[8] 侯茂锐,王卫东,常崇义,等. 动车所小半径曲线钢轨磨耗及减磨措施研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 45 - 50.  
HOU Maorui, WANG Weidong, CHANG Chongyi, et al. A Study of Rail Wear on Sharp Curves in EMU Maintenance Depot [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 45 - 50.

[9] KALKER J J. Three-dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.

[10] ARCHARD J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981 - 988.

[11] LI Xia, JIN Xuesong, WEN Zefeng, et al. A New Integrated Model to Predict Wheel Profile Evolution Due to Wear [J]. Wear, 2011, 271(1/2): 227 - 237.