

国产高分遥感数据估算草地 NPP

包妮沙¹, 吴立新^{1, 2}, 叶宝莹³, 赵菲菲¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国地质大学(北京)地质调查院, 北京 100083)

摘 要: 利用国产卫星高分一号卫星数据评估其植被第一生产力(NPP)的潜力, 对植被指数取值范围、光能利用率、水分指数等参数进行修订, 建立适合高分卫星数据的光能利用率模型, 反演小尺度草地生态系统的生产力, 利用野外观测数据对反演结果进行验证. 模型模拟的数值与实测值的拟合度达到 0. 94, 均方差为 20. 59 gC/(m² · a), 并进一步将该结果与该区域同类型研究进行类比分析. 结果表明, 该模型对小尺度草地 NPP 估算可行, 减少了工作量, 为国产高分数据进行草地 NPP、尤其煤矿区草地环境的监测提供了可行的技术方法, 从而推动国产卫星在该地区的应用.

关 键 词: 国产高分卫星; 植被第一生产力; 干旱半干旱草地; 煤矿区; 光能利用率模型
中图分类号: X 87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005 - 3026(2016)10 - 1450 - 05

Estimating Net Primary Productivity Using Chinese GF-1 Remote Sensing Data for Regional Grassland

BAO Ni-sha¹, WU Li-xin², YE Bao-ying³, ZHAO Fei-fei¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China. Corresponding author: BAO Ni-sha, E-mail: baonisha@mail. neu. edu. cn)

Abstract: The ability of net primary production(NPP) was estimated by using the Chinese GF-1 remote sensing data. The specified land surface parameters such as vegetation indices, light efficiency and water indices were modified to establish Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model for NPP modeling by using the Chinese GF-1 satellite data. The field observation data was used to valid the accuracy of simulated NPP from CASA model. There is a good correlation between the simulated NPP and field observed NPP with correlation coefficient of 0. 94, and RMSE is 20. 59 gC/(m² · a). Furthermore, the NPP results were compared with similar study over semi-arid grassland zone. The results showed that the CASA model performs well at regional scale grassland monitoring. The Chinese satellite data has potential to be further applied on the semi-arid grassland, particular on coal mine environment monitoring over this region.

Key words: Chinese GF-1 satellite data; NPP (net primary productivity); semi-arid grassland; coal mine area; CASA model

植被第一生产力(NPP)是生态系统功能状况的重要指标和碳循环的关键要素, 可以反映气候变化和人类活动对陆地植被综合作用的结果. 目前 NPP 估算的模型, 主要包括三类: 气候相关模型、过程模型和光能利用率模型. 其中基于光能利

用率的 CASA 模型简单实用, 可以由遥感获得的 FPAR 直接监测 NPP, 成为一个很重要的发展方向. 根据全球 NPP 的空间分布规律, 对不同区域的光能有效率因子进行了修订和改进^[1]. 国内已有许多学者对该 CASA 模型进行了修改并应用

于藏北草原、黑河流域等的植被 NPP 估算,由于 NOAA/AVHRR 和 MODIS 数据时间分辨率高,时间序列较长,而且 MODIS 数据有一系列陆面参数产品,成为大尺度 NPP 遥感反演和动态监测的主要数据源^[2]。但在低分辨率遥感数据中,存在空间异质性和混合像元问题,当出现草地和灌木及林地等混合时,模拟结果会比实测数值大;当草地和退化草地及裸土等混合时,模拟结果会比实测数值小^[3]。中等分辨率数据则很好地解决了空间异质性问题,通过对土地覆盖类型进行分类甚至地貌分类,不断修正区域尺度的光能利用率,从空间尺度提高 NPP 估算精度^[4];但是中等分辨率数据无法保证每个月的可用数据,因此常常采用植被的一个生长季来代替全年的 NPP。此外,大部分中等分辨率数据如 Landsat, SPOT 在波谱分辨率和辐射分辨率方面无法像 MODIS 数据获取多种地表生态参数,因此,利用中等分辨率估算 NPP 时,模型其他地面参数,尤其气候参数需要和遥感数据尺度保持一致^[5]。

随着高分辨率卫星的不断发射,能够清楚反映地物的精细特征,更好地解决了混合像元和空间异质性问题,为植被的精细定量反演提供了数据源。此外,只有地面实测值的覆盖范围达到像元尺度的时候,才可以和地面真实值进行验证^[6],所以目前大部分大尺度 NPP 监测结果只能与同类研究进行对比。高分辨率数据的反演结果可以作为地面实测数据和中、低分辨率遥感数据的联系纽带^[7]。但是高分辨率数据的较低重访周期和幅宽,昂贵的价格,限制了高分辨率数据在植被生态参数及 NPP 反演中的广泛应用。随着我国高分系列卫星的研制和不断发展,其中最先发射的高分一号卫星,多光谱数据空间分辨率为 8 m,全色数据空间分辨率为 2 m,4 天一次的重访周期及卫星的连续性为高精度地面生态反演提供了遥感数据源。

目前大部分针对高分辨率数据在这一敏感区域的研究都集中在植被分类及通过统计样方来完成植被覆盖度和生物量的估测,还没有利用并评估国产卫星高分卫星数据应用于 CASA 等光能利用率模型估算 NPP 的潜力。本文选择干旱半干旱草原露天煤矿区,区内有优质草场、退化草场等不同类型的草地,空间异质性较强。研究区域范围不大,可以暂时忽略气候因素对 NPP 空间分布的影响,更多考虑水分指数和植被指数,保证了数据参数尺度的一致。选择生长季卫星数据来代替全年 NPP,通过 NDVI 指数取值范围、光能利用率、水分指数等参数的修订,建立适合高分卫星数据

的小尺度草地生态系统的生产力估算模型,利用野外同步测量数据及其他该地区的研究结果进行对比和验证,探讨国产卫星数据在草地生态系统及煤矿区环境遥感监测中的适用性,从而推动国产卫星在该地区的应用。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

伊敏露天矿位于内蒙古呼伦贝尔草原中部,占地面积为 371 km²(图 1)。区域气候为干旱半干旱气候,降水量主要集中在 7~8 月,占年降水量的 75%。年均降水量大约在 30 mL,矿区周围主要包括有围栏草场、退化草场、放牧草场及乔木草场等,分布有黄芥、羊草、黄花蒿、星毛委陵菜、针茅、铁杆蒿等植被类型。由于过度放牧及矿区持续开采的影响,该区域已经出现了草原退化及沙化。

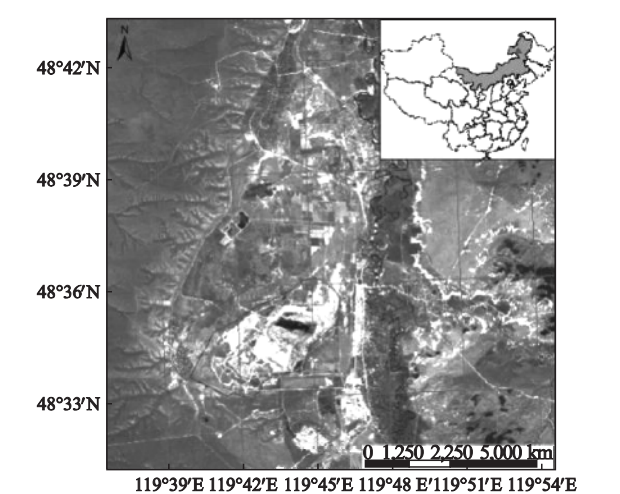


图 1 研究区位置图(高分一号卫星 RGB 波段合成)
Fig. 1 Location of study area (RGB combination from Chinese GF-1 imagery)

1.2 数据采集

植被第一生产力遥感反演涉及到的气象数据(太阳辐射、降水量、气温等),由距离研究区最近的气象站获得。2014 年 8 月对研究区进行了野外生态调查,选择了包括围栏草场、放牧草场、退化草场等多个景观类型。共 18 个样地均匀分布于研究区,每一个样地内有 5 个 1 m×1 m 的样方,将样方内全部植物齐地面切割,将剪下的样品分别装入纸袋,并分别做好标记。然后去除样品中的碎石、石块等杂物,在 65℃ 下烘干直至恒重后,用精度为 1% 的天平称重。最终碳含量的换算是将总生物量乘以系数 0.45。通过计算 5 个样方的生物量获得样地内平均草本生物量,同时记录描述样点周边的植被覆盖类型、土壤类型与地貌类型等

环境特征.

本文采用的遥感数据源为高分一号于 2014 年 7 ~ 9 月拍摄的伊敏矿区的多光谱数据,通过草地生长季的数据来代替全年的数据,对 NPP 模型进行构建与估测. 高分数据的预处理包括:辐射校正、大气校正与地理配准. 利用高分一号的波谱响应函数,基于 FLAAH 模块完成影像的大气校正. 大气校正后的影像以 14 个地面控制点为参照完成影像地理配准,地理配准精度小于一个像元.

2 CASA 模型

CASA(Carnegie – Ames – Stanford approach)模型是一个充分考虑环境条件和植被本身特征的光能利用率模型,其中的关键参数可以通过遥感数据反演获取,从而完成植被 NPP 模型的构建与估算^[8]. NPP 的估算主要基于植被吸收的光合有效辐射 (absorbed photosynthetically active radiation , APAR , MJ/m²)与光能转化率(ε , gC/MJ)两个变量:

$$NPP(x,t)=APAR(x,t)\times\varepsilon. \quad (1)$$

式中 t 为时间, x 为空间位置. APAR 是通过计算太阳总辐射量(MJ/m²)与植被层对入射光合有效辐射的吸收比例(FPAR):

$$APAR(x,t)=SOL(X,T)\times FPAR(x,t)\times 0.5. \quad (2)$$

式中 FPAR 可以由 NDVI 得到;常数 0.5 为植被所能利用的可见光波段的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例; ε 是指植被将吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率. Potter 等表明在理想的条件下,植被对于光能有最大的利用率,但事实上,水分胁迫系数与温度会影响光能的利用率,其计算式为

$$\varepsilon(x,t)=T_{el}(x,t)\times T_{e2}(x,t)\times W_{\varepsilon}(x,t)\times \varepsilon_{\max}. \quad (3)$$

式中: $T_{el}(x,t)$ 表示在低温和高温时,净第一性生产力的降低是由于植被内在的生化作用限制了光合作用; $T_{e2}(x,t)$ 为当环境温度由最适温度趋向高温和低温时,植被的光能转化率趋势慢慢减小; $W_{\varepsilon}(x,t)$ 为水分胁迫影响系数,它表达的是植物所能利用的有效水分条件对光能转化率的影响; ε_{\max} 为某一区域一年内 NDVI 值达到最高时月份的平均气温.

3 结果与分析

3.1 模型参数获取

1) 光合有效辐射参数的确定. 归一化植被指数(NDVI)是被广泛应用的植被指数,常被用于

表达植被的覆盖度及其生长状况等. 可以通过近红外和可见光波段的反射率获取: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$,其中 NIR 与 RED 分别为近红外波段与红波段的反射值. FPAR 的计算式为

$$FPAR(x,t)=\min\left\{\frac{(SR(x,t)-SR_{\min})}{(SR_{\max}-SR_{\min})},0.95\right\}, \quad (4)$$

$$SR=\frac{1+NDVI(x,t)}{1-NDVI(x,t)}. \quad (5)$$

式中, NDVI 最大值根据分布累计概率 95% 确定,最小值根据分布累计概率 5% 确定. 对生长季 3 个月份 NDVI 值进行最大合成,得到研究区最终全年的 NDVI 分布.

2) 光能利用率的确定. 光能利用率受温度和水分胁迫因子的影响,温度参数均从当地的气象站获取,水分胁迫因子则利用归一化水体指数(NDWI)计算获得. NDWI 是由遥感数据绿波段和近红外波段反射率建立的指数: $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$,其中 NIR 与 GREEN 分别为近红外波段与绿波段的反射值. NDWI 能够有效反映植被冠层及地表的水分含量,尤其植被冠层受水分胁迫时,NDWI 指数能及时地响应. 此外,利用遥感数据反演得到的水分胁迫因子,可以更好地表达地表湿润程度空间异质性,并与植被有效光能率在空间尺度上保持一致. 依据 NDWI 计算水分胁迫影响系数($W_{\varepsilon}(x,t)$)^[9]:

$$W_{\varepsilon}(x,t)=\frac{1+NDWI(x,t)}{1-NDWI_{\max}(x,t)}. \quad (6)$$

式中, $NDWI_{\max}(x,t)$ 为每个像元在生长季的最大湿润指数.

3.2 反演结果及精度验证

如图 2 所示,研究区内的 NPP 在空间异质性较强, NPP 低于 100 gC/(m² · a)区域出现在矿区内部及距离矿区 1 km 左右区域. 而在河流两岸分布为灌木和林地等植被生长较为茂盛的区域, NPP 高于 500 gC/(m² · a). 典型草甸草原区域 NPP 高于 300 gC/(m² · a),放牧区域 NPP 在 200 ~ 300 gC/(m² · a)之间. 如表 1 所示, Zhou 等^[10]利用 MODIS 数据,通过 CASA 模型动态监测 30 年内中国北方草原的 NPP,得出呼伦贝尔草原地区的平均 NPP 值为 200 gC/(m² · a),对于植被覆盖度较高的区域可以达到 300 gC/(m² · a),而由于过度放牧导致的土地沙化退化的区域, NPP 值在 50 ~ 100 gC/(m² · a)之间. 根据全国草地生态服

务功能价值遥感估算结果 ,呼伦贝尔地区的草地生产力范围为 $300 \sim 500 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})^{[11]}$ 。从区域尺度和这些研究结果对比可知 ,本研究的反演结果在合理范围内 ,而且能够反映出不同退化程度及围栏草地生产力的空间分布状态。

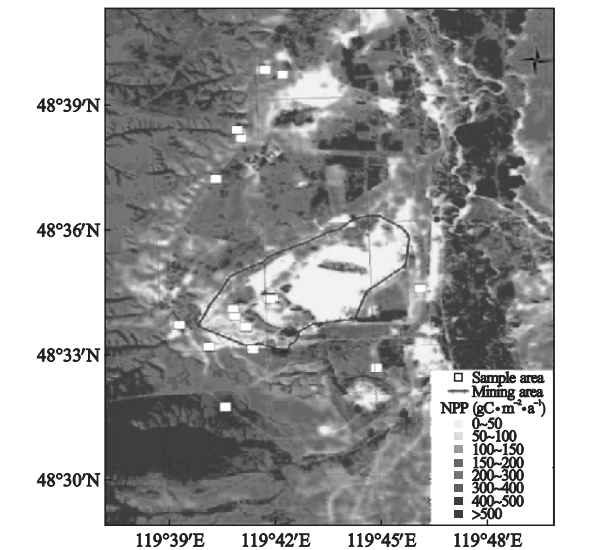


图 2 2014 年草地 NPP 反演结果

Fig. 2 Inversive results for NPP distributions of 2014

表 1 呼伦贝尔草原 CASA 模型 NPP 估算结果
Table 1 Estimated NPP of Hulunbuir glassland by CASA model

研究区域	遥感数据	时间	NPP 范围	出处
			$\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	
全国	AVHRR	1997	100 ~ 200	朴世龙 2001
全国	MODIS	2003	300 ~ 500	姜立鹏 2007
内蒙古地区	MODIS	2003	> 300	李刚 2007
北方草原	MODIS	2010	200 ~ 300	Zhou 等 , 2014

根据野外调查样方数据对遥感反演结果进行验证 ,如图 3 所示 ,基于 CASA 模型反演得到 NPP 与野外调查样地的 NPP 之间存在显著相关性 ,拟合度达到 0.94 ,均方差为 20.59。

通过对比实地样方数据和遥感监测结果(表 2) ,区内 NPP 异质性受到不同景观格局的影响 ,自然因素包括地形、水域分布 ,人为因素包括采矿、放牧、采沙等。区域内围栏、放牧及退化的草甸草原 NPP 与影像获取一致性较好 ,尤其在退化草原 ,包括砖厂附近、矿区内部 NPP 小于 $200 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,观测值与反演值差异小于 $10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。NPP 大于 $200 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 区域多为平地围栏 ,矿区西部的一级阶地坡脚、坡肩处 ,观测值与反演值差异较大 ,大于 $10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

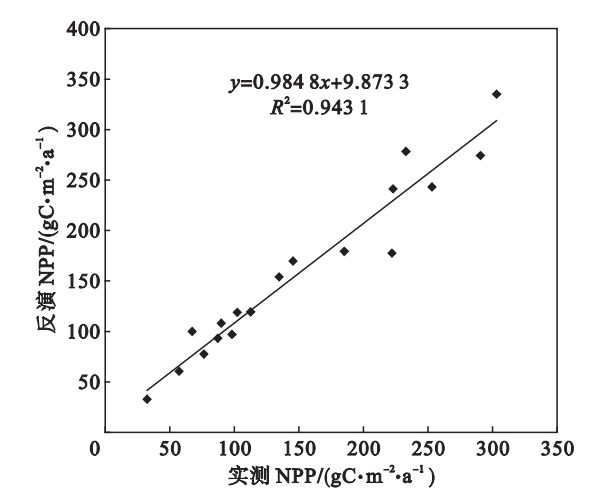


图 3 实地测量与反演结果线性回归验证

Fig. 3 Linear regression calibration using field observed NPP and modeling NPP

表 2 实地观测样方与遥感监测 NPP 结果
Table 2 NPP results from field observation and remote sensing modeling

地面样方数据 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	遥感监测结果 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	绝对 差值	景观类型
303.18	335.00	31.82	平地围栏
290.09	275.01	15.08	平地围栏
252.47	244.12	8.35	平地围栏
232.58	278.00	45.42	一级阶地坡脚
221.48	176.67	44.81	一级阶地坡肩
184.40	179.15	5.25	一级阶地山顶
145.68	169.00	23.32	矿区内部放牧
134.27	153.63	19.36	矿区复垦排土场
111.83	119.00	7.17	矿区复垦排土场
101.43	118.82	17.39	矿区复垦排土场
97.82	95.95	1.87	砖厂附近
89.77	108.28	18.51	一级阶地高地放牧
86.80	92.40	5.60	矿区内部退化
76.43	77.56	1.13	矿区复垦排土场
67.23	98.69	31.46	放牧
57.30	60.00	2.70	矿区复垦排土场
32.00	32.47	0.47	砖厂附近退化土地

4 结 论

1) 改进的 CASA 模型估测草地 NPP ,与实测地上干物质量进行比较 ,两者的相关度较高 ,相关系数达到 0.94 ,建立的方法对小尺度草地 NPP 估算可行。

2) 利用高分一号 8 m 空间分辨率的多光谱数据得到的 NDVI 的精度要高于 MODIS 等数据 ,FPAR 值和真实值更加接近。

3) 大尺度 CASA 模型应用中 ,气候条件是影响 NPP 空间格局变化的主要原因 ,因此太阳辐射量及温度等值均通过插值成空间数据来和遥感获取的其他参数保持一致的空间尺度 ,但是小尺度

NPP 反演中 ,NPP 的变化主要受植被的状态和地表的水分甚至微地形的影响 ,因此气候参数均以最近的气象站获取的数据为主.

参考文献：

[1] Potter C ,Klooster S ,Myneni R ,et al. Continental-scale comparisons of terrestrial carbon sinks estimated from satellite data and ecosystem modeling 1982 – 1998[J]. *Global and Planetary Change* ,2003 ,39(3/4) 201 – 213.

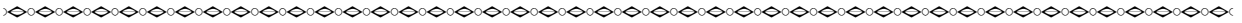
[2] Turner D P ,Ritts W D ,Cohen W B ,et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. *Remote Sensing of Environment* 2006 ,102(3/4) 282 – 292.

[3] 吴小丹 ,闻建光 ,肖青 ,等. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展[J]. *遥感学报* 2015 ,19(1) 75 – 92.

(Wu Xiao-dan ,Wen Jian-guang ,Xiao Qing ,et al. Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters[J]. *Journal of Remote Sensing* ,2015 ,19(1) 75 – 92.)

[4] Huang C Y ,Asner G P ,Barger N N. Modeling regional variation in net primary production of pinyon-juniper ecosystems[J]. *Ecological Modeling* 2012 ,227 82 – 92.

[5] Prieto-Blanco A ,North P R J ,Barnsley M J ,et al. Satellite-driven modeling of net primary productivity (NPP) : theoretical analysis[J]. *Remote Sensing of Environment* , 2009 ,113(1) :137 – 147.



(上接第 1449 页)

其主要参数如下 :最大扭矩 45 kN·m ,电机功率 11 kW ,电机转速 1 460 r/min ,最大扭转速度 1. 21 r/min ,最大转角 ±180°.

4. 2 试验数据

此强扭试验主要针对 45CrNiMoVA 钢低温回火扭杆弹簧 ,利用此扭杆弹簧预设参数进行强扭试验. 从试验结果与仿真结果数据可知 ,不同型号扭杆弹簧的强扭工艺参数与有限元仿真强扭工艺数据最终存在一定的误差 ,但总体有较好的一致性 ,且最大相对误差不超过 15% . 同时 ,随着扭转角度的变化 ,其仿真分析数值之间变化不超过 5% ,这表明所建模型的可靠性.

5 结 论

本文研究了扭杆弹簧强扭工况下的受力与变形情况 ,利用弹塑性理论与非线性有限元分析方法 ,数值模拟了扭转精度对扭杆弹簧强扭效果的影响 ,得出在强扭工艺允许范围内的扭转误差对扭杆弹簧强扭效果的影响不超过 5% . 试验研究证明 ,扭杆弹簧具有强扭误差在不超过 ±1⁰ 工况下的强扭效果可近似等同的特点.

参考文献：

[1] 丁法乾 ,杨景义. 扭力轴强扭处理[J]. *兵工学报* ,1987 ,10

[6] Friedl M A ,Michaelsen J ,Davis F W ,et al. Estimating grassland biomass and leaf-area index using ground and satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing* , 1994 ,15(7) :1401 – 1420.

[7] Dusseux P ,Hubert-Moy L ,Corpetti T ,et al. Evaluation of SPOT imagery for the estimation of grassland biomass[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2015 ,38 72 – 77.

[8] Potter C S ,Randerson J T ,Field C B ,et al. Terrestrial ecosystem production : a process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles* , 1993 ,7(4) 811 – 841.

[9] Xiao X ,Zhang Q ,Saleska S ,et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen fores[J]. *Remote Sensing of Environment* ,2005 , 94(1) :105 – 122.

[10] Zhou W ,Gang C ,Zhou L ,et al. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the northwest China[J]. *Acta Oecologica* 2014 ,55(1) 86 – 96.

[11] 姜立鹏 ,覃志豪 ,谢雯 ,等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[J]. *自然资源学报* ,2007 ,22(2) :161 – 170.

(Jiang Li-peng ,Qin Zhi-hao ,Xie Wen ,el al. Estimation of grassland ecosystem service value of China using remote sensing data [J]. *Journal of Natural Resources* ,2007 ,22(2) :161 – 170.)

(1) :1 – 10.

(Ding Fa-qian ,Yang Jing-yi. The process of torsion bar spring pre-setting. [J] *Acta Armamentarii* ,1987 ,10(1) : 1 – 10.)

[2] 周流芳 ,钱士文 ,曹玉成. 扭杆弹簧硬化强扭理论的研究 [J]. *锻压技术* 2009 ,34(34) :125 – 131.

(Zhou Liu-fang ,Qian Shi-wen ,Cao Yu-cheng. Study on hardening pre-setting theory of torsion bar spring [J]. *Forging &Stamping Technology* 2009 ,34(34) :125 – 131.)

[3] Paul A. Models for the dynamic simulation of tank track components[D]. Bedfordshire :University of Cranfield , 2006.

[4] Nguyen T V T. Automated torsion bar design for vehicle suspension system[D]. Louisville :University of Louisville , 1999.

[5] Dhir A ,Sankar S. Ride dynamics of high-speed tracked vehicles[J]. *Vehicle System Dynamics* ,1994 ,23(6) 379 – 409.

[6] Liu C J ,Zhu B S. Development of a measuring system for stiffness evaluation of micro torsion bar [J]. *Applied Mechanics and Materials* 2010 ,3(3) :190-194.

[7] Juan M M G ,Daniel F C ,Victor R C et al. Eeneralized spiral torsion spring model[J]. *Mechanism and Machine Theory* , 2012 ,51(1) :110 – 130.

[8] Lee H C ,Choi J H. Spatial dynamics of multi-body tracked vehicles. Part II :contact forces and simulation results [J]. *Vehicle System Dynamics* ,1998 ,29(1) :113 – 137.

[9] Rubinstein D ,Hitmn R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles [J]. *Journal of Terramechanics* 2004 ,41(5) :163 – 173.

[10] Han S R ,Kun S H ,Dae S B et al. Development of multibody dynamics simulation tool for tracked vehicles[J]. *JSME International Journal ,Series C* 2003 ,46(2) 540 – 549.