引文格式：尹宏杰. 高纬地区 BDS-3/GPS/Galileo 长基线单历元解算分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 118-121. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.03.026

高纬地区 BDS-3/GPS/Galileo 长基线单历元解算分析

尹宏杰[1]
（1. 郑州市规划勘测设计研究院，河南 郑州 450000）

摘　要：分别进行了北半球高纬度地区 BDS-3、BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo 长基线单历元解算实验。结果表明，高纬度地区 BDS-3 长基线单历元定位性能较优，定位精度可达厘米级，模糊度固定率可达 91%以上；随着 GPS 和 Galileo 的加入，不仅改善了 BDS-3 单独定位的卫星可见数和 PDOP 值，还较大程度地提升了 BDS-3 单独定位的精度与模糊度固定率，水平最优精度优于 1 cm，高程最优精度优于 3 cm，模糊度固定率接近 100%，可为今后高纬度地区的导航定位提供一些参考。

关键词：高纬度；BDS-3/GPS/Galileo；长基线；精度
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0118-04

Long Baseline Single Epoch Solution Analysis of BDS-3/GPS/Galileo in High Latitude Areas

YIN Hongjie[1]
(1. Zhengzhou Planning, Survey and Design Institute, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In this paper, we carried out BDS-3, BDS-3/GPS, BDS-3/GPS/Galileo long baseline single epoch solution experiments. The experimental results show that the BDS-3 long baseline single epoch positioning performance is better in high latitude areas, the positioning accuracy can reach centimeter level, and the ambiguity fixed rate can reach more than 91%. With the addition of GPS and Galileo, not only the number of visible satellites and PDOP values of BDS-3 independent positioning are improved, but also the accuracy and ambiguity fixed rate of BDS-3 independent positioning are greatly improved. The optimal horizontal accuracy is better than 1 cm, the optimal height accuracy is better than 3 cm, and the ambiguity fixed rate is close to 100%, which can provide some references for future navigation and positioning in high latitude areas.

Key words: high latitude, BDS-3/GPS/Galileo, long baseline, accuracy

高纬度地区通常是指南北纬 60°~90°之间的地区。该区域常年受太阳辐射较少，气候相对寒冷、人烟较少，但自然资源丰富，是今后各国重点关注探索的区域[1-3]。在高纬度地区进行科考探索需要大量的保障手段，其中导航定位是必不可少的工具，也是保障科考人员生命安全的重要措施[4-6]。我国北斗三号全球卫星导航系统（BDS-3）已正式投入使用，不仅打破了部分国家卫星导航系统的垄断，也为全球卫星定位系统注入了新鲜血液，增加了多系统组合定位方式[7-10]。

相对定位作为高精度定位技术，目前主要研究短基线、中长基线单历元解算性能，如李勇熹[11]等通过削弱长基线网解算中高阶电离层影响，提升了基准站坐标定位精度以及 BDS-3 与 GPS 长基线解算定位精度；高猛[12]等采用一种新的 BDS 中长基线三频整周模糊度确定方法固定 BDS 模糊度，使 BDS 三频中长基线窄巷整周模糊度固定率超过 97%，定位精度可达厘米级；罗杰[13]通过控制解算高度角分析 BDS 短基线 RTK 定位性能发现，随着高度角的增加，BDS 卫星可用性和定位精度将降低，而 BDS-2/BDS-3 组合则能弥补任一单一卫星在极端环境下定位性能较差的缺点；汪利[14]等采用 GAMIT 软件对比分析四大系统长基线定位精度发现，BDS 与其他系统的定位精度相当，解算结果均在 10^{-8} 级别，相互较差在 5 cm 以内；赵立都[15]等采用 GAMIT 10.7 解算 7 个 MGEX 站 BDS-3 与 GPS 长基线定位性能发现，BDS 水平与高程定位精度均可达厘米级，但略低于 GPS。目前，针对长基线定位性能的研究主要集中在网解算方面，对单历元解算性能的研究较少，尤其缺乏对高纬度地区长基线单历元解算性能的研究。鉴于此，本文选取位于北半球高纬度地区的一条长基线实测数据，分析了 BDS-3、BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo 长基线单历元定位性能。

收稿日期：2022-03-23；修回日期：2022-04-25。
项目来源：西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室（长安大学）开放基金资助项目（300102261501）。
作者简介：尹宏杰（1983—），硕士，高级工程师，主要从事测绘新技术及应用、InSAR 理论及应用技术研究，E-mail：hongjieyin@126.com。

1　定位模型与数据处理策略

1.1　定位模型

双差组合观测是基线定位中常用的定位模型，可消除接收机与卫星钟差，还可削弱电离层延迟、对流层延迟以及星历等误差。BDS-3/GPS/Galileo组合双差观测方程一般可表示为[15]：

$$\Delta\nabla P_i^{\mathrm{C}}=\Delta\nabla\rho^{\mathrm{C}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{trop}}^{\mathrm{C}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{orb}}^{\mathrm{C}}+\beta_i\Delta\nabla\delta_{\mathrm{ion1}}^{\mathrm{C}}+\Delta\nabla\varepsilon_P^{\mathrm{C}}$$

$$\Delta\nabla P_i^{\mathrm{G}}=\Delta\nabla\rho^{\mathrm{G}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{trop}}^{\mathrm{G}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{orb}}^{\mathrm{G}}+\beta_i\Delta\nabla\delta_{\mathrm{ion1}}^{\mathrm{G}}+\Delta\nabla\varepsilon_P^{\mathrm{G}}$$

$$\Delta\nabla P_i^{\mathrm{E}}=\Delta\nabla\rho^{\mathrm{E}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{trop}}^{\mathrm{E}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{orb}}^{\mathrm{E}}+\beta_i\Delta\nabla\delta_{\mathrm{ion1}}^{\mathrm{E}}+\Delta\nabla\varepsilon_P^{\mathrm{E}}$$

$$\Delta\nabla\varphi_i^{\mathrm{C}}=\Delta\nabla\rho^{\mathrm{C}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{trop}}^{\mathrm{C}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{orb}}^{\mathrm{C}}-\beta_i\Delta\nabla\delta_{\mathrm{ion1}}^{\mathrm{C}}-\lambda_i^{\mathrm{C}}\Delta\nabla N_i^{\mathrm{C}}+\Delta\nabla\varepsilon_\varphi^{\mathrm{C}}$$

$$\Delta\nabla\varphi_i^{\mathrm{G}}=\Delta\nabla\rho^{\mathrm{G}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{trop}}^{\mathrm{G}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{orb}}^{\mathrm{G}}-\beta_i\Delta\nabla\delta_{\mathrm{ion1}}^{\mathrm{G}}-\lambda_i^{G}\Delta\nabla N_i^{\mathrm{G}}+\Delta\nabla\varepsilon_\varphi^{\mathrm{G}}$$

$$\Delta\nabla\varphi_i^{\mathrm{E}}=\Delta\nabla\rho^{\mathrm{E}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{trop}}^{\mathrm{E}}+\Delta\nabla\delta_{\mathrm{orb}}^{\mathrm{E}}-\beta_i\Delta\nabla\delta_{\mathrm{ion1}}^{\mathrm{E}}-\lambda_i^{\mathrm{E}}\Delta\nabla N_i^{\mathrm{E}}+\Delta\nabla\varepsilon_\varphi^{\mathrm{E}}$$

式中，C、G、E分别为BDS-3、GPS和Galileo；$\Delta\nabla P_i^{\mathrm{C}}$为BDS-3双差伪距观测值；$\Delta\nabla\varphi_i^{\mathrm{C}}$为BDS-3双差载波相位观测值；$\Delta\nabla\rho^{C}$为BDS-3双差测站至卫星间的几何距离；$\Delta\nabla\delta_{\mathrm{trop}}^{\mathrm{C}}$为BDS-3双差对流层延迟；$\Delta\nabla\delta_{\mathrm{orb}}^{\mathrm{C}}$为BDS-3双差卫星轨道误差；$\Delta\nabla\delta_{\mathrm{ion1}}^{\mathrm{C}}$为BDS-3双差一阶电离层延迟；$\beta_i$为一阶电离层延迟系数；$\lambda_i^{\mathrm{C}}$为BDS-3频率波长；$\Delta\nabla N_i^{\mathrm{C}}$为BDS-3双差整周模糊度；$\Delta\nabla\varepsilon_P^{\mathrm{C}}$、$\Delta\nabla\varepsilon_\varphi^{\mathrm{C}}$分别为BDS-3双差伪距观测噪声和载波相位观测噪声；GPS与Galileo双差定位方程含义与BDS-3一致。

1.2　数据处理策略

数据解算软件采用Net_Diff软件，可通过界面设置各种解算参数，如表1所示。

表1　基线解算参数设置

参数	处理方式
解算截止高度角	10°
组合方式	非差非组合
组合频率	B1CB2a/L1L5/E1E5a
周跳探测	GF+MW+LLI+P1L1
对流层改正模型	GPT2_5w
基线处理模式	Long Baseline

2　高纬度地区算例分析

2.1　数据来源

本文选取位于北半球高纬度地区4个MGEX跟踪站组成的两条长基线，观测时段为2022-01-01—2022-01-07连续7 d，数据采样间隔为30 s。测站具体位置与基线长度如图1所示。

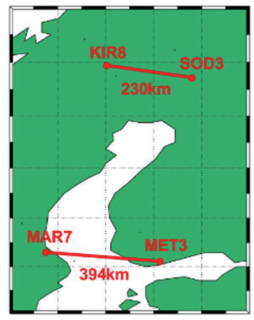
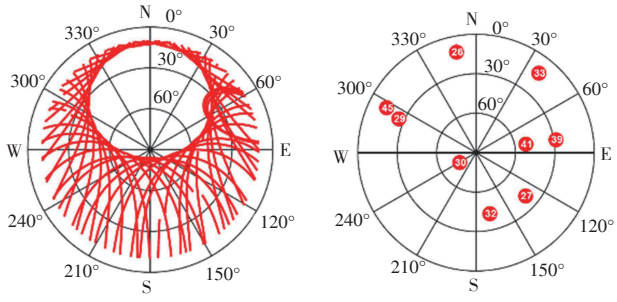


图1　测站位置与基线长度

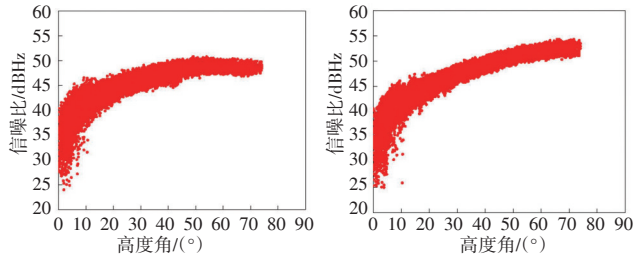
2.2　卫星星座与信号情况

实验区域内BDS-3卫星轨迹与某时刻卫星分布位置如图2所示，可以看出，BDS-3卫星能覆盖实验区域，为高纬度地区提供定位服务。B1C和B2a频率信噪比如图3所示，可以看出，两个频率信噪比随高度角的增加而增加，B1C频率信噪比趋近于50 dBHz，B2a频率信噪比趋近于55 dBHz；当高度角大于10°时，两个频率信噪比均大于30 dBHz。



a 卫星星座轨迹　　b 某时刻卫星分布位置

图2　BDS-3卫星星座天空位置



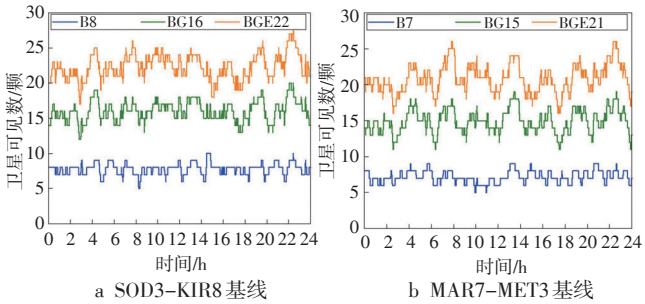
a B1C频率　　b B2a频率

图3　BDS-3参与解算的频率信噪比

2.3　卫星可见数与PDOP值

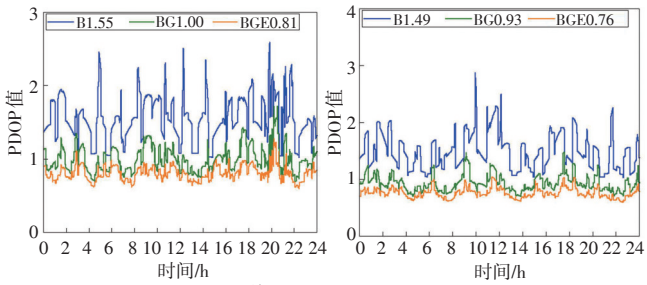
两条基线参与解算的卫星可见数与PDOP值如图4、5所示，B代表BDS-3，G代表GPS，E代表Galileo，以第3天解算结果为例，可以看出，两条基线参与解算的卫星可见数相差1颗，但随着参与解算系统的增加，每个历元的卫星可见数均有明显增加，BDS-3/GPS平均卫星可见数比BDS-3增加了8颗，BDS-3/GPS/Galileo平均卫星可见数比BDS-3/GPS增加了8颗；随着GPS和Galileo系统的加入，PDOP值明显减小，BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo平均PDOP

值为1，甚至低于1。



a SOD3-KIR8基线　b MAR7-MET3基线

图4　参与解算的卫星可见数



a SOD3-KIR8基线　b MAR7-MET3基线

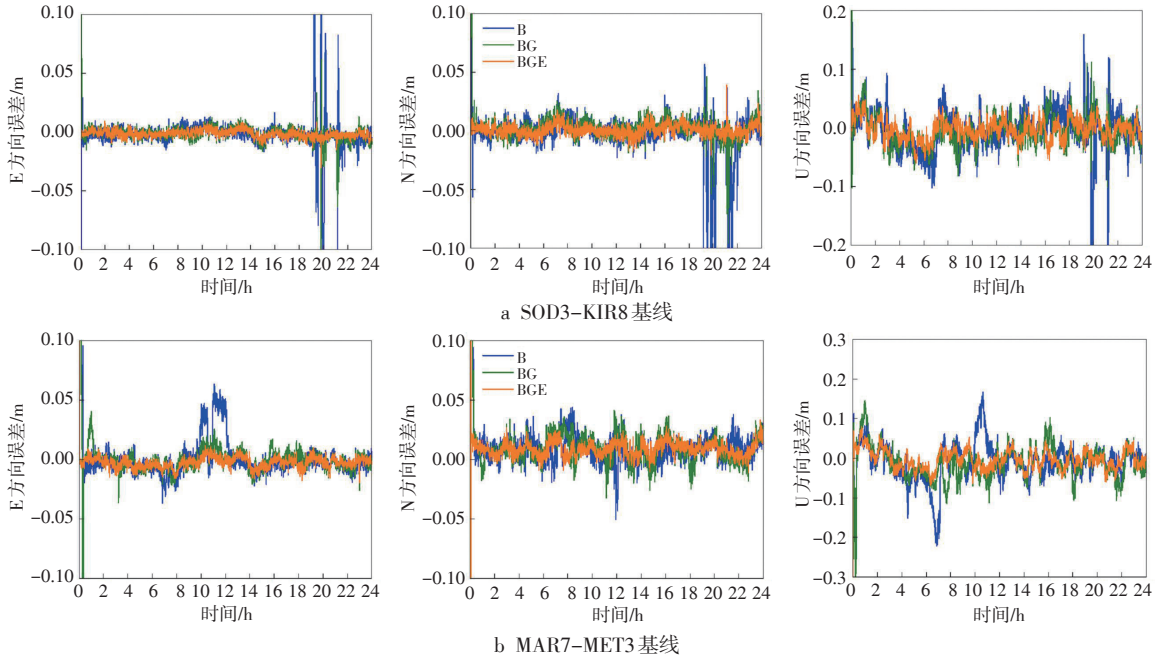
图5　卫星PDOP值

2.4　定位性能分析

两条长基线BDS-3、BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo的定位误差序列如图6所示，以第3天解算结果为例，可以看出，BDS-3单独定位误差较大，GPS和Galileo系统的加入，使得定位误差明显减小，BDS-3/GPS/Galileo组合定位误差最小；两条基线水平定位误差均在±5 cm以内变化，高程定位误差在±10 cm以内变化。

两条长基线BDS-3、BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo单天整周模糊度固定率如图7所示，可以看出，部分单天BDS-3、BDS-3/GPS组合SOD3-KIR8基线整周模糊度固定率高于MAR7-MET3基线，而两条基线BDS-3/GPS/Galileo组合整周模糊度固定率相当，均接近100%；GPS和Galileo系统的加入，使得整周模糊度固定率增加，尤其是MAR7-MET3基线整周模糊度固定率增加趋势明显。

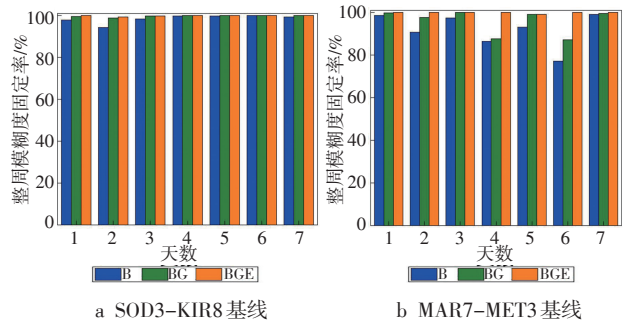
两条长基线BDS-3、BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo单天定位精度如图8所示，可以看出，SOD3-KIR8基线定位精度优于MAR7-MET3，其原因在于SOD3-KIR8基线长度略短；对于SOD3-KIR8基线定位，BDS-3单独定位E方向精度优于2 cm、N方向精度优于4 cm、U方向精度优于8 cm，BDS-3/GPS组合定位E方向精度优于2 cm、N方向精度优于2 cm、U方向精度优于5 cm，BDS-3/GPS/Galileo组合定位E方向精度优于1 cm，N方向精度优于2 cm，U方向精度优于4 cm；对于MAR7-MET3基线



a SOD3-KIR8基线

b MAR7-MET3基线

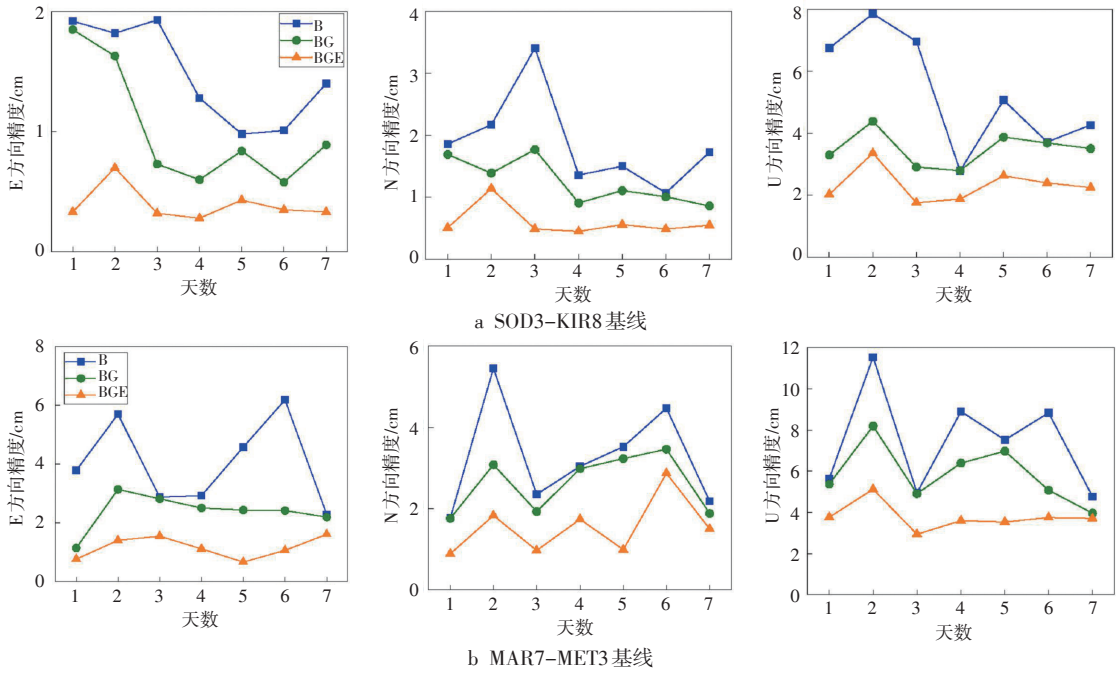
图6　两条长基线定位误差序列



a SOD3-KIR8基线　b MAR7-MET3基线

图7　两条长基线单天模糊度固定率

定位，BDS-3单独定位E方向精度优于7 cm、N方向精度优于6 cm、U方向精度优于12 cm，BDS-3/GPS组合定位E方向精度优于4 cm、N方向精度优于4 cm、U方向精度优于9 cm，BDS-3/GPS/Galileo组合定位E方向精度优于2 cm，N方向精度优于3 cm，U方向精度优于6 cm。



a SOD3-KIR8基线

b MAR7-MET3基线

图8　两条长基线单天E、N、U方向定位精度

两条长基线BDS-3、BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo多天定位精度与整周模糊度固定率平均值如表2所示，可以看出，KIR8-SOD3长基线BDS-3单独定位水平精度优于2 cm、高程精度优于6 cm、模糊度固定率在98%以上，BDS-3/GPS组合定位水平精度优于2 cm、高程精度优于4 cm、模糊度固定率在99%以上，BDS-3/GPS/Galileo组合定位水平精度优于1 cm、高程精度优于3 cm、模糊度固定率在99%以上；MAR7-MET3长基线BDS-3单独定位E方向定位精度优于5 cm、N方向定位精度优于4 cm、高程定位精度优于8 cm、模糊度固定率在91%以上，BDS-3/GPS组合定位水平精度优于3 cm、高程精度优于6 cm、模糊度固定率在95%以上，BDS-3/GPS/Galileo组合定位水平精度优于2 cm，高程精度优于4 cm，模糊度固定率在99%以上。

在平均定位精度与整周模糊度固定率的基础上，本文进一步计算了相较于BDS-3，BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo在定位精度和整周模糊度固定率上的提升量（表3），可以看出，KIR8-SOD3长基线BDS-3/GPS组合的定位精度比BDS-3提升30%以上，BDS-3/GPS/Galileo组合E方向定位精度比BDS-3提升70%以上，N方向精度提升60%以上，U方向精度提升50%以上，模糊度固定率提升均在1%~2%之间；MAR7-MET3长基线BDS-3/GPS组合E方向定位精度比BDS-3提升40%以上，N、U方向精度提升20%以上，BDS-3/GPS/Galileo组合E方向定位精度比BDS-3提升70%以上，N、U方向精度提升50%以上，模糊度固定率提升均在4%~10%之间。

表2　多天定位精度与模糊度固定率平均值

基线	定位系统	定位精度/cm			整周模糊度固定率/%
		E	N	U	
KIR8-SOD3	B	1.48	1.87	5.35	98.47
	BG	1.02	1.25	3.50	99.76
	BGE	0.39	0.60	2.33	99.89
MAR7-MET3	B	4.05	3.25	7.45	91.77
	BG	2.38	2.52	5.84	95.81
	BGE	1.17	1.54	3.67	99.83

表3　BDS-3/GPS、BDS-3/GPS/Galileo相较于BDS-3定位精度与模糊度固定率提升量

组合系统	KIR8-SOD3				MAR7-MET3			
	定位精度提升量/%			模糊度固定率提升量%	定位精度提升量/%			模糊度固定率提升量%
	E	N	U		E	N	U	
BG	31.08	33.16	34.58	1.31	41.23	22.46	21.61	4.40
BGE	73.65	67.91	56.45	1.44	71.11	52.62	50.67	8.78

（下转第126页）