

利用 TOPEX 卫星高度计资料分析东中国海的风、浪场特征

孙 群, 宋金宝, 陈小刚

(中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 利用 TOPEX 卫星高度计和日本气象厅浮标观测资料, 对东中国海的有效波高和风速进行比较, 分析了卫星高度计资料的有效性。利用有效波高和风速的 3 种概率密度函数分布, 结合 TOPEX 卫星高度计资料, 并采用最大似然方法对统计分布参数进行估计, 结果表明, 有效波高的对数正态概率密度分布与观测资料的直方图在有效波高的整个范围内符合较好, 风速的直方图与 Weibull 概率密度分布符合较好。同时, 分析了有效波高大于 4 m 的巨浪在东中国海的时空分布特征, 表明巨浪多出现在冬、秋两季, 平均有效波高最大值出现在夏季, 且主要分布在东中国海东南部。

关键词: 卫星高度计; 有效波高; 风速; 概率分布

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2006) 04-0010-06

海浪是重要的海洋环境动力要素之一, 对海洋工程、军事和航海等方面都有重要影响。如波高大到一定程度将构成灾害性海况(如巨浪), 对海上航行与海上建筑物构成严重威胁。波浪预报涉及的一个主要方面是海浪严重程度的长期统计, 海浪的这种严重程度通常以有效波高表达或以有效波高配合跨零周期或峰值周期表达。但由于受到传统观测技术手段的限制, 使得观测资料不能满足相关研究领域的需要。随着海洋卫星遥感技术的发展, 各种高度计及合成孔径雷达(SAR)为波浪场的研究提供了宝贵的数据源, 其中 TOPEX/Poseidon 卫星高度计提供了迄今为止时间序列最长、数据质量最高的全球海面风速和有效波高的同步观测资料。

由于波浪的存在, 海面起伏不平, 这种海面粗糙度造成雷达回波脉冲前沿较发射脉冲前沿展宽, 该展宽的程度与有效波高成正相关, 从而能够通过回波信息分析有效波高。利用 TOPEX 卫星高度计资料, 候一筠等^[1]验证了有效波高的非线性统计分布, 林琿等^[2]分析了全球海面风速和有效波高的季节变化。但利用高度计资料分析东中国海的风、浪统计特征的研究还较少, 本文利用 TOPEX 卫星高度计得到的风速和有效波高资料, 对渤、黄、东海的风、浪场进行了统计分析, 并描述了东中国海巨浪的时、空分布特征。

1 TOPEX 高度计资料与实测资料的比较分析

TOPEX 卫星高度计发射于 1992 年 8 月 10 日, 完成对全球风场等的观测所需周期约为 10 d, 通过

分析返回脉冲的强度和波形, 可以得到卫星星下点的海面风速和有效波高信息^[2]。为与浮标资料保持一致, 文中读取 TOPEX 高度计自 1992 年 12 月 1 日~1999 年 12 月 1 日, 连续 7 a 的有效波高(H_s)和风速(U_{10})的资料。

观测资料采用日本气象厅(JMA)在东海布放的浮标 B22001(28.17°N, 126.33°E)观测资料, 时间范围与高度计资料一致。为与观测资料比较, 此处选取 TOPEX 高度计的数据与 JMA 浮标 B22001 的经纬度相差不超过 0.5°, 时间相差不超过 1 h, 由此得到符合要求的高度计样本数据 166 个。图 1 给出 TOPEX 卫星高度计和 JMA 浮标得到的有效波高和风速资料的对比结果。根据样本点得到有效波高的相关系数(r)为 0.95, 风速的相关系数为 0.88, 该结果表明利用 TOPEX 资料分析 H_s 和 U_{10} 的统计特征是有效的。

收稿日期: 2005-04-18; 修回日期: 2005-06-22

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA633070); 国家自然科学基金资助项目(40476008)

作者简介: 孙群(1975), 女, 山东菏泽人, 博士, 主要研究非线性波动及上层海洋混合动力学, 电话: 0532-82898873, E-mail: sunqun@ms.qdio.ac.cn

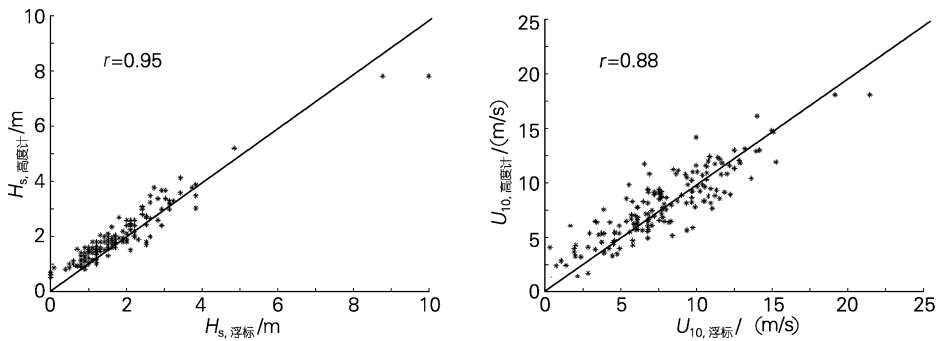


图 1 高度计资料和浮标资料对比

Fig. 1 Comparison between altimeter data and buoy data

2 有效波高和风速的统计特征

有效波高定义为最大的 1/3 部分波高的平均值, 它可以方便地表达海浪成长的严重程度。根据现有研究^[3], 假定研究海域有效波高的长期分布遵从 Rayleigh 概率密度函数分布, 可表示为:

$$f_1(x) = \frac{x}{a^2} e^{-\frac{x^2}{2a^2}} \quad (1)$$

其中 x 代表 H_s , a 为根据观测资料确定的参数。此外, 常用的有效波高概率密度函数还有 Weibull 分布和对数 - 正态分布^[4,5]。二参数的 Weibull 分布可表示为:

$$f_2(x) = c\lambda^c x^{c-1} e^{-(\lambda x)^c}, 0 \leq x < \infty \quad (2)$$

其中 c 和 λ 为根据观测资料确定的参数。对数 - 正态分布可表示为:

$$f_3(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, 0 \leq x < \infty \quad (3)$$

其中 μ 和 σ 为根据实测资料所得的参数。类似于有效波高的概率密度分布, 此处假定 U_{10} 也遵从 Rayleigh, Weibull 和对数 - 正态概率密度分布, 相应的 3 种概率密度函数可表示为:

$$P_1(U_{10}) = \frac{U_{10}}{b^2} e^{-\frac{U_{10}^2}{2b^2}} \quad (4)$$

$$P_2(U_{10}) = d\delta^d U_{10}^{d-1} e^{-(\delta U_{10})^d} \quad (5)$$

$$P_3(U_{10}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta U_{10}} e^{-\frac{(\ln U_{10} - \nu)^2}{2\beta^2}} \quad (6)$$

其中 b, δ, d, ν, β 分别为 3 种概率密度函数中根据观测资料确定的参数。

根据文献[5], 可定义有效波高和风速的离差系数(C_v)及偏态系数(C_s):

$$C_v = \frac{1}{x} \left[\int_0^\infty (x - \bar{x})^2 f(x) dx \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$C_s = \frac{\int_0^\infty (x - \bar{x})^3 f(x) dx}{\left[\int_0^\infty (x - \bar{x})^2 f(x) dx \right]^{3/2}} \quad (8)$$

其中 x 和 $\bar{x}$ 分别代表 H_s 和 U_{10} 及其平均值。(7)和(8)式的物理意义为: C_v 刻划了分布密度函数关于变量平均值的分散与集中程度; 而 C_s 则描述了最可几变量与平均值的偏离程度。

在分析风、浪场统计特征时, 采用的 TOPEX 高度计资料时间范围仍是自 1992 年 12 月 1 日至 1999 年 12 月 1 日共 7a 的数据资料, 选取的海域范围为 117°E ~ 128°E, 24°N ~ 4°N, 资料样本总数为 189 840。根据实测资料, 可采用样本特征数的计算公式得到各外观统计量的估计值, 参见表 1。利用最大似然方法, 结合有效波高和风速的 TOPEX 资料, 分别对 H_s 和 U_{10} 的 3 种概率密度函数中的参数进行估计, 得到的各参数估计值如表 2 所示。

表 1 H_s 和 U_{10} 的统计特征数

Tab 1 The statistical characteristics of H_s and U_{10}		
变量	H_s (m)	U_{10} (m/s)
变量平均值	1.691	6.751
C_v	0.598	0.525
C_s	1.668	0.555

表 2 H_s 和 U_{10} 概率密度函数中的各参数估计值
Tab. 2 The estimated parameters in the probability density functions for H_s and U_{10}

变量	H_s	变量	U_{10}
a	1.394	b	56.90
λ	0.522	δ	0.131
c	1.801	d	1.981
μ	0.362	ν	1.733
σ	0.585	β	0.668

图 2a 和图 2b 分别给出了在表 1 各参数下, 由式 (1), (2) 和 (3) 确定的有效波高概率密度分布和由式 (4),

(5) 和 (6) 确定的 U_{10} 概率密度分布与相应的高度计观测资料直方图的比较。可以看出, 对于有效波高, 对数正态概率密度分布与实测资料直方图在有效波高的整个范围内符合很好, (1) 和 (2) 式确定的概率密度分布在平均值附近明显低于实测资料。 U_{10} 的实测资料直方图在整个风速范围内与由 (5) 式确定的 Weibull 概率密度函数分布符合得很好, 其次是由 (6) 式给出的风速对数正态概率密度分布 (如图 2b 中虚线所示), 其概率密度最大值略高于实测资料直方图的概率最大值, 且向低风速方向偏移, 该值对应风速为 3.62 m/s; 而风速概率密度分布 (4) 式与实测资料直方图吻合得最差, 其概率密度最大值显著高于实测资料直方图的概率最大值, 向高风速方向偏移, 其对应风速为 8.39 m/s。

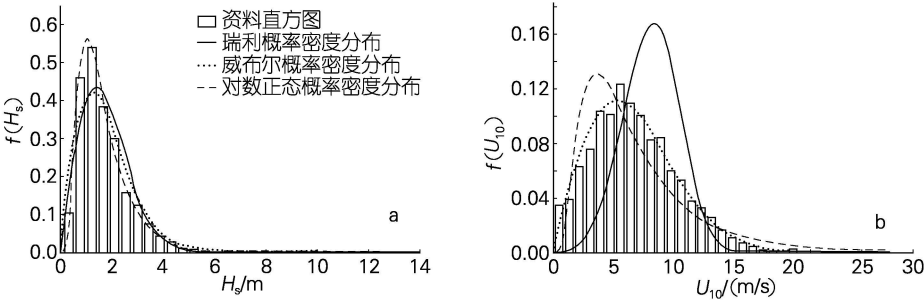


图 2 有效波高和风速的直方图及概率密度函数分布

Fig. 2 The histogram and probability density function of significant wave height and wind speed

图 3a 和图 3b 给出有效波高和风速在表 2 所给各参数下的累积率曲线, 以及相应的实测资料的累积率。令 $F(X)$ 表示累积率, 其定义可表示为: $F(X) = \int_x^\infty f(t) dt$ 。对于有效波高, 3 种分布的累积率曲线在整个有效波高范围内分布相似, 有效波高实测值的累积率与对数正态分布的累积率曲线吻合得最好 (图 3a)。对于 U_{10} , 根据 (4), (5) 和 (6) 式得到的累

积率曲线在整个风速范围内有较大不同, 实测值的累积率与 (5) 式所得的累积率曲线符合最好, (6) 式所得累积率曲线稍差, 它在风速大于 2.3 m/s 小于 9.4 m/s 范围内低于实测值的累积率, 而在此范围以外则大于实测值的累积率。根据 (4) 式所得的累积率曲线与实测值的累积率差别最大, 以 10.6 m/s 风速为分界点, 低于该风速的理论累积率显著大于实测值的累积率, 而高于该风速的理论累积率则偏小。

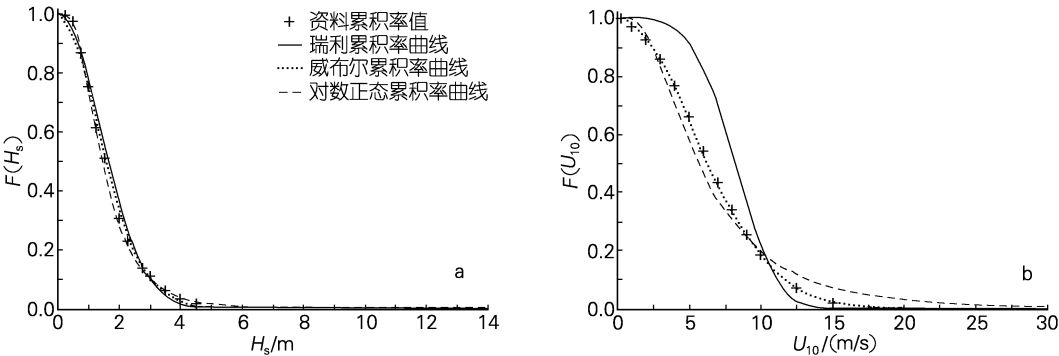


图 3 有效波高和风速的理论累积率曲线与资料累积率点值的比较

Fig. 3 The comparison between the cumulative distribution function of the theory and that of the data for significant wave height and wind speed

3 东中国海巨浪时空分布特征

巨浪(此处定义为有效波高大于 4 m 的波浪)的分布特征是海洋工程、军事及航海等方面比较关注的问题,因其所构成的灾害性海况将对海上航行与海上建筑物构成严重威胁。作者采用上述选取的时空范围内的 TOPEX 卫星高度计有效波高资料,分析了有效波高在渤、黄、东海的时空分布特征。在有效样本点 18 940 里,有效波高大于 4 m 的巨浪数据有 5 284 个,占总样本的 2.78%。同时,文中定义冬季为 12~ 2 月,春季为 3~ 5 月,夏季为 6~ 8 月,秋季为 9~ 11 月。

根据有效波高的 3 种概率密度函数 (1), (2) 和 (3) 式,可以得到有效波高大于 4 m 的巨浪对应的 3 种条件概率密度函数:

$$f_1(H_s | H_s \geq 4) = \frac{H_s}{a^2} e^{-\frac{H_s^2 - 16}{2a^2}} \tag{9}$$

$$f_2(H_s | H_s \geq 4) = c \mathcal{K} H_s^{c-1} e^{-\mathcal{K}(H_s^c - 4^c)} \tag{10}$$

$$f_3(H_s | H_s \geq 4) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma H_s} e^{-\frac{(\ln H_s - \mu)^2}{2\sigma^2}} \\ - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln 4}{\sqrt{2\pi}} - \frac{\sqrt{2}\mu}{2\sigma} \right] \end{array} \right\} \tag{11}$$

图 4 给出根据上述 3 式得到的巨浪有效波高条件概率密度分布曲线及相应高度计观测资料直方图。

(11) 式所给的条件概率密度曲线比其它两条曲线更符合实测资料直方图。

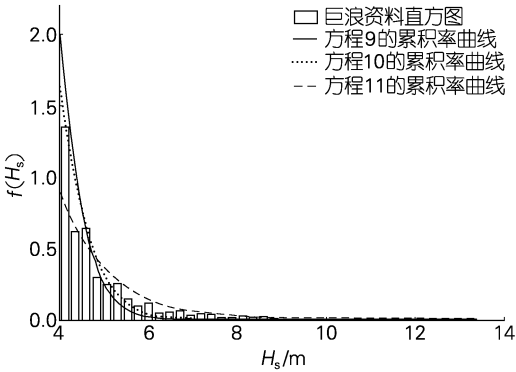


图 4 巨浪($H_s \geq 4$ m)的直方图及其条件概率密度分布
Fig. 4 The histogram and condition probability density function for surge with $H_s \geq 4$ m

图 5a 给出巨浪(4 m 以上)季节平均有效波高随时间的变化。巨浪有效波高有明显的季节变化,一年中最大值主要出现在夏季,这可能主要是由于夏季台风频繁爆发,出现较大的台风浪,导致夏季的季节平均有效波高最大。图 5b 给出不同季节,有效波高大于 4 m 的巨浪出现的频率(每年各季节 4 m 以上巨浪个数与 4 m 以上巨浪总个数之比)。由图 5b 可知,冬季和秋季是巨浪出现频率较高的季节。

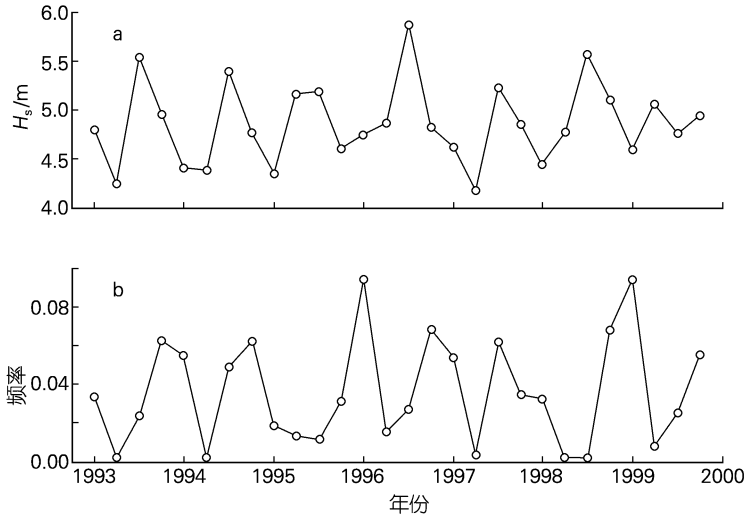


图 5 巨浪的季节变化
Fig. 5 The seasonal variations of the surger

根据 1992 年至 1999 年连续 7 年的 TOPEX 卫星高度计有效波高资料,图 6 给出渤、黄、东海有效波高大于 4 m 的巨浪在不同季节的空间分布。图中实心点表示有效波高在 $4\text{ m} < H_s < 6\text{ m}$ 之间的点,空心圆表示 $H_s \geq 6\text{ m}$ 的点。由于整个东中国海受到东亚季风的控制,导致波浪场也存在明显的季节变化,冬季和夏季是巨浪出现范围最广的两个季节,在北纬

35° 以南的整个东中国海域,沿 TOPEX 卫星轨迹均观测到巨浪的存在,在冬、夏季风转换季节,春季巨浪出现的频率和范围都显著减小,而有效波高大于 6 m 的巨浪则主要出现在夏季,其次是秋季(如图 6c,图 6d 所示)。有效波高大于 4 m 的巨浪分布范围主要在东中国海东南部海域,渤海及黄海北部出现较少。

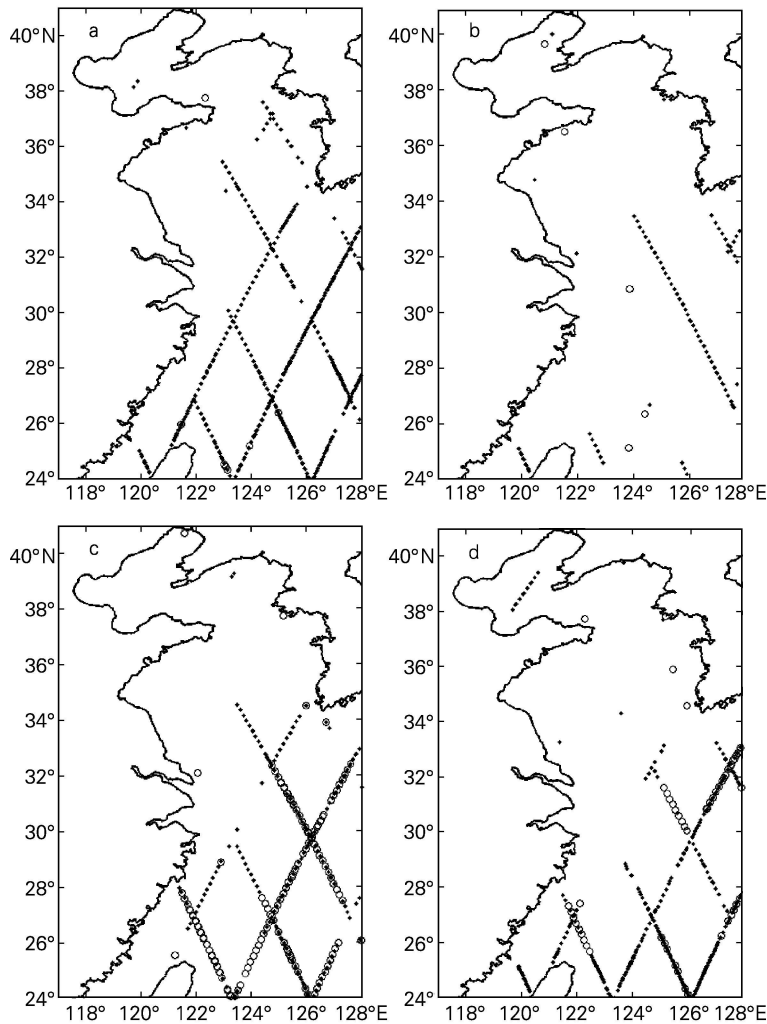


图 6 巨浪有效波高的季节分布

Fig. 6 The seasonal distributions of the large wave

a. 冬季; b. 春季; c. 夏季; d. 秋季

a. Winter; b. Spring; c. Summer; d. Autumn

4 结论

作者采用 TOPEX 卫星高度计和浮标观测资料,对渤、黄、东海的有效波高和风速进行了比较,分析了

TOPEX 观测资料的有效性。

根据已有研究,假定有效波高和风速都遵从瑞利、Weibull 及对数正态概率密度函数分布,结合 TOPEX 卫星高度计资料,采用最大似然方法估计了

3 种概率密度函数分布的各参数。通过分布曲线拟合,表明有效波高的对数正态概率密度分布与观测资料的直方图在有效波高的整个范围内符合较好,风速的直方图与 Weibull 概率密度函数分布符合较好。对于有效波高大于 4 m 的巨浪,其出现概率虽然不高,但由于其对海上航行及建筑物有着严重威胁,因此本项工作还利用 TOPEX 高度计资料,进行了有效波高大于 4 m 的巨浪的条件概率密度分布与实测资料直方图的比较,同时分析了其在东中国海的时空分布特征,结果表明巨浪的有效波高具有明显的季节变化,一年中最大值主要出现在夏季,冬季和秋季是巨浪出现频率较高的季节,春季巨浪出现的频率和范围都显著减小,且主要分布在东中国海东南部深水海域,渤海及黄海北部出现较少。

参考文献:

- [1] 候一筠, 卢筠, 李明悝, 等. 有效波高的非线性统计及在南海卫星高度计中的应用[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(5), 541-546.
- [2] 林琿, 陈戈. 利用 TOPEX 卫星高度计观测全球海面风速和有效波高的季节变化[J]. 科学通报, 2002, 45(4): 411-416.
- [3] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [4] Ochi M K. 刘德辅译. 不规则海浪随机分析及概率预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1985.
- [5] 徐德伦, 于定勇. 随机海洋理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

The analysis of the characteristic of the wind and wave fields over the East China Sea by using TOPEX satellite altimeter data

SUN Q un, SONG Jir-bao, CHEN Xiao-gang

(Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Apr., 18, 2005

Key words: satellite altimeter; significant wave height; wind speed; probability distribution

Abstract: The data of the significant wave height (SWH) and the wind speed from TOPEX satellite altimeters are compared with the data from the buoy and the validity of data from TOPEX is analyzed. The three probability density function distributions of the SWH and wind speed are used. Based on the data from TOPEX altimeter, the parameters for the statistical distributions are calculated by using the method of Maximum Likelihood Estimation. It shows that the lognormal probability density distribution of the SWH is in a well agreement with the histogram of the observed data in the whole scope, and the histogram of the measured wind speed is in a well agreement with the Weibull probability density distribution. At the same time, the characteristic of the wave the SWH of which is more than four meters over the East China Sea is analyzed and it was shown that the large waves commonly appear in winter and autumn, which maximum values of the mean SWH appear in summer, and mainly distribute over the southeast of the East China Sea.

(本文编辑: 刘珊珊)