

# 沙漠地区沙尘气溶胶及 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征的飞机观测

牛生杰 孙照渤

(南京气象学院气象灾害和环境变化省重点实验室, 南京 210044)

## 1 引言

大气气溶胶研究由研究气溶胶总悬浮颗粒物(TSP)转向研究可吸入颗粒物 PM<sub>10</sub>, 尤其是研究细粒子 PM<sub>2.5</sub> 的时空分布、化学组成及环境健康效应; 由研究气溶胶的人为源向研究生物地球化学源和自然源拓展等。干旱、半干旱地区春季频繁发生的沙尘暴是沙尘气溶胶的重要来源, 贺兰山地区分布着巴丹吉林、腾格里沙漠和毛乌素沙地, 是我国沙尘暴的多发中心之一。一些研究者深入沙尘源区对西北地区沙尘气溶胶进行了大量的观测, 系统分析了春季沙尘暴高发期背景大气、浮尘、扬沙、沙尘暴天气条件下沙尘气溶胶的质量浓度、谱分布、化学成分及光学特性, 分析了沙尘起动和垂直输送的物理因子; 并对 1983 年 6 月 10 日发生在内蒙古阿拉善盟的一次沙尘暴进行了飞机探测, 分析了沙尘气溶胶的空间结构分布、沉降和输送等, 这是迄今为止对东亚沙尘暴的唯一一次飞机探测。

国外学者利用激光雷达、太阳光度计、激光粒子计数器、常规地面监测网和卫星监测, 成功监测了 1998 年 4 月发源于中国西北地区的强沙尘暴, 分析了沙尘气溶胶数浓度、质量浓度、化学组成和光学性质及其随时间的演变。这些观测都是在沙尘暴下游地区进行的, 目前尚缺乏对沙尘暴从源区到下游地区同步进行的综合探测, 不便深入分析沙尘气溶胶的远距离输送机制。西北沙漠地区上空背景大气沙尘气溶胶粒子谱及 PM<sub>2.5</sub> 的空间结构、分布特征及其与沙尘暴沙尘微结构的比较等, 同样还缺乏观测资料和系统分析。因此, 我们分别于 1999 年 5 月 27 日和 5 月 31 日在飞机上安装空气动力学粒子谱仪 APS-3310, 在银川、阿拉善盟、伊克昭盟等地沙漠地区上空进行了背景沙尘气溶胶的观测, 本文是对观测资料的分析。

作者

## 2 资料分析

1999 年 5 月 27 日, 飞机由银川某机场于 16:22 起飞向东飞行约 28 分钟在伊克昭盟上空盘旋一周后向东南方向飞行, 主要是在毛乌素沙地上空飞行探测, 飞行探测高度为 1336~3759m, 采样时间为 16:29~17:13。1999 年 5 月 31 日由银川某机场于 09:15 起飞在银川盘旋一周后飞向阿拉善左旗, 经锡林高勒飞向吉兰泰后返回银川降落, 主要在腾格里沙漠上空飞行探测阿拉善左旗。飞机探测高度为 1224~5037m, 采样时间为 9:15~10:34。

### 2.1 粒子数浓度、粒子直径及质量浓度

图 1 给出了 1999 年 5 月 27 日飞行探测中沙尘气溶胶数浓度及平均粒子直径的高度分布。沙尘粒子数浓度级为 1 个/cm<sup>3</sup> 到 7 个/cm<sup>3</sup>, 这与文献装有粒子测量系统(PMS, Particle Measuring System)的飞机在该地区上空观测到的沙尘气溶胶粒度为 2 个/cm<sup>3</sup> 的结果基本一致; 16:36~16:59 基本上在 2500m 高度飞行探测, 粒子数浓度基本维持在 1 个/cm<sup>3</sup> 的水平, 粒子平均直径小于 5μm, 粒子最大直径在 10.0~15.0μm 之间; 16:56 以后, 飞机进入毛乌素沙地上空, 地面植被稀疏, 粒子数浓度逐渐增加, 最大值为 7 个/cm<sup>3</sup>, 粒子最大直径一般在 12μm~28.0μm 之间; 沙尘粒子可浮扬至 4000m 高空, 粒子最大直径可达 28μm, 这可能是沙地表热通量大, 湍流交换强, 造成沙地上空沙尘粒子浓度较高, 且粒子直径也较大。

地面植被较好时, 2600m 高空气溶胶质量浓度约为 0.02mg/m<sup>3</sup>, 该值小于这一地区地面的大气背

景值;毛乌素沙地上空,沙尘气溶胶 TSP 质量浓度逐渐增加,最大值达  $0.37 \text{ mg/m}^3$ ,相当于浮尘天气沙尘质量浓度;2500m 高度上的 PM10 也达  $0.17 \text{ mg/m}^3$ ,已高于地面背景大气的质量浓度;PM2.5 基本上维持在  $0.01 \text{ mg/m}^3$  的水平,这一观测事实说明沙尘粒子浮扬有其优势直径,并不是粒子越小,浮扬到高空的越多。

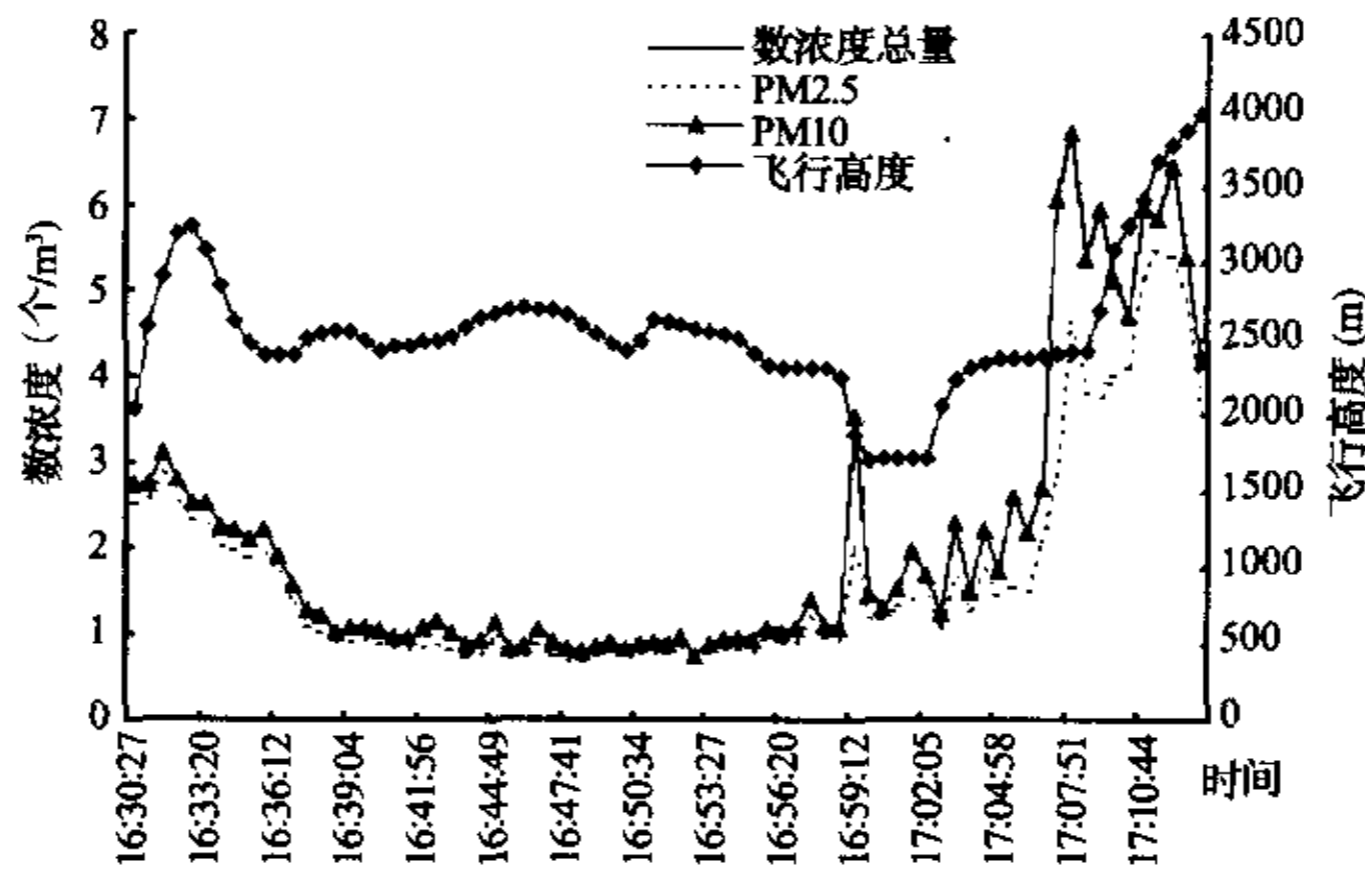


图1 5月27日粒子谱数浓度随飞行高度的变化

1999年5月31日主要飞行探测区域为位于贺兰山两侧的腾格里沙漠上空。该次探测了沙尘气溶胶数浓度、平均直径和最大直径随高度的分布。当飞行高度超过2800m后,气溶胶粒子数浓度迅速下降,从  $80 \text{ 个/cm}^3$  下降到  $10 \text{ 个/cm}^3$  的量级。飞行跨越贺兰山脉后,9:28~9:35 约在2800m 高度上飞行,沙尘粒子数浓度可达  $20 \text{ 个/cm}^3$ ,此时对应的地面植被较差,为戈壁和沙漠。9:35后,粒子浓度除了小的波动外基本上随飞行高度的增加而减少至  $2 \text{ 个/cm}^3$  左右;10:16后随飞行高度的降低,粒子浓度逐渐增大;粒子平均直径基本上在  $7\mu\text{m}$  以下,其尺度和变率均大于毛乌素沙地的相应平均值,最大直径在  $5\sim 28\mu\text{m}$  之间,变率较大。5000m 高空,沙尘粒子 TSP 质量浓度可达  $0.25\sim 0.50 \text{ mg/m}^3$ ,其量级达浮尘或扬沙天气的沙尘质量浓度。

## 2.2 沙尘粒子谱的演变

### 2.2.1 5月27日个例

1999年5月27日飞行探测,根据飞行的高度,下垫面状况基本上可以分为3段。

16:30~16:36 在贺兰山东侧飞行,下垫面为农田,植被覆盖较好,平均飞行高度为2677m,沙尘粒子数浓度平均为  $2.401 \text{ 个/cm}^3$ ,平均直径为  $2.2\mu\text{m}$ ,最大直径为  $12.2\mu\text{m}$ ,直径小于  $10\mu\text{m}$  和  $2.5\mu\text{m}$  的粒子数浓度分别为  $2.399 \text{ 个/cm}^3$  和  $2.176 \text{ 个/cm}^3$ ;沙尘粒子质量浓度为  $0.0134 \text{ mg/m}^3$ ,PM10 和 PM2.5 分别为  $0.0118 \text{ mg/m}^3$  和  $0.00179 \text{ mg/m}^3$ ,PM2.5、PM10 分别占 TSP 的 13.4%和 88.1%。图 2a 给出了该时段的平均粒子谱,在双对数坐标中,是偏态分布。

16:37~17:00 在鄂尔多斯台地上飞行,平均飞行高度为2406m,粒子数浓度为  $1.074 \text{ 个/cm}^3$ ,直径小于  $10\mu\text{m}$  和  $2.5\mu\text{m}$  的粒子数浓度分别为  $1.071 \text{ 个/cm}^3$  和  $0.90 \text{ 个/cm}^3$ ,平均直径和最大直径分别为  $2.88\mu\text{m}$  和  $14.58\mu\text{m}$ ;TSP 质量浓度为  $0.0165 \text{ mg/m}^3$ ,PM10 和 PM2.5 分别为  $0.010 \text{ mg/m}^3$  和  $0.001 \text{ mg/m}^3$ ,PM2.5 和 PM10 分别占 TSP 的 6%和 61%;图 2b 给出了该时段的平均粒子谱,在双对数坐标中,也是偏态分布。但与图 2a 相比,大粒子端的数浓度明显增多。

17:00~17:13 在毛乌素沙地上空飞行,下垫面植被稀疏,平均飞行高度为2623m,平均粒子数浓度为  $3.726 \text{ 个/cm}^3$ ,小于  $10\mu\text{m}$  和  $2.5\mu\text{m}$  的粒子数浓度分别为  $3.703 \text{ 个/cm}^3$  和  $2.861 \text{ 个/cm}^3$ ,平均直径和最大直径分别为  $2.94\mu\text{m}$  和  $20.58\mu\text{m}$ ;TSP 质量浓度为  $0.0940 \text{ mg/m}^3$ ,PM10 和 PM2.5 分别为  $0.0499 \text{ mg/m}^3$  和  $0.00342 \text{ mg/m}^3$ ,PM2.5 分别占 TSP 和 PM10 的 4%和 5%;图 2c 给出了该时段的平均粒子谱,谱型呈现出明显的双峰特点。

图 2a~2c 基本上代表了由植被覆盖较好的地区上方飞向沙漠上空的过程中沙尘粒子谱的演变, 即由单模态向双模态的转变。

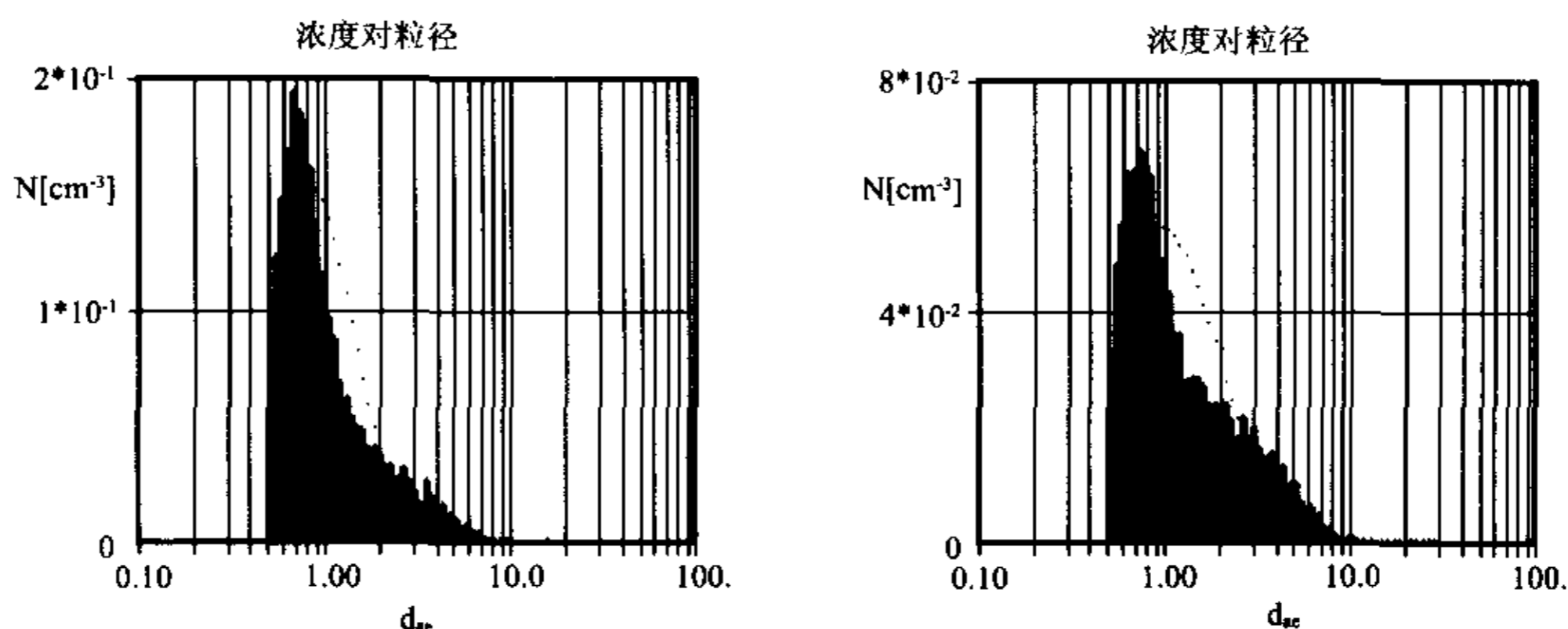


图 2a 第一时间段的数浓度谱(16:30~16:36)

图 2b 第二时间段的数浓度谱(16:37~17:00)

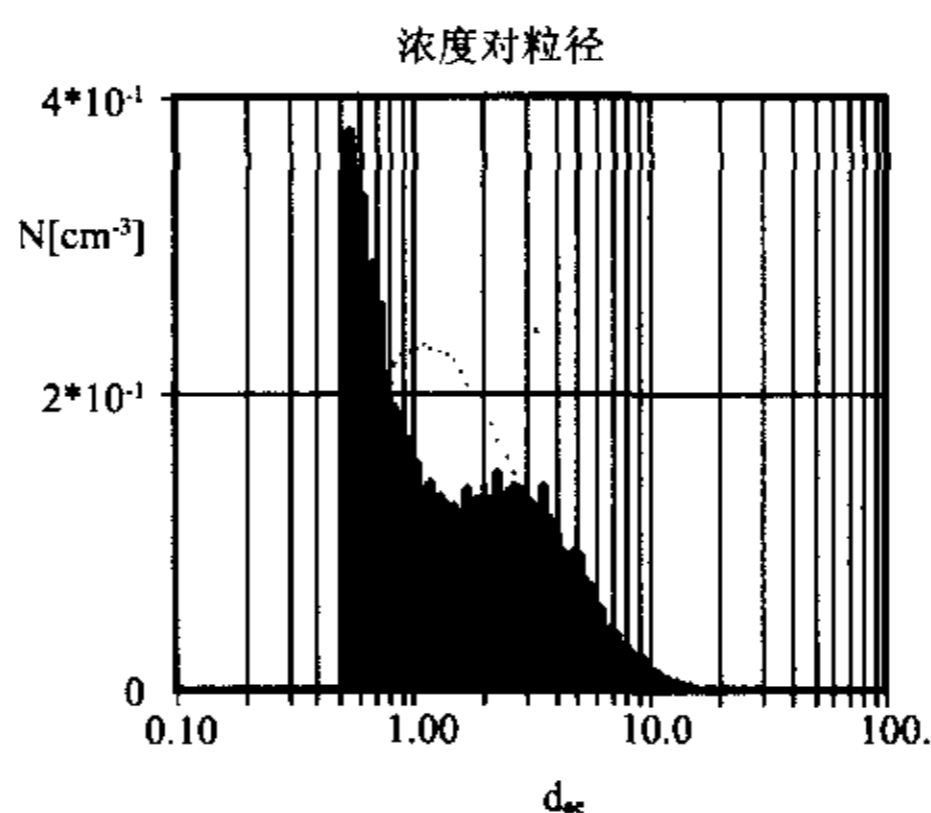


图 2c 第三时间段的数浓度谱(17:01~17:13)

### 2.2.2 5月31日个例

5月31日的探测主要是飞行跨越贺兰山后在其西侧的腾格里沙漠上空进行。飞行探测高度为1200~4867m, 粒子数浓度为0.799~13.735个/cm<sup>3</sup>, 平均直径为1.5~4.6μm, 最大直径为9.9~19.2μm之间, TSP的质量浓度为0.01~0.08 mg/m<sup>3</sup>之内, 平均为0.037 mg/m<sup>3</sup>, PM10和PM2.5分别在0.008~0.05 mg/m<sup>3</sup>和0.001~0.01 mg/m<sup>3</sup>之内, 平均为0.024 mg/m<sup>3</sup>和0.003 mg/m<sup>3</sup>, PM2.5和PM10分别占TSP的64.9%和8.1%。而在位于腾格里沙漠的巴音浩特和通古淖尔地面观测表明, PM2.5和PM10占TSP的比例分别为22.5%和30.5%, 细粒子所占比例随高度是减少的, 高空沙尘粒子的平均直径为1.5~4.6μm, 说明位于该粒径范围的沙尘粒子是向高空浮扬的优势粒子群。

Chun等在韩国Anmyon岛观测了1998年4月中旬发源于中国西北地区的沙尘暴, 发现在沙尘气溶胶体积谱函数分布中在1~5μm之间有一明显峰值, 体积平均直径为2μm。对不同尺度粒子的连续监测表明, 在沙尘峰值区(2~3μm)沙尘粒子呈现出了很好的相关, 这也证明细粒子具有远距离输送能力, 在考虑沙尘粒子的远距离输送机制时应重点考虑。

谱型先由单峰偏态演变为双峰偏态, 再由双峰偏态演变为单峰偏态, 所对应的飞行高度轨迹为由1200m升至约4800m, 再降到2500m左右, 证明沙尘气溶胶粒子随高度分布存在两个模态; 其后的飞行探测结果也显示出了粒子谱相同的演变规律。这种现象同样说明, 峰值直径为2~3μm的粒子可输送至3000~5000m高空, 形成第二个峰值, 这部分粒子的浓度随高度的变化较大。

## 3 小结

(1) 沙漠地区上空沙尘气溶胶粒子数浓度为1~1.4个/cm<sup>3</sup>, 平均直径为1.6~4.6μm, 最大直径

为  $13.0\sim 28.0\mu\text{m}$ ; TSP 质量浓度为  $0.01\sim 0.08\text{ mg}/\text{m}^3$ ; PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 分别占 TSP 的  $4\%\sim 13\%$  和  $53\%\sim 88\%$ 。与该地区地面观测结果 PM<sub>2.5</sub> 占 TSP 的  $33\%$  相比,说明在沙漠地区上空,细粒子所占的比例大大下降,也说明细粒子不易浮扬至高空;而高空最大粒子直径达  $28\mu\text{m}$ 。

(2) 高空沙尘气溶胶数浓度与下垫面状况密切相关,沙漠地表上空的粒子数浓度高于植被覆盖较好的地区上空。

(3) 当在沙漠地区上空飞行轨迹为上升、平飞、下降时,沙尘气溶胶粒子谱呈现出由单峰偏态,双峰,正态列单峰偏态等形式的演变,说明高空粒子谱较宽,大粒子较多,高空( $3000\sim 5000\text{m}$ )以粗粒子为主,由此说明,沙尘粒子向高空的浮扬存在优势粒子群。

#### 参 考 文 献

- [1] 牛生杰,章澄昌,孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究.《大气科学》2001,25(2):243~252
- [2] 牛生杰,章澄昌,孙继明. 贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究. 气象学报,2001,59(2):196~205
- [3] 游来光,马培民,陈君寒等. 沙尘天气下大气中沙尘粒子空间分布特点及其微结构. 应用气象学报,1991,2(1):13~21
- [4] Chun, Y., J. Kim, J. C. Choi, K. O. Boo, et al. Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust episode in Korea. Atmos. Environ., 2001,35(15):2715~2721