

周立波, 邹捍, 马舒坡, 等. 2010. 喜马拉雅山地区地气间物质交换及其与南亚夏季风的联系 [J]. 气候与环境研究, 15 (3): 289-294.  
Zhou Libo, Zou Han, Ma Shupo, et al. The air mass exchange between the surface and free atmosphere and its relationship with the South Asian summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (3): 289-294.

## 喜马拉雅山地区地气间物质交换及其 与南亚夏季风的联系

周立波 邹捍 马舒坡 李鹏 朱金焕 霍翠萍

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 喜马拉雅山是青藏高原的重要组成部分, 是大型山地的代表。该地区陡峭的地形和复杂的地表状态在强烈太阳辐射条件下形成了特殊的局地环流系统。该特殊局地环流系统所导致的地气交换过程可能不同于平坦地形和其他山区。喜马拉雅山毗邻南亚季风区, 该地区的地气交换过程也可能受到南亚季风活动的影响。为正确认识喜马拉雅山地区的地气交换过程, 利用2006年夏季喜马拉雅山北侧绒布河谷地区获得大气观测资料, 结合同期的大气环流资料, 对绒布河谷地区地气间的物质交换进行研究。结果表明: 1) 该地区的地气间物质交换以午后至次日凌晨强烈的向下输送为主; 观测期间平均向下输送强度为  $7.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 相当于每天将整个封闭河谷内大气置换约38次; 2) 该地区地气间的物质输送与南亚夏季风存在密切关系, 南亚夏季风活动弱(季风中断期)则物质交换量大 ( $9.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 季风活动强(季风活跃期)则物质交换量小 ( $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); 3) 南亚夏季风可能主要通过改变局地大气辐射状况进而影响该地区地气间的物质交换过程。

**关键词** 喜马拉雅山 局地环流 地气交换 南亚夏季风

**文章编号** 1006-9585 (2010) 03-0289-06 **中图分类号** P401 **文献标识码** A

## The Air Mass Exchange between the Surface and Free Atmosphere and Its Relationship with the South Asian Summer Monsoon

ZHOU Libo, ZOU Han, MA Shupo, LI Peng, ZHU Jinhuan, and HUO Cuiping

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** The Himalayas is an important area of the Tibetan Plateau, and is also a typical large-scale mountain region. The strong solar irradiance under the steep topography and complex terrains of the Himalayas introduces a distinguished local circulation system. The distinct mountain system could cause a different surface-to-air exchange process from that over the plateau flat areas and other mountain regions. Besides, the Himalayas is adjacent to the South Asian monsoon regions, the air mass exchange between the surface and free atmosphere could also be affected by the monsoon evolution. In this study, the surface-to-air mass exchange in the Rongbuk Valley on the north side of the Himalayas is analyzed, based on the observational and large scale grid data in June 2006. Results show that: 1) The surface-to-air exchange is dominated by the strong downward transfer from afternoon to early morning. The

**收稿日期** 2009-07-30 收到, 2010-03-22 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院项目 KZCX2-YW-Q11-01 和 LAPC-KF-2008-12、国家重点基础研究计划 2009CB421403

**作者简介** 周立波, 男, 副研究员, 主要从事大气臭氧、山地环流以及中高纬度物质交换研究。E-mail: zhoulibo@mail.iap.ac.cn

averaged downward transfer of the air volume flux is  $7.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , equivalent to around 38 times of the enclosed valley volume; 2) the surface-to-air mass exchange is closely related to the South Asian summer monsoon (SASM) activities, with strong air mass transfer (air volume flux of  $9.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) in the SASM break period and weak transfer (air volume flux of  $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) in the SASM active period; 3) the SASM can possibly affect the Himalayan surface-to-air exchange mainly by changing the local radiation conditions.

**Key words** Himalayas, local circulation, surface-to-air exchange, South Asian summer monsoon

## 1 引言

青藏高原是东亚和全球变化的关键区域,对于亚洲季风和 ENSO 等重要气候系统的形成和演变有重要影响(叶笃正和高由禧, 1979; Ding, 1991; 周秀骥, 1995; Wu et al., 1996)。青藏高原的地气交换过程是研究青藏高原在全球变化作用中的重要内容,通过地气交换过程,青藏高原地面的物质和能量能够与全球大气系统间的物质和能量进行交换(陶诗言等, 1999)。为此,人们对青藏高原的地气交换过程进行了许多观测和研究,其中包括 20 世纪 70 年代和 90 年代分别进行的第一次和第二次青藏高原大气科学实验(叶笃正和高由禧, 1979; 陶诗言等, 1999; 周明煜, 2000)。目前研究大都集中在以湍流交换为主的高原平坦地区(Li et al., 1999; Gao et al., 2000; Bian et al., 2002; 刘辉志等, 2007; 张美根等, 2008),但对于占高原总面积一半以上的山地地区(张懿铨等, 2002)的地气交换过程研究较少。喜马拉雅山区位于青藏高原西南侧,平均海拔 6000 m 以上,总面积达  $40 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,占青藏高原总面积的六分之一(张懿铨等, 2002)。该地区的地气交换过程在整个青藏高原地气交换过程中占有十分重要的地位,是研究青藏高原乃至大型山地地气交换过程的典型地区。观测和研究结果表明,喜马拉雅山地区存在着包括山谷风和冰川风在内复杂的局地环流系统(高登义等, 1975; Egger et al., 2000; Zou et al., 2008)。该环流系统可以将大气物质在地面与对流层中高层间输送,这与高原平坦地区以湍流交换为主的地气交换过程有很大差别。例如, Hindman and Upadhyay (2002)指出喜马拉雅山南坡的山谷风环流系统可以将污染物从南部山脚输送向北部高海拔地区; Zhu et al. (2006)也指出喜马拉雅山北侧珠峰北坡地区

的强下泻流可以将大气高层的高臭氧浓度空气带入大气低层,从而在地面形成臭氧浓度高值。

南亚夏季风是亚洲夏季风的一个重要组成部分,其形成和演变对于中国和东亚地区的天气气候及大气环流变化至关重要(李崇银, 1995; 黄荣辉等, 1998)。研究结果指出,南亚夏季风的影响区域可以到达印度半岛北侧和青藏高原南部地区(He et al., 1987; Hsu et al., 1999)。南亚季风爆发导致孟加拉湾的大气水分可以通过喜马拉雅山东端的雅鲁藏布江水汽通道进入青藏高原内部,影响该地区的降水 and 水分平衡(高登义等, 1985)。南亚夏季风降水与青藏高原和喜马拉雅山雪盖面积间存在明显的关系(Bamzai and Shukla, 1999; Zhao and Moore, 2004)。南亚夏季风的强弱也影响着我国华北地区的夏季降水(张人禾, 1999)。喜马拉雅山地区地处青藏高原南缘,紧邻南亚季风区,南亚夏季风爆发带来的对流层大气环流变化以及水热条件的改变可能直接影响喜马拉雅山区的局地环流系统及其导致的地气交换过程。

为进一步认识喜马拉雅山地区的地气交换过程,中国科学院大气物理研究所和青藏高原研究所于 2006 年 5~6 月在珠峰北坡绒布河谷地区进行了大气强化观测实验(HEST2006),获得了包括风场、辐射和热力场等在内的大气观测资料。本文将使用 HEST2006 获得的风场、大气辐射和热力状况资料,结合同期的大尺度环流资料,分析研究珠峰北坡绒布河谷地区局地环流导致的地气间物质交换过程,以及观测期间南亚夏季风活动对地气交换过程的影响。

## 2 资料和方法

2006 年 5~6 月,中国科学院大气物理研究所和青藏高原研究所在喜马拉雅山北侧珠峰北坡绒布河谷地区联合进行了大气强化观测实验

HEST2006。图 1 为绒布河谷地区地形图，地形高度等值线间隔为 1000 m。图中黑虚线为珠峰北坡绒布河谷地区，该河谷大致为南北走向，其东、南、西三个方向环山，谷底由南至北向下倾斜，底部宽约 1 km，两侧山脊宽约 3.5 km，东西两侧的山峰相对谷底高度约为 1 km。河谷地表主要为碎石和沙石覆盖，并且可见有稀疏的高原植被，其南端有三个冰川：东绒布、中绒布和西绒布冰川。该河谷的主要部分可以由海拔 5800 m 水平截面和沿河谷中部地区的垂直截面形成封闭。根据大气物质守恒原理，穿越 5800 m 水平截面的大气物质与穿越河谷中部地区垂直截面的大气物质应该相等，因此，可以通过分析研究穿越河谷中部垂直截面的大气物质通量初步定量估计河谷内外大气物质的交换量。为此，我们在河谷中部设立站点“OBS”，该站点位于 (28.17°N, 86.84°E)，5050 m，在该站点架设了自动气象站 (Vaisala MAWS) 和风温廓线仪 (Vaisala LAP-3000)。自动气象站对地面风、大气辐射和热力状况等参数进行观测，观测高度为 2.5 m，采样频率为 10 min。风温廓线仪对 150~1500 m 高度的垂直风廓线进行观测，垂直分辨率为 50 m，时间步长为 30 min。本文采用的垂直风资料为地面至 1500 m 高

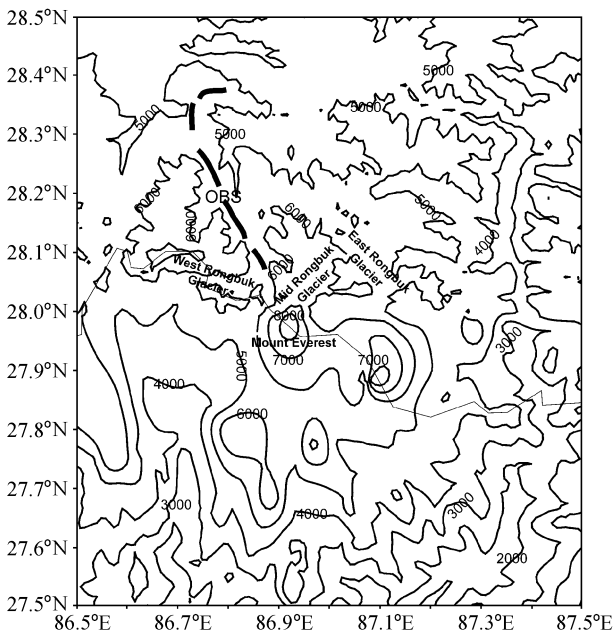


图 1 珠峰北坡绒布河谷地区地形图  
Fig. 1 Topography of the Rongbuk Valley, northern slope of Mt. Everest

度，垂直分辨率为 50 m，其中地面至 150 m 高度的风资料利用对数内插法获得。

此外，为分析研究喜马拉雅山地区的大尺度环流背景，我们使用了与 HEST2006 观测实验同时期的 NCEP/NCAR 再分析大尺度环流资料，包括位势高度和风场等 ([http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep\\_data/\[2007-08-20\]](http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/[2007-08-20]))。该资料为每日 4 次，使用时我们都对其进行了日平均处理。

为研究绒布河谷内外大气物质交换量，我们采用了 Whiteman and Barr (1986) 的假设：垂直截面同一高度上的水平风速  $U(y, z)$  与河谷中心位置观测的水平风速  $U_{obs}(z)$  相同，即：

$$U(y, z) = U_{obs}(z). \quad (1)$$

此外，假设空气密度在垂直截面上不随高度变化，因此穿过垂直截面的大气物质通量可以用通过该截面的体积通量  $V_F$  表示：

$$V_F = \sum_{j=1}^N \left[ \int_{y_E(z)}^{y_W(z)} U(y, z) dy \right] \Delta z_j, \quad (2)$$

其中， $y_E(z)$  和  $y_W(z)$  分别为该垂直截面的东西边界； $\Delta z = 50$  m 为垂直分辨率； $N = 15$  为河谷谷底至 5800 m 的层数。

### 3 大气物质交换

#### 3.1 大气体积通量的日变化

图 2 给出了通过垂直截面大气体积通量的日变化及对应的大气垂直交换率。可以看出，观测期间，河谷内外大气物质交换存在显著的日变化特征：上午 02 时（当地时间，下同）至 10 时交换较弱，大气体积通量值都小于  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，负值代表河谷内大气向河谷外输送；10 时后河谷内外交换量迅速增加，体积通量在 15 时增加到  $12.8 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，15 时至 24 时维持高值，最大值  $15.3 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  出现在 20 时 30 分。该交换量次日凌晨开始迅速减弱。因此，绒布河谷内外大气物质交换主要以午后至次日凌晨强烈的向下输送为主。将体积通量换算为穿越 5800 m 水平截面的垂直交换率，可以看出，穿越 5800 m 水平截面的平均交换率为  $0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其中最大垂直交换率可以达到  $0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从方程 (2) 可知，绒布河谷地区的大气体积通量决定于该河谷

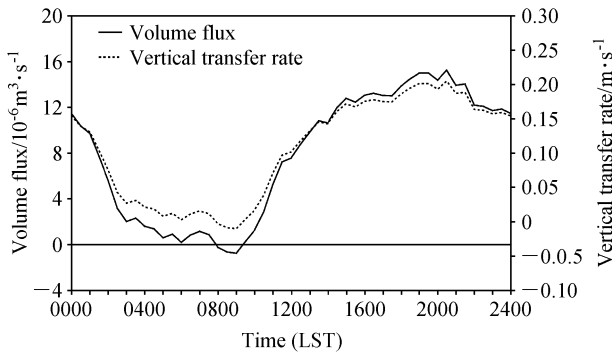


图2 通过观测站点“OBS”所在垂直截面体积通量的日变化及对应的大气垂直交换率

Fig. 2 The diurnal variations of the air volume flux passing through the cross section at station “OBS” and the corresponding vertical transfer rate

的水平风速，因此，大气体积通量的日变化同样为热动力过程驱动形成的（邹捍等，2007；Zou et al.，2008）。

2006年6月观测期间平均体积通量为  $7.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，按封闭河谷体积  $1.8 \times 10^{10} \text{ m}^3$  计算，该交换量相当于每天将整个封闭河谷内大气置换约38次。

### 3.2 大气体积通量的逐日变化

图3为2006年6月通过垂直截面体积通量的逐日变化和对应的大气垂直交换率，可以看出，河谷内外大气交换逐日变化明显：大气体积通量在1~8日变化较大，9~21日则维持在相当稳定的高值，平均值为  $9.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ；经过3天

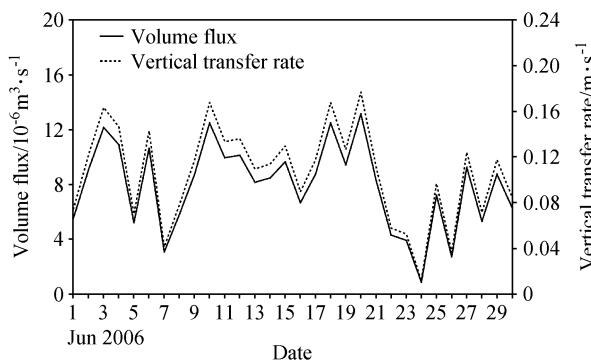


图3 2006年6月通过垂直截面体积通量的逐日变化和对应的大气垂直交换率

Fig. 1 The daily variations of the air volume flux passing through the cross-section at station “OBS” and the corresponding vertical transfer rate across the 5800 m horizontal surface

调整，6月25~30日体积通量减弱为低值，其平均值为  $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。对应地，绒布河谷内外大气垂直交换率在6月9~21日期间的平均值也明显大于6月25~30日期间的平均值，两者分别为  $0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 4 南亚夏季风

为研究南亚夏季风对喜马拉雅山地区大气物质交换的影响，我们计算了南亚夏季风 WY 指数 (Webster and Yang, 1992)，即 850 hPa 与 200 hPa 的纬向风切变距平，见图 4a。由图可见，

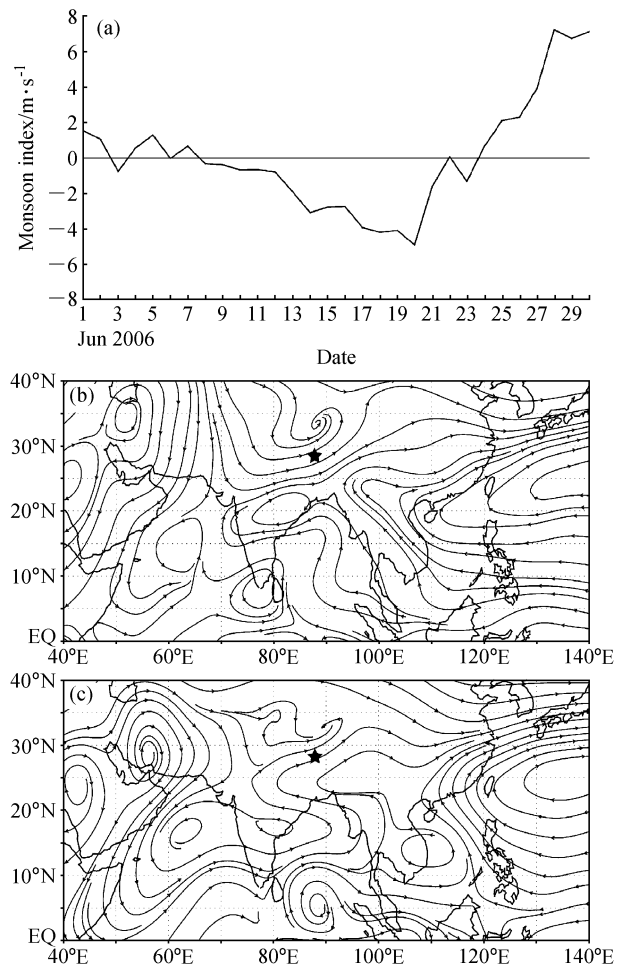


图4 2006年6月 (a) 南亚夏季风指数变化，(b) 季风中断和 (c) 活跃期间南亚地区 500 hPa 天气形势变化

Fig. 4 The variation of (a) the South Asian summer monsoon index in Jun 2006, and the synoptic situations at 500 hPa over the South Asian regions during the South Asian summer monsoon (b) break and (c) active periods

Webster 指数在 6 月 9~21 日出现较大的负值，平均值为  $-2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，代表着季风中断期；6 月 25~30 日季风指数为较大的正值，平均值为  $4.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，代表着季风活跃期。图 4b 给出了两个期间南亚地区的大气环流状况。在季风中断期，印度中北部地区为高压控制，受该高压和青藏高原低压影响，观测区域对流层中高层为西风气流控制，该气流将西北部的干冷空气带入观测地区，导致观测区域上空为晴空控制；而在季风活跃期，阿拉伯海和孟加拉湾地区出现强的涡旋结构，受其影响，观测区域为西南气流控制，该气流将暖湿气流带入观测地区，使得该区域出现多云和小雨天气。上述两个期间的天气状况与实际观测状况相符。

### 5 南亚夏季风对局地大气交换的影响

比较图 3 和图 4a 可以看出，南亚夏季风指数的与绒布河谷内外大气物质交换量的日变化关系密切，两者相关系数为  $-0.4$ 。在季风中断期，绒布河谷内外大气交换强；在季风活跃期，大气交换弱。从图 4b 进一步看出，在南亚夏季风不同期间观测区域上空为不同环流形势控制，该环流形势可以通过改变当地的水热条件进一步影响局地大气交换状况。为此，我们给出了观测地区大气总辐射通量的逐日变化，并与绒布河谷内外大气体积通量和南亚夏季风指数进行比较（见图 5）。可以看出，季风指数变化与绒布河谷内外大气体

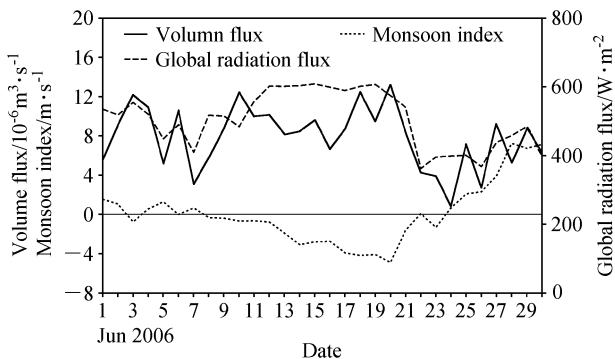


图 5 2006 年 6 月绒布河谷内外大气体积通量、太阳总辐射通量和季风指数的逐日变化  
Fig. 5 The daily variations of the air volume flux, global radiation flux, and monsoon index from 1 to 30 Jun 2006

积交换量和太阳总辐射通量的逐日变化关系密切，其相关系数分别为  $-0.4$  和  $-0.6$ ，且两者都通过了 99% 的置信度检验。从方程 (2) 可知，绒布河谷内外大气体积交换量决定于局地风场，而局地风场主要为热力驱动 (Zou et al., 2008)。因此，我们认为，南亚夏季风可以通过调整绒布河谷当地的大气辐射状况进而影响局地地气间的大气物质交换过程。

### 6 结论

利用 2006 年夏季喜马拉雅山北侧绒布河谷地区获得大气观测资料，结合同期的大气环流资料，我们对绒布河谷内外的大气物质交换进行了分析研究。研究表明：

- (1) 绒布河谷内外大气物质交换存在显著的日变化特征，其交换主要以午后至次日凌晨强烈的向下输送为主。观测期间平均向下交换量可以达到  $7.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，相当于每天将整个封闭河谷内大气置换约 38 次；
- (2) 绒布河谷内外大气物质交换存在明显的逐日变化特征，且与南亚夏季风活动密切相关：季风中断期大气物质交换强，季风活跃期交换弱；
- (3) 南亚夏季风可能主要通过改变局地大气辐射状况进而影响喜马拉雅山地区地气间的大气物质交换过程。

### 参考文献 (References)

Bamzai A S, Shukla J. 1999. Relation between Eurasian snow cover, snow depth, and the Indian summer monsoon: An observational study [J]. *J. Climate*, 12 (10): 3117-3132.  
Bian L, Gao Z, Xu Q, et al. 2002. Measurements of turbulence transfer in the near-surface layer over the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 102: 281-300.  
Ding Y. 1991. *Monsoons over China* [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 419pp.  
Egger J, Bajrachaya S, Egger U, et al. 2000. Diurnal winds in the Himalayan Kali Gandaki Valley, Part I: Observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (4): 1106-1122.  
高登义, 冯雪华, 张江援. 1975. 珠穆朗玛峰北坡的冰川风 [R]. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告, 气象与环境. 北京: 科学出版社, 34-51.  
Gao D, Feng X, Zhang J. 1975. Glacier wind on the northern slope of Mt. Qomolangma [R]. In: *The*

- Scientific Report on the Expedition of the Qomolangma Region, Meteorology and Environment (in Chinese). Beijing: Science Press, 34-51.
- 高登义, 邹捍, 王维. 1985. 雅鲁藏布江水汽通道对降雨的影响 [J]. 山地研究, 3 (4): 239-249. Gao Dengyi, Zou Han, Wang Wei. 1985. Influences of Brahmaputra river water passage on the precipitation [J]. Mountain Research (in Chinese), 3 (4): 239-249.
- Gao Z, Wang J, Ma Y, et al. 2000. Calculation of near-surface layer turbulent transport and analysis of surface thermal equilibrium features in Nagqu of Tibet [J]. Physics and Chemistry of the Earth (B), 25 (2): 135-139.
- He H, McGinnis J W, Song Z, et al. 1987. Onset of the Asian monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau [J]. Mon. Wea. Rev., 115: 1966-1995.
- Hindman E E, Upadhyay B P. 2002. Air pollution transport in the Himalayas of Nepal and Tibet during the 1995-1996 dry season [J]. Atmos. Environ., 36 (4): 727-739.
- Hsu H H, Terng C T, Chen C T. 1999. Evolution of large-scale circulation and heating during the first transition of Asia summer monsoon [J]. J. Climate, 12: 793-810.
- 黄荣辉, 张代洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. 大气科学, 22 (4): 460-469. Huang Ronghui, Zhang Daizhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22 (4): 460-469.
- 李崇银. 1995. 气候动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 449 pp. Li Chongyin. 1995. Introduction of Climate Dynamics [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 449pp.
- Li J, Hong Z, Luo W, et al. 1999. A study of surface fluxes in Gerze area, Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (2): 142-151.
- 刘辉志, 冯健武, 邹捍, 等. 2007. 青藏高原珠峰绒布河谷地区近地层湍流输送特征 [J]. 高原气象, 26 (6): 1151-1161. Liu Huizhi, Feng Jianwu, Zou Han, et al. 2006. Turbulent characteristics of the surface layer in Rongbuk Valley on the northern slope of Mt. Qomolangma [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (6): 1151-1161.
- 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 1999. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 348pp. Tao Shiy-an, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 1999. The theoretic progress of 2nd atmospheric experiment over the Tibetan Plateau [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 348pp.
- Webster P J, Yang S. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 118: 877-926.
- Whiteman C D, Barr S. 1986. Atmospheric mass transport by a long-valley wind systems in a deep Colorado Valley [J]. J. Climate Appl. Meteor., 25, 1205-1212.
- Wu G, Zhu B, Gao D. 1996. The impact of Tibetan Plateau on local and regional climate, from atmospheric circulation to global change [M]. Beijing: China Meteorological Press, 425-440.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 213pp. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. The Meteorology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [M]. Beijing: Science Press, 213pp.
- 张美根, 胡非, 邹捍, 等. 2008. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 923-934. Zhang Meigen, Hu Fei, Zou Han, et al. 2008. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment in LAPC [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 923-934.
- 张人禾. 1999. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用 [J]. 高原气象, 18 (4): 563-574. Zhang Renhe. 1999. The role of Indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18: 567-574.
- 张懿铨, 李炳元, 郑度. 2002. 论青藏高原范围与面积 [J]. 地理研究, 21 (2): 1-10. Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. 2002. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. Geographic Research (in Chinese), 21 (2): 1-10.
- Zhao H, Moore G W K. 2004. On the relationship between Tibetan snow cover, the Tibetan plateau monsoon and the Indian summer monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 31, L14204, doi: 10.1029/2004/GL020040.
- 周明煜. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 125pp. Zhou Mingyu. 2000. The Observation Analysis and Dynamical Research on the Atmospheric Boundary Layer over Tibet [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 125pp.
- 周秀骥. 1995. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 273pp. Zhou Xiuji. 1995. The Ozone Variation in China and Its Influence on the Climate and Environment [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 273pp.
- Zhu T, Lin W, Song Y, et al. 2006. Downward transport of ozone-rich air near Mt. Everest [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L23809, doi: 10.1029/2006GL027726.
- 邹捍, 周立波, 马舒坡, 等. 2007. 珠穆朗玛峰北坡局地环流日变化的观测研究 [J]. 高原气象, 26 (6): 1123-1140. Zou Han, Zhou Libo, Ma Shubo, et al. 2006. Observation of diurnal circulation on the northern slope of Mt. Qomolangma [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (6): 1123-1140.
- Zou H, Zhou L, Ma S, and et al. 2008. Local wind system in the Rongbuk Valley on the northern slope of Mt. Everest [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L13813, doi: 10.1029/2008GL033466.