

## 甘肃马衔山区陆面过程与降水的研究

陈 乾<sup>1</sup>, 毛玉琴<sup>2</sup>, 李宝梓<sup>1</sup>

(1. 甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省山丹县气象局, 甘肃 山丹 734100)

**摘 要:** 采用定西的麦田微气象观测, 定西、兰州的辐射观测和马衔山区 34 个气象、水文和雨量站的气候资料, 结合 NOAA-16 卫星的 AVHRR 资料以及反演的地表植被盖度和反射率, 并用 SEBAL 算法推导出夏季地表净辐射、感热、潜热、土壤热通量密度的区域分布特征, 并分析陆面过程对降水的影响。结果表明: 本区降水的空间分布与夏季植被盖度对应最好, 相关系数高达 0.722, 其次是土壤热通量和潜热通量, 相关系数分别为 -0.65 和 0.615。这表明森林通过降低地表反射率和表面温度, 不仅增加地表净辐射, 而且减少其用于感热和土壤热通量的消耗。由于林区地表水分多, 从而将接收较多的太阳辐射能主要用于蒸散, 增加边界层中的水汽。故林区降水远大于植被稀疏的半干旱黄土梁。

**关键词:** 甘肃马衔山区; 陆面过程; 降水**中图分类号:** P426.6**文献标识码:** A

## 引 言

甘肃中部的马衔山区是青藏高原东北侧少雨带中的湿岛, 是半干旱黄土高原内孤岛式的茂密植被覆盖区, 为强对流天气的发源地和加强区, 因而倍受气象学家的重视。以往由于缺少资料, 对马衔山区陆面过程与降水的关系尚未深入研究。为改进 GCM 数值预报模式, 作为气候形成和变化的陆面过程观测试验已被世界气候研究计划(WCRP)和国际陆圈生物圈计划(IGBP)作为一个重要的研究领域。自 20 世纪 80 年代以来国外开展了许多野外观测研究, 我国也相继开展了黑河实验 HEIFE<sup>[1-2]</sup>, 全球能量水分循环亚洲季风试验<sup>[3]</sup>等研究, 取得了大量资料和科研成果。已从单点观测发展到利用卫星遥感估算非均匀陆面地表特征参数和地气间能量通量的区域分布特征<sup>[3-4]</sup>, 但在荒漠化威胁日益严重的黄土高原半干旱地区尚停留在点和局地尺度上<sup>[5]</sup>, 对其区域分布的研究不够。能量平衡(SEBAL)算法是以荷兰 DLO Staring Center 为主, 于 1998 年逐步完善的<sup>[6]</sup>, SEBAL 算法由地表能量平衡方程出发, 推导出地表净辐射、感热、潜热、土壤热通量密度。近期陈添宇、陈乾、李宝梓利用卫星遥感结合地面观

测估算了中国西北区东部地表能量通量<sup>[7]</sup>, 本文参照其方法, 先用卫星遥感技术反演出甘肃中部的地表特征参数, 进而估算复杂地形下甘肃中部夏季地表各能量通量密度的分布。结合马衔山区稠密的雨量站网资料, 统计陆面过程各参数与降水空间分布的相关, 以便选取最佳参数, 改进本试验区中尺度和区域气候预报模式陆面过程的参数化, 并有助于对山区地气相互作用的深入研究。

## 1 试验区自然地理概况

马衔山位于甘肃省中部, 榆中和临洮 2 县交界处(35.57°~35.93°N, 103.78°~104.23°E)。有 2 条平行的西北东南走向的山脉组成, 北面为兴隆山, 主峰海拔 3 276 m, 南面的马衔山主峰海拔 3 670 m。马衔山区是黄土高原中部罕见的石山, 其土壤保水性好, 因而兴隆山阴坡有针阔混合的乔木林, 最大年雨量近 600 mm。阳坡为干草原, 其西南山麓系荒漠草原, 最少的年雨量仅 308 mm, 前者比后者大近一倍。马衔山区降水主要在夏季(6~8月), 占年雨量的 55%~59%, 降水集中在 5~9 月, 占年雨量的 80%~83%, 冬季降雪稀少仅占 2%。

## 2 测站分布和资料处理

试验区位于甘肃中部 103.5 ~ 104.7°E, 35.3 ~ 36.1°N, 内有兰州、榆中、定西、临洮 4 个气象站和

皋兰山生态站, 黄石坪等 14 个水文站和兴隆山等 15 个气象哨共 34 站, 试验区地形和测站位置如图 1。

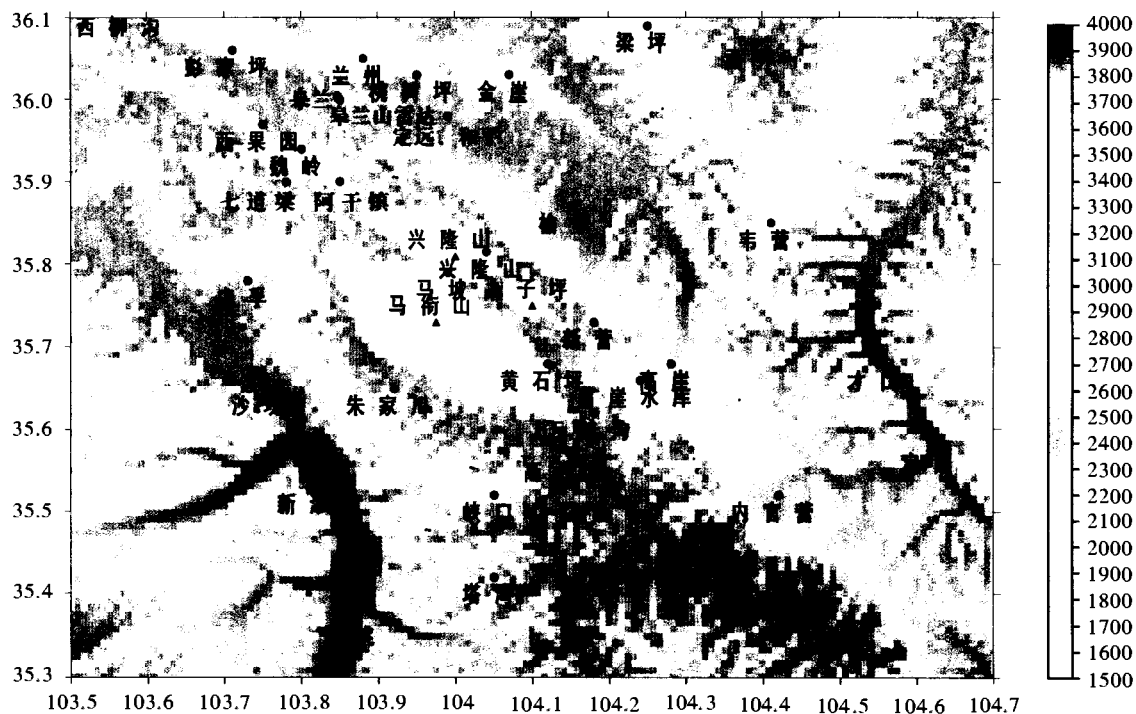


图 1 马衔山区地形和测站分布(图右侧色标为海拔高度,单位:m)

Fig. 1 The sites distribution of observational stations and topography over the Maxian Mountain region

雨量资料取自建站至 2005 年,其中兰州最长有 73 a, 临洮 71 a, 凡短序列测站的年雨量均与邻近气象站拟合出回归方程后,作延长序列订正。

陆面过程各参数的反演选用 NOAA - 16 卫星 2001 ~ 2003 年 6 ~ 8 月下午(北京时 13 ~ 17 时)过境时的 AVHRR 晴空资料(网格距 0.01 × 0.01 经纬度),分辨率约 1 km,对通道 1 和 2 的反射率做太阳高度角订正,通道 4 和 5 的亮温做临边变暗订正,用青海湖为地物作定位校正。地面气象资料取定西试验基地的微气象资料,其仪器设置和观测项目见文献[5],兰州和定西的辐射观测资料,试验区内及其周边的气象台站与卫星过境时刻对应的气温、绝对湿度、气压和风速等。先用卫星资料反演地表植被盖度、反射率和表面温度,再用 SEBAL 算法推导出地表净辐射、感热、潜热、土壤热通量密度的区域分布特征。

## 3 陆面过程各参数的算法

能量各分量的计算基本按 SEBAL 算法<sup>[6]</sup>,其具体计算公式各家有差别,本文采用陈添宇等的方法计算地表特征参量<sup>[8]</sup>,然后由地表能量平衡方程算出地表净辐射、土壤热通量、感热通量后,潜热通量则由余项得出<sup>[7]</sup>。

植被覆盖度用 Carlson Ripley<sup>[9]</sup>的方法计算,其公式为:

$$P_v(x, y) = \left[ \frac{I_{NDV}(x, y) - I_{NDVmin}}{I_{NDVmax} - I_{NDVmin}} \right]^2 \quad (1)$$

式中  $I_{NDVmin}$  和  $I_{NDVmax}$  分别是试验区内最小和最大的归一化植被指数 NDVI 值。

地面反射率参照陈添宇<sup>[8]</sup>和吴艾生<sup>[10]</sup>的方法,用兰州、定西实测地面反射率资料,拟合出地面反射率的计算式:

$$r_s = A + B \times r_1 + C \times r_2 \quad (2)$$

式中  $r_1$  和  $r_2$  为 AVHRR 通道 1 和 2 的反射率;  $A, B, C$  为回归系数见文献[8]。

地表净辐射  $R_n$  按下式计算:

$$R_n = Q \times (1 - r_s) - F_{\text{H}} \quad (3)$$

式中  $Q, r_s, F_{\text{H}}$  分别为到达地面的晴空太阳总辐射 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )、地面反射率和有效辐射的日平均值 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

土壤热通量按 B. J. Chodhury 等的工作<sup>[11]</sup>, 用定西干旱试验基地观测的土壤热通量  $G$ 、净辐射  $R_n$ 、卫星反演的地面反射率  $\bar{r}_s$ 、表面温度  $T_s$  和归一化植被指数, 拟合出下式计算:

$$G/R_n = \frac{T_s - 273}{r_s} \times (0.00073 - 0.00806 \times \bar{r}_s + 0.04132 \times \bar{r}_s^2) \times (1 - 0.97892 \times I_{\text{NDV}}^4) \quad (4)$$

表面温度  $T_s$  取卫星通道 4 和 5 的亮温  $T_4, T_5$ , 用下式反演, 式中  $W$  为整层水汽含量 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )。

$$T_s = T_4 + 1.5(T_4 - T_5) + 0.43(T_4 - T_5)^2 + 4.83 + (52 - 5W)(0.029 - 0.018P_v) \quad (5)$$

感热通量  $H$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 的计算公式为:

$$H = 350 \times \frac{P_s}{T_a} (T_s - T_a) / \Gamma_a \quad (6)$$

式中  $T_a$  为气温;  $P_s$  为地面气压 (hPa);  $\Gamma_a$  为空气动力学热输送阻抗, 用文献[3]的公式计算。将  $R_n, G$  和  $H_{\text{H}}$  (感热通量的日平均值) 代入下式可得潜热通量日平均值  $\lambda E$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

$$\lambda E = R_n - G - H_{\text{H}} \quad (7)$$

## 4 夏季陆面过程各参数与年雨量的相关分析

甘肃中部的马衔山区是青藏高原东北侧少雨带中的湿岛, 年雨量的高值区位于兴隆山脉北坡, 呈西北东南走向。有 4 个高中心分别位于西北段的七道梁 (550 mm), 中部兴隆山主峰北坡推算的极值为 598 mm, 东南端的九子坪 > 540 mm。此外在南面的马衔山区可能还有一中心, 约为 563 mm, 兴隆山与马衔山之间的马坡为相对低值区仅 437 mm (图 2)。由图 2 可看出年雨量分布与植被覆盖度对应良好, 兴隆山北坡最大的降雨中心区植被覆盖度大于 70%, 极值 82%。马衔山西南山麓和东北部为雨量低值中心, 如临洮县中孚乡植被覆盖度仅 2%, 这里年雨量 308 mm, 小于山脉北麓的兰州市七里河区。

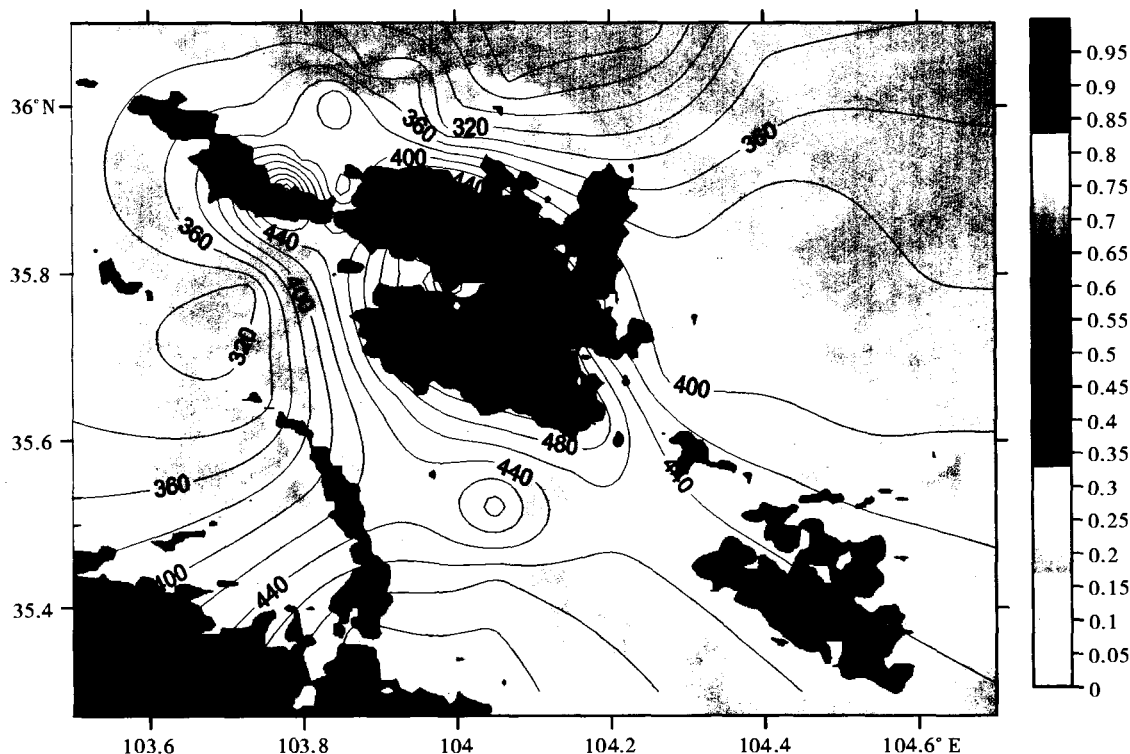


图 2 马衔山区夏季的植被盖度与年降水量分布

Fig. 2 The distributions of vegetation coverage in summer and annual mean precipitation over the Maxian Mountain region

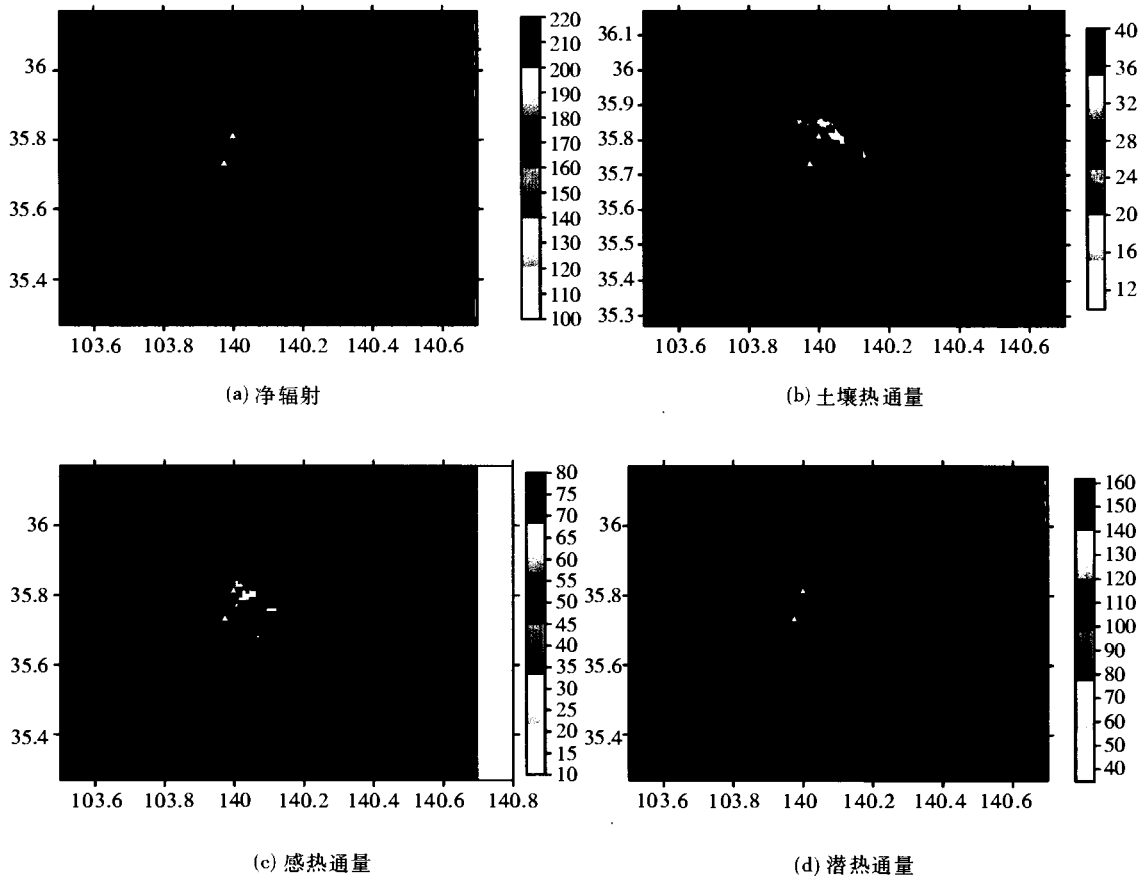


图3 2001~2003年夏季甘肃中部地表能量通量密度(单位: $W \cdot m^{-2}$ )

Fig. 3 Maps of land surface energy flux densities for central Gansu in summer (Unit:  $W \cdot m^{-2}$ )

按晴空时次反演的夏季平均净辐射、土壤热通量和感热、潜热通量的区域分布如图3。

兴隆山北坡林区最大年雨量与净辐射通量213.2(单位: $W \cdot m^{-2}$ ,以下省略)和潜热通量161.8的极值相吻合,与感热通量10.4和土壤热通量13.5的低值区对应。年雨量 $< 320$  mm的榆中会宁等县北部半干旱黄土梁上,净辐射和潜热通量最小,分别为115.9和35.1,这里是感热和土壤热通量的高值区分别达76.7和33.1。

取有稠密雨量站网的 $103.7 \sim 104.3^{\circ}E, 35.5 \sim 36.1^{\circ}N$ 区域,陆面过程各参数用0.01度分辨率的像元值,与其相对应分辨率的年雨量取平面格点插值(用克里格方案)作相关统计。结果表明,雨量与植被覆盖度对应最好,相关系数 $R$ 高达0.722。由于缺少地形降水梯度观测资料,插值时未考虑海拔高度,否则 $R$ 将更高。降水多的林区反射率小,地面接收的太阳净辐射多。森林蒸散旺盛,潜热通量

大,林区地表温度低,向土壤和空气输送热通量少。半干旱黄土梁上降水少,情况相反。因此降水量与地表净辐射和潜热(蒸散)通量正相关,相关系数分别为0.5365和0.6151。与感热和土壤热通量反相关,其相关系数分别为-0.417和-0.6525。地面反射率与降水相关不明显。图4是夏季植被覆盖度、土壤热通量和日平均蒸散量与年雨量的相关散点图,年降水量与植被覆盖度呈对数曲线,其余为线性。

上述地表和陆面过程各参数与年降水量的相关统计表明,森林通过降低地表反射率和表面温度,不仅增加地表净辐射,而且减少其用于感热和土壤热通量的消耗。由于林区地表水分多,从而将接收较多的太阳辐射能主要用于蒸散,增加边界层中的水汽。午后谷风使水汽向山区汇集并产生上升气流,故林区降水远大于植被稀疏的半干旱黄土梁。

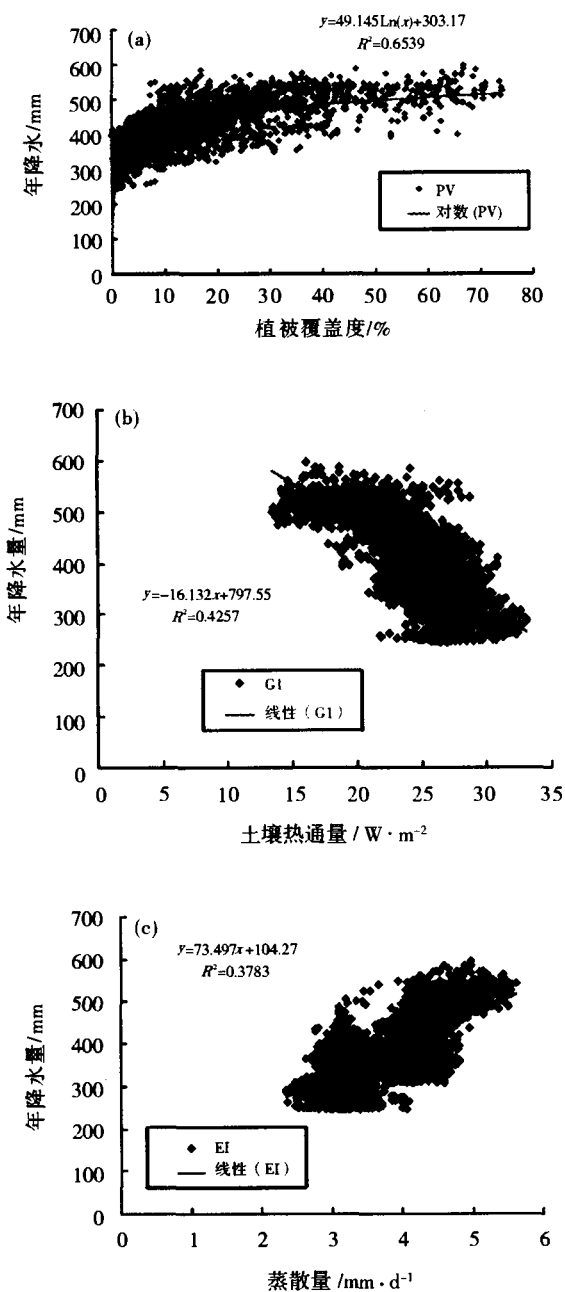


图 4 马衔山区年雨量与植被覆盖度(a)、土壤热通量(b)和潜热通量(c)的相关散点图  
 Fig. 4 Correlations between annual mean rainfall and vegetation coverage (a), soil heat flux density (b) and daily ET (c) over the Maxian Mountain region

## 5 马衔山脉北坡年降水量随海拔高度的变化

兰州市南山区年雨量随海拔高度的变化,因实测资料样本较少,我们用降水的空间网格插值与DEM高度资料分析,七道梁取 $103.77^{\circ} \sim 103.19^{\circ}E$ , $35.90^{\circ} \sim 36.11^{\circ}N$ 区域,皋兰山为 $103.88^{\circ} \sim 103.$

$90^{\circ}E, 36.00^{\circ} \sim 36.05^{\circ}N$ 范围,兴隆山用 $103.99^{\circ} \sim 104.01^{\circ}E, 35.75^{\circ} \sim 36.03^{\circ}N$ ,结果表明,凡 $< 2500$  m的山如七道梁和皋兰山,雨峰出现在山顶附近(图5a,5b)。而 $> 3000$  m的兴隆山年雨量随海拔高度呈抛物线型,雨峰在山腰(图5c),兴隆山雨峰高度是根据榆中年平均凝结高度2680 m按递增率推算出的峰值,年雨量约为597.7 mm。按图5拟合的年雨量峰值以下其随海拔的递增率,兴隆山北坡最大为23.4(单位: $mm/100$  m,以下省略),这与森林覆盖有关,七道梁次之20.1,皋兰山最小仅9.4。取山脚至山上实测的峰值雨量计算结果也如此,但数值大些,分别为30.4,27.1和19.0。

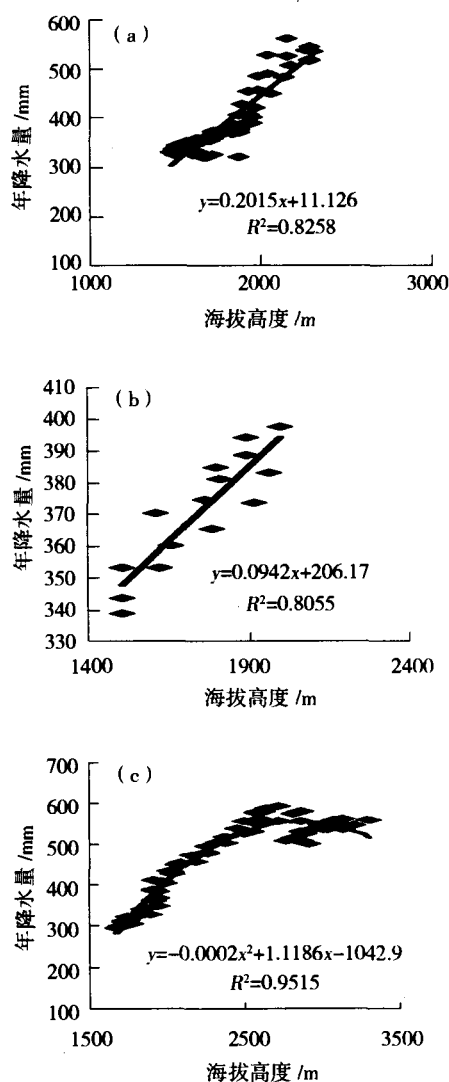


图 5 七道梁北坡(a)、皋兰山北坡(b)、兴隆山北坡(c)年降水量随海拔高度的变化廓线  
 Fig. 5 The profiles of annual mean precipitation with altitude in north slopes of Qidaoliang (a), Gaolan (b) and Xinglong(c) mountains

## 6 结论

(1) 本区降水的空间分布与夏季植被盖度对应最好, 相关系数  $R$  高达 0.722, 其次是土壤热通量和潜热通量分别为 -0.65 和 0.615。这几个参数可选作中尺度和区域气候预报模式陆面过程参数化的主要因子。

(2) 实验区内兴隆山阴坡林区的最大雨量中心与植被盖度、潜热和净辐射通量最大中心相吻合, 与土壤热通量和感热通量最低值对应。年雨量  $> 320$  mm 的榆中、会宁等县北部半干旱黄土高原梁上植被盖度、潜热和净辐射通量最小, 是感热和土壤热通量的高值区。

(3) 森林通过降低地表反射率和表面温度, 不仅增加地表净辐射, 而且减少其用于感热和土壤热通量的消耗。从而林区将接收较多的太阳辐射能, 并主要用于叶面蒸腾, 增加边界层中的水汽, 故林区降水远大于植被稀疏的半干旱黄土梁。

(4) 降水随海拔升高由北向南递增, 年雨量随海拔的递增率, 兴隆山北坡最大为 23.4 (mm/100 m), 显然与森林覆盖有关, 七道梁次之 20.1, 皋兰山最小仅 7.2。七道梁最大实测年雨量 566.1 mm, 马衔山北坡海拔 2 484 m 的黄石坪实测年雨量 544.4 mm, 年雨量极大值出现于兴隆山北坡 2 700 m 附近约 600 mm。

**致谢:** 兰州干旱气象研究所、兰州市气象局和信息网络中心资料室分别提供卫星资料, 定西干旱气象与生态环境试验基地的资料, 有关气象哨的雨量资料和地面常规气象资料。作者在此深表谢意。

## Research of Land Surface Process and Precipitation over the Maxian Mountain Region of Gansu

CHEN Qian<sup>1</sup>, MAO Yuqin<sup>2</sup>, LI Baozi<sup>1</sup>

(1. Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, China; 2. Shandan Meteorological Station of Gansu Province, Shandan 734100, China)

**Abstract:** The regional distribution features of daily mean net radiation, sensible heat flux, latent heat flux and soil heat flux density in summer over central Gansu were derived from the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) using micrometeorological observations over a wheat field at Dingxi station, solar radiation observations at Dingxi and Lanzhou stations, observations of 34 meteorological, hydrological and rainfall stations over the Maxian Mountain region, combining with NOAA-16 AVHRR data, as well as the land surface reflectance and vegetation coverage retrieved from NOAA-16 AVHRR data, the effects of land surface process on precipitation were also analyzed in this paper. The results show that the regional distribution of annual mean precipitation corresponds well to vegetation coverage in summer, the correlation coefficient is 0.722, and the correlation coefficients of annual mean precipitation and soil heat flux, latent heat flux density are -0.65 and 0.615, respectively. It is showed that the forest can not only increase net radiation but also decrease sensible and soil heat fluxes by decreasing surface reflectance and temperature. More solar energy can be received and mostly used for evapotranspiration over forest regions, which makes vapor content increased there. For this reason precipitation over forest regions is much more than that of semi-arid regions with sparse vegetation.

**Key words:** the Maxian mountain region; land surface process; precipitation

### 参考文献:

- [1] Hu Yinqiao, Yang Xuanli, Zhang Qiang, et al. The characters of energy budget on the Gobi and Desert surface in Hexi region [J]. *Acta Meteor Sinica*, 1992, 6(1): 82-91.
- [2] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. *高原气象*, 1994, 13(3): 225-236.
- [3] Ma Yaoming, Ishikawa H, Tsukamoto O, et al. Regionalization of surface fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan plateau by using satellite remote sensing data [J]. *J Meteor Soc Japan*, 2003, 81(2): 277-293.
- [4] Ma Yaoming, Tsukamoto O, Ishikawa H, et al. Determination of regional land surface heat flux densities over heterogeneous landscape of HEIFE integrating satellite remote sensing with field observations [J]. *J Meteor Soc Japan*, 2002, 80(3): 485-501.
- [5] 杨兴国, 张强, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究 [J]. *高原气象*, 2004, 23(6): 828-834.
- [6] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation [J]. & Part 2 validation [J]. *J of Hydr*, 1998a & 1998b 212-213; 198-212. 213-229.
- [7] 陈添宇, 陈乾, 李宝梓. 卫星遥感结合地面观测估算中国西北部东部地表能量通量 [J]. *干旱区农业研究*, 2006, 24(3): 7-15.
- [8] 陈添宇, 陈乾. 用卫星资料推算黑河地区地表特征参数 [J]. *高原气象*, 1992, 11(4): 446-452.
- [9] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sens Environ*, 1997, 62: 241-252.
- [10] 吴艾生, 钟强. 黑河实验区下垫面总辐射、地表反射率与太阳高度角的关系 [J]. *高原气象*, 1993, 12(2): 147-154.
- [11] Chodhury B J, Idos S B, Reginato R J. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by infrared-temperature based energy balance equation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, 39: 283-297.