

# 利用 MODIS 资料估算西北雨养农业区地表净辐射

张 杰<sup>1</sup>, 杨兴国<sup>1</sup>, 杨启国<sup>1</sup>, 马胜萍<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020 2. 兰州气象学校 730020)

**摘 要** :应用定西地区的气象资料和 4 次 EOS-MODIS 卫星资料,对典型的西北半干旱雨养农业区的基本地表特征参数进行反演,并在此基础上对地表净辐射量进行估算,进而分析了它的季节变化。结果表面,应用卫星数据估算的净辐射结果与实际观测值基本接近,相对误差在 16% 以内,基本反映了当地的实际情况。雨养农业区净辐射的季节变化表现为冬季最小,其次是秋季,夏春两季最大,并且四季相差比较大,净辐射四季变化也呈现出均匀分布特性,频率分布范围较宽。

**关键词** :净辐射;EOS-MODIS;西北雨养农业区

中图分类号 :P412.27

文献标识码 :A

## 引 言

气候系统中地—气相互作用可以分为动力作用和热力作用两部分,与热力作用有关的能量包括来自大气下界的地热能和来自大气上界的辐射能,辐射能通过地表转换为驱动大气运动的能量<sup>[1]</sup>。因此,准确地了解净辐射的时空分布对研究大气运动特征具有重要意义。获取地表净辐射的方法有 3 种:一种是利用辐射传输模式计算辐射方程的各分量,来计算净辐射,这种方法存在辐射模式的不确定性<sup>[2]</sup>;第 2 种是通过观测净辐射各分量,来计算净辐射,这种方法虽然能代表点的准确信息,但有点到面转换困难;第 3 种方法是目前应用较为广泛的卫星反演法,国外在这方面应用较早<sup>[3]</sup>,并且方法也比较多。有些研究通过大气顶与地表净辐射之间的回归关系得到地表净辐射<sup>[4]</sup>,也有许多研究是根据辐射平衡原理,通过计算净辐射方程的各项,得到地表净辐射<sup>[5-6]</sup>。文中应用美国最新发射的对地观测极轨卫星 EOS-MODIS,对净辐射方程的各参数如地表反照率、地表温度、长波辐射等参数进行反演,最终得到地表净辐射,并分析净辐射能量的时空分布,试图为下一步分析地—气相互作用和相互影响等提供参考。

## 1 研究区域概况和数据处理

中国西北半干旱区主要以雨养农业为主,该地的农业生产与区域气候变化密切相关。文中选取该典型区域进行了地表净辐射的反演,区域包括  $400 \times 400$  个像元,以  $1\text{km} \times 1\text{km}$  像元为单位,范围为东经  $103^\circ \sim 106^\circ\text{E}$ ,北纬  $35^\circ \sim 38^\circ\text{N}$ ,研究区为西北半干旱雨养农业区的典型下垫面。2003 年来,中国西北半干旱区设立了地气相互作用观测试验站,站点位于  $104.6^\circ\text{E}$   $35.53^\circ\text{N}$ 。

文中所使用的资料主要包括(1)遥感资料的大气订正输入参数采用 MODIS 3A 文件数据,包括太阳天顶角、方位角、卫星天顶角、方位角、地理经纬度以及地形高度等资料,分辨率为  $1\text{km}$ ,数据来自中国气象局兰州干旱气象研究所;(2)MODIS 资料的处理过程中需要一些能见度、气温资料以及地温资料等,来源于甘肃省气象局兰州中心气象台和定西地区气象局。(3)分析资料为 MODIS HDF 格式数据,分辨率为  $1\text{km}$ ,由于卫星资料与云的特征等有关,所以文中仅选 4 次代表资料,四季代表资料分别为:2003 年 1 月 22 日 12 时、22 时,2003 年 5 月 28 日 12 时、22 时,2003 年 6 月 13 日 12 时、22 时,2003 年 9 月 13 日 12 时、22 时的过境数据。由于云的影响,所选的春、夏资料分别代表春末、初夏状况。数据处理过程中,应用 ENVI 软件进行地理定位、通道反射率的转换和区域数据的存取,应用 6S 辐射传输模式进行可见光区大气订正,用以计算植被指数

和地表反照率, BRDF 模型的参数计算, 用 MODTRAN 辐射传输模式进行红外通道大气订正, 用以计算地表温度。

## 2 计算原理与方法

应用分项计算地表净辐射的方法需要分步计算, 首先要取地表特征参数(地表反照率、地表温度和植被指数  $I_{ndv}$ ) 然后推算地表净辐射。

### 2.1 地表反照率参数

应用 EOS 卫星 MODIS 数据, 采用目前发展的推算反照率比较完善的一种二向反射(BRDF)模型 Rossthick-Li sparse R 核算法(AMBRALS 算法), 首先计算窄带反照率, 然后根据下式计算得到总的地面反照率  $\alpha_0$ 。

$$\alpha = 0.3973 \times \alpha_1 + 0.2382 \times \alpha_2 + 0.3489 \times \alpha_3 - 0.2655 \times \alpha_4 + 0.1604 \times \alpha_5 - 0.0138 \times \alpha_6 + 0.0682 \times \alpha_7 + 0.0036 \quad (1)$$

式中  $\alpha_i$  分别代表 MODIS 的第  $i = 1, \dots, 7$  个波段的窄带反照率。

### 2.2 地表温度参数

采用考虑大气校正和地表辐射率的原始方法, 将温度独立发射率光谱指数法(TISIE)应用到 MODIS 卫星数据的温度反演中。该方法描述了两个或更多的波段范围的比辐射率存在指数关系<sup>[7]</sup>, 通过计算相关通道的比辐射率可以反演地表温度, 应用 MODIS 卫星的 20、22、23、29、31、32 中红外和热红外通道的辐射量, 利用 MODTRAN 辐射传输模型, 进行大气校正。为了精确测量具有方向性的半球状物体表面的比辐射率, 考虑双向反射分布函数(BRDF), 用 Minnaert 半经验关系作为双向反射函数(BRDF)核的驱动模型, 计算白天 20、22、23 中红外通道的反射率, 推算出该通道比辐射率, 然后根据其与 31 通道的比值关系, 计算热红外通道的比辐射率, 进而根据普朗克函数推算地表温度的反演。

### 2.3 植被指数参数

植被指数参数是比较常用的反映地表植被覆盖密度、植被种类、土壤湿度等特征的量, MODIS 植被指数通常使用红色可见光通道( $0.62 \sim 0.67 \mu\text{m}$ ), 近红外光谱通道( $0.841 \sim 0.876 \mu\text{m}$ ) 组合设计植被指数 NDVI。

$$NDVI = \frac{P_n - P_r}{P_n + P_r} \quad (2)$$

### 2.4 净辐射通量计算

根据地表净辐射平衡方程, 可以将地表净辐射

通量  $R_n$  表示为:

$$R_n = Q(1 - \alpha) + \epsilon_a \partial T_a^4 - \epsilon_s \partial T_s^4 \quad (3)$$

式中  $Q$  为太阳总辐射通量, 用 MODTRAN 3 辐射传输模式计算,  $\alpha$  为地表反照率,  $\epsilon_a$  为空气比辐射率, 是大气平均的短波透过率  $\bar{\tau}_{s,w}$  的函数<sup>[8]</sup>, 可表示为  $\epsilon_a = 1.08(1 - \bar{\tau}_{s,w})^{0.265}$ ,  $\bar{\tau}_{s,w}$  通过 MODTRAN 辐射传输模式获得,  $T_a$  为空气温度, 根据区域内 5 个气象台站的地温和气温的关系得到,  $T_a = 0.0473 \times T_s^2 + 2.8111 \times T_s - 18.459$ ,  $\partial$  为 Stefan-Boltzmann 常数( $\partial = 5.6696 \times 10^{-8} \text{J/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot \text{s}$ ),  $\epsilon_s$  为地表比辐射率, 它是植被指数  $I_{ndv}$  的函数<sup>[9]</sup>, 可表示为  $\epsilon_s = 1.009 + 0.0471 \ln I_{ndv}$ ,  $T_s$  为地表温度。  $\epsilon_a \partial T_a^4$  为大气长波辐射,  $\epsilon_s \partial T_s^4$  为地表长波辐射。

## 3 结果与讨论

### 3.1 反照率的季节变化

西北半干旱雨养农业区地表的状况复杂, 有裸露的黄土高原、稀疏的植被等, 另外区域内有山涧沟壑等复杂地形, 所以区域内反照率的变化也呈现出不均匀的分布特性, 频率分布的振幅在季节内的变化较大, 如图 1 所示: 冬季(图 1a)反照率表现为单峰型, 虽分布范围较宽, 但大部分地方的反照率集中于  $0.2 \sim 0.25$  之间, 占 40% 左右; 春季(图 1b)地表状况反差较大, 反照率也表现为单峰型, 反照率分布范围相对比较集中, 但主要分布集中于  $0.14 \sim 0.17$  之间, 所占比例为 20% 左右, 说明其空间分布比较复杂; 夏季(图 1c)下垫面状况相对比较均一, 反照率分布范围相对较集中, 反照率基本集中在  $0.12 \sim 0.16$  之间; 到秋季(图 1d), 由于秋粮作物还没有收割, 夏粮作物已经收割, 下垫面状况变得比较复杂, 反照率分布范围较宽, 反照率表现为单峰型, 主要集中于  $0.21 \sim 0.25$ , 部分区域在  $0.15 \sim 0.21$  之间。结果表明, 雨养农业区反照率的季节变化与气候变化相一致, 充分体现了植被的季节变化特征, 由于有小流域灌溉、积水灌溉, 山区种植稀疏植被, 川区有农作物等影响, 区域地表反照率有较大振幅, 并且变化复杂。反照率的反演方法经作者前一部分工作验证, 结果基本能反映当地的实际情况。

### 3.2 表面温度的季节变化

地表温度(LST)是区域和全球尺度地表物理过程中的一个关键因子, 它是地球能量平衡和温室效应的一个很好的度量指标, 并将地—气间的相互作用及其间的能量交换结合起来。区域内表面温度的

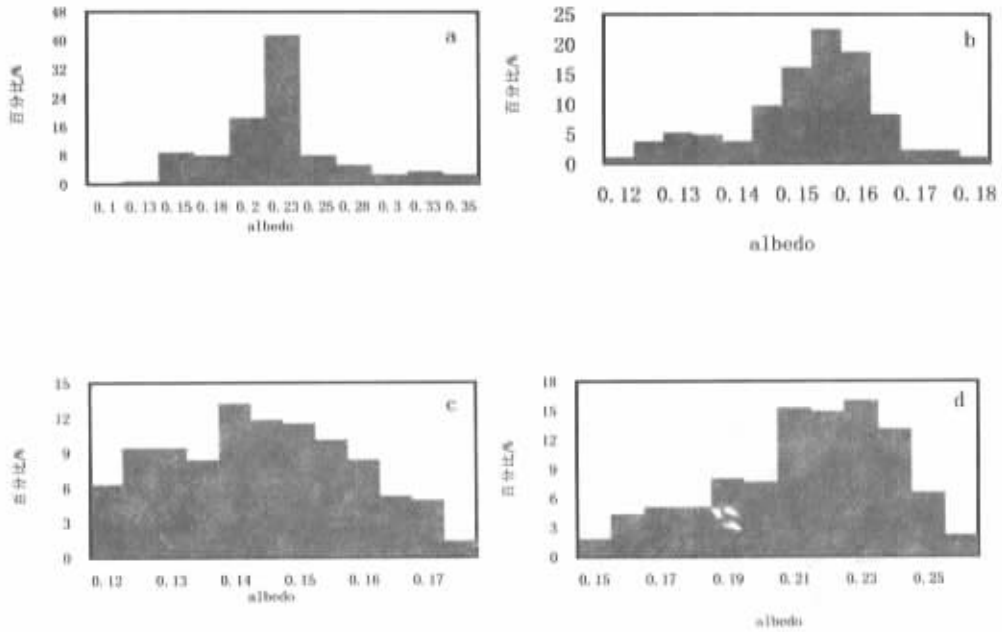


图 1 雨养农业区反照率的季节变化  
(a : 冬季 b 晚春 c 初夏 d 秋季)

Fig.1 Seasonal variety of albedo in the dry - farming region  
( a : winter b late spring c early summer d autumn)

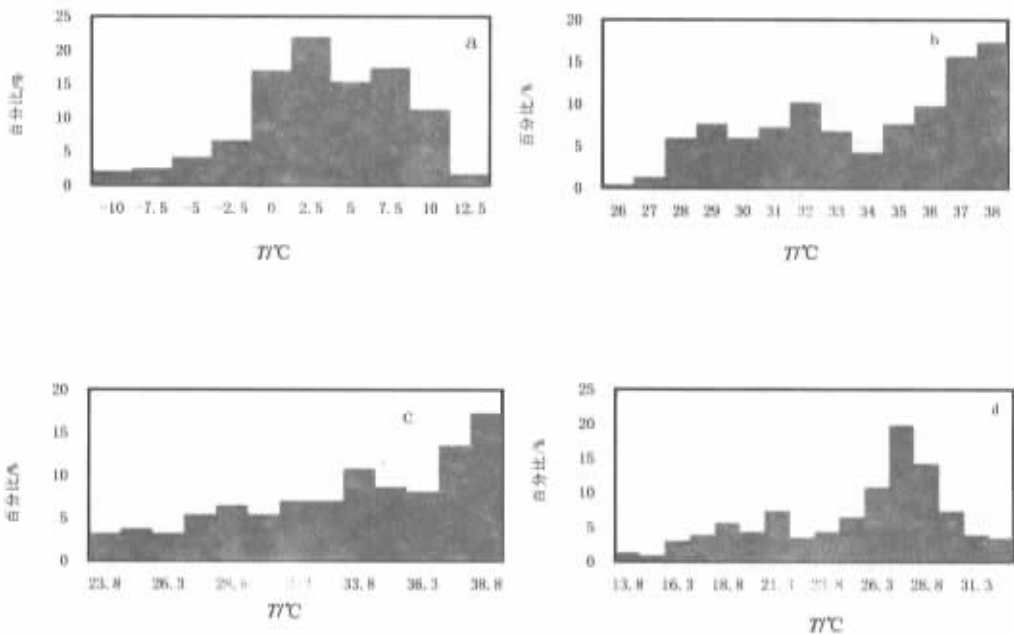


图 2 雨养农业区表面温度的季节变化

Fig.2 Seasonal variety of surface temperature in dry - farming region

变化呈现出不均匀的分布特性,频率分布的振幅在季节内的变化较大,如图 2 所示:冬季(图 2a)表面温度表现为单峰型,大部分地方的表面温度位于 0~10℃ 之间,观测点的反演温度为 5.0℃,实际观测

0cm 地温为 5.6℃,误差为 0.6℃;春季(图 2b)地表状况反差较大,表面温度分布范围较宽,表面温度也表现为单峰型,主要分布集中于 35~39℃ 之间,观测点的反演温度为 38.6℃,实际观测 0cm 地温为

38.9℃,误差为 0.3℃;夏季(图 2c)下垫面状况与春季基本一致,表面温度分布范围较宽,表面温度基本集中在 35~39℃之间,观测点的反演温度为 38.6℃,实际观测 0cm 地温为 38.8℃,误差为 0.2℃;到秋季(图 2d),由于秋粮作物还没有收割,所以下垫面状况仍比较复杂,表面温度分布范围较宽,表面温度也表现为双峰型,主要集中于 25~29℃之间,观测点的反演温度为 27.7℃,实际观测 0cm 地温为 28.7℃,误差为 1℃。结果表明,雨养农业区表面温度的季节变化与气候变化相一致,地表温度的空间变化说明该区域虽处于半干旱区,植被分布相对少,但下垫面覆盖比较复杂,所以温度分布范围较宽;与实际观测结果比较,反演结果基本准确,可以反映当地的实际情况。

### 3.3 净辐射的季节变化

西北半干旱雨养农业区主要以自然降水来维持农作物生长,少部分地方可以得到山水小流域的灌

溉,所以地表植被分布极不均匀,区域内地表净辐射分布也呈现出分布不均匀的特性,四季频率分布的振幅较大,如图 3 所示:冬季(图 3a)净辐射表现为单峰型,大部分地方的净辐射位于 100~140W/m<sup>2</sup>之间,春季(图 3b)地表状况反差较大,净辐射分布范围较宽,净辐射也表现为单峰型,主要分布集中于 380~420W/m<sup>2</sup>,夏季(图 3c)下垫面状况比较均一,净辐射基本集中在 390~410W/m<sup>2</sup>之间;到秋季(图 3d),下垫面状况又变得复杂,净辐射分布范围较宽,净辐射也表现为单峰型,主要集中于 310~330W/m<sup>2</sup>。分析结果表明,雨养农业区净辐射的季节变化表现为冬季最小,其次是秋季,夏春两季最大,并且四季相差比较大。净辐射的季节变化与植被覆盖的季节变化相一致,其空间分布也说明植被在空间上分布的不均匀性,高植被覆盖区,净辐射较高,这为我们分析地表能量收支及其空间分布提供了参考。

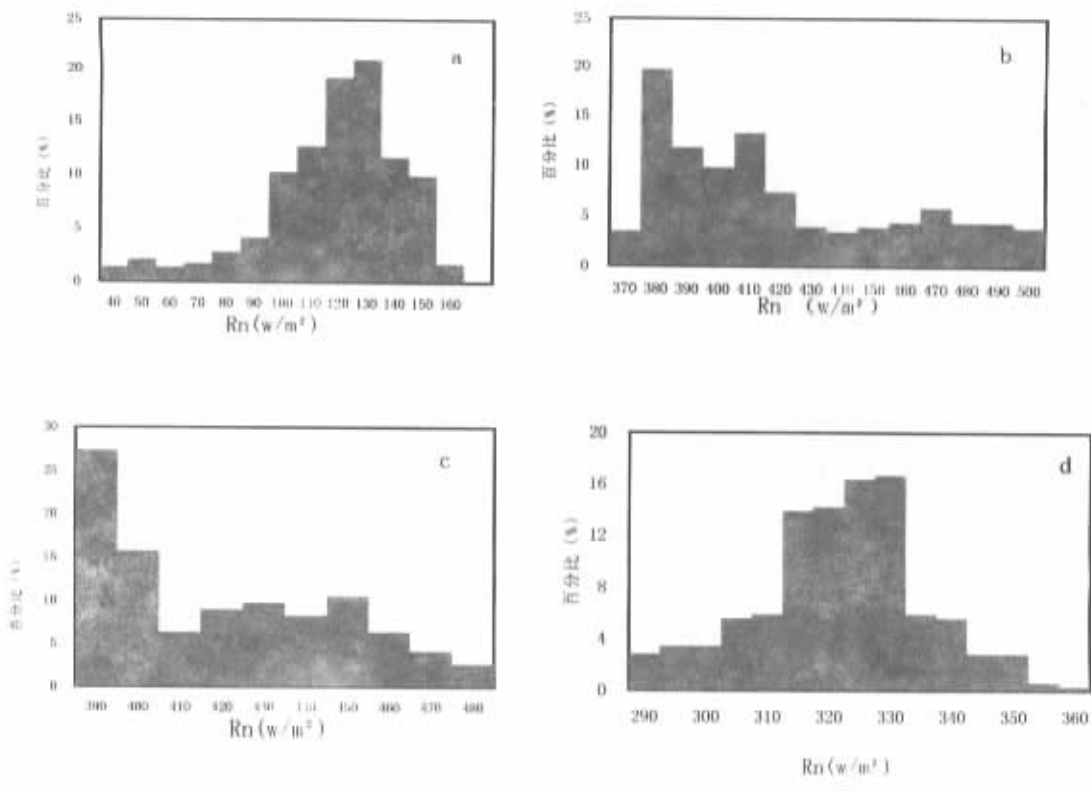


图 3 雨养农业区净辐射的季节变化

Fig. 3 Seasonal variety of net radiation in the dry-farming region

### 3.4 结果检验

反演结果的可靠性检验应该通过实际观测值进行验证,由于实验站的观测仪器出现故障,所以本研

究选取了反演区域的另一个点兰州台站的资料进行验证,结果如表 1 所示,春、夏、秋、冬代表季节的 4 次卫星过境的兰州反演结果分别为 403.13W/m<sup>2</sup>、

399.97W/m<sup>2</sup>、332.66W/m<sup>2</sup>、91.79W/m<sup>2</sup>,相应的台站观测数据分别为 479.3W/m<sup>2</sup>、468.9W/m<sup>2</sup>、359.6W/m<sup>2</sup>、86.1W/m<sup>2</sup>,相对误差分别为 15.9%、14.7%、7.5%、6.4%,说明卫星的反演结果基本准确,并且反演结果也能够体现地表净辐射的空间分布和时间分布特点。

## 4 结论与讨论

西北半干旱雨养农业区地表的状况表现为裸露的黄土高原、稀疏的植被或者是茂密的植被区域等景观,另外区域内有山涧沟壑等复杂地形,所以下垫面状况较复杂,植被分布也呈现不均匀分布的特性,本文反演的地表特征参数也充分体现了这一点。

(1)区域内反照率的变化呈现出不均匀的分布特性,频率分布的振幅在季节内的变化较大,四季反照率都表现为单峰型,冬、春、夏、秋四季反照率分别为 0.2~0.25、0.14~0.17、0.12~0.16、0.21~0.25,雨养农业区反照率的季节变化与气候变化相一致,充分体现了植被的季节变化特征;另外,由于受小流域灌溉、积水灌溉,山区种植稀疏植被、川区有多种农作物覆盖类型,所以区域地表反照率有较大振幅,并且变化复杂。

(2)区域内表面温度的变化呈现出不均匀的分布特性,频率分布的振幅在季节内的较大。冬、春、夏、秋四季表面温度分别为 0~10、35~39、35~39、25~29℃,地表温度的空间变化说明该区域虽处于半干旱区,植被分布相对少,但下垫面覆盖比较复杂,所以温度分布范围较宽。

(3)区域内地表净辐射分布也呈现出不均匀的分布特性,四季频率分布的振幅较大,净辐射的四季

变化都表现为单峰型,冬、春、夏、秋四季净辐射分别为 100~140W/m<sup>2</sup>、380~420W/m<sup>2</sup>、390~410W/m<sup>2</sup>、310~330W/m<sup>2</sup>,净辐射的季节变化与植被覆盖的季节变化相一致,其空间分布也说明植被在空间上分布的不均匀性,高植被覆盖区,净辐射较高,这为我们分析地表能量收支及其空间分布提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 王可丽. 青藏高原地区云对地表净辐射的影响[J]. 高原气象, 1996, 15(3): 269-275.
- [2] Cess R D, Potter G L. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models[J]. J Geophys Res, 1990, 95: 16601-16615.
- [3] Pinker R T, Corio L A. Surface radiation budget from satellites[J]. Mon Wea Rev, 1984, 112: 209-215.
- [4] 王可丽, 钟强. 青藏高原地区大气顶净辐射与地表净辐射的关系[J]. 气象学报, 1995, 53(1): 101-109.
- [5] 马耀明, 王介民, Massimo Menenti, 等. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量[J]. 气象学报, 1999, 57(2): 180-188.
- [6] 马耀明, 王介民, Massimo Menenti, 等. 黑河实验区地表净辐射区域分布及季节变化[J]. 大气科学, 1997, 21(6): 743-749.
- [7] Becher F, Li Z L. Temperature Independent Spectral Indices in thermal infrared bands[J]. Remote sensing of Environment, 1990, 32: 17-33.
- [8] Bastiaanssen W G M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain, Ph. D. Thesis, Wageningen Agriculture University, the Netherlands, 1995, 143-144.
- [9] Van de Griend A A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the NDVI for natural surface[J]. Int J Remote Sens, 1993, 14: 1119-1131.

## Estimation of Net Radiation in Dry – farming Region in Northwest by MODIS Data

ZHANG Jie<sup>1</sup>, YANG Xing-guo<sup>1</sup>, YANG Qi – guo<sup>1</sup>, MA Sheng-ping<sup>2</sup>

( 1. Institute of Arid Meteorology ,CMA ,Lanzhou 730020 ,China 2. Lanzhou Meteorological School ,Lanzhou 730000 ,China )

**Abstract** :By using meteorological data of Dingxi region and EOS/MODIS data ,some basic surface parameters and the net radiation of earth 's surface in the dry – farming region in Northwest China are derived , moreover , the seasonal variety of the net radiation of earth 's surface is analyzed. The results show that the derived value is close to the observed value , the relative error is less than 16% , which means the derived value may reflect the fact instance ; the seasonal variety of the net radiation is least in winter and most in summer and spring , and there is asymmetrical feature of its distribution in different seasons , its frequency distribution range is also wide in this dry – farming region.

**Keyword** :net radiation ; EOS/MODIS ; the dry – farming region in Northwest China