

文章编号: 1008-2786-(2007)6-664-07

青藏高原北部五道梁地表热量平衡方程中 各分量特征

李 韧, 赵 林, 永建, 杨 文, 胡泽勇, 季国良
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用青藏高原北部五道梁地区实测的太阳辐射及气象资料, 计算分析了高原北部地面热量平衡方程中各分量特征, 定义了一个无量纲参量土壤热平衡系数 k_s 。结果显示: 五道梁地区地表净辐射及地面加热场强度表现为夏季大, 冬季小, 地表净辐射累年平均通量为 65.5 W/m^2 ; 土壤热通量自 1997 年来有增大的趋势; 土壤热平衡系数有增大的趋势, 平均值为 1.17; 感热及潜热是地面热平衡方程中的大项, 其中感热居首位, 潜热居其次; 暖季感热、潜热以相反的趋势变化, Bowen 比 β 值有下降的趋势。

关键词: 净辐射; 地表加热场; 土壤热通量; 土壤热平衡系数; 感热; 潜热

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

太阳辐射能是地球能量的主要来源, 它是地球表层各种物理过程和生物过程的基本动力, 地球上许多自然现象的发生和变化, 主要是由于太阳辐射能的差异、转化和输送所引起的^[1]。由于大气对太阳辐射的直接吸收很微弱, 当太阳辐射穿过大气到达地球表面时将产生一系列的能量再分配。地面、大气及地-气系统的吸收、反射和二次辐射等就是这种能量再分配的表现形式。能量分配的结果致使地表热量平衡方程中各分量的特征发生变化, 从而改变了下垫面热力状态, 影响了下垫面与大气间的水热交换, 进而, 对天气气候产生影响。青藏高原平均海拔 4 000 m 以上, 是一个高大的耸立于对流层中空的大陆块, 它位于热带与副热带的过渡区上, 又

处在北半球著名季风区的心脏地区。相关的研究表明, 青藏高原巨大的动力和热力作用不仅在很大程度上控制着高原及其邻近地区的天气气候^[2], 高原地区大范围的热力异常及地气物理过程对全球气候异常与东亚大气环流及中国灾害性天气的发生、发展具有重大的影响^[3]。作为一个相对独立的气候单元, 青藏高原不仅是我国天气变化的“启动区”, 也是我国气候变化的“启动区”^[4,5]。因此, 高原上太阳能收支的变化及其分配过程必将会对我国天气、气候产生相应的影响。从 20 世纪 60 年代开始, 我国的科学工作者对高原地区地面辐射收支和热源状况进行了研究, 并取得了一系列重要成果^[6]。随着对高原问题研究的不断深入, 高原地表热量状况

收稿日期 (Received date): 2007-04-30; 改回日期 (Accepted): 2007-09-03。

基金项目 (Foundation item): 青藏高原多年冻土活动层水热动态过程及其与大气间的水热交换研究 (40471926); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划): 青藏高原冰冻圈变化与能量水分循环过程; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目: 青藏高原地气系统能量收支的观测和模拟研究 (KZ2003111); 中国科学院青藏高原冰冻圈观测试验研究站: [National Natural Sciences Foundation of China NO. 40471026 Research on thermal and moisture dynamics in active layer of permafrost on the Tibetan Plateau and its impacts on climate and environment (2005-2007), The National Basic Research Project (973 Project), No. 2005CB422003 The change of cryosphere and the process of energy and water cycle in the Tibetan Plateau (2005-2009), The innovative foundation of Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences The Study of Energy Budget over Tibetan Plateau by Observation and Numerical Simulation (2004-2006) and Cryosphere Research Station on Qinghai-Xizang Plateau Chinese Academy of Sciences]

作者简介 (Biography): 李韧, (1970-), 男, 汉族, 陕西武功人, 博士, 副研究员, 主要从事寒区气候变化、大气辐射及陆面过程等方面的研究。
[Brief introduction of the first author The first author's name is Li Ren, the Han nationality. The birth time is Aug. 1970 The native place is Wugong county, Shanxi province The degree is Phd. The job title is vice Prof. And the main research domains are atmospheric radiation, climate change and land surface processes in arid region.]

的研究也取得了新的进展, 学者们从不同角度论述了高原热力作用^[7-15], 对更加深入地研究高原地气物理过程做出了重要贡献。然而, 由于高原自然条件恶劣, 地形复杂, 野外观测台站相对较少, 因而, 高原地区陆面热力状况的研究仍显不足, 这方面仍需更进一步的研究工作。

五道梁地处高原北部, 该地区的辐射气候特征在青藏高原北部, 特别是在昆仑山与唐古拉山之间的广大地区有较好的代表性^[8], 因而, 本文以五道梁为个例, 分析了该地区地表热量平衡方程中各分量的特征。

1 资料、观测仪器

本文的辐射资料源于五道梁 (35°13'N, 93°05'E, 4 612 m) 地面能量收支观测站 1993-09~2000-12 的辐射观测资料, 取其中的总辐射 Q 、反射辐射 R_k 、地面向上长波辐射 U 、大气逆辐射 G 及土壤热通量 G_s 。总辐射 Q 及反射辐射 R_k 采用日本 EKO 生产的 MS-42 型天空辐射表, 地面向上长波辐射 U 及大气逆辐射 G 采用美国 Eppley 实验室 PR 型精密红外辐射表, 土壤热通量观测采用日本 EKO 生产的 CN-81 型土壤热流板。数据采集系统采用了澳大利亚 DE 数据采集公司 DT600 数据采集器, 数据以地方时整点采集, 每小时 1 次。所取得的观测资料精度符合要求^[8]。

2 地表热量平稳方程中各分量特征

热量平衡方程常用来描述大气圈、水圈和地-气系统内具有一定容积或质量的物质的自然过程的数量关系。地表热量平衡方程有着特别重要的意义, 因为入射的太阳辐射在这里发生的能量转换是地球大气中一切气象过程的基础。地表面热量平衡的收入项为净辐射 R_n 。支出项有: 地表面与低层大气间的感热交换 H ; 由水的相变产生的潜热交换 LE ; 由土壤上层热含量的变化而产生的地表面与其下层土壤或水体的能量交换 G_s ; 地表面以下能量的水平输送 C_0 ^[16]。因而, 下垫面的热量平稳方程可描述为

$$R_n = H + LE + G_s + C_0 \quad (1)$$

对于陆地表面而言, 由于土壤热传导产生的能量水平输送过程异常缓慢, 可略去不计^[16], 因此对于陆

地表面来说, 热量平衡方程可表示为

$$R_n = H + LE + G_s \quad (2)$$

相关研究表明, 五道梁地区近地面能量基本上达到平衡^[17], 因而, 对五道梁地区而言, 这种简化是可靠的。把 (2) 式中 G_s 移到方程左边可得

$$R_n - G_s = H + LE \quad (3)$$

式中 $R_n - G_s$ 称为地面加热场强度, 为简便起见, 以下用 E_s 代表 $R_n - G_s$ 。根据周允华等^[18]的研究, 测量地表热通量时, 把热通量板埋置于地下 2~3 cm 是合适的。因此本文用 2 cm 处热通量代表从地表向地下传输的热量值。

2.1 地表净辐射及地表加热场

地面吸收的太阳辐射能与支出的长波辐射能之差为地表面净辐射, 地表净辐射为正时, 表明地表获得热量, 为负时表明其失去热量。其表达式日间为,

$$R_n = Q(1-A) - (U-G) = Q(1-A) - F \quad (4)$$

夜间为

$$R_n = -F \quad (5)$$

式中 R_n 为地表净辐射, Q 、 A 、 U 、 G 依次为太阳总辐射、地表反射率、地面向上长波辐射及大气逆辐射, F 为地面有效辐射。地表反射率 A 可由下式计算

$$A = \frac{R_k}{Q} \quad (6)$$

式中 R_k 为地表反射辐射, 其它参量的定义与上同。地面辐射平衡主要受太阳高度角、测点海拔、反射率及云量的影响。

利用实测的 Q 、 R_k 、 U 、 G 计算了五道梁地区地表净辐射, 图 1 给出了五道梁地区地表净辐射的变化曲线。该地区净辐射冬季小, 夏季大, 其季节变化主要受太阳、测点海拔高度、反射率及云量的影响。净

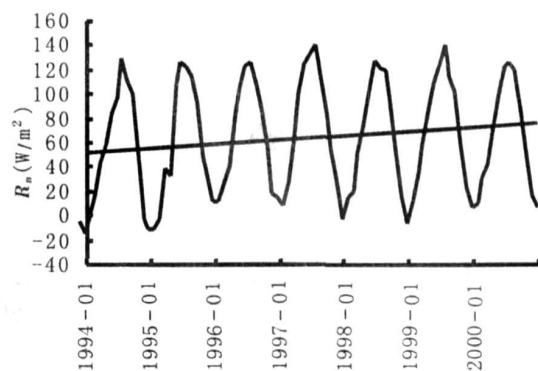


图 1 五道梁地区的净辐射变化

Fig 1 The variation of net radiation over Wudao liang

辐射最大值为 141.0 W/m^2 , 最小为 -11.2 W/m^2 , 变幅为 152.2 W/m^2 , 年平均值为 65.5 W/m^2 。从 1994~2000 年间, 五道梁地区地表净辐射有增大的趋势。

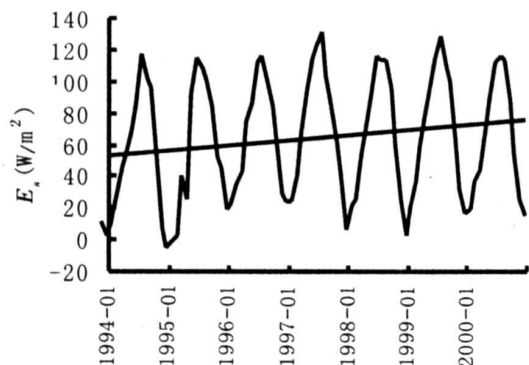


图 2 五道梁地面加热场强度的变化

Fig 2 The variation of surface heating field intensity over Wudao liang

利用地表净辐射 R_n 及观测得到的土壤热通量, 计算了五道梁地区的地表加热场强度, 结果如图 2 所示。对比图 1 及图 2 可以发现, 五道梁地区的地表净辐射与地面加热场强度的变化趋势相同。这主要是由于, 该地区地面加热场强度主要受地表净辐射的影响, 土壤热通量相对于地表净辐射而言较小, 不居主导地位。五道梁地区地面加热场强度最大值为 130.6 W/m^2 , 最小值为 -4.4 W/m^2 , 振幅为 135.0 W/m^2 , 年平均值为 64.5 W/m^2 。对五道梁地区地表净辐射及地面加热场强度的相关分析发现, 二者高度线性相关, 线性相关系数高达 0.99, 超过了 0.001 的信度检验, 回归方程为

$$E_s = 0.8233R_n - 11.134 \quad (7)$$

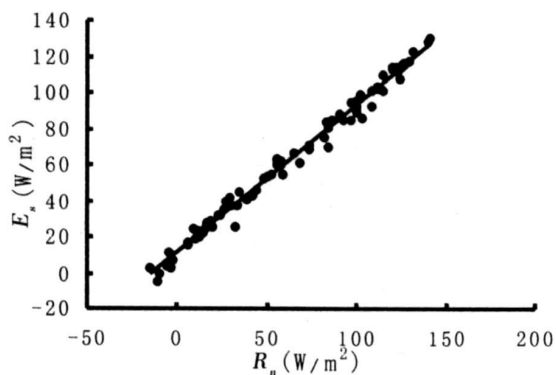


图 3 五道梁地区 E_s 随 R_n 的相关分布

Fig 3 The correlation analysis between the R_n and the E_s

in Wudao liang region

2.2 土壤热状况

2.2.1 土壤热通量

土壤热通量为由地表进入土壤的热量。利用埋设在五道梁土中 2cm 处的热流板所测得的热通量值, 我们对藏北高原地表输入土壤中的热通量的季节变化和年际变化进行了讨论。五道梁全年有 6 个月 (4~9 月) 时间, 土壤热通量为正值, 即从地表有热量进入土壤层, 另有 6 个 (10~3 月) 为负值, 即地表不仅没有热量进入土壤中, 相反土壤要向大气释放热量。观测结果表明, 除 1997 年, 由地表进入土壤中的热通量年平均值为正值, 且自 1997 年来, 有逐年增大的趋势。1997 年土壤热通量较小是由于该时段地表反射率较大所致, 地表反射率较大, 地面得到的能量相对较小, 由地表面向下传输的热量相应的减小。相关研究也显示^[19], 五道梁附近, 1997 年冻结期土壤温度 -8°C 达到的深度大于 1998 年冻结期; 1997 年融化期土壤温度 0°C 达到的深度小于 1996 年融化期。

当土壤热通量年平均值 > 0 表明热量由地表向下层土壤输送, 土壤吸热。五道梁地处羌塘高原大片连续多年冻土区^[20], 近年来, 由于全球气候变暖, 较高的土壤热通量对所造成的高原冻土退化起着促进和加速的作用。对此我们必须给予充分的重视。

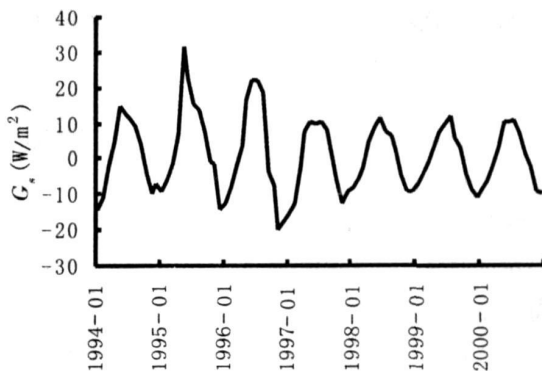


图 4 五道梁地区土壤热通量的年际变化

Fig 4 The inter annual variation of the soil heat flux in Wudao liang region

2.2.2 土壤热平衡系数

土壤热通量向下为正, 向上为负。当土壤热通量为正时表示土壤吸热, 土壤温度上升; 土壤热通量为负表示土壤放出热量, 土壤温度下降。为了研究方便, 在此定义了一个无量纲参量: 土壤热平衡系数 K

$$K = \left| \frac{G_{s+}}{G_{s-}} \right| \quad (8)$$

式中 G_{s+} 为一年中由地表向下层土壤传输热总量, G_{s-} 为一年中下层土壤向上传输的热总量, 此处一年的范围为当年 10 月份至来年 9 月份。 K 为 1 表示一年之中土壤吸收的热量与土壤放出的热量保持平衡, $K > 1$ 表示一年之中土壤吸收的热量大于放出的热量, 土壤温度将上升, 如果 K 持续 > 1 冻土则可能退化; $K < 1$ 时, 一年中土壤吸收的热量小于放出的热量, 土壤温度下降, 如 K 持续 < 1 冻土将得以维持发展。

2.2.3 土壤热平衡系数的年际变化

由实测的土壤热通量, 我们计算了五道梁地区 G_{s+} 及 G_{s-} , 由此计算了该地区的热平衡系数 K , 其值如下图所示:

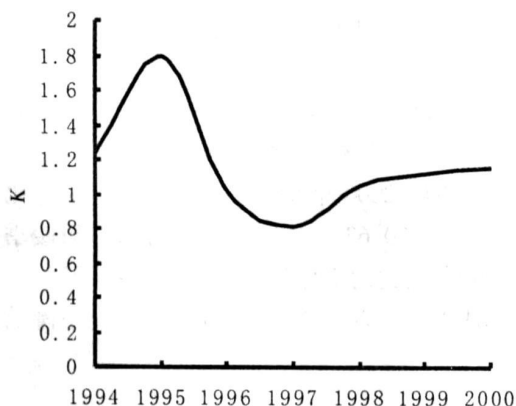


图 5 五道梁 K 值之年际变化

Fig 5 The inter annual variation of the K value in Wudaoliang region

图 5 给出了五道梁地区土壤热平衡系数 K 的年际变化。其中 K 值 1995 年较大, 1997 年较小, 平均值为 1.17。从 1997 年起, K 有增大的趋势。在监测的 7 a 中, K 值 > 1.0 的有 6 a, < 1.0 的仅有 1 a, 土壤热平衡系数 $K > 1$ 表明土壤增温, 冻土不稳定, 有退化的趋势。相关研究也表明^[14], 同一时期, 该地季节冻土的融化深度有增大的趋势。

2.2.4 暖季土壤热通量占净辐射之比例

土壤热通量在地表热量平衡方程中是一个小项, 然而, 土壤在暖季 (5~8 月) 收入的能量的大小变化会对高原地区冻土产生影响, 土壤能量的变化同时也会对冻土区的工程建设带来一定的影响, 图 6 给出了暖季土壤热总量占暖季地表净辐射总量的比例。

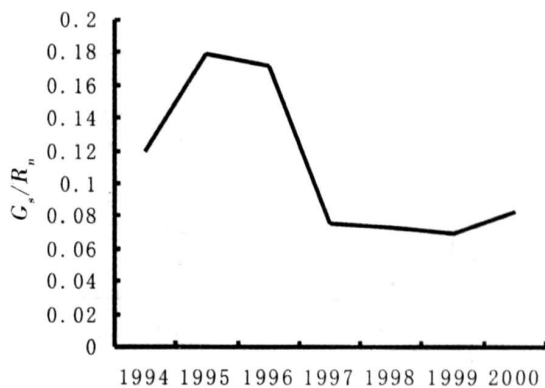


图 5 五道梁暖季 G_s/R_n 之年际变化

Fig 5 The inter annual variation of G_s/R_n during the warm season in Wudaoliang region

1996 年到 1997 年迅速减小, 1999 年后以趋于增大。 G_s/R_n 最大值为 17.9%, 最小值为 7.0%, 平均值为 11.0%, 表明在观测的 7 a 里, 地表净辐射 R_n 的暖季总量中有 11.0% 耗于冻土融化和土壤增温, 该结论小于文献^[21]之结论, 原因除了讨论的地点不同外, 文献^[21]中讨论的时段为夏半年 (4~9 月份)。与高原地区其他站点相比, 其值与改则、格尔木相当, 大于甘孜、那曲及拉萨的比值^[22-24]。将图 5 中 G_s/R_n 的变化趋势与图 4 中平衡系数 K 的变化趋势基本相同, 这主要是因为, 五道梁地区土壤吸收的能量大部分集中在暖季, 而平衡系数 K 为一年 (当年 10 月份至来年 9 月) 中吸热总量与放热总量之比, 因而两者的变化趋势基本相同。

3.3 感热及潜热

本文的感热、潜热的计算参考了文献 [25] 之方法, 即先计算出 1994~2000 年月平均 Bowen 比, 然后由地表能量平衡方程计算出感热、潜热, 最后计算了暖季 (5~8 月) 感热、潜热总量占地表净辐射总量之比例。与高原西部之改则、北部的那曲^[23, 24]、安多^[26, 27]相同, 五道梁地区感热及潜热是地面热平衡方程中的大项, 其中感热居首位, 潜热居其次。这种能量分配的特点不同于高原东部的甘孜、南部的拉萨^[23]及中国东部的上海^[28]。甘孜、拉萨两地感热、潜热占净辐射的比例相当, 其中高原东部的甘孜, 潜热占净辐射的份额略大于感热, 而在高原南部则表现为感热略大于潜热。东部的上海则已潜热为主, 其中蒸发潜热占净辐射的 70%, 而感热仅占净辐射的 24%。不同的下垫面特征及局地气候状态各异是产生差异的主要原因。

图 6 给出了五道梁暖季感热、潜热总量占地表

图 5 中, G_s/R_n 从 1994~1996 年是增大的, 从

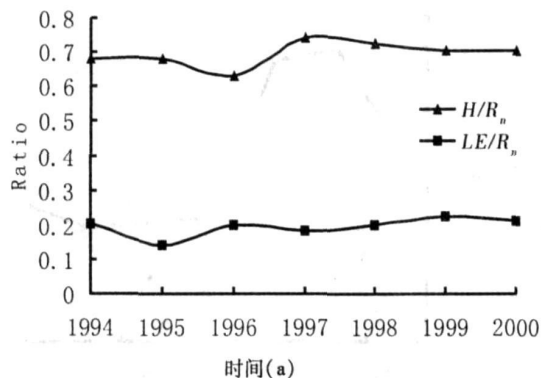


图 6 五道梁暖季 H/R_n 、 LE/R_n 的年际变化

Fig 6 Interannual variation of H/R_n and LE/R_n during the warm season in Wudao liang region

净辐射总量之比例。由图 6 可见, 五道梁地区 1994~2000 年间暖季感热与净辐射之比的变化范围在 0.628~0.741, 振幅为 0.113; H/R_n 从 1994~1996 年, 1997~2000 年均减小; 暖季潜热与净辐射之比的变化范围在 0.140~0.224, 振幅为 0.084; 潜热与净辐射之比 1994~1995 年是减小的, 从 1995~2000 年是增大的。

Bowen 比反映了一个地区地表的感热、潜热两个主要支出项之间的关系, Bowen 比 β 的表达式为,

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (9)$$

利用所求的感热及潜热代入 (9) 式得到五道梁地区的 Bowen 比, 结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 1994~2000 时段, 暖季 β 值有下降的趋势。通常情形下, 土壤湿度决定着地气间潜热交换的变化。五道梁地区气象站观测资料显

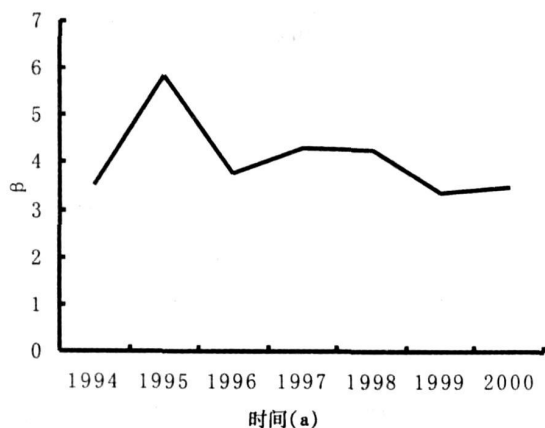


图 7 五道梁暖季 β 之年际变化

Fig 7 The interannual variation of β during warm season in Wudao liang region

示, 1994~2000 年时段, 暖季降水量有增大的趋势, 降水量的增大致使土壤湿度增大, 导致蒸发潜热相对较大; 降水量增大时段, 地气温差相对较小, 感热相对较小。相对较小的感热及增大的潜热导致 β 下降。

3 结论

综上所述, 可得以下初步结论:

1. 五道梁地区地表净辐射夏季大, 冬季小, 累年平均值为 65.5 W/m^2 。
2. 土壤热通量除 1997 年外, 平均值为正, 且自 1997 年来有增大的趋势; 五道梁地区土壤热平衡系数在监测的 7 a 中, K 值大于 1.0 的有 6 a, 1997 年有增大的趋势, 表明该地区冻土有退化的趋势; 暖季土壤热通量占净辐射的比例变化趋势与 K 的变化趋势相近。
3. 五道梁地区感热及潜热是地面热平衡方程中的大项, 其中感热居首位, 潜热居其次。
4. 1994~2000 年间暖季感热与净辐射之比的变化范围在 0.628~0.741, 振幅为 0.113; 暖季潜热与净辐射之比的变化范围在 0.140~0.224, 振幅为 0.084; 1994~2000 年时段, 暖季 β 值有下降的趋势。

参考文献 (References)

- [1] JiGuoliang, LuLanzhi. Secular variation characteristics of solar radiation and air temperature at Gohud [J]. *Plateau Meteorology*, 1997, 16(1): 30~35 [季国良, 吕兰芝, 格尔木太阳辐射与气温的多年变化 [J]. 高原气象, 1997, 16(1): 30~35]
- [2] YeDuzheng and Gaoyouxi. Tibetan Plateau meteorology [M]. Beijing: Science Press, 1979: 89~101 [叶笃正, 高由喜. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 89~101]
- [3] TaoShiyao, ChenLanshou, Xuxingde et al. The researching advance of the second atmospheric experiment over the Tibetan Plateau (I) [M]. Beijing: Science Press, 1999 [陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学试验研究进展 (一) [M]. 北京: 科学出版社, 1999]
- [4] TangMaocang, LiCunqiang. The fact analysis on "the Tibetan Plateau is the startup region of climate change" [A]. In: The Paper Volume of the First Academic Meeting of China Society on the Tibetan Plateau [C]. Beijing: Science Press, 1992: 42~48 [汤懋苍, 李存强. 关于“青藏高原是气候变化启动区”的分析事实 [A]. 中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文选 [C]. 北京: 科学出版社, 1992: 42~48]
- [5] Fengsong, TangMaocang, WangDongnei. New evidences for the Qinghai-Tibetan Plateau as a pilot regions of climate change in China

- [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1998, 43(6): 633~ 636 [冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据 [J]. 科学通报, 1998, 43(6): 633~ 636]
- [6] JiGuoliang The Observational Experiment Studies on the Surface Radiation Budget and Heat Sources over the Tibetan Plateau [A]. In: The formative environment and development on the Tibetan Plateau [C]. Shijiazhuang: Hebei Technological Press, 2003: 120 ~ 129 [季国良. 高原地面辐射收支和热源观测实验研究 [A]. 见: 郑度. 青藏高原形成环境与发展 [C]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003: 120~ 129]
- [7] JiGuoliang, PuMing Characteristics of the surface and atmospheric heating fields over Qinghai-Xizang Plateau for the period from August 1982 to July 1983 [J]. *Acta Meteor Sinica*, 1989, 3(2): 228~ 241
- [8] JiGuoliang Advances in energy budget observation experiment over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 333~ 340 [季国良. 青藏高原能量收支观测实验的新进展 [J]. 高原气象, 1999, 18(3): 333~ 340]
- [9] LiDongliang, JiGuoliang, LuLanzhi Impact of Tibetan Plateau surface heating field intensity on northern hemispherical general circulations and weather and climate of China [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(Suppl.): 312~ 319 [李栋梁, 季国良, 吕兰芝. 青藏高原地面加热场强度对北半球大气环流和中国天气气候异常的影响研究 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 31(增刊): 312~ 319]
- [10] LiYaoqing Surface heating in the Tibetan Plateau and general circulation over it and their relations with prediction of drought/flood at eastern site [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(1): 107~ 114 [李跃清. 青藏高原地面加热及上空环流场与东侧旱涝预测的关系 [J]. 大气科学, 2003, 27(1): 107~ 114]
- [11] LiDongliang, LiWeijing, WeiLi The effect of surface sensible heat flux of the Qinghai-Xizang Plateau on general circulation over the northern hemisphere and climatic anomaly of China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 71~ 83 [李栋梁, 李维京, 魏丽等. 青藏高原感热及其异常的诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 71~ 83]
- [12] Yang Kun, Koike Toshiro, Ishikawa Hirohiko *et al*. Analysis of the surface energy budget at a site of GAME/Tibet using a Single-Source Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(1): 131~ 153
- [13] LiRen, JiGuoliang, YangWen Inter annual change of global solar radiation over Wudaoliang region [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(2): 173~ 177 [李韧, 季国良, 杨文. 五道梁地区总辐射的年内变化 [J]. 高原气象, 2005, 24(2): 173~ 177]
- [14] LiRen, JiGuoliang, LiShuxun *et al*. Soil heat condition discussion of Wudaoliang region [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2005, 26(3): 299~ 304 [李韧, 季国良, 李述训, 等. 五道梁地区土壤热状况的讨论 [J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 299~ 304]
- [15] LiRen, YangWen, JiGuoliang *et al*. The 40 a variational characteristics of surface heating field over Wudaoliang the northern Tibetan Plateau [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2005, 26(6): 868~ 873 [李韧, 杨文, 季国良, 等. 40 年来藏北高原五道梁地区地表加热场的变化特征 [J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 868~ 873]
- [16] Pan Shouwen. Theories of Modern Climatology [M]. Beijing: Meteorological Press, 1994: 142 [潘守文. 现代气候学原理 [M]. 北京: 气象出版社, 1994: 142]
- [17] Wang Jimin, Ma Yaoming, Qi Yongqiang The physical characteristics of near surface layer in Tibetan Plateau region [A]. In: Tang Maocang, Cheng Guodong and Li Zhenyao Late climate change and its influences to environment in Plateau. Guangzhou: Guangdong Technology Press, 1998: 101~ 119 [王介民, 马耀明, 祁永强. 青藏高原地区近地面层物理特征 [A]. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响 [C]. 广州: 广东科技出版社, 1998: 101~ 119]
- [18] Zhou Yunhua, Xiang Yuejin The observational accuracy analysis on heat plate [A]. The Study on Agricultural Zoology [C]. Beijing: Sciences Press, 1989: 233~ 244 [周允华, 项月琴. 热流板测量精度分析 [A]. 农业生态环境研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1989: 233~ 244]
- [19] Zhao L., Cheng G., Li S. Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1205~ 1211 [赵林, 程国栋, 李述训. 青藏高原五道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程 [J]. 科学通报, 2000, 45(11): 1205~ 1211]
- [20] Cheng Guodong, Zhao Xufeng, Wang Shaojing *et al*. Study on the recent change of permafrost on the Tibetan Plateau [A]. In: Academic annual of study on the Formation and evolution environment changes and ecosystem on the Tibetan Plateau [C]. Beijing: Sciences Press, 1996: 175~ 180 [程国栋, 赵秀峰, 王绍令, 等. 青藏高原多年冻土之近期变化研究 [A]. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊 (1995) [C]. 北京: 科学出版社, 1996: 175~ 180]
- [21] Zeng Qunzhu, Xie Yingqing Discuss the heat effect of the Tibetan Plateau from the surface radiation balance and thermal balance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 25(12): 552~ 554 [曾群柱, 谢应钦. 从地表辐射平衡、热量平衡论青藏高原的热力作用 [J]. 科学通报, 1980, 25(12): 552~ 554]
- [22] JiGuoliang, Yao Lanchang, Yuan Fumao Characteristics of surface and atmospheric heating fields over Qinghai-Xizang Plateau during the winter in 1982 [J]. *Scientia Sinica (Series B)*, 1986, XXIX(8): 876~ 888
- [23] Li Dinghai, Wu Jingzhi, JiGuoliang The heat balance in the Lhasa Nagqu Gêrê and Garê during August 1982 to July 1983 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1987, 45(3): 370~ 373 [李丁华, 吴敬之, 季国良. 1982 年 8 月 ~ 1983 年 7 月拉萨、那曲、改则、甘孜地面热量平衡分析 [J]. 气象学报, 1987, 45(3): 370~ 373]
- [24] Zhu Keyun, Duan Tingyang, Pan Yong Feature analysis of thermal regime on Tibetan Plateau [J]. *Journal of Yunnan University*, 2001, 23(4): 252~ 257 [朱克云, 段廷扬, 潘永. 青藏高原热状况特征分析 [J]. 云南大学学报, 2001, 23(4): 252~ 257]
- [25] JiGuoliang, Gu Benwen, Lu Lanzhi Characteristics of atmospheric heating field over northern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2001, 21(3): 238~ 242 [季国良, 顾本文, 吕兰芝. 青藏高原北部的大气加热场特征 [J]. 高原气象, 2001, 21(3): 238~ 242]
- [26] Kenji Tanaka, Ichiro Tamagawa, Hirohiko Ishikawa *et al*. Surface

- energy budget and closure of the eastern Tibetan Plateau during the GAME-Tibet DP 1998[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 283: 169 ~ 183
- [27] Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto. Combining Satellite Remote Sensing with Field Observations for Land Surface Heat Fluxes over Inhomogeneous Landscape[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 26~ 45
- [28] Ju Xiaoshen. A preliminary study of the surface heat balance in Shanghai[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, 5 (2): 211~ 217 [鞠笑生. 上海地区热量平衡状况的初步分析[J]. *应用气象学报*, 1994, 5(2): 211~ 217]

The Features of Each Components in the Surface Heat Balance Equation over Wudaoliang Northern Tibetan Plateau

LI Ren, ZHAO Lin, DING Yongjian, YANG Wen, HU Zeyong, JI Guoliang

(Cold and Arid Regions Environmental And Engineering research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The energy budget is an important domain in the research of the Earth-air's physical processes on the Tibetan Plateau. In order to have a good understanding of the surface energy regime, the characteristics of each component in the equation of the surface heat balance are analyzed by using the data observed on radiation, surface and air temperature and moisture pressure from Sep. 1993 to Dec. 2000 at Wudaoliang in the northern Tibetan Plateau. And for analyzing the soil heat condition, one dimensionless quantity, the soil heat balance coefficient (K) is defined. The results show that the surface net radiation and surface heating fields are big in summer and small in winter; the mean value of surface net radiation is about 65.5 W/m^2 . There is good relationship between the net radiation and the surface heating field. As for the soil heat conditions, there is an increasing trend for soil heating flux and K from 1997. And during the 7 years observation there are six years in which K values are bigger than 1.0, which means heat amount absorbed by soil is bigger than that emitted by the soil and the frozen ground will be degenerate. For the sensible heat and latent heat, the variation trend in the warmer season is different between the ratio H/R_n and LE/R_n . The ratios H/R_n are among the range from 0.628 to 0.741, which is the dominant component of the surface heat balance equation. And Bowen ratio decreases from 1994 to 2000.

Key words net radiation, surface heating flux, soil heat flux, soil heat balance coefficient, sensible heat, latent heat