

藏东南高山林线冷杉原始林土壤热通量

李明财^{1,2}, 罗天祥^{2*}, 郭军¹, 何吉成², 刘新圣²

(1. 天津市气候中心, 天津 300074 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要: 利用藏东南色齐拉(也称色季拉)山高寒区林线地带连续的气象观测资料, 分析了高山林线冷杉原始林土壤热通量的日、季节以及逐日变化特征及其与净辐射的关系, 初步研究高寒区原始林土壤-大气热量交换特征。结果表明: 随着土壤深度的增加, 土壤热通量日变化振幅减小, 至 60 cm 处没有明显的日变化。除春季表层土壤 5 cm 处热通量没有明显的日变化特征外, 其余季节日变化呈明显“S”型曲线。不同深度的土壤热通量存在明显的季节及年内逐日变化特征, 但变化的幅度表层土壤明显高于深层。不同年间土壤热通量逐日变化趋势非常一致。不同深度土壤年总热通量均为正值, 表明高山林线地带土壤总体上为热汇。土壤热通量的变化与净辐射直接相关, 但二者的同步性较差, 土壤热通量对净辐射的反馈延时约 6 h, 明显高于农田、草地及温带、亚热带森林, 因此在利用净辐射估算土壤热通量时, 要充分考虑植被类型及环境的影响。

关键词: 高山林线; 冷杉原始林; 土壤热通量; 净辐射; 能量交换

中图分类号: S152.8

文献标识码: A

被称为世界“第三极”的青藏高原地处我国西部, 约占国土面积的四分之一, 因其海拔高而形成独特的气候环境, 形成极其脆弱而且对全球变化非常敏感的生态系统。高原热力、动力作用以及地-气间的物质能量交换过程对我国、亚洲乃至全球的气候变化均有重大影响。开展青藏高原地气系统物理过程的观测研究, 分析确定热量参数的变化特征, 有助于改进全球气候模式和区域天气、气候模式在该地区的参数化方案^[1], 在青藏高原研究中受到中外学者的普遍关注^[2-4]。

土壤热通量是表征地-气能量交换的主要物理参量, 是生态系统能量平衡方程中的重要组成部分, 研究土壤热通量变化特征对分析生态系统物质和能量交换过程具有重要意义, 在全球变化研究得到了广泛的关注^[5,6]。森林作为陆地生态系统的主体, 其能量平衡特征不仅体现森林本身的生态效应, 而且对区域甚至全球的气候有重要的影响, 一直以来

受到科学界的重视^[7-9]。国内目前对森林生态系统土壤热通量的研究多集中于温带^[7,8,10]或亚热带地区^[11-13]。在藏东南地区, 由方枝柏和急尖长苞冷杉构成的高山林线是全球海拔最高的林线之一, 相对较多的降水以及高海拔的低温环境, 形成了该地区典型的冷湿气候特征, 土壤低温成为限制该地区植物生长和分布的主要因子, 为研究极端寒冷环境条件下森林生态系统物质和能量交换过程提供了理想场所。但是长期以来, 由于青藏高原特殊的地理条件和恶劣的气候环境给野外观测试验带来极大困难, 使得国内对该区林线研究相对缺乏, 而对于土壤热状况研究更是没有涉及。因此对藏东南高山林线地带土壤热通量进行观测分析, 分析极端环境条件下森林生态系统地-气界面的热量交换特征, 从而为进一步展开土壤-植被-大气连续体的物质和能量交换系统研究具有重要意义。

收稿日期 (Received date): 2007-12-03; 改回日期 (Accepted): 2008-04-01。

基金项目 (Foundation item): 美国林务局国际合作项目 (5-IC-11242343-064); 国家自然科学基金资助项目 (40671069)。[Supported by the International Cooperation Project of the USDA Forest Service Northern Global Change Program (05-IC-11242343-064), and the National Natural Science Foundation of China (Project 40671069).]

作者简介 (Biography): 李明财 (1976-), 男, 吉林抚松人, 博士, 主要从事森林生态学研究。[Limingcai male, born in Fusong, Jilin province in 1976, Ph.D., research interest is forest ecology.] E-mail: Lin@ipcas.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 罗天祥 [Luo Tianxiang] E-mail: Loux@ipcas.ac.cn

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区设在青藏高原东南部林芝地区色齐拉(也称色季拉)山口($29^{\circ}36'N$, $94^{\circ}36'E$), 该区属高山寒带半湿润区, 海拔 4 380 m, 年平均气温 $-0.73^{\circ}C$, 最高月(7月)平均气温 $9.23^{\circ}C$, 最低月(1月)平均气温 $-13.98^{\circ}C$, 近 10 a 极端最低气温 $-31.6^{\circ}C$, 极端最高气温 $24.0^{\circ}C$; 年均降水量 1 134.1 mm, 蒸发量 544.0 mm, 相对湿度 78.83%; 6~9 月为雨季, 占全年降水的 75%~82%, 其中 8 月降雨最多, 平均为 294.2 mm; 土壤为酸性棕壤($pH = 5.5$), 土壤含水率 39.1%; 土壤氮、磷和碳含量分别为 6.5 mg/g、0.8 mg/g 和 63.3 mg/g。研究区内乔木建群种为急尖长苞冷杉(*Abies georgei*), 常绿灌木主要为海绵杜鹃(*Rhododendron pingianum*)、黄杯杜鹃(*Rhododendron wardii*), 落叶灌木主要为山生柳(*Salix oritrepha*)、冰川茶藨子(*Ribes glaciale*)和西南花楸(*Sorbus rehderiana*)。

1.2 研究方法

中国科学院藏东南高山环境站高山林线观测场于 2005–08 建立。在急尖长苞冷杉林线最上端林内、林外分别安装了两套树木生长及气象观测系统(合计 88 个传感器), 动态监测树木径向生长及其相关的气象要素和辐射、热量平衡。HL20 自动气象站于 2005–08 开始运行。

林内自动气象站连接 HFP01 热通量板(热通量传感器)测量土壤热通量, 而林外自动气象站连接 Kipp & Zonen NR-Lite 净辐射传感器测净辐射。林内土壤热通量板水平置于距地表 5 cm、20 cm 和 60 cm 处土壤中, 净辐射传感器距离地面约 1.5 m。自动气象站的数据采集为同步采集, 每小时记录一次, 本研究采用 2005–09~2006–08 连续一整年的数据, 分析该地区土壤热通量的日、季节变化动态。另外, 我们结合 2006–09~2007–08 数据试图比较逐日土壤热通量的变化趋势在两年内有无明显差异。

2 结果与讨论

2.1 土壤热通量日变化

为了更清楚地了解土壤热通量在不同季节的日

变化特征, 分别选取 2005–10–17、2006–01–17、04–16 和 07–17 典型晴天的资料进行分析。结果表明, 随土壤深度的增加, 土壤热通量振幅明显减小(图 1a~d)。表层土壤 5 cm 处热通量有明显的波动, 而 20 cm 处呈现微弱波动, 至土壤 60 cm 几乎没有日变化, 表明日尺度上的地–气热量交换主要发生在表层土壤。

表层土壤 5 cm 处除在春季外(图 1c), 其他季节呈现明显的“S”型曲线日变化(图 1a、b、d), 与前人对于青藏高原珠峰地区^[1]以及亚热带林地^[12]的研究结果一致。通常在中午前后土壤热通量出现最低值, 之后逐渐升高至 20 00 时左右达到最高, 再次下降。不同季节白昼和夜间土壤热通量有明显的变化, 春季和夏季, 白昼和夜间总的土壤热通量均为正值(能量由地上部分向土壤传递, 土壤为热汇); 与此相反, 秋季和冬季, 白昼和夜间土壤热通量均为负值(能量由土壤向地上部分传递, 土壤为热源)。尹光彩等^[11]研究了鼎湖山地区针阔混交林土壤热通量日变化, 发现白昼是明显的正值, 而夜间和凌晨为明显负值, 表明白昼从大气向土壤传送热量, 而夜间从土壤向大气传送。本研究结果表明不同森林类型以及不同气候环境条件下, 地–气热量交换有明显差异。

通过比较不同季节表层土壤 5 cm 处的热通量发现尽管秋、冬以及夏季存在明显的日变化(图 1a、b、d), 而在春季却没有明显的波动(图 1c)。春季表层土壤 5 cm 处热通量值在 $0.2 W/m^2$ 处摆动, 而深层土壤(20 cm 和 60 cm)热通量变化很小。这可能与春季该区的较厚积雪有关, 一方面对太阳辐射有强烈的反射作用, 另一方面, 积雪形成一个明显的隔热层, 阻挡了热量的交换。

2.2 土壤热通量的季节变化特征

不同深度土壤热通量均存在明显的季节变化, 变化的幅度表层土壤明显高于深层(图 2)。5 cm、20 cm 和 60 cm 深度土壤热通量一年变化范围分别为 $-8.66 \sim 11.80 W/m^2$ 、 $-4.69 \sim 7.16 W/m^2$ 和 $-2.11 \sim 3.52 W/m^2$ 。5 cm 深度土壤负向热通量的最大值是 12 月, 而 20 cm 和 60 cm 是 1 月, 5 cm 和 20 cm 深度土壤正向热通量最大值是 6 月, 而 60 cm 是 7 月, 表明随着土壤深度的增加, 土壤热通量出现峰值的时间明显存在延迟(见图 2)。

不同深度(5 cm、20 cm、60 cm)一年总的土壤热通量分别为 $5.91 W/m^2$ 、 $2.23 W/m^2$ 和 $5.91 W/m^2$,

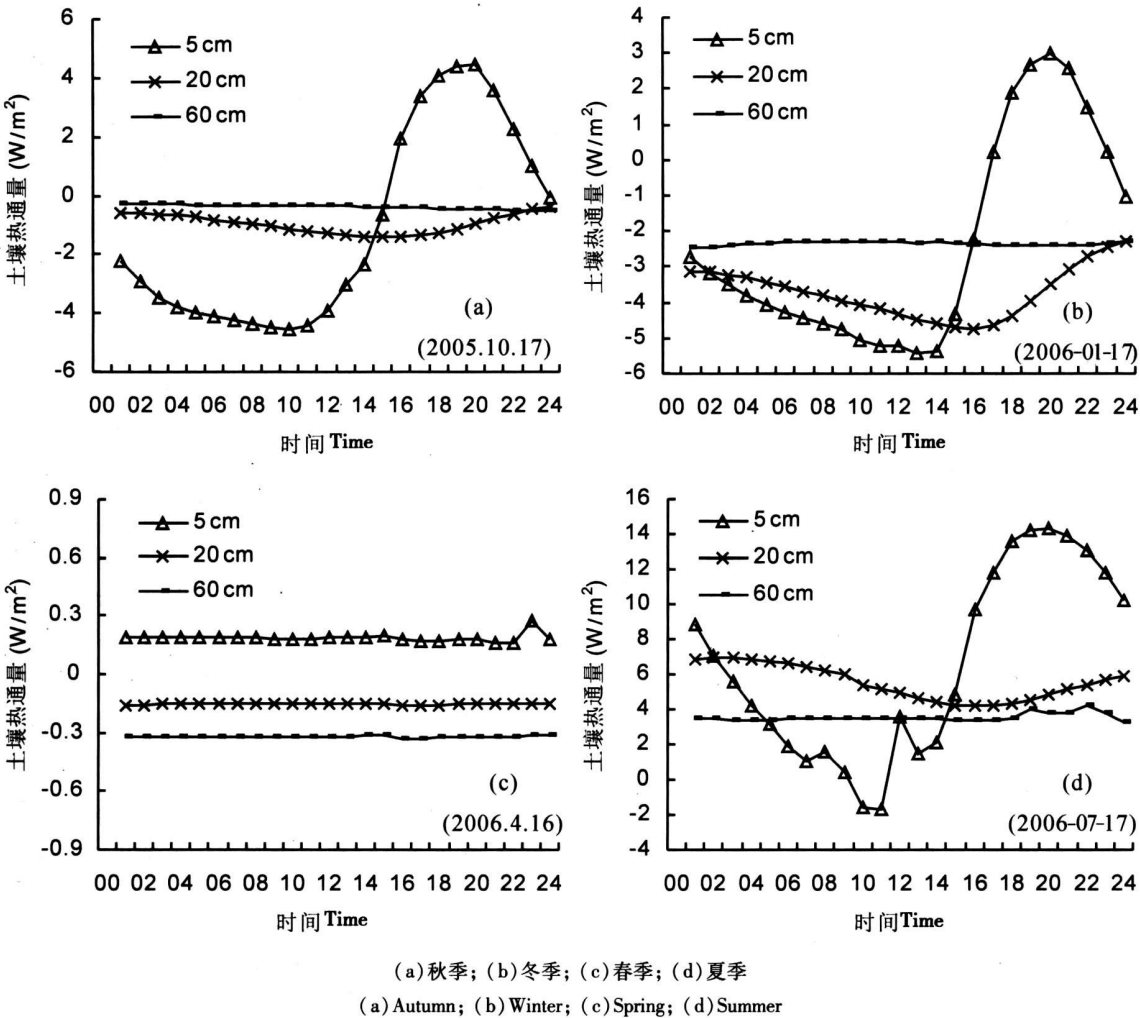


图1 不同季节土壤热通量的日变化

Fig. 1 Diurnal changes of soil heat flux at different seasons

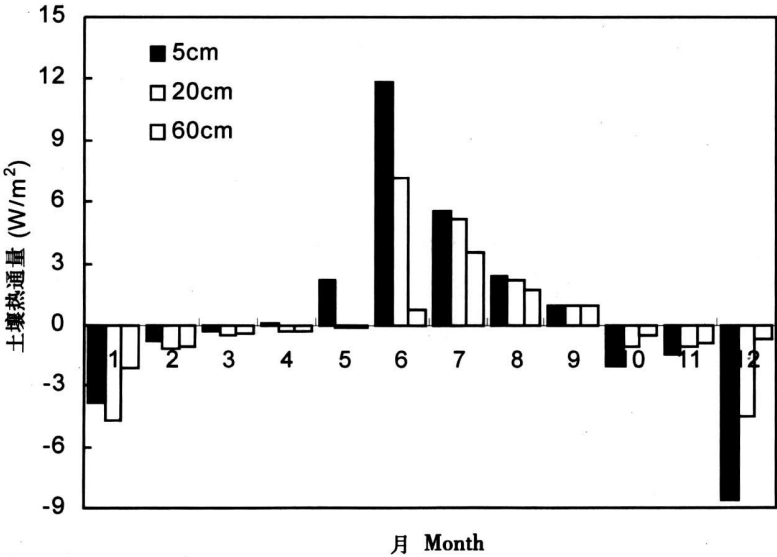


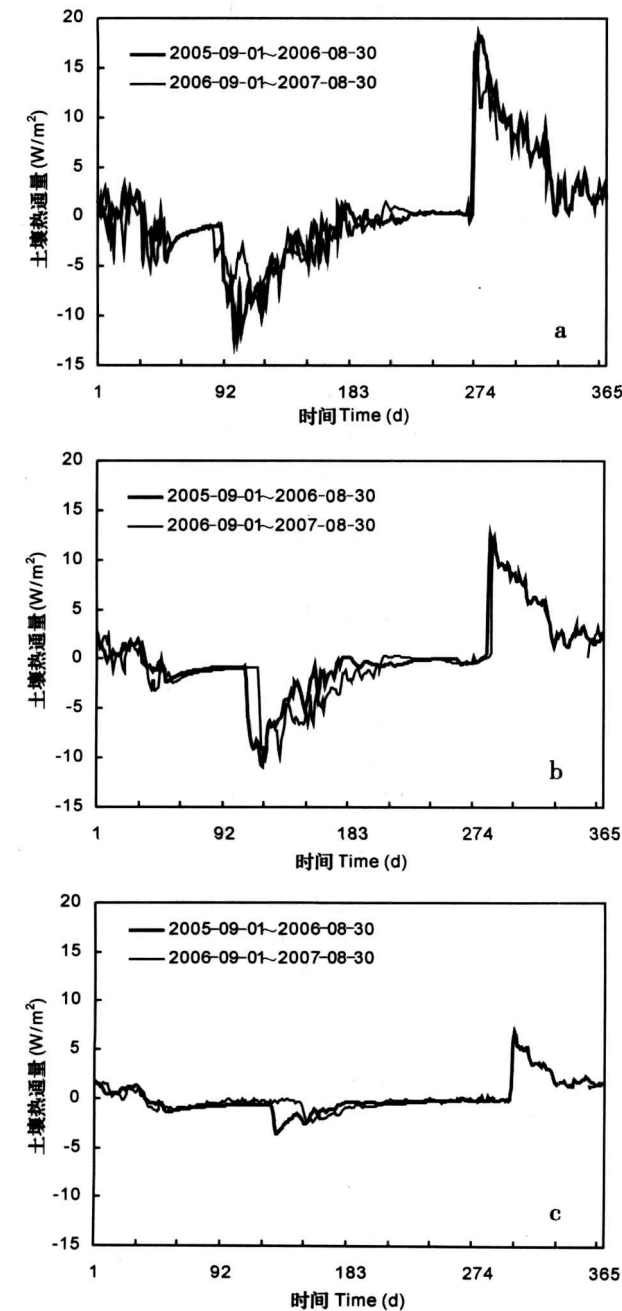
图2 土壤热通量的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of soil heat flux

表明土壤总体上均为热汇, 即热量从大气向土壤传送, 这与该区的极端低温环境有直接关系。就不同季节而言, 植物生长季 (5~9 月) 为明显的正值, 为热汇, 而生长季之外为负值, 为热源。

2.3 2 a 内土壤热通量逐日变化特征

为了研究该区土壤热通量年内有无明显差异, 我们对 2 a (2005-09~2006-08 与 2006-09~2007-08) 土壤热通量数据进行了分析。遗憾的是



a 5 cm; b 20 cm; c 60 cm

图 3 2 a 内土壤热通量的逐日变化特征

Fig 3 Day-to-day changes of soil heat flux in two years

由于电池的原因, 2007-06-15~08-19 数据中断, 从而为比较 2 a 内土壤热通量的总量带来困难。但通过分析现有的数据发现, 土壤热通量逐日变化趋势 2 a 间非常一致 (图 3 a~c), 尽管达到峰值的时间有差异。比如, 表层-5 cm 土壤热通量出现负向最大值的时间分别为 2005-12-07 和 2006-12-25, 2006 年较 2005 年延后了 18 d 而 -20 cm 和 -60 cm 土壤热通量 2006 年较 2005 年分别延后了 12 d 和 24 d。年内随着土壤深度的增加, 土壤热通量出现峰值的时间明显存在延时, 最深层 (60 cm) 较表层 (5 cm) 土壤大约延时一个月左右。而且, 表层土壤热通量的逐日变化幅度明显高于深层土壤, 也进一步从年内逐日变化的角度证实表明地-气热量交换主要发生在表层土壤。张法伟等^[14]研究了青藏高原北部海北高寒矮嵩草草甸土壤热通量的年内逐日变化状况发现, 最高值出现在 5 月, 明显早于本研究表层土壤热通出现峰值的 6 月, 可能与森林冠层对太阳辐射的遮挡有直接的关系。尽管本研究区的全年平均气温为 -0.73°C , 明显高于海北高寒草甸 (平均气温 -1.7°C), 而且最低月的平均气温也明显偏高接近 1°C , 但由于森林相对密闭的冠层阻挡了太阳辐射能量向地面的输送, 使土壤热通量出现峰值的时间明显晚于草甸生态系统。

2.4 土壤热通量与净辐射的关系

土壤热通量通常以净辐射的变化为基础, 净辐射的变化通常在午后出现最高值, 由于林分冠层的遮挡以及林内微环境的影响, 土壤热通量对净辐射的反馈存在延时。因为表层土壤热通量存在明显的日变化, 将不同延时时间的表层土壤热通量与净辐射做相关分析, 研究二者的相关关系。结果表明, 从没有延时 (0) 至延时 12 h 二者之间的相关性 (R^2 和 F 值) 呈现先增加后降低的趋势 (图 4)。延时 6 h 的土壤热通量与净辐射的相关性最高, $R^2 = 0.13$, F 值 = 1164.02, $P < 0.0001$, $n = 8751$, 表明表层土壤 (5 cm) 热通量对净辐射的反馈延滞约 6 h。王旭等^[12]和尹光彩等^[11]研究了南亚热带针阔混交林土壤热通量变化与净辐射的关系, 发现延滞 2.5 h 和 3.5 h 的土壤热通量与净辐射的相关性最高, R^2 分别为 0.29 和 0.24, 表明土壤热通量对净辐射的反馈延滞约为 2.5 h 和 3.5 h。本研究的延长时间明显高于亚热带地区, 可能与该地区较低的环境温度有关。

钟雷等^[11]研究了珠峰地区土壤热通量峰值出

现在 T18 00 左右, 比本研究提前约 2 h 这可能与研究区下垫面有关, 珠峰地区下垫面以草甸为主, 使土壤热量变化对净辐射的反馈延时要低于林地。前人通过对草地^[15]以及稀疏冠层生态系统^[16]的研究发现土壤热通量与净辐射的相关关系更为密切, 延时间明显缩短, 而且 R^2 可达 0.80 以上, 主要是由于稀疏冠层的生态系统中植物覆盖程度低, 到达土壤表面的净辐射增多, 与净辐射的同步程度增高^[11, 12, 17]。

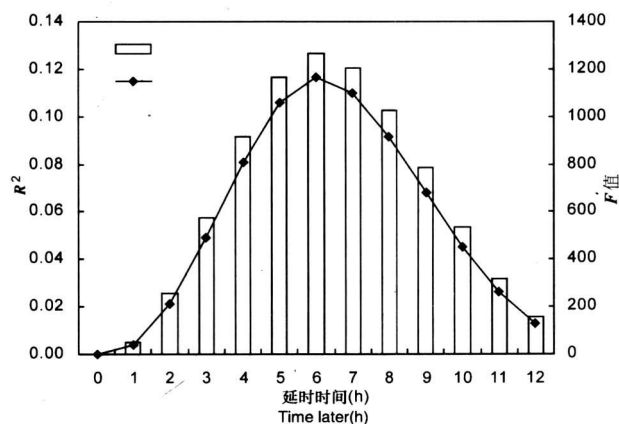


图 4 不同延时条件下土壤热通量与净辐射之间回归关系的 R^2 和 F 值

Fig. 4 R^2 and F value of between soil heat flux and net radiation at different lagged time conditions

3 小结

随着土层深度的增加, 土壤热通量的日变化幅度明显减弱, 而且年内逐日变化幅度也呈降低趋势, 表明日变化尺度上的土壤-大气间的热量交换主要发生在土壤表层。由于受积雪的影响, 春季土壤热通量日变化减弱。在高山林线地区, 土壤总的年热通量为正值, 表明该地区土壤为热汇。土壤热量交换模式有明显的季节变化, 春季和夏季, 能量由地上部分向土壤传递, 土壤为热汇, 而秋季和冬季, 能量由土壤向地上部分传递, 土壤为热源。

土壤热通量变化受净辐射的影响, 但由于该地区较低的环境低温以及较高的林冠层遮挡, 使土壤热通量与净辐射相关关系要明显低于稀疏生态系统, 而且土壤热通量对净辐射的延时明显加强。因此在利用净辐射估算土壤热通量时, 要充分考虑植被覆盖对土壤热通量的影响, 尤其是叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 较高的林分, 应该引入 LAI

表征植被覆盖, 作为一个重要影响因子进行计算。另外, 即使具有相同的叶面积指数, 或植被覆盖程度均很高的林分, 由于其所处环境有所不同, 土壤热通量对净辐射的反馈也有明显差异, 在估算土壤热通量时亦应考虑这些影响因素。

参考文献 (References)

- [1] Zhong Lei, Ma Yaoming, Su Zhongba, et al. Atmospheric turbulence and land-atmosphere energy transfer characteristics in the surface layer of the northern slope of Mt. Qomolangma area [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2006, 21(12): 1293~1303 [钟雷, 马耀明, 苏中波, 等. 珠峰北坡地区近地层大气湍流与地气能量交换特征 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1293~1303]
- [2] Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. Turbulent characteristics in the surface layer over Gerze area in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(3): 289~300 [刘辉志, 洪钟祥. 青藏高原改则地区近地层湍流特征 [J]. 大气科学, 2000, 24(3): 289~300]
- [3] Ma Yaoming, Osumu Tsukamoto, Wu Xiaoming, et al. Characteristics of energy transfer and microclimate in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(5): 715~722 [马耀明, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 2000, 24(5): 715~722]
- [4] Tanaka K, Ishikawa H, Hayashi T, et al. Surface energy budget of Amdo on the eastern Tibetan plateau using GAME/Tibet DP98 data [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2001, 79: 505~517
- [5] Ogee J, Lamaud E, Brunt Y, et al. A long-term study of soil heat flux under a forest canopy [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106: 173~186
- [6] Kell W, Allen G, Eva F, et al. Energy balance closure at FLUX-ENT sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 223~243
- [7] Wu Jiabin, Guan Dexin, Zhao Xiaosong, et al. Characteristic of the energy balance in broad-leaved Korean pine forest of northeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2520~2526 [吴家兵, 关德新, 赵晓松, 等. 东北阔叶红松林能量平衡特征 [J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2520~2526]
- [8] Guan Dexin, Wu Jiabin, Wang Zhi'an, et al. Dynamics of heat balance during growing season of broadleaved Korean pine forest in Changbai mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1828~1832 [关德新, 吴家兵, 王安志, 等. 长白山阔叶红松林生长季热量平衡变化特征 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1828~1832]
- [9] Wang Anzhi, Pei Tiejian. Calculation of parameters in forest evapotranspiration model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 13(12): 1547~1550 [王安志, 裴铁璠. 长白山阔叶红松林蒸散量的测算 [J]. 应用生态学报, 2001, 13(12): 1547~1550]
- [10] Li Xin, Zhang Mingzhi, Huo Ran, et al. Studies on the soil heat

- condition of *Ledum-Larix* Gemlini virgin forest in cold temperate zone of innerMongolia [J]. *Journal of InnerMongolia Agricultural University*, 2001, 22(4): 92~ 96 [吕馨, 张明知, 霍然, 等 . 寒温带杜香落叶松原始林土壤热量状况的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2001, 22(4): 92~ 96]
- [11] Yin Guangcai Wang Xu, Zhou Guoyi *et al.* Study on the soil thermal conditions of coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghu Shan Reserve [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2006, 27(3): 16~ 20 [尹光彩, 王旭, 周国逸, 等 . 鼎湖山针阔混交林土壤热状况研究 [J]. 华南农业大学学报, 2006, 27(3): 16~ 20]
- [12] Wang Xu, Zhou Guoyi, Zhang Deqiang *et al.* Soil heat fluxes of mixed coniferous and broad-leaf forest in the south subtropics in China [J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 260~ 265 [王旭, 周国逸, 张德强, 等 . 南亚热带针阔混交林土壤热通量研究 [J]. 生态环境, 2005, 14(2): 260~ 265]
- [13] Li Ju, Liu Yunfen, Yang Xiaoguang *et al.* Studies on water vapor flux characteristics and their relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2449~ 2456 [李菊, 刘允芬, 杨晓光, 等 . 千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2449~ 2456]
- [14] Zhang Fawei, Li Yingnian, Zhao Liang *et al.* Primary study on energy exchange and energy balance ratio in an alpine meadow of *Kobersia humilis* [J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24 (Suppl): 258~ 265 [张法伟, 李英年, 赵亮, 等 . 高寒矮嵩 (*Kobersia humilis*) 草甸能量平衡和闭合状况的初步研究 [J]. 山地学报, 2006, 24(增刊): 258~ 265]
- [15] Li Yingnian, Zhao Liang, Gu Song *et al.* Energy-balance features of the alpine meadows on the Haibei area (northern shores of the Qinghai lake) [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(4): 289~ 295 [李英年, 赵亮, 古松, 等 . 海北高寒草甸地区能量平衡特征 [J]. 草地学报, 2003, 11(4): 289~ 295]
- [16] Xiao Wenfa. The energy balance of a stand (*Pinus Tabulaeformis* Carr) [J]. *Acta Ecologia Sinica*, 1992, 12(1): 16~ 24 [肖文发 . 油松林的能量平衡 [J]. 生态学报, 1992, 12(1): 16~ 24]
- [17] Wang Yiyong, Yang Qing, Zhang Guang *et al.* Characteristics of evapotranspiration and energy budget of soybean field in the Sanjiang plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11 (4): 82~ 85 [王毅勇, 杨青, 张光, 等 . 三江平原大豆田蒸散特征及能量平衡研究 [J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 82~ 85]

Soil Heat Flux in *Abies George Virgin* Forest at the Alpine Timberline Southeastern Tibetan Plateau

LIM ingcai^{1, 2}, LUO Tianxiang², GUO Jun¹, HE Jicheng², LIU Xinsheng²

(1. Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract Based on the meteorological data collected at alpine virgin *Abies george* timberline area of the Serkyinla Mt's southeastern Tibetan Plateau, diurnal, seasonal and day-to-day variations of soil heat flux and its relationships with net radiation were analyzed to study soil-air thermal exchange characteristics at the alpine virgin forest area. The results suggested that the diurnal changes of soil heat fluxes decreased with the depth of soil layers, and no obvious variation was found at the depth of 60 cm. The diurnal change of soil heat fluxes at the 5 cm depth showed an "S" shape other than spring, in which no obvious diurnal change existed. Significant seasonal and day-to-day changes of soil heat fluxes were found in different depth soil, although it was less pronounced in deeper layer soil. The change trend of day-to-day soil heat fluxes was very consistent in two years. The total soil heat fluxes for different depth layers were all more than 0, suggesting that the soil at the alpine timberline area is totally heat sink, i.e., the heat flux transferring from air to soil. The change of soil heat flux was directly related to net radiation, however, the feedback of soil heat flux lagged 6 hours behind the net radiation, i.e., the changes of soil heat flux and net radiation was not synchronous. The lagged time was not only higher than in farmland or grassland, but also higher than in forest at temperate or subtropical zone, indicating that vegetation type and environment condition should be considered when soil heat flux was assessed by using net radiation.

Key words alpine timberline, *Abies george* virgin forest, soil heat flux, net radiation, thermal exchange