

张宏, 胡波, 刘广仁, 等. 2012. 中国土壤热通量的时空分布特征研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 515–522, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10124.
Zhang Hong, Hu Bo, Liu Guangren, et al. 2012. Temporal and spatial characteristics of soil heat flux in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 515–522.

中国土壤热通量的时空分布特征研究

张宏^{1,2} 胡波¹ 刘广仁¹ 王跃思¹ 赵瑞霞³

1 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

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 国家气象中心, 北京 100081

摘要 利用中国生态系统研究网络 (CERN) 的 17 个野外台站 2004~2007 年的实测土壤表层热通量资料, 分析了土壤表层热通量的季节和空间变化规律。土壤热通量从 2 月份开始由负值转变为正值, 9 月份左右开始由正值转变为负值, 在 3~8 月份土壤热通量的值都为正值, 12 月至次年 1 月土壤热通量都为负值。空间分布上, 东北地区和西北地区季节变化明显, 年变幅比较大, 长江流域地区夏季增加幅度小, 年变化幅度也比较小, 青藏高原地区四季都相对为低值地区, 年变幅比较小, 总的空间变化趋势是春夏季北高南低, 秋冬季节南高北低。土壤热通量年合计值在东北黑土地地区、西北荒漠地区、黄土高原陕北地区和四川盆地地区是高值区, 长江流域下游和黄河中下游冲积而成的区域为负值区。研究结果为进一步研究土壤的生态环境形成和变化提供了参考依据。

关键词 中国 土壤热通量 时空分布 特征

文章编号 1006-9585 (2012) 05-0515-08

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10124

Temporal and Spatial Characteristics of Soil Heat Flux in China

ZHANG Hong^{1,2}, HU Bo¹, LIU Guangren¹, WANG Yuesi¹, and ZHAO Ruixia³

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

2 Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The authors used soil heat flux data observed at 17 stations of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN) from 2004 to 2007 to analyze the seasonal and spatial variation of the soil surface heat flux. The soil heat flux changed from negative to positive at the beginning of February and became negative again around September. It remained positive from March to August then became negative from December to January. The soil heat flux showed seasonal variation over the northeast and northwest regions of China while it had little seasonal variation over the Yangtze River basin. Over the plateau region, the heat flux was relatively small and varied only slightly throughout the year. The general spatial distribution pattern of the soil heat flux over China was larger in northern China in spring and summer and in southern China during fall and winter. The annual mean soil heat flux was higher over the black land areas of northeast China, the northwest desert region, the north Loess Plateau, and the Sichuan Basin regions, but had negative values over the lower reaches of the Yangtze River and the alluvial regions of the lower reaches of the Yellow River. This study provides good references for further studies of soil climate formation.

收稿日期 2010-09-26 收到, 2012-07-20 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重大项目 KZCX1-YW-06, 国家重点基础研究发展计划 2007CB407303, 国家气象中心预报员专项

作者简介 张宏, 男, 1970 年出生, 博士研究生, 主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: zhangh@dq.cern.ac.cn

通讯作者 王跃思, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

Key words China, soil heat flux, spatial and temporal distribution, characteristics

1 引言

土壤热通量是地表能量平衡中重要的组成部分, 土壤表面热量的吸收和损失都与气候变化息息相关(徐兆生和马玉堂, 1984)。地表土壤热通量是土壤表层与深层之间的热交换状况的反映, 研究土壤热交换对了解各地气候形成, 特别是土壤的生态环境形成以及农业生产、工程建设都有重要意义(Kasten and Young, 1989; IPCC, 2001; Heusinkveld et al., 2003)。由于地理位置的不同, 地表接收的太阳辐射存在差异, 加之不同的生态系统、环境条件、土壤特性造成土壤热通量在时间和空间上存在变化和差异(马柱国等, 2000; 孙力等, 2003; 张强和曹晓彦, 2003; 翟方国, 2009)。对土壤热通量的时空分布状况进行详细研究, 才能深入了解其物理过程, 为各种天气、气候及生态模型的建立和检验提供参数和基础理论支持(韦志刚等, 2005)。土壤热通量的大小以及正负转变直接影响到土壤热量的收支, 影响着植物根系的生长和呼吸, 以及对营养物质和水分的吸收, 影响着土壤水分的蒸发和呼吸。

由于受观测技术和观测资料条件的限制, 国内外对土壤热通量时空分布的观测研究工作并不是很多。高国栋和陆渝蓉(1982)最早研究了全国冷热源的分布, 根据实测资料对我国地表辐射平衡和热量平衡进行了较系统的研究, 提出了各分量的气候计算公式, 从而为进一步研究我国地表热源创造了条件。翁笃鸣等(1994)以及高庆先和翁笃鸣(1995)利用地表热量平衡各分量的气候计算方法, 结合全国热平衡站资料, 计算并讨论了地表热源在全国的时空分布特征, 分析了地面对大气加热的特点以及地表热源的参数化问题, 同时指出季风气候背景、纬度、地形和地表湿润状况是决定地表热源特征的重要因素。也有一些学者对不同区域的热通量进行了分析计算, 鲍婧等(2009)计算了半干旱区近地层的动量热通量, 王宝灵和汤懋苍(1993)计算了我国土壤热流, 李锁锁等(2009)对黄河上游地区土壤热状况的季节变化进行了分析, 戴彩悌等(2007)分析了南海地区地表热通量的时空变化特征, 马伟强等(2007)研究了藏北高原地区和西北干旱区地表能量的季节变化特征, 另

外, 吴迪生等(2005)、刘衍榤等(2004)和王旭等(2005)还分别分析研究了我国南海海气热通量、太平洋海气界面净热通量以及南亚热带针阔混交林土壤热通量的时间演变特征。

以上学者的研究基本上是通过理论计算分析, 或者是局限于某一区域热通量的分析研究, 对全国范围内的观测研究并不多, 因此对全国范围内的土壤热通量的时空变化特征进行研究是非常有必要的。目前, 中国科学院的一些野外生态站点对土壤热通量进行了长时间连续的观测和研究, 站点分布具有较好的代表性, 本研究利用台站的实测数据分研究我国土壤热通量的时空分布特征, 更好的深入了解我国地表热量通量在全国范围的分布状况。

2 观测方法与资料

2.1 观测网络介绍

中国土壤热通量观测网是在中国生态系统网络36个野外台站上建立的。本文选取了17个热通量观测台站的长期观测数据, 对我国不同土壤类型和生态类型的地表热通量变化规律进行了分析研究, 其中14个农田生态观测站、1个荒漠生态观测站、1个湿地生态观测站和1个草原生态观测站, 站点的地理位置和土壤类型见表1。

表1 站点信息

Table 1 Site information

站点名	代码	省份	纬度	经度	海拔/m	土壤类型
环江	HJ	广西	24.73°N	108.32°E	279	黄壤土
千烟洲	QY	江西	26.75°N	115.07°E	86	红壤土
鹰潭	YT	江西	28.2°N	116.92°E	45	红壤土
桃源	TY	湖南	28.92°N	111.45°E	106	红壤土
拉萨	LS	西藏	29.67°N	91.33°E	3688	高寒潮土
盐亭	YG	四川	31.27°N	105.45°E	420	紫色土
常熟	CS	江苏	31.53°N	120.68°E	3	水稻土
封丘	FQ	河南	35°N	114.4°E	68	沉积潮土
长武	CW	陕西	35.2°N	107.67°E	1220	黑垆土
禹城	YC	山东	36.85°N	116.37°E	23	潮土
安塞	AS	陕西	36.85°N	109.32°E	1033	黄绵土
海北	HB	青海	37.53°N	101.25°E	3220	草毡土
栾城	LC	河北	37.88°N	114.68°E	50	潮褐土
沈阳	SY	辽宁	41.52°N	123.4°E	26	棕壤土
阜康	FK	新疆	44.29°N	87.91°E	461	灰漠土
海伦	HL	黑龙江	47.45°N	126.88°E	236	中厚层黑土
三江	SJ	黑龙江	47.58°N	133.52°E	55	沼泽土

2.2 观测仪器原理与标定

土壤热通量用热通量板 HFP01SC 进行观测。HFP01SC 热通量板具有量程宽 ($\pm 500 \text{ W/m}^2$)、灵敏度高 ($50 \mu\text{V/m}^2$) 和误差小的优点, 可以很好的适应环境 ($-30 \sim 70^\circ\text{C}$)。HFP01SC 热通量板由一个热电堆和一个薄膜加热器组成。热电堆测量周围介质的热通量, 其电压输出信号正比于热通量。薄膜加热器是用来标定时生成一个通过热通量板的热通量, 脉冲热反应维持了有效的标定常数, 排除了由于环境导热性变化引起的误差。

在线标定 (Van den Bos-Hoeksema方法) 自动修正由于探头和介质间热导率的不完好匹配, 以及由于温度依存度和探头稳定性造成的误差, 通常每2 h 标定一次, 消除了温度依存度, 提高测量精度的质量。薄层加热器在启动状态下产生一可知的热通量, 热流被分为向上的通过未扰乱的介质的热流和向下的通过热通量板与下层介质的热流。测量热通量板的反应, 在理想状态下有50% 的产生热通量通过板体, 一旦热导率不匹配, 将产生一个偏离 (X), 而 $(1-X)$ 信号水平仍将代表50% 的热通量, 自动修正热流热扰乱和探头的不稳定性。

2.3 资料

所用资料为中国科学院中国生态系统研究网络 (CERN) 基础上的土壤热通量网 17 个生态站点 2004~2007 年的实测数据, 通过计算得到实测土壤热通量月合计平均值和年合计平均值, 通过对月合计平均值和年合计平均值数据的分析, 对我国土壤热通量的时空分布特征进行分析研究。

3 结果与分析

在土壤热通量年变化规律和空间分布特征研究中, 分别对站点土壤热通量2004~2007年的月合计值和多年月合计值的平均值进行分析。而且按照气象上的划分方法, 3~5月为春季, 6~8月为夏季, 9~11月为秋季, 12~2月为冬季。

3.1 土壤热通量的年变化

利用 2004 年 12 月至 2007 年 12 月的各站土壤热通量月合计值, 选取西北地区的阜康站 (FK) 和海北站 (HB)、东北地区沈阳站 (SY)、青藏高原区域的拉萨站 (LS) 以及我国东部地区的栾城站 (LC) 和长江以南地区的鹰潭站 (YT) 等不同区域的代表站点, 分析土壤热通量在一年当中各月的变化, 见图 1。

春季, 土壤热通量的月合计值都为正值, 土壤获得热量并向上传输, 而且 3~5 月土壤热通量的月合计值基本上是逐月递增。西北地区 (FK、HB) 气候干燥太阳辐射强烈, 而且土壤干燥含水量低, 进入地表的那部分净辐射能量主要用于了土壤热通量, 所以土壤热通量在春季升高迅速。青藏高原区域 (LS) 由于海拔比较高, 地表得到的太阳净辐射比较小, 用于土壤升温的热通量也少, 所以土壤热通量升高比较小。东北地区 (SY) 土壤热通量也迅速增加, 我国东部地区 (LC) 的土壤热通量增加平缓, 长江以南地区 (YT) 的土壤热通量虽然总的趋势在上升, 但受季节降水的影响, 在春季出现波动。

夏季, 土壤热通量的月合计值也都为正值, 热

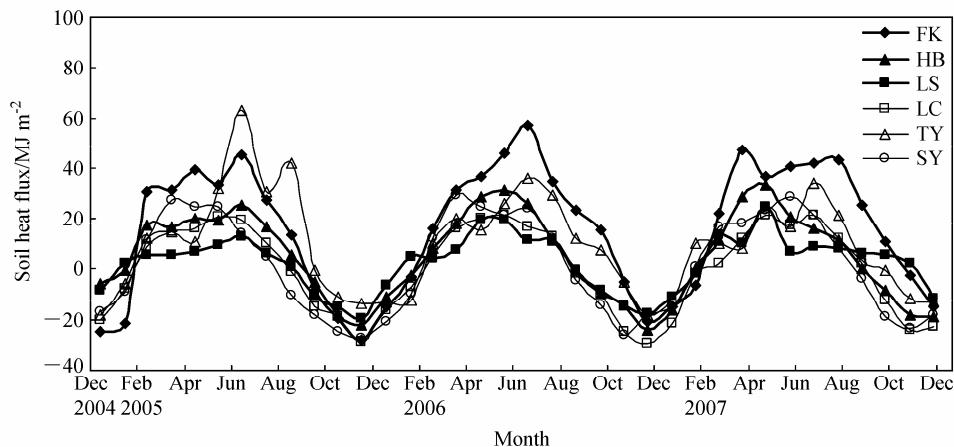


图 1 土壤热通量的季节变化
Fig. 1 Seasonal variation of soil heat flux

量向下传输,由于夏季太阳的辐射比较强烈,土壤获得热量要多于春季,而且土壤热通量月合计值在夏初达到全年的最大,各地区基本上是在6月或6月前达到最大值,在7、8月份降雨的增加土壤的湿度加大,土壤所获得的热量有相当一部分用于了潜热变化,所以土壤热通量的量值也开始下降。

秋季,随太阳辐射强度的下降,各站土壤热通量月合计值逐渐减小,除青藏高原区域(LS)下降比较平缓外,其他区域的土壤热通量下降速度都比较大,且下降的速度要大于春季上升的速度,而且在9月份首先在东北地区(SY)土壤热通量月合计值开始由正值转变为负值,即土壤由获得热量向下传输开始转变为失去热量向上传输。

冬季,土壤热通量的月合计值各月基本上都为负值,土壤以热量散失为主,土壤热通量变化幅度在整个冬季都比较小,绝对值也较小,12月份为年内最大热量散失期,之后随着土壤储热的下降,热量散失率逐渐减少,随太阳辐射强度的逐渐增加,2月份部分地区的土壤热通量开始由负值转变为正值,土壤开始获得热量而升温。

总的来说,土壤热通量的年变化受太阳辐射、降水和土壤湿度等因素的影响,我国土壤热通量月合计值在12月和1月都为负值,土壤热通量的传递方向是从下层向上层传输,热量向上传输,弥补地表热量的散失。入春后,随着天气的转暖,土壤接受到太阳的能量越来越多,土壤热通量也由负值转变为正值,在3~8月全国的土壤热通量都为正值,土壤热通量的传递方向是从上层向下层传输,土壤温度升高,而在入秋以后,随着天气的变冷,土壤接受到太阳的能量逐渐减少,土壤热通量也由正值转变为负值。基本上是在2月份左右由负值转变为正值,9月份以后由正值转变为负值,土壤热通量月合计最大值出现在6月份,最小值出现在12月份,在4~8月受降雨的影响,土壤热通量月合计值波动比较大。

3.2 土壤热通量的空间分布

虽然我国各地土壤热通量的年变化趋势基本相同,但由于各地土壤特性和气候特征的差异,在不同月份的空间分布却有所不同。根据各站多年土壤热通量各月合计的平均值,分析了我国土壤热通量的空间分布特征。

春季3~5月(图2a、2b、2c),土壤热通量多年月合计平均值明显增加(与图3d、3e、3f中的冬

季月份相比),全国范围内都为正值。随着季节变化太阳辐射强度的增加,3月份各区域土壤热通量数值都明显增加,由负值全面转变为正值,尤其是在西北地区荒漠土壤热容量小、导热率大,热量传导比较快,土壤热通量也就比较大,升高更为明显,总的空间分布趋势是西北地区为高值区,最高达 25.8 MJ/m^2 ;4月份,各区域土壤热通量数值上继续增加,东北地区的黑土地吸收太阳辐射比较充分,所以东北地区土壤热通量增加迅速,为高值区,土壤热通量的月合计平均值达 58 MJ/m^2 左右。西北地区、黄土高原北部地区和四川盆地地区为次高值区。青藏高原海拔高地表得到的净辐射比较小、长江下游地区土壤湿度相对比较大潜热损耗能量比较多,用于土壤热通量的能量比较小,所以造成青藏高原和长江下游地区为低值区,总的的趋势是北高南低,这与翁笃鸣等(1994)对我国土壤热通量气候计算的分布特征研究是比较一致的;5月份,全国各地土壤热通量相比4月份基本都有所升高,东北地区为明显高值,最大值达 69 MJ/m^2 ,南方地区和青藏高原的值比较低,但青藏高原地区达到全年的最大值,约为 17 MJ/m^2 ,其他地区土壤热通量月合计值差别不是很大。

夏季6~8月(图2d、2e、2f),土壤热通量多年月合计平均值也均为正值。6月份,土壤热通量月合计平均值在全国大部地区达到一个比较大的值,随着雨带随季节的向长江以北的挺进,华南地区土壤热通量月合计平均值增加最大,东北地区的东部土壤热通量有所下降;7月份,受雨季的影响,土壤热通量的分布特点总体为南北高中间低,东北地区、西北地区,以及华南地区为高值区,华南地区达到全年最高,最大值可达 62 MJ/m^2 ,青藏高原高海拔地理环境和西南地区高温潮湿环境,造成青藏高原和西南地区得到太阳净辐射比较小,为低值区;8月份,随着太阳直接辐射点的南移和下旬雨带随着冷空气的逐渐活跃而快速南撤,土壤热通量开始下降,华南地区下降幅度最大,东北地区中部、西北地区、黄土高原北部地区大气透明度高,到达地面的太阳辐射比较充分,四川盆地紫色土壤导热率比较大的土壤特性,在4~8月份土壤热通量值都比较大,所以东北地区中部、西北地区、黄土高原北部地区和四川盆地地区为高值区。

秋季9~11月(图3a、3b、3c),随着太阳直接辐射点的不断南移,土壤热通量月合计逐月下

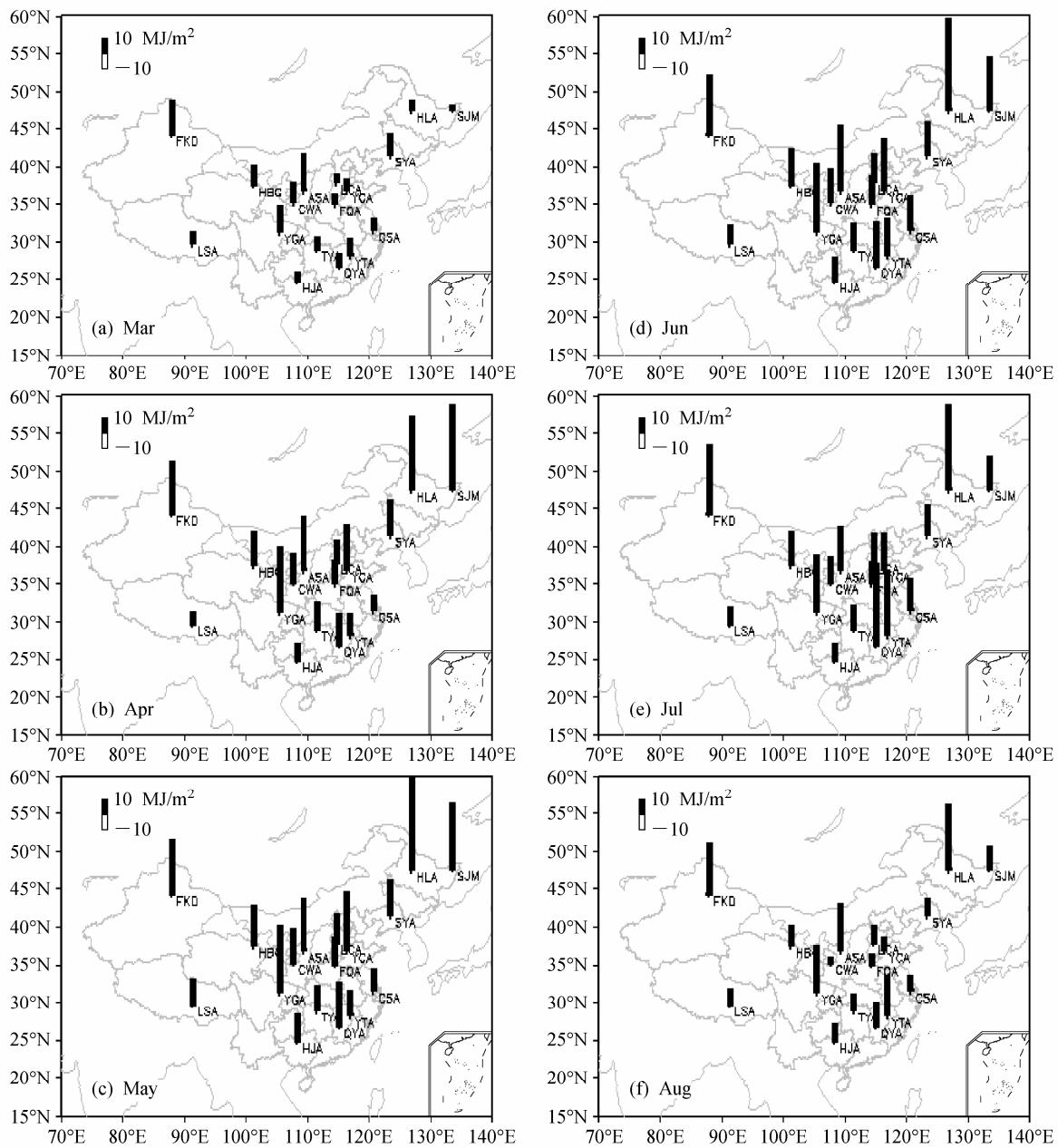


图2 春季、夏季土壤热通量月合计平均值的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of monthly soil heat flux in spring and summer

降, 土壤热通量开始由正值转变为负值, 在全国分布出现为有正有负的分布特征。9月份我国东部大部分地区土壤热通量开始转变为负值, 其他地区虽然下降, 仍然保持正值状态; 10月份各地区土壤热通量继续下降, 全国大部分地区转变为负值状态, 且负值的大小比较相近, 在 $-19\sim-11\text{ MJ/m}^2$, 但是在西北地区和西南地区仍然保持正值状态, 约为 6 MJ/m^2 ; 11月份, 全国土壤热通量继续全面下降, 东北地区下降的比较迅速, 为全国最低值 -37 MJ/m^2 , 也只有西南地区继续保持正值数据, 约为

3 MJ/m^2 , 全国大部分地区在 $-25\sim-15\text{ MJ/m}^2$ 。

冬季(图3d、3e、3f), 12月份, 土壤热通量的月合计数据仍在下降, 全国范围都为负值, 土壤热通量数值变得很小, 在东北地区为低值区, 最小值为 -41 MJ/m^2 左右, 其它地区的数据差别不是很大, 在 $-32\sim-18\text{ MJ/m}^2$; 1月份, 土壤热通量数值相比12月份虽仍为负值, 但其绝对值有所减少, 表明1月土壤中热量的损失速率在降低, 在两河流域地区, 以及长江流域以南地区土壤热通量数值比较相近, 土壤热通量月合计数值大小比较接近, 相

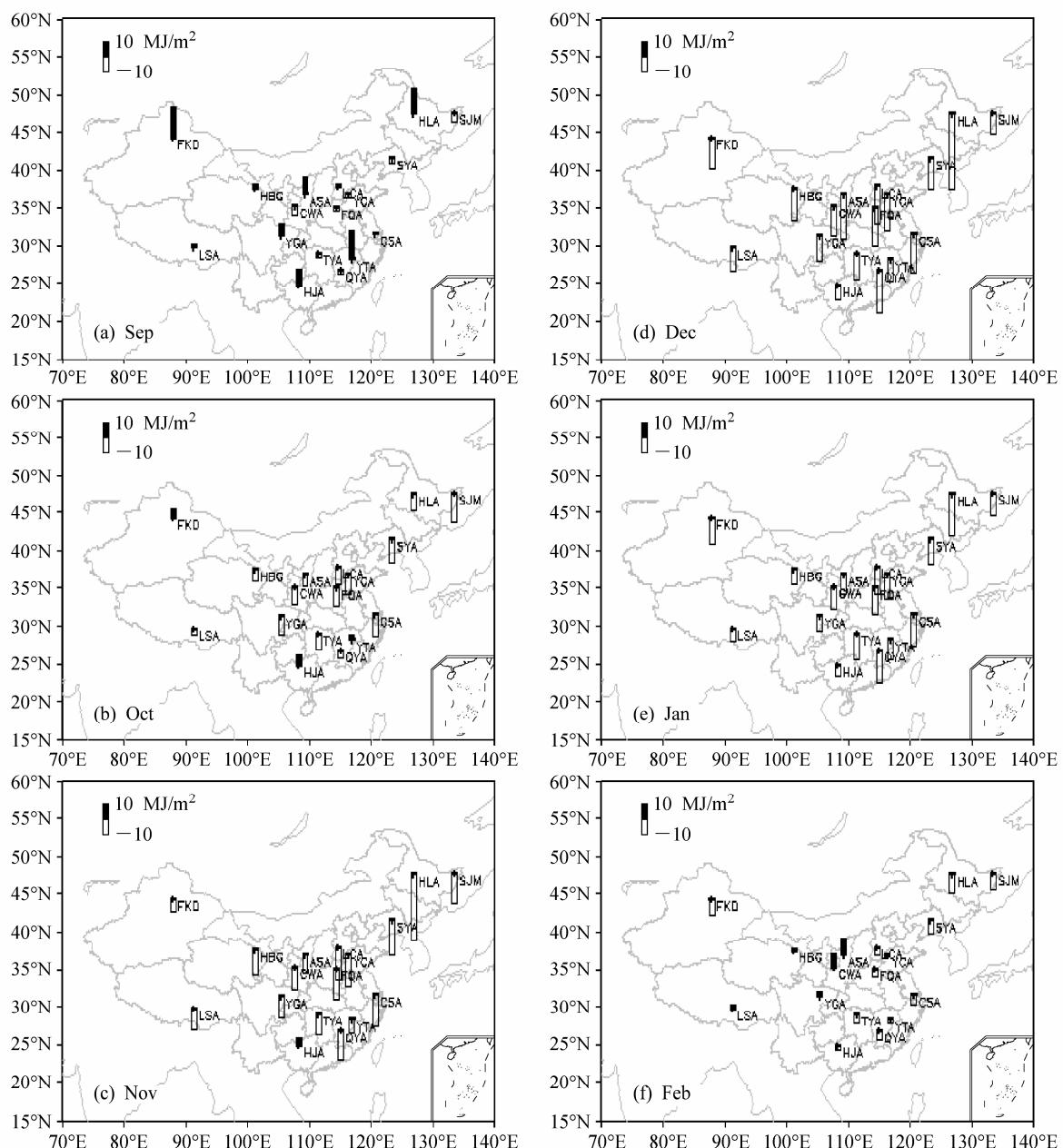


图 3 秋季、冬季土壤热通量月合计平均值的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of monthly soil heat flux in autumn and winter

差在 $-19\sim-12 \text{ MJ/m}^2$ ，在东北地区为一低值区，最小值为 -29 MJ/m^2 左右；2月份，各地土壤热通量月合计平均的数值开始有明显的增加，而且在部分地区开始出现正数值的土壤热通量月合计，土壤热通量在全国分布出现为有正有负的分布特征。黄土高原地区、拉萨地区和四川盆地地区土壤热通量已经由负值转变为正值，最高值在黄土高原地区为 11 MJ/m^2 左右，土壤热通量开始向下层土壤传输热量。西北地区和东北地区为负的低值区，为 -12 MJ/m^2 左右，而且在东部地区土壤热通量的绝

对值有随纬度的增加而增加的趋势。

土壤热通量由于受地理位置、温度、光照、降水和土壤特性等条件的影响，不同地区土壤热通量的年变化幅度具有明显差别。在东北地区和西北地区春夏季土壤热通量比较大，冬季土壤热通量小，年变幅比较大；而在长江流域地区，受雨季的变化影响还是比较明显，夏季增加幅度不是很大，造成年变化幅度比较小；在青藏高原地区太阳净辐射偏低，一年四季都是一个相对低值的区域，所以土壤热通量年变幅也比较小。同样受下垫面土壤特性不

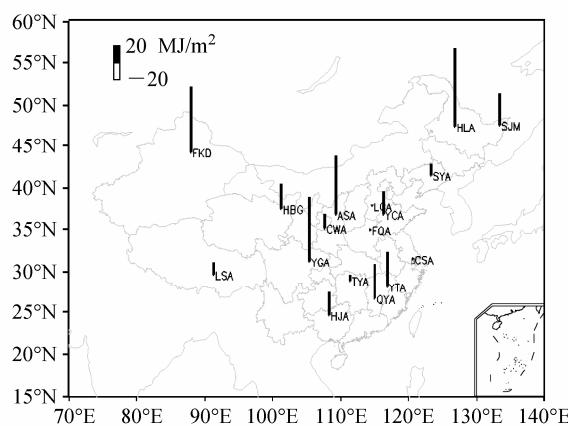


图 4 土壤热通量年合计平均值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of yearly soil heat flux

同的影响，在相邻区域也存在年变化幅度的差别，例如在东北区域，海伦站为中厚层黑土，可以很好的接收太阳辐射，而三江站为沼泽土，土壤湿度大导热性相对差，热量传递慢，这样就造成海伦站土壤热通量的年变化幅度较三江站的大。

图 4 给出 2004~2007 年我国土壤热通量的年合计平均值的空间分布，由于受地理位置、温度、光照、降水、以及土壤特性等条件的影响，在东北黑土地地区、西北荒漠地区、黄土高原陕北地区和四川盆地紫色土壤地区，由于土壤本身的特点有利于热量的吸收和传导，以及这些区域常年光照比较充足，所以土壤热通量的年合计值是正值高值区，东北高值区年合计平均值可达到 222.5 MJ/m^2 ，为全国的最高值。由于华南地区气候特点降雨比较多，东北湿地地区含水量比较大导热性比较差，所以华南地区和东北湿地地区为次高值区。由于气候特点和海拔高度等因素的影响，在青藏高原地区、黄土高原中南部陕甘交界区、西南地区以及华北地区，土壤热通量的年合计平均值为正值低值区。比较特殊的是在长江流域下游和黄河流域中下游冲积而成的区域，由于土壤导热性差，加之，降雨相对比较多，土壤湿度也比较大的影响，土壤热通量年合计值为负值，最小负值出现在长江下游地区，可达到 -13.2 MJ/m^2 。

4 结论

利用实测资料详细分析了我国土壤热通量在时间上和空间上的分布规律，对于土壤热通量变化特征进行了描述，得到如下结论：

(1) 我国土壤热通量的年变化趋势是夏季大冬季小，12~1月份都为负值，在2月份部分地区开始由负值转变为正值，3~8月都为正值，9月份部分地区开始由正值转变为负值。土壤热通量月合计最大值基本上出现在6、7月份，最小值出现在12月份，在4~8月受降雨的影响，土壤热通量月合计值波动比较大。

(2) 受气候环境要素和土壤特性的影响，土壤热通量在空间上的分布是不同的。在初春季节，西北地区和黄土高原地区及四川盆地地区为高值区，南方地区和青藏高原的值较低，总的的趋势是北高南低；夏季，东北地区、西北地区、黄土高原地区及四川盆地地区为高值区，青藏高原及西南地区为低值区；入秋以后，土壤热通量开始由正值转变为负值，在空间分布上出现有正有负的特征，东北地区、西北地区、黄土高原地区及四川盆地地区仍然保持相对高的值；冬季土壤热通量大部分时间为负值且分布形式比较简单，西南地区相对比较高。

(3) 我国东北地区和西北地区土壤热通量年变幅比较大，长江流域地区、青藏高原地区土壤热通量年变幅比较小。

(4) 我国土壤热通量的年合计平均值在东北地区、西北地区、黄土高原陕北地区和四川盆地地区是正的高值区，青藏高原地区、黄土高原中南部陕甘交界区、西南地区以及华北地区为正的低值区，长江流域下游和黄河流域中下游为负的低值区。

参考文献 (References)

- 鲍婧, 张镭, 张燕, 等. 2009. 半干旱区近地层动量热通量计算 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 45 (5): 63–67. Bao Jing, Zhang Lei, Zhang Yan, et al. 2009. Analysis of momentum and sensible heat fluxes in surface layer in the semi-arid regions [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 45 (5): 63–67.
- 戴彩悌, 王学忠, 李宏群. 2007. 南海地区热通量的时空变化特征 [J]. 气象科学, 27 (S1): 8–14. Dai Caili, Wang Xuezhong, Li Hongqun. 2007. Spatial-temporal distribution of the heat flux over south China sea area [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (S1): 8–14.
- 高国栋, 陆渝蓉. 1982. 中国地表面辐射平衡与热量平衡[M]. 北京: 科学出版社, 87–103. Gao Guodong, Lu Yurong. 1982. The Surface Radiation Balance and the Surface Heat Balance in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 87–103.
- 高庆先, 翁笃鸣. 1995. 中国地表热源的气候学特征 [J]. 南京气象学院学报, 18(4): 543–547. Gao Qingxian, Weng Duming. 1995. Climatological characteristics of ground heat sources over China [J]. Journal of Nanjing

- Institute of Meteorology (in Chinese), 18 (4): 543–547.
- Heusinkveld B G, Jacobs A F G, Holtslag A A M, et al. 2003. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 122 (1–2): 21–37.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001 – Synthesis Reports: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kasten F, Young A T. 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula[J]. Appl. Opt., 28: 4735–4738.
- 李锁锁, 吕世华, 奥银焕, 等. 2009. 黄河上游地区辐射收支及土壤热状况季节变化特征 [J]. 太阳能学报, 30 (2): 156–162. Li Suosuo, Lv Shihua, Ao Yinhuan, et al. 2009. The seasonal variation character of radiation budget and soil heat condition in the upper Yellow River [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese), 30 (2): 156–162.
- 刘衍韫, 刘秦玉, 潘爱军. 2004. 太平洋海气界面净热通量的季节、年际和年代际变化 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 34 (3): 341–350.
- Liu Yanyun, Liu Qinyu, Pan Ajun. 2004. Seasonal, annual and decadal variations of air-sea heat fluxes in the northern Pacific Ocean[J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 34 (3): 341–350.
- 马伟强, 冯耀明, 李茂善, 等. 2007. 藏北高原地区和西北干旱区地表能量季节变化特征对比分析[J]. 太阳能学报, 28 (8): 922–928. Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Li Maoshan, et al. 2007. Analyses on seasonal variation characteristics of surface energy in the northern Tibetan Plateau and arid region of northwest China [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese), 28 (8): 922–928.
- 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 2000. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系 [J]. 气象学报, 58 (3): 278–287. Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. 2000. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (3): 278–287.
- 孙力, 沈柏竹, 安刚. 2003. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析[J]. 应用气象学报, 14 (5): 542–552. Sun Li, Shen Baizhu, An Gang. 2003. A study of the variation and tendency of surface dry-and-wet state of northeast area in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (5): 542–552.
- 王宝灵, 汤懋苍. 1993. 我国土壤热流计算结果的初步分析[J]. 科学通报, 38 (11): 1013–1016. Wang Baoling, Tang Maocang. 1993. Preliminary analysis on the results of the calculation of the soil heat flux in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 38 (11): 1013–1016.
- 王旭, 周国逸, 张德强, 等. 2005. 南亚热带针阔混交林土壤热通量研究 [J]. 生态环境, 14 (2): 262–265. Wang Xu, Zhou Guoyi, Zhang Deqiang, et al. 2005. Soil heat fluxes of mixed coniferous and broad-leaf forest in the south subtropics in China [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 14 (2): 262–265.
- 韦志刚, 文军, 吕世华, 等. 2005. 黄土高原陆—气相互作用预试验及其晴天地表能量特征分析 [J]. 高原气象, 24 (4): 545–555. Wei Zhigang, Wen Jun, Lv Shihua, et al. 2005. A primary field experiment of land-atmosphere interaction over the Loess Plateau and its ground surface energy in clear day [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 545–555.
- 翁笃鸣, 高庆先, 何凤翩. 1994. 中国土壤热通量的气候计算及其分布特征 [J]. 气象科学, 14 (2): 91–97. Weng Duming, Gao Qingxian, He Fengpien. 1994. Climatological calculations and distribution of soil heat flux over China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 14 (2): 91–97.
- 吴迪生, 许建平, 王以琳, 等. 2005. 南海海洋站观测海气热通量的时间演变特征 [J]. 热带气象学报, 21 (5): 517–524. Wu Disheng, Xu Jianping, Wang Yilin, et al. 2007. Variation characteristics of air-sea heat flux at ocean observation stations in South China Sea [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (5): 517–524.
- 徐兆生, 马玉堂. 1984. 青藏高原土壤热通量的测量、计算和气候学推广方法 [C]// 青藏高原气象科学实验文集 (二). 北京: 科学出版社, 24–34. Xu Zhaosheng, Ma Yutang. 1984. The measurement. Calculation and climatologic extending method of the soil heat flux in Qinghai—Tibet plateau [C]// The Corpus of the Scientific Experiments on the Meteorology in Qinghai—Tibet Plateau (II) (in Chinese). Beijing: Science Press, 24–34.
- 翟方国. 2009. 西北太平洋海气界面热通量时空分布特征研究 [J]. 海洋科学, 33 (7): 37–42. Zhai Fangguo. Study on the temporal and spatial variabilities of air-sea heat flux over the northwestern Pacific [J]. Marine Sciences (in Chinese), 33 (7): 37–42.
- 张强, 曹晓彦. 2003. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究 [J]. 大气科学, 27 (2): 245–254. Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. 2003. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over Desert or Gobi [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (2): 245–254.