doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2010.01.004

祁连山海北地区两种高寒草甸植被类型的土壤热通量比较*

王建雷[1,2],李英年[1**],王勤学[3],杜明远[4],薛晓娟[1,2],张法伟[1]

(1. 中国科学院西北高原生物研究所,西宁 810001;2. 中国科学院研究生院,北京 100049;3. 日本农业环境技术研究所,日本筑波 3058604;4. 日本国立环境研究所,日本筑波 3050053)

摘要:对祁连山海北地区矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸两种植被类型土壤热通量观测和比较分析发现:晴天两种植被类型区土壤热通量日变化均表现为单峰型,夜间低午后高;阴雨天土壤热通量变化复杂,随降水或云层厚薄波动剧烈。金露梅灌丛草甸土壤热通量的日变化较矮嵩草草甸更为平稳。两种草甸土壤热通量的月际变化同样表现为单峰型,12月最低(矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸分别为-40.27MJ/m^{2}和-16.85MJ/m^2)、6月最高(矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸分别为20.47MJ/m^{2}和18.98MJ/m^2)。矮嵩草草甸与金露梅灌丛草甸土壤热通量的年总量差异明显,分别为-24.72MJ/m^{2}和48.10MJ/m^2。表现出前者由土壤深层向地表散热,而后者由地表向土壤深层输送热量。两种植被类型区不同时间尺度上的土壤热通量与冠层净辐射均有显著的线性相关关系。由于冠层厚度的影响,金露梅灌丛草甸土壤热通量所占净辐射的比例较小,同步性较差,反馈延时约2.5h,而矮嵩草草甸的土壤热通量与净辐射的相关性更加密切。

关键词:金露梅灌丛草甸;矮嵩草草甸;土壤热通量;净辐射

Comparative Analysis of Soil Heat Flux between Two Alpine Meadow Vegetation Types at Haibei Station, Qilian Mountains

WANG Jian-lei[1,2], LI Ying-nian[1], WANG Qin-xue[3], DU Ming-yuan[4], XUE Xiao-juan[1,2], ZHANG Fa-wei[1]

(1. Northwest Plateau Institution of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Institute Environmental Studies, Tsukuba 3058604, Japan; 4. National Institute of Agro-Environment Sciences of Japan, Tsukuba 3050053, Japan)

Abstract: Based on the measurement of soil heat flux of *Kobresia humilis* and *Potentilla fruticosa* meadows at Haibei station, Qilian Mountains, the results indicated that the diurnal change of soil heat flux for both types of meadows in clear days was lower at night and higher in the afternoon, representing a single-peak distribution. And it was complex in rainy days, with drastic fluctuation caused by rain and cloud. Whether it was sunny or not, the diurnal change of soil heat flux for *Potentilla fruticosa* meadow was more stable and its extent was smaller for high canopy height and much soil water content in *Potentilla fruticosa* meadow, with respecting to *Koresia humilis*. The monthly change of soil heat flux which was lowest in December (*Kobresia humilis* and *Potentilla fruticosa* meadows were -40.27MJ/m^2, -16.85MJ/m^2 respectively) and highest in June (*Kobresia humilis* and *Potentilla fruticosa* meadows were 20.47MJ/m^2, 18.98MJ/m^2 respectively), appearing a single-peak distribution. The annual total soil heat flux for *Kobresia humilis* and *Potentilla fruticosa* meadows was significantly different and was -24.72MJ/m^2 and 48.10MJ/m^2 respectively. Both of the annual change of soil heat flux was relevant to the variations of plant growth, soil water, seasonal frozen soil, especially net radiation. Due to the difference of vegetation types and environment factors, *Potentilla fruticosa* meadows' soil heat flux was a smaller consumer of net radiation than that of *Kobresia humili*. However, the synchronicity between soil heat flux and net radiation was worse for *Potentilla fruticosa*, whose delay feedback was 2.5 hours, longer than that of *Kobresia humilis*.

Key words: *Potentilla fruticosa* meadows; *Kobresia humili* meadows; Soil heat flux; Net radiation

---

* 收稿日期:2009-04-08 **通讯作者。E-mail:ynli@nwipb.ac.cn

基金项目:中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-06-01);中日合作项目"温暖化影响的早期监测网络系统建设";中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-432-1);中科院西北高原生物研究所百人计划项目

作者简介:王建雷(1984-),山东人,硕士生,主要从事植物生态学研究。

青藏高原地处中国西部，占国土面积的四分之一，是世界上面积最大、海拔最高的高原，素有地球第三极之称。特殊的地形条件，形成了独特的气候环境，成为对全球气候变化最敏感的地区之一。青藏高原植被类型多样，其中高寒嵩草草甸和灌丛草甸占高原面积的近三分之一[1]，是青藏高原重要的天然放牧草场。不仅如此，青藏高原产生的高原热力、动力作用以及地表－大气之间的物质能量交换对亚洲乃至全球的气候变化有重大影响[2]。一直以来，研究者对青藏高原的地表－大气系统的物理过程的研究从未中断，并取得显著的成果[3-4]，而对土壤热通量的研究多集中在农田、森林、温性草原草地[5-8]，较少涉及青藏高原各类草地。研究土壤热通量对于分析生态系统的物质和能量的交换以及局地微气候、土壤气候形成等有着重要的意义。本文拟分析祁连山海北高寒草甸地区矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸两种植被类型土壤热通量的变化特征，以期为不同植被类型区热量传输及热平衡研究、揭示生命与非生命系统之间能量流动和物质循环的内在规律提供依据。

1 资料和方法

1.1 自然概况

研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站进行。研究区地处青藏高原东北隅的祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷。该地区位于亚洲大陆腹地，有明显的高原大陆性气候特点，东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件制约，气温极低，无明显四季之分，仅有冷暖二季之别，年平均气温－1.7℃；年降水量580mm，降水分配不均，主要集中于暖季的5－9月，占年降水量的80%，冷季10月－翌年4月仅为年降水量的20%。年内无霜期极短，干湿季分明。表现为冷季寒冷、干燥、漫长，暖季凉爽、湿润、短暂[9]。

在相距7km范围内地势开阔的两种不同植被类型区选择30m×30m样地，分别架设微气象－涡度相关法观测系统。分布在平缓滩地的高寒矮嵩草草甸样地(37°37′N，101°18′E)，海拔3220m，群落以多年生草本植物为主，外貌整齐、均匀，植被的总盖度93%，草层高度为10～20cm，植被主要优势种为矮嵩草、异针茅(*Stipaaliena*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*poa. annua*)，次优势种有蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等54种植物，土壤为草毡寒冻雏形土。分布在阴坡和沿河阶梯的金露梅灌丛草甸样地(37°39′N，101°19′E)，海拔3400m，植被主要优势种除金露梅外，还有草本植物垂穗披碱草、异针茅、苔草(*Carex onoei*)、早熟禾、瑞苓草(*Saussurea nigrescens*)等47种植物，植被总盖度80%，冠面高度可达40～60cm，土壤为暗沃寒冻雏形土。

1.2 研究资料

微气象－涡度相关法观测系统观测1.5m处的净辐射(CNR-1，Kipp&Zonen，Netherlands)，0.02m处的土壤热通量(HFT-3，CSI，USA)，土壤0.1m、0.2m、0.5m处的温度等。记录为30min的输出数据，全年观测。本文利用2003年资料分析两种植被类型土壤热通量的变化特征并进行比较，同时分别分析了与净辐射之间的关系。

2 结果与分析

2.1 两种植被类型土壤热通量的日变化比较

选择1、4、7、10月(分别代表冬季、春季、夏季和秋季)的典型晴天(2003－01－24、2003－04－24、2003－07－24和2003－10－25)、阴雨天(2003－01－25、2003－04－17、2003－07－29和2003－10－12)分别绘出矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸土壤热通量的日变化图(图1和图2)。

图1显示，典型晴天状况下，两种植被类型区土壤热通量日变化表现相同，夜间低且多为负值，能量从土壤向地上传递；午后高且为正值，能量从地上向土壤传递。矮嵩草草甸土壤热通量的最高值明显高于金露梅灌丛草甸，最低值却低于金露梅灌丛草甸，表现出金露梅灌丛草甸土壤热通量日变化幅度较小，相对稳定，矮嵩草草甸的日变化幅度较大。就日总量来看，金露梅灌丛草甸土壤热通量大于矮嵩草草甸。晴天状况下矮嵩草草甸地区日出后土壤热通量开始明显升高，12:30－13:30达到最高值然后下降，一直到18:00左右，期间变化幅度较大；金露梅灌丛草甸土壤热通量在11:00－12:00明显升高，最高推迟到15:00－16:00，然后下降。同一植被类型的土壤热通量随季节也有明显的变化，春季和夏季土壤热通量的变化比较大(图1b和图1c)，冬季和秋季的变化较小(图1a和图1d)。造成这种差异的主要原因是金露梅为木本植物，冠面高、冠层较厚，具有良好的保温和“缓冲”作用，热量传输减弱，导致金露梅灌丛草甸土壤热通量日变化曲线光滑、日最高值滞后明显，一般出现在15:00－16:00。在矮嵩草草甸土壤热通量的日变化过程中，一般在日出前或日落后最低，在深夜反而相对升高，可能与矮嵩草草甸植被高度较低，地－气能量交换明显有关，特别是与早晚水汽凝结和升华(蒸发)耗热有很大的关系。

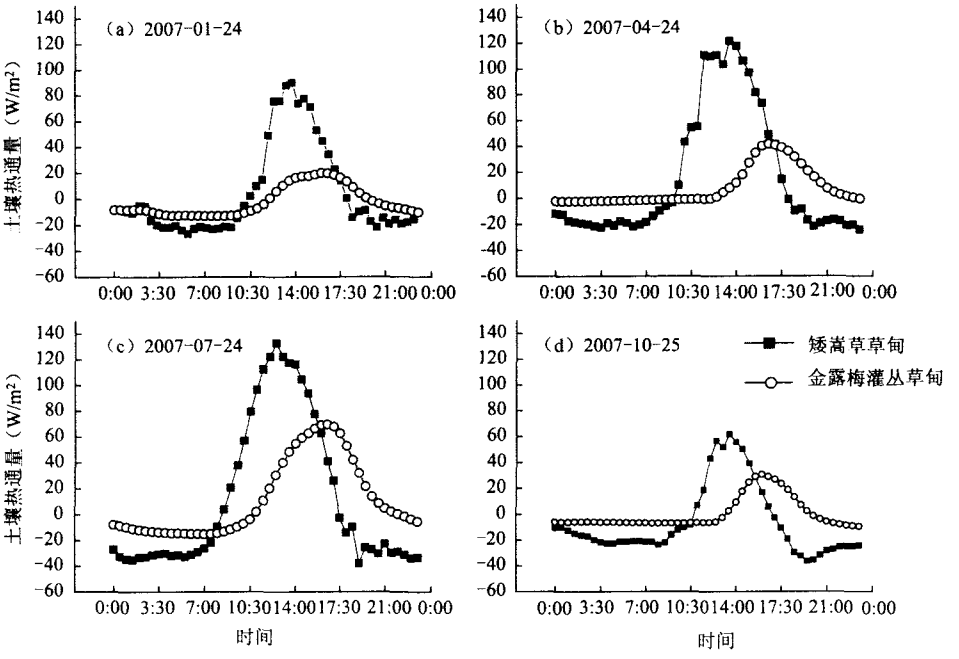

图 1　两种植被类型区典型晴天土壤热通量的比较

图 2 显示,在阴雨天气,土壤热通量的日变化复杂,波动较大,虽然仍具有一定的日变化规律,在日出后升高、日落后下降并相对稳定,但在白天受天空云系多少或降水强度大小的影响变化明显。如 7 月 29 日,全天云雨,特别是在中午前后云系厚,降水强度大,土壤热通量出现次低值,甚至为负值。尽管两种植被类型区土壤热通量受云雨天影响明显,但在灌层厚的金露梅灌丛草甸土壤热通量的日变化仍比较平稳,而矮嵩草草甸区冠层薄,易受云系及辐射影响,土壤热通量变化随地表接受太阳辐射(阴雨天主要受散射辐射)的影响变化剧烈。阴雨天状况下土壤热通量主要影响因素是云对净辐射的影响,青藏高原地区地表净辐射是云量的线性函数[10]。在春季和夏季,云对地表净辐射的影响非常强烈,云可使地表净辐射减小,因此,土壤热通量变化剧烈;秋季和冬季,云量少,对地表净辐射的影响较小,土壤热通量变化相对平稳。

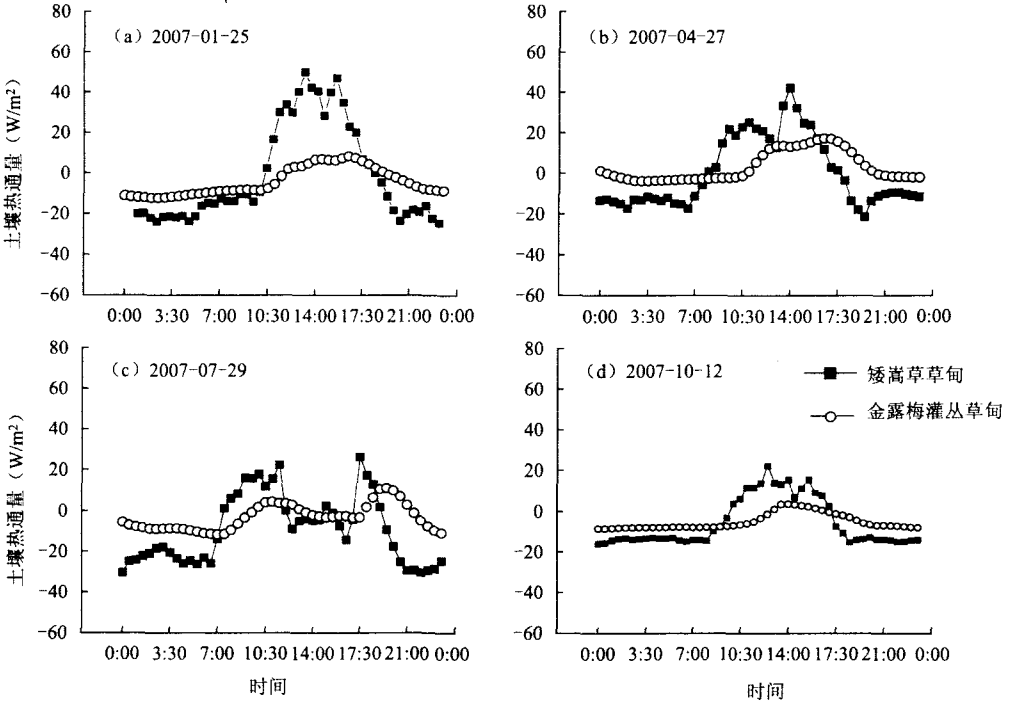

图 2　两种植被类型区阴雨天土壤热通量的比较

2.2 两种植被类型土壤热通量的月变化比较

2.2.1 月际变化

图3给出了2003年两种植被类型区土壤热通量的月变化过程。从图3看到，矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸土壤热通量的月变化均呈单峰型分布，10月－翌年2月为负值，3月开始为正值，在太阳高度较高的6月份达到最高（矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸分别为20.47MJ/m²和18.98MJ/m²）。9月矮嵩草草甸从正值转为负值，而金露梅灌丛草甸由于冠层较厚的影响从正值转为负值则出现在10月。两种植被类型土壤热通量最低值均出现在冷季太阳高度较低的12月（矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸分别为－40.27MJ/m²和－16.85MJ/m²）。一年中，金露梅灌丛草甸土壤热通量的月变化比矮嵩草草甸稳定。

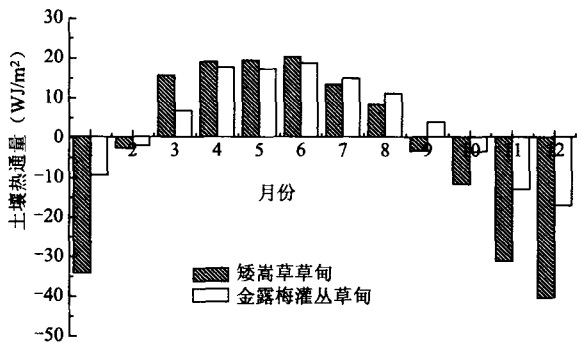

图3 2003年两种植被类型区逐月平均土壤热通量对比

图3还表明，在暖季（4－10月）金露梅灌丛草甸的土壤热通量略高于矮嵩草草甸，分别为81.69MJ/m²和67.07MJ/m²，而在冷季（11月－次年3月），矮嵩草草甸由土壤流向外界的土壤热通量远远大于金露梅灌丛草甸，分别为－72.61MJ/m²和－15.73MJ/m²。全年来看矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸土壤热通量年总量分别为－24.72MJ/m²和48.10MJ/m²，表现为矮嵩草草甸由土壤深层向地表散热，而金露梅灌丛草甸由地表向土壤深层输送热量。

2.2.2 月变化产生的原因

土壤热通量的月变化主要与植被生长规律有关。高寒草甸植物的生长一般表现为缓慢生长－快速增加－相对稳定－折损减少等4个不同阶段。3月份，矮嵩草草甸经冬季放牧，地表近似裸露，接受太阳辐射能强，地表受热加速了土壤热量向地下传播；而在金露梅灌丛草甸上，虽有冬季的放牧活动，但较厚的灌丛将会储存大量的热量，导致热量向地下传输相对较少。4月下旬开始，日均气温≥0℃，植物萌动发芽，并逐渐进入主要生长阶段，到8月底植物生物量累积减缓。期间两种植被类型区由于距离较近（仅7km），接受太阳辐射能的差异不大，而矮嵩草草甸盖度高、高度低，金露梅灌丛草甸则正好相反，这些因素综合后显示该时期两种植被类型区土壤热通量在总体上差异不显著，其中矮嵩草草甸在4－6月较金露梅灌丛草甸高，7、8月则相反。9月－翌年2月，由于金露梅灌丛草甸处于海拔相对较高的地区，而矮嵩草草甸在海拔较低的平缓滩地，冬季又是逆温层强盛时期，导致金露梅灌丛草甸土壤热通量不论是正向还是负向均较低，加之金露梅灌丛草甸植物冠层厚度大，使得冬季矮嵩草草甸负向土壤热通量明显大于金露梅灌丛草甸。

土壤热通量的月变化与土壤水分及其冻结状况也有很大的关系。通过观测，当地土壤水分的变化过程为：1－3月较低，3月下旬突然升高，到4月中旬趋于稳定，一直延续到9月中下旬，之后土壤含水量缓慢下降，10月底急剧降低，11月中旬达到稳定较低值，两种植被类型中土壤水分变化趋势的发生时间略有差异，但总体上差异不明显。水分的这种变化趋势与李英年等[11]所描述的海北高寒草甸季节冻土的变化规律相一致。天气寒冷，土壤干燥，植被盖度小，冻土则深；反之冻土较浅。灌丛区海拔相对较高，土壤冻结来临提早，厚冠层的存在，使土壤水分不易蒸发，保持较高的土壤湿度，进而使得土壤热量传输缓慢，特别是冬季这种作用更为显著。

对于全球平均来讲，土壤热通量年总量趋近于零，但由于不同地区受下垫面性质不同的影响，土壤热通量年收支存在一定差异。在海北高寒草甸地区，矮嵩草草甸多分布在土壤湿度适中的平缓滩地，而金露梅灌丛草甸多分布在土壤湿度较高的阴坡或沿河阶梯，因而表现出在矮嵩草草甸区土壤冻结深厚，最大可在2.0m以上，而金露梅灌丛草甸区土壤湿度大，土壤冻结相对浅，一般在1.6m左右，从而导致距离相近的两种植被类型区其年总量表现不同。

2.3 两种植被类型土壤热通量与净辐射之间的关系

2.3.1 净辐射的月变化

净辐射的高低直接影响着土壤热通量的变化。图4给出了2003年矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸净辐射的月平均状况。由图4可见，金露梅灌丛草甸上净辐射最低值出现在1月，为25.17MJ/m²，然后逐渐升高，6月达到最大，为438.52MJ/m²，以后逐渐下降；矮嵩草草甸的最低值同样出现在1月，但略高于金露梅灌丛草甸，为59.04MJ/m²，最大值出现在6月，为378.66MJ/m²，比金露梅灌丛草甸略低。矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸两种植被类型年净辐射总量分别

为 2857.24MJ/m²和 2676.69MJ/m²,表现为矮嵩草草甸区净辐射大于金露梅灌丛草甸区。

产生净辐射差异的原因比较多,主要在于它的计算过程比较复杂[12]。净辐射不仅受太阳总辐射、空气温度、湿度及风速等气象因素的影响,而且还与下垫面物理及生物属性有关。据研究[13],青藏高原地表净辐射是随太阳高度、海拔高度以及云量、云状和下垫面状况变化的。但本试验中两种植被类型区距离很近,海拔差异相对较小,引起净辐射差异的应该主要是下垫面性状。下垫面性状对短波辐射和长波辐射都有影响。在暖季,金露梅灌丛草甸区由于灌丛的存在,地表反射率降低,使太阳短波辐射返回大气的短波能量下降,同时灌丛厚度大,易贮存较多的能量,但冠面高,温度相对低,长波辐射能下降,从而导致金露梅灌丛草甸区净辐射明显高于矮嵩草草甸。在冬季,两种植被类型的地表均被枯黄的植物所覆盖,有降雪时,金露梅灌丛草甸区的积雪时间甚至比矮嵩草草甸区长,前者地表平均反射率加大,使金露梅灌丛草甸区净辐射小于矮嵩草草甸区。

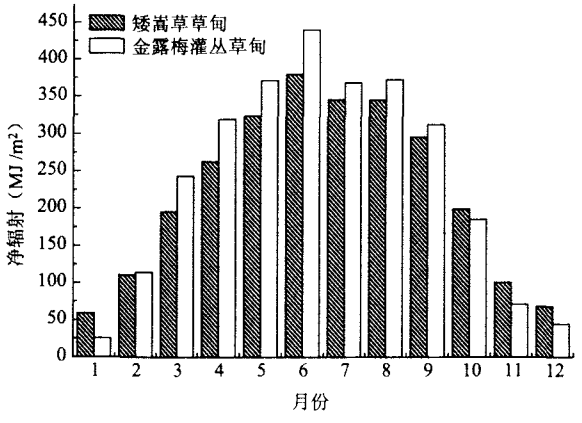

图 4　两种植被类型区净辐射的对比

2.3.2　土壤热通量占净辐射的比例

由图 5 可以看到,土壤热通量月总值占净辐射的比例在一年中呈现倒"U"形变化。由于各月净辐射总量始终为正,而土壤热通量因季节不同有向上、向下传播之分,故比值符号也有正、负之分。在冬季的 1 月、11 月和 12 月,两种植被类型区土壤热通量与净辐射比值的绝对值比较高,且均为负值,表明此期土壤自深层向地表热量传输明显。3 - 9 月比值相对较低,且均为正值,表明期间土壤自表层向深层传输热量,而且在土壤自表层向深层开始融化的春季比值较高。2 月和 10 月是季节转换交替明显时期,土壤热传输受冻融作用的影响显著,主要表现在日消夜冻,土壤热通量的月合计量非常小,导致土壤热通量占净辐射的比值保持在 0 值上下。全年来看,矮嵩草草甸区和金露梅灌丛草甸区土壤热通量占净辐射的比值分别为 -0.92% 和 1.68%。

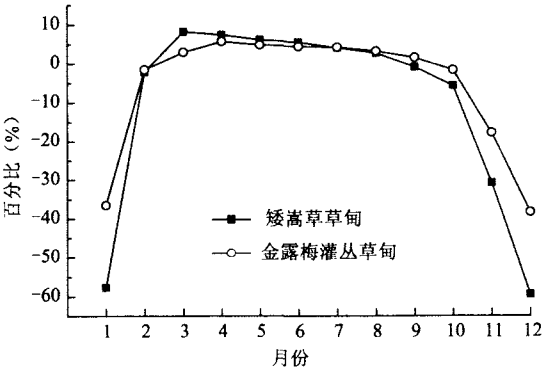

图 5　两种植被类型区土壤热通量所占净辐射的百分比

2.3.3　土壤热通量与净辐射的相关关系

对两种植被类型土壤热通量月均值和 0.5h 尺度上的值分别与净辐射进行回归分析发现,两个时间尺度上的土壤热通量值(G)均与净辐射(Rn)间存在极显著正相关关系(表 1,$P < 0.01$)。对比表明,矮嵩草草甸在 0.5h 尺度上的土壤热通量与净辐射的相关系数较高,而金露梅灌丛草甸在月尺度上的相关系数较高。总体上 0.5h 尺度上土壤热通量与净辐射的相关性稍差,这主要与土壤热通量与净辐射之间存在一定的滞后性有关。

表 1　两种植被类型草甸在日、月尺度上土壤热通量和净辐射的回归关系

	0.5h 尺度	月尺度
矮嵩草草甸	$G = 0.1811Rn - 16.331$ ($R^2 = 0.8613$, $F = 90610$, $P < 0.0001$, $n = 17521$)	$G = 0.1619Rn - 14.485$ ($R^2 = 0.7112$, $F = 24.631$, $P = 0.001$, $n = 12$)
金露梅灌丛草甸	$G = 0.0406Rn - 2.2179$ ($R^2 = 0.305$, $F = 7498$, $P < 0.0001$, $n = 17521$)	$G = 0.0823Rn - 5.9235$ ($R^2 = 0.8928$, $F = 83.276$, $P < 0.001$, $n = 12$)

分别利用两种植被类型上延滞的土壤热通量(以 0.5h 为单位)与相应的净辐射资料进行相关分析表明,矮嵩草草甸上的净辐射与同期的土壤热通量(没有延滞)的相关性最高($r = 0.8613$),而金露梅灌丛草甸上延滞 2.5h 的土壤热通量与净辐射的相关性最高($G = 0.0639Rn - 4.3143$, $R^2 = 0.7555$, $F = 52310$, $P < 0.0001$, $n = 17521$)。两种植被类型上的这种差异,主要与植被覆盖程度有关。矮嵩草草甸植被覆盖程度不高,使得更多的净辐射到达地表,系统受外界的影响更大,同步程度也高,而金露梅灌丛草甸易储存热量,土壤热通量对净辐射的反馈会延滞约 2.5h。以往在农田上的研究也发现有同样的滞后现象,滞后时

间与金露梅灌丛草甸相近，相关系数达到0.85左右[14]；而在森林研究中发现相关系数明显下降，仅有0.29左右[6]。

3 结论与讨论

土壤热通量决定于地表所得到的太阳辐射能、土壤温度梯度以及土壤热属性，而影响这些的主要因素是土壤覆盖物及土壤质地。研究表明[8]，海北高寒草甸受高原气候的影响，白天土壤表面接受太阳照射强烈，温度升高很快，夜间长波辐射冷却也极为剧烈，土壤导热率低，温度变化主要发生于地表。土壤覆盖物可以反射白天的太阳照射，减缓夜间长波辐射，这种性质随覆盖物的厚度和层次的不同对辐射的影响力也有所不同。具体来说，矮嵩草草甸是多年生草本植物为主，总盖度90%左右，高度为10～20cm。而金露梅灌丛草甸则主要是灌丛[15]，厚度可分为两层，一层为金露梅所处的高度，其多年生殖枝最高可达40～60cm，低层多以矮蒿草、线叶蒿草、针茅、羊茅以及其它杂草类植物组成，高度在15cm左右。这种状况下金露梅灌丛草甸覆盖物的层次相对较多，反射辐射也相对较强。导致作用层底部地面接受的太阳辐射能降低明显，土壤温度变化比矮嵩草草甸平稳，日(年)较差较小。另外，灌层作用使地表发生的蒸散能力大大减弱，导致土壤湿度与矮嵩草草甸相比，保持较高。同时两种植被类型土壤状况也不相同[16]，金露梅灌丛为暗沃寒冻雏形土海拔较高、土壤温度较低，土壤湿度较大，冻结时间较长；而矮嵩草草甸草毡寒冻雏形土地温较高，土壤湿度相对较低，冻结时间较短。这样就使金露梅灌丛的比热容增大，土壤温度随外界太阳辐射的变化不甚明显，土壤热通量相对稳定。这些条件决定了矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸土壤热通量表现有以下特点。

(1)矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸土壤热通量在晴天的状况下均表现为单峰型，土壤热通量在早晚均表现为负值，而午后表现为正值，而且白天的变化比较大。在阴天状况下，表现为双峰或多峰型，白天土壤热通量波动比较明显。无论是晴天还是阴雨天，土壤热通量日变化金露梅灌丛草甸均比矮嵩草草甸波动小。

(2)矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸土壤热通量月际变化同样表现为单峰型，最高出现在6月(分别为20.47MJ/m^{2}和18.98MJ/m^2)，最低值出现在12月(分别为-40.27MJ/m^{2}和-16.85MJ/m^2)，但金露梅灌丛土壤热通量维持正值的时间相对较长，其年均值大于矮嵩草草甸。土壤热通量的年变化与植物生长周期性变化及土壤冻结的周期性有明显的相关性。

(3)矮嵩草草甸多分布在土壤相对干燥的平缓滩地，金露梅灌丛草甸多分布在土壤湿度较高的阴坡和沿河阶梯，植被及土壤物理性状的不同，导致两种植被类型土壤热通量年总量差异明显，分别为-24.72MJ/m^{2}和48.10MJ/m^2。

(4)土壤热通量所占净辐射的比例，在矮嵩草草甸较大，年变化幅度也大。土壤热通量与净辐射的相关性分析发现，在0.5h尺度上，土壤热通量与净辐射在矮嵩草草甸无明显滞后现象，而金露梅灌丛草甸土壤热通量对冠层净辐射的反应有2.5h的滞后性。

参考文献：

[1]赵亮，徐世晓，李英年，等. 青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO_2 通量变化与环境因子的关系[J]. 西北植物学报，2006，26(1)：133-142.

[2]李明财，罗天祥，郭军，等. 藏东南高山林线冷杉原始林土壤热通量[J]. 山地学报，2008，26(4)：490-495.

[3]翁笃鸣，高建芸. 青藏高原地表净辐射的气候学研究[J]. 南京气象学院学报，1993，16(4)：464-470.

[4]季劲钧，黄玫. 青藏高原地表能量通量的估计[J]. 地球科学进展，2006，21(12)：1268-1271.

[5]张晓煜，王连喜，袁海燕. 宁南半干旱地区农田和草地生态系统能量通量的季节变化[J]. 生态学报，2005，25(9)：2333-2340.

[6]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.

[7]Ogee J, Lamaud E, Bruent Y, et al. A long-term study of soil heat flux under a forest canopy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 106: 173-186.

[8]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.

[9]李英年，师生波，曹广民，等. 祁连山海北高寒草甸地区微气候特征的观测研究[J]. 高原气象，2000，19(4)：512-519.

[10]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.

[11]李英年，关定国，赵亮，等. 海北高寒草甸的季节冻土及在植被生产力形成过程中的作用[J]. 冰川冻土，2005，27(3)：311-318.

[12]孟平，张劲松，高峻. 果树冠层太阳总辐射与净辐射分形特征的相关分析[J]. 林业科学，2005，41(1)：1-4.

[13]翁笃鸣. 青藏高原地表净辐射若干重要特征研究[J]. 南京气象学院学报，1991，14(2)：151-159.

[14]申双和，崔兆韵. 棉田土壤热通量的计算[J]. 气象科技，1999，19(3)：276-281.

[15]李英年，王勤学，古松，等. 高寒植被类型及其植物生产力的监测[J]. 地理学报，2004，59(1)：40-48.

[16]陶贞，沈承德，高全洲，等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J]. 地理学报，2006，61(7)：720-728.