

文章编号: 1007-0435(2006)03-0248-06

青藏高原两种草甸地表通量季节变化特征

赵亮¹, 徐世晓¹, 李英年¹, 赵新全¹, 于贵瑞², 古松¹, 杜明远³

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 日本农林环境技术研究所, 日本 筑波 30508604)

摘要: 2003年1月-2004年7月运用涡度相关法技术研究青藏高原金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸(SRM)和藏蒿草(*Kobresia humilis*)沼泽化草甸(SWM)的地表通量。结果表明:二者地表湍流通量都具有明显的季节变化和日变化,其中感热通量以4月最大,1月最小,而潜热通量则以5月最大;感热通量随着季节的变动而显著变化,在相同月份中沼泽化草甸白天最大值大于灌丛草甸,日变化振幅比灌丛草甸强;白天潜热通量达到最大值的时间和波动强度因季节不同而各异,在非生长季节白天最大值在13~15 h,日波动较弱,生长季节最大值在12 h,日波动较强;高寒草甸地表湍流通量与温度间存在着线性关系;不同季节感热通量:沼泽化草甸>灌丛草甸,而潜热通量与感热通量各异,在1月沼泽化草甸>灌丛草甸,在4和10月,沼泽化草甸<灌丛草甸,在7月二者基本一致。

关键词: 青藏高原; 感热通量; 潜热通量; 草甸

中图分类号: S812 文献标识码: A

Seasonal Variation of Surface Fluxes of two Species Meadows on the Qinghai-Tibet Plateau

ZHAO Liang¹, XU Shi-xiao¹, LI Ying-nian¹, ZHAO Xin-quan¹,

YU Gui-rui², GU Song¹, DU Ming-yuan³

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810001 China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101 China;

3. National Institute for Agro-Environmental Science, Tsukuba 3058604, Japan)

Abstract: Eddy covariance technique was used to measure the surface fluxes (sensible flux and latent flux) of a *Potentilla fruticosa* shrub meadow (SRM) and a *Kobresia humilis* swamp meadow (SWM) on the Qinghai-Tibetan Plateau from January 2003 to July 2004. Results show that the surface fluxes had been recorded with significant diurnal and seasonal variations. Among them, April saw the highest monthly sensible flux, and January the lowest, while the latent fluxes maximum appeared in May. Diurnal sensible flux amplitude significantly changed with season alternations. Within the same month, the maximal diurnal sensible flux of the *K. humilis* shrub meadow was higher than that of the *P. fruticosa* swamp meadow, and the diurnal amplitude of the former excelled that of the latter. Different seasons also altered the time in which the diurnal latent flux and the amplitude vibration force reaching the peaks. During the plant dormant season, the maximal diurnal sensible flux appeared between 1:00 pm to 3:00 pm and the diurnal amplitude was weak. During the plant growing seasons, the maximal diurnal sensible fluxes occurred in midday, 12:00 am, with strong diurnal amplitude. There exists a linearity or exponential relationship between surface fluxes and air temperature in the two meadows. The responses of the *P. fruticosa* shrub meadow latent flux to temperature were stronger than those of the *K. humilis* swamp meadow each month. The responses of the shrub meadow sensible flux to temperature were stronger than those of the swamp meadow in January. It was the reverse in April and October. In July, the response of sensible flux to temperature of the two was similar.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Sensible flux; Latent flux; Meadow

收稿日期: 2005-06-10; 修回日期: 2005-11-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-01A5); 国家973项目(2002cb412501)

作者简介: 赵亮(1974-),男,助理研究员,从事生态学研究

地表湍流通量是表征地-气相互作用过程的重要物理量。国内外对陆地生态系统地表通量进行了广泛研究^[1-6]。但是除余锦华^[6]对改则郊区荒漠和狮泉河郊区边缘的平坦裸土进行长期研究外,其它的主要在夏季,且观测时间较短^[3-5]。至于对青藏高原同类研究几乎没有。金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸是在青藏高原广泛分布的两种植被类型。研究其地表通量,不仅为青藏高原热力状况提供资料,也将对了解高寒草甸生命与非生命系统间的关系,揭示系统间能量流动及其物质循环规律,解释植被类型区气候及其水分循环等有重要意义。对这两种草甸类型的碳循环^[7-9],以及辐射能量平衡^[10,11]已进行了广泛的研究,但对地表通量至今尚未详细的观测和研究。本文运用涡度相关法技术对这2种植被类型的地表通量进行观测,分析其感热和潜热通量的时间变化特征,比较2种植被类型地表通量之间差异。

1 材料与方法

1.1 研究区域自然概况

于2003年1-12月和2004年1-6月在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(37°37'N, 101°19'E, 海拔3220m)进行。年均气温-1.7℃,7月和1月平均气温为9.8和-14.8℃;年均降水量580mm,主要分布在5-9月,占全年的80%,10月至翌年4月仅占年降水量的20%,相对无霜期20d左右,在7月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等冬季天气现象。

1.2 观测项目与方法

1.2.1 涡度相关观测系统分别设置金露梅灌丛草甸和沼泽化藏嵩草甸,地势平坦,地形开阔,具有足够大“风浪区”的中心带。观测系统离地面250cm高,主要有CSAT型超声风速仪温度计(CSD)和LI7500 CO₂/H₂O 红外分析仪(LICOR, Inc)。

1.2.2 在湍流资料处理中,采用每小时30min资料,利用剔除和内插法消除由于各种原因引起的噪声和峰值干扰,通过选用自然坐标(x, y, z)投影计算得到水平风速分量的脉动值(u 和 v),垂直速度、温度和比湿的脉动值(w 、 t 、 q)。由处理后的湍流脉动量序列,直接计算动量通量(τ)、感热通量(H)和潜热通量(LE)。其表达式如下:

$$\tau = \overline{\rho u w} \quad (1)$$

$$H = \overline{\rho C_p \theta w} \quad (2)$$

$$LE = \overline{\rho L_v w q} \quad (3)$$

式中 θ 和 ρ 分别为位温和空气密度,由同步实测气压和温度求取, C_p 为定压比热, L_v 为水汽的汽化热系数。

2 结果与分析

2.1 地表湍流通量年际变化

2.1.1 青藏高原下垫面为金露梅灌丛草甸(SRM)和藏嵩草沼泽化草甸(SWM)。其地表潜热通量(LE)和感热通量(H)的季节变化非常显著,在非生长季的 H 值和 LE 值都低于生长季节。就 LE 值而言,全年日均值都为正,1-5月很快增大,达到最大值,其出现月份因年际和下垫面的差异不同而异。如2003年,SRM和SWM最大值出现在6月,分别为77.39和78.08W·m⁻²月,而在2004年,SRM仍出现在6月(73.59W·m⁻²),而SWM则出现在4月(74.51平均值W·m⁻²),在最大值月至10月上下波动,10月以后迅速减小,1月最小,SRM在2003和2004年1月分别为6.60和11.49W·m⁻²,SWM分别为14.12和5.22W·m⁻²; H 值从1-4月很快增大,4月最大;SRM在2003和2004年4月分别为69.99和77.46W·m⁻²,SWM在2003年4月为40.53W·m⁻²,其后逐渐减小直至12月。值得注意的是,2004年,SWM在6月达到最大值,年度变化特征与以往研究存在着明显差异。如文献^[13]指出 H 值最大在6月,5月次之,12月最小,而 LE 值在7月最大。而本文的研究结果显示, H 值最大月为4月,而 LE 最大月因年际和下垫面的差异而不同。结果与文献^[6]的分布有很大区别。这主要因下垫面不同所致。本文研究的下垫为草甸,而余锦华等研究对象的下垫面为裸土,另外一个原因可能与计算方法不同有关(图1)。

2.1.2 SRM的 H 值高于SWM 1.93倍,而 LE 值则相反,SRM低于SWM 8%。在生长季节 H 和 LE 值差异不显著,而非生长季节则差异显著。就 H 值而言,在2003和2004年SRM的 H 值高于SWM,而 LE 则年际变化明显,在2003年,SRM低于SWM,在2004年SRM高于SWM(图1)。结果证明,在同样条件下,因下垫面不同对 H 和 LE 值的影响各异,在非生长季 H 值通量在地表热源中所占的比例更大。

2.1.3 LE 和 H 值因下垫面类型和月份不同而异。SRM在非生长季节(1、1、3、4、10、11和12月) LE 小于 H 值,而在生长季节(6、7、8和9月), LE 大于 H 值;而SWM则在所有月份, LE 值均大于 H 。SEM的波文比最大值在2月,最小值在7和8月,为0.5。SWM波文比的月际变化不明显,因而最大值与最小值的分布也不明显。SWM和SEM全年波文比分别为2.12和0.32,前者是后者的6~7倍。表明青藏高原北部高寒草甸地区在非生长季气候干燥,用于蒸发的水分较少,地气间的热量交换以感热通量为主,而在生长季节降水较多,地气

间的热量交换以潜热通量为主。与余锦华^[6]等研究结果相比,本文灌丛草甸的波文比最大值比之早一个月,最

小值与之相同,该文的最大值($H/LE = 19$)与本文相比,比2003年大3倍,比2004年大6倍左右。

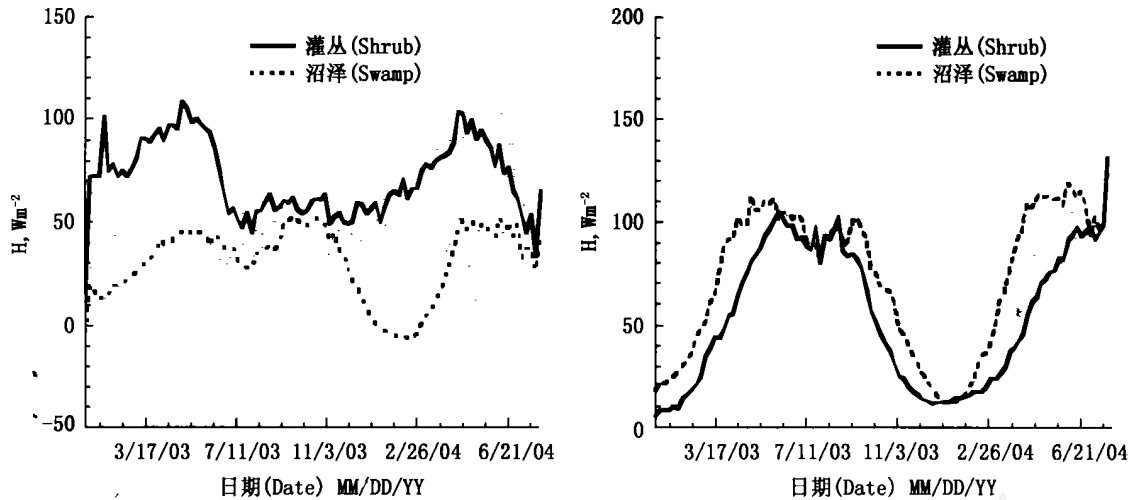


图1 灌丛和沼泽草甸感热通量和潜热通量日值季节变化

Fig 1 Seasonal variation of sensible heat flux (H) and latent heat flux (LE) in the shrub (a) and the swamp (b)

表1 2种草甸波文比月际动态

Table 1 Monthly variations of Bowen's ration in the two species meadows

类型 Type	年 Year	月份 (month)											
		1 Jan.	2 Feb.	3 Mar.	4 Apr.	5 May.	6 Jun.	7 Jul.	8 Aug.	9 Sept.	10 Oct.	11 Nov.	12 Dec.
金露梅灌丛草甸 SRM	2003	5.93	6.09	2.05	1.49	1.15	0.76	0.52	0.53	0.65	1.66	2.05	3.82
	2004	2.97	3.12	2.19	1.59	1.17	0.81	-	-	-	-	-	-
藏嵩草沼泽化草甸 SWM	2003	0.67	0.58	0.43	0.59	0.49	0.45	0.39	0.40	0.51	0.83	0.94	0.74
	2004	-0.54	-0.28	0.04	0.32	0.40	0.52	-	-	-	-	-	-

综上所述,同属一个地区而下垫面不同的灌丛草甸和沼泽化草甸,除在最大值出现月份二者存在一定差异外,其地表通量 H 和 LE 值的季节变化特征基本相同,但二者存在着明显差异,特别在非生长季节,灌丛草甸的 H 值大于沼泽化草甸,而 LE 值存在年度变化,在2003年灌丛草甸的 LE 值大于沼泽化草甸,在2004与2003年则相反。二者的波文比相差也很大。

2.2 地表湍流通量日变化

2.2.1 感热通量(H)

青藏高原高寒草甸月际 H 值的日变化情况与报道^[2,5,6]一致,上午 H 值逐渐增大,中午前后达到最大,尔后减小。但不同草甸类型 H 值间存在差异,SRM日变化的最大 H 值>SWM(表2)。正负转换时间的月际变化在两种草甸间也存在差异。从冬到夏, H 值为正的时间逐渐延长,负的时间逐渐缩短,即由负转正的时间逐渐延长,而正转负的时间逐渐推后(表4)。例如,在SRM,1月由负转正的时间约10h(北京时间,下同),由正转负的时间为19h, H 值为正的时间只有8个小时。4月由负转正的时间在8h,由正转负大致在20h, H 值为正的时间增加到11个小时,而6和7月 H 值为正的时间增至13个小时,是一年中 longest 的月份。从8、9月开始由

负转正的时间又逐渐推后,由正转负的时间逐渐提前,在生长季节,正的时间长于负值,在非生长季节则相反。SWM的变化与SRM相同,其主要区别在于,SWM在11和12月都是正值,没有正负转换现象(表2)。

在青藏高原SRM和SWM, H 值的日变化较强,白天最强大多发生在14:00h,最小负值在03:00h。在SRM,在非生长季节 H 白天正值增大较快,日变化较强,在生长季节日变化较弱,白天正值以2月最大,4月 H 的日变化与5月接近,10-12月的变化相差不大。而在SWM,白天正值以4月最大,1、2和12月 H 的日变化与SRM接近,特别是1和12月很接近。比较两种草甸的 H 变化,在相同月份白天的最大值,SRM比SWM大,并且SRM白天 H 最大值大的月份在SWM白天 H 最大值较小。

2.2.2 潜热通量日变化(LE)

高寒草甸 LE 日变化和 H 值相同,也存在着非常明显的日变化,上午逐渐增大,中午前后达到最大值,然后开始减小,最大值出现在白天,最小值出现在夜间(表6)。但是白天 LE 达到最大值的时间和波动强度因季节不同而异,在非生长季节白天达到最大值的时间在13~15h,日波动较弱,而在生长季节在12h,日波动较强。 LE 与以往的报道一致,全天的值都大于零。

表2 灌丛草甸月际感热通量日变化(H, Wm^{-2})

Table 2 Diurnal variation of monthly mean sensible heat (H, Wm^{-2}) flux in shrub meadow

时间 Time(h)	1月 Jan	2月 Feb	3月 Mar	4月 Apr	5月 May	6月 Jun	7月 Jul	8月 Aug	9月 Sept	10月 Oct	11月 Nov	12月 Dec
1	-34.93	-26.85	-16.38	-12.50	-12.43	-13.93	-8.74	-9.64	-12.80	-12.78	-25.66	-30.88
2	-31.44	-22.94	-11.39	-11.28	-11.40	-15.54	-9.37	-13.04	-15.63	-9.84	-20.51	-27.10
3	-33.98	-21.81	-11.60	-13.17	-10.52	-12.10	-16.15	-11.67	-5.81	-13.01	-21.63	-25.75
4	-35.19	-25.13	-14.27	-19.68	-10.57	-15.09	-10.41	-6.57	-14.05	-13.02	-20.37	-29.23
5	-37.87	-30.18	-11.11	-16.56	-12.17	-17.84	-11.56	-15.76	-12.62	-10.48	-21.73	-31.60
6	-33.28	-28.92	-16.82	-16.11	-5.30	-13.96	-14.18	-11.80	-24.00	-10.85	-18.58	-28.39
7	-39.25	-23.99	-20.22	-22.66	-8.05	-18.73	-21.39	-12.86	-23.66	-6.99	-21.79	-29.32
8	-24.62	-25.12	-19.14	-5.99	1.05	7.42	-0.30	-1.64	-18.10	-8.49	-21.64	-34.13
9	-35.98	-15.53	1.95	27.01	47.05	42.55	8.16	6.26	12.13	3.26	-14.82	-29.05
10	7.44	12.15	61.12	94.42	105.86	107.03	60.55	41.18	61.78	38.34	25.85	10.54
11	83.56	115.76	129.86	153.77	160.20	153.97	85.81	96.92	97.07	108.31	93.12	86.01
12	161.12	186.00	192.16	191.20	196.26	183.17	123.69	113.96	132.53	168.95	141.98	152.05
13	209.50	242.00	228.89	229.43	223.60	193.00	150.13	143.81	167.24	206.20	186.26	184.21
14	244.28	271.23	247.25	240.70	224.22	210.33	141.42	151.23	180.04	215.14	187.32	199.77
15	224.55	255.45	238.40	254.71	201.58	205.66	127.79	117.49	152.81	214.91	165.28	197.82
16	181.06	221.96	223.01	212.18	170.91	174.87	92.29	108.18	137.71	172.80	127.93	156.30
17	120.38	145.30	162.81	172.40	130.15	131.15	81.65	88.18	81.86	117.91	82.77	97.69
18	48.83	77.93	107.11	121.32	101.61	81.13	41.79	50.25	49.55	51.98	25.62	29.44
19	-9.00	9.22	38.62	56.41	61.94	45.89	17.43	22.16	9.00	-0.61	-14.95	-10.84
20	-38.49	-17.35	-8.20	5.03	22.42	13.08	2.56	-10.80	-23.25	-24.83	-26.16	-27.79
21	-31.92	-30.34	-24.47	-13.50	-5.04	-17.53	-21.39	-19.85	-22.20	-24.67	-26.60	-25.76
22	-28.83	-33.16	-18.95	-19.07	-15.98	-19.66	-13.30	-16.39	-11.83	-23.54	-26.79	-27.02
23	-36.29	-25.19	-15.90	-17.09	-5.51	-20.52	-19.73	-10.01	-12.00	-17.87	-26.50	-25.38
24	-31.78	-29.41	-16.95	-15.97	-14.12	-12.13	-17.95	-13.39	-12.59	-18.91	-27.01	-31.05

表3 沼泽化草甸月际感热通量日变化(H, Wm^{-2})

Table 3 Diurnal variation of monthly mean sensible heat (H, Wm^{-2}) flux in swamp meadow

时间 Time(h)	1月 Jan	2月 Feb	3月 Mar	4月 Apr	5月 May	6月 Jun	7月 Jul	8月 Aug	9月 Sept	10月 Oct	11月 Nov	12月 Dec
1	-1.39	-4.61	-3.84	-8.44	-0.40	-14.84	-14.94	-9.82	-2.41	-5.85	1.58	-0.54
2	-10.08	-3.95	-4.77	-12.48	-4.14	-14.96	-3.66	-5.16	-0.48	-2.99	5.19	-2.81
3	-11.27	-8.94	-0.60	-14.06	-4.48	1.83	-10.67	-9.22	-17.89	-4.72	-1.34	-5.21
4	5.94	-11.55	0.49	-12.74	-13.76	-9.70	-11.56	-6.37	-12.81	-5.63	-2.46	-4.72
5	-7.88	-6.98	-0.71	-11.44	-14.32	-8.69	-17.65	11.29	1.05	-4.46	0.51	7.32
6	3.44	-2.86	-1.14	-6.92	-22.28	4.64	-16.01	-0.08	6.55	-3.07	5.75	10.26
7	4.27	0.82	-4.67	-5.97	0.43	1.76	-20.42	-12.90	12.97	-1.28	-1.95	6.19
8	1.35	-0.70	1.63	-9.66	-1.77	-8.31	9.01	16.60	-0.94	1.29	-2.56	7.18
9	-5.10	-1.17	2.36	16.04	20.84	31.02	24.30	36.74	14.44	5.44	7.76	10.12
10	4.74	3.47	23.33	63.92	46.90	73.69	53.18	41.04	60.30	28.13	26.65	-13.57
11	18.08	31.86	49.80	97.96	93.30	95.29	63.49	67.15	97.87	63.27	45.66	12.54
12	25.49	46.75	61.36	112.99	106.88	115.76	75.07	92.32	103.92	101.06	67.99	12.07
13	35.36	55.88	75.61	157.33	129.06	109.26	87.44	105.26	131.76	134.11	93.46	23.33
14	50.17	49.38	75.96	165.53	125.20	118.34	80.51	99.48	132.75	140.37	100.28	38.88
15	49.91	46.16	68.84	151.46	105.56	112.96	89.22	88.53	113.28	135.89	96.82	40.38
16	37.23	38.15	56.32	128.22	89.89	89.08	52.71	72.95	86.77	108.71	69.39	35.27
17	23.49	24.48	35.97	81.18	72.86	68.79	42.80	65.82	67.97	76.20	36.45	19.22
18	6.89	7.89	10.86	35.65	47.01	37.83	25.68	31.70	25.13	27.21	11.01	4.97
19	-9.56	-2.56	-8.14	1.21	9.67	16.43	13.57	7.08	1.77	-5.81	-11.61	-2.09
20	-14.74	-8.37	-12.96	-16.06	-12.77	-4.64	-4.81	-12.03	-7.68	-11.10	-10.02	-4.62
21	-4.14	-1.38	-14.36	-19.82	-0.12	-13.86	-12.44	-11.91	-14.79	-10.14	-10.85	-7.45
22	-11.07	-2.62	-4.63	-18.84	-1.89	-16.46	-18.65	-17.95	-11.43	-8.68	4.89	9.27
23	-3.58	-4.80	-8.72	-15.79	-9.69	-13.87	-12.75	-15.98	-13.02	-5.35	-3.11	-4.06
24	-10.80	-9.10	-7.46	-14.78	-7.04	-12.24	-16.32	-11.88	-10.27	-4.73	-10.28	6.92

比较SRM 和SWM 的 L_E 值日变化,二者白天 L_E 最大值出现的月份一样,都在8月,最小值出现在12月(表6),SWM 白天 L_E 达到最大值的时间随着季节的变化比SRM 强,例如在1、2和3月,SRM 白天 L_E 达到最大值

的时间约为13h,SWM 则接近15h,二者相差2小时

2.3 地表湍流通量与温度的关系

感热通量是由所大气温度差异所造成的,主要通

过分子传导、热量交换和对流完成,而潜热通量则由地面蒸发和大气凝结所致,因此,二者与温度之间有着紧密的关系(表5)。

随着温度的增加,感热通量线性递增,而潜热通量指数递增,且均存在着季节变化。比较2种草甸的地表湍流

通量对温度的响应,不同季节SRM的H值>SWM,也就是说,在同样温度条件下,SRM的H比SWM的高;而LE则与H相反,在1月,SRM>SWM,在4和10月,SRM<SWM,而7月2种草甸基本一样。另外,SWM的H和LE,在1月不随着温度的变化而变化。

表4 灌丛和沼泽草甸感热通量日变化正负转换时间月际动态

Table 4 Monthly variations of diurnal transferred time of the two meadows sensible heat fluxes from positive to negative and vice versa

类型 Type		月份 (month)											
		1 Jan	2 Feb	3 Mar	4 Apr	5 May	6 Jun	7 Jul	8 Aug	9 Sept	10 Oct	11 Nov	12 Dec
SRM	- +	10	10	9	9	8	8	8	9	9	9	10	10
	+ -	18	19	19	19	21	21	21	19	19	18	18	18
SWM	- +	11	11	10	9	8	9	8	8	9	9	-	-
	+ -	16	16	16	18	19	20	19	19	19	18	-	-

表5 灌丛和沼泽草甸感热通量和潜热通量与温度的关系

Table 5 Relationship between sensible heat flux (H), latent heat flux (Le) and air temperature (Ta) of shrub (SRM) and swamp (SWM)

月份 Month	类型 Type	感热通量 (Wm ⁻²) Sensible fluxes (H, Wm ⁻²)	潜热通量 (Wm ⁻²) Latent flux (Le, Wm ⁻²)
1月 January	SRM	$H = 205.25 + 11.83T_a, R = 0.71$	$Le = 37.44e^{0.12T_a}, R = 0.28$
	SWM	$H = -0.59 + 0.66T_a, R = 0.199$	$Le = 25.82e^{0.11T_a}, R = 0.56$
4月 April	SRM	$H = 78.58 + 9.89T_a, R = 0.51$	$Le = 24.81e^{0.12T_a}, R = 0.65$
	SWM	$H = 20.70 + 3.69T_a, R = 0.34$	$Le = 47.66e^{0.12T_a}, R = 0.51$
7月 July	SRM	$H = -47.41 + 10.17T_a, R = 0.63$	$Le = 4.82e^{0.24T_a}, R = 0.58$
	SWM	$H = -18.41 + 5.32T_a, R = 0.50$	$Le = 16.97e^{0.14T_a}, R = 0.45$
10月 October	SRM	$H = 48.72 + 13.17T_a, R = 0.62$	$Le = 14.24e^{0.19T_a}, R = 0.56$
	SWM	$H = 26.205 + 7.63T_a, R = 0.53$	$Le = 21.28e^{0.17T_a}, R = 0.62$

表6 灌丛草甸月际潜热通量日变化(LE, Wm⁻²)

Table 6 Diurnal variation of monthly mean latent heat flux (LE, Wm⁻²) in shrub meadow

时间 Time(h)	1月 Jan	2月 Feb	3月 Mar	4月 Apr	5月 May	6月 Jun	7月 Jul	8月 Aug	9月 Sept	10月 Oct	11月 Nov	12月 Dec
1	-0.08	-0.06	1.53	6.92	20.26	33.08	9.39	24.57	15.46	9.33	2.83	1.94
2	-2.01	-1.49	-1.83	9.90	15.96	7.64	19.66	16.75	19.54	7.09	0.95	2.25
3	-2.77	-1.63	-2.23	10.96	-0.68	10.88	8.75	34.04	24.06	5.49	0.78	0.23
4	-2.87	-1.98	-0.66	5.35	3.85	1.98	5.09	23.01	6.20	5.54	0.38	0.51
5	-3.52	-2.26	-0.83	5.17	-9.23	16.58	8.22	15.42	11.94	4.80	0.84	1.97
6	-2.61	-2.02	1.96	4.81	15.44	6.87	5.30	3.63	-0.89	3.28	2.90	1.56
7	-2.42	-0.86	1.56	9.95	0.27	9.31	19.39	11.11	5.43	4.14	2.73	3.57
8	-2.40	-2.95	0.25	7.56	17.60	23.84	27.84	24.44	7.57	1.32	1.95	0.46
9	-2.56	-1.21	10.28	32.73	43.50	63.04	43.79	39.94	30.38	12.88	3.98	1.34
10	4.62	4.25	31.67	55.12	72.80	105.22	99.07	81.59	77.74	27.95	14.30	7.08
11	11.67	17.84	51.60	73.27	109.50	155.35	140.27	131.88	96.37	42.78	29.80	16.42
12	15.90	26.96	65.60	91.14	139.19	197.72	175.05	164.15	133.98	65.93	35.87	20.24
13	19.03	31.67	77.82	113.29	168.40	207.87	212.78	203.55	163.58	80.45	39.78	22.27
14	20.05	31.89	90.76	122.13	155.49	207.85	158.89	212.98	185.19	84.75	41.72	22.01
15	17.27	28.58	87.87	130.38	151.80	188.74	149.79	174.41	179.25	80.92	38.01	20.36
16	13.37	22.87	83.96	113.32	126.26	179.06	142.55	152.19	157.06	72.29	30.07	16.15
17	9.11	14.33	64.09	94.67	99.38	157.58	144.83	178.96	120.43	53.81	24.56	10.33
18	3.95	6.13	43.43	67.91	87.73	119.05	133.37	140.02	100.33	33.81	13.32	4.38
19	-0.48	3.22	21.11	42.89	62.81	76.05	107.80	87.88	69.10	18.94	6.12	2.30
20	-1.63	-1.73	13.21	21.64	45.63	62.52	70.53	57.78	31.48	9.74	5.98	0.02
21	-0.63	-2.60	6.66	23.66	13.38	32.56	36.87	19.58	33.08	16.77	6.44	1.62
22	-0.72	-2.23	4.36	12.01	11.36	26.55	17.12	23.18	20.22	10.42	5.47	-0.96
23	-1.37	-0.56	7.22	6.68	8.32	28.32	12.78	8.46	20.88	7.47	5.76	0.76
24	-1.33	-0.25	7.14	4.44	3.63	23.95	24.03	28.92	30.40	4.98	3.81	0.17

表7 沼泽化草甸月际潜热通量日变化(LE, Wm^{-2})Table 7 Diurnal variation of monthly mean latent heat flux (LE, Wm^{-2}) in swamp meadow

时间 Time(h)	1月 Jan	2月 Feb	3月 Mar	4月 Apr	5月 May	6月 Jun	7月 Jul	8月 Aug	9月 Sept	10月 Oct	11月 Nov	12月 Dec
1	5.11	10.05	18.84	17.60	25.24	9.30	20.40	-3.86	46.62	13.44	9.62	11.90
2	3.02	9.74	15.73	18.17	11.97	14.14	10.62	17.18	33.86	12.65	14.81	5.42
3	4.68	9.07	15.41	12.52	49.40	50.62	13.47	18.86	64.40	1.35	8.39	6.87
4	5.77	6.19	13.98	10.19	31.53	5.12	11.22	14.03	41.06	6.28	2.96	8.21
5	5.16	3.60	11.18	5.57	-2.91	10.61	-10.42	35.24	38.36	11.48	5.56	5.52
6	3.01	-5.91	10.56	0.06	5.13	1.35	38.17	40.32	34.82	9.80	7.42	4.52
7	5.64	4.68	11.57	1.28	18.95	17.50	20.12	15.40	28.92	6.56	7.61	4.31
8	9.68	-0.18	11.48	13.03	54.05	19.21	31.87	42.17	35.62	4.16	4.92	6.53
9	9.26	-1.56	15.56	37.47	64.82	74.86	54.88	38.12	13.30	17.50	-2.97	5.56
10	9.92	6.85	37.10	67.08	91.89	133.23	117.59	91.36	93.06	42.62	23.48	4.97
11	11.87	24.41	52.29	95.43	163.33	181.67	155.46	142.04	143.72	64.56	49.13	12.86
12	19.62	30.82	69.12	120.80	193.35	200.23	172.50	208.41	172.05	81.02	53.79	16.55
13	27.32	43.02	94.45	181.62	193.31	177.71	160.69	224.30	205.76	109.93	60.88	29.16
14	41.26	53.82	106.41	188.38	181.80	189.83	148.42	201.76	208.90	124.78	66.29	43.84
15	46.74	64.50	121.04	202.16	148.24	189.39	147.88	188.98	181.91	129.56	73.39	48.15
16	49.48	63.76	116.62	185.01	168.87	187.81	125.47	180.28	153.01	117.18	63.58	52.66
17	43.11	58.49	93.42	149.18	150.85	161.89	134.57	153.17	155.01	98.93	49.46	42.32
18	33.01	46.21	71.66	109.59	138.37	149.67	110.39	141.77	102.55	67.02	39.29	37.94
19	18.81	28.26	49.13	76.38	93.75	121.86	108.46	97.71	56.79	29.58	19.65	22.81
20	12.75	19.34	27.40	41.70	75.75	71.40	82.40	59.16	13.94	25.96	16.41	16.73
21	10.01	15.45	23.28	32.17	23.28	33.63	30.17	44.83	5.48	18.76	17.15	8.24
22	10.73	17.10	23.05	23.55	15.33	28.02	29.28	8.52	23.27	17.46	18.73	10.44
23	9.44	14.58	21.42	19.30	22.26	10.46	22.50	19.29	10.69	9.55	12.78	10.70
24	5.39	15.84	20.47	16.17	16.11	5.66	23.10	50.92	32.45	6.20	13.84	10.37

参考文献:

3 讨论与结论

3.1 在灌丛草甸和沼泽化草甸, H 值季节变化以1月最小, 4月最大; LE 值则1月最小, 5月最大。月际间相差30 d。

3.2 在灌丛草甸和沼泽化草甸, H 和 LE 值的季节变化特征基本相同, 但二者差异显著。SRM H 年均值高于SWM 1.93倍, 而 LE 则相反, SRM 低于SWM 8%。

3.3 在灌丛草甸和沼泽化草甸, H 值月均日变化特征与以往的研究结果一致, 表现为白天为正值, H 最大正值出现在14:00 h, 夜间为负, 最小负值出现在03:00 h。在夏季正值的时间长于负值, 冬季则相反。日变化强度随着季节的变动而显著变化。在相同月份白天的最大值, SRM > SWM, 日变化振幅比后者强, 且SRM 白天 H 最大值月份比后者小。

3.4 在灌丛草甸和沼泽草甸, LE 日变化与 H 值相同, 也存在着非常明显的日变化。但是白天 LE 达到最大值的时间和波动强度因季节不同而异, 在非生长季节最大值在13~15 h, 日波动较弱, 而在生长季节最大值在12 h, 日波动较强。 LE 全天值都大于零。白天 LE 最大值出现的月份一样, 都在8月, 最小值出现在12月, SWM 白天的 LE 达到最大值的时间随着季节的变化程度比SRM 强, 二者相差2 h。

3.5 随着温度的增加, 高寒草甸感热通量则呈线性递增, 而潜热通量则呈指数递增, 并且存在着季节变化。

- [1] Wilson K B, Baldocchi D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America[J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 100: 1-18
- [2] Linda A W, Flanagan L B, Peter C J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland[J]. *Agric For Meteorol*, 2002, 112: 31-49
- [3] 季国良, 姚兰昌, 袁福茂, 等. 1982年冬季青藏高原地面和大气热场特征[J]. *中国科学(B辑)*, 1986, (2): 214-224
- [4] 李家伦, 洪钟祥, 罗卫东, 等. 青藏高原改则地区近地层通量观测研究[J]. *大气科学*, 1999, 23(2): 172-177
- [5] 卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究[J]. *应用气象学报*, 2001, 12: 1-13
- [6] 余锦华, 刘晶淼, 丁裕国. 青藏高原西部地表通量的年、日变化特征[J]. *高原气象*, 2004, 23: 353-359
- [7] Zhao L, Li Y N, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine shrubland meadow during the growing season on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *J Integrative Plant Biology*, 2005, 47: 271-282
- [8] Zhao L, Li Y N, Zhao X Q, et al. Comparative study of the net exchange of CO_2 in 3 type of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chiese Science Bulletin*, 2005, 50: 1767-1774
- [9] 赵亮, 徐世晓, 伏玉玲, 等. 积雪对藏北高寒草甸 CO_2 和水汽通量的影响[J]. *草地学报*, 2005, 13: 242-247
- [10] 赵亮, 古松, 杜明远, 等. 海北高寒草甸辐射能量的收支及植物生物量季节变化[J]. *草地学报*, 2004, 12: 66-69
- [11] 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: 289-295
- [12] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. *高原气象*, 2004, 23: 558-567
- [13] 李栋梁, 章基嘉, 吴洪宝. 夏季青藏高原下垫面感热异常的诊断研究[J]. *高原气象*, 1997, 16: 368-375

(责任编辑 孟昭仪)