DOI: 10.5846/stxb201707111253

孙树臣,邵明安.热储通量对黄土高原北部柠条林地地表能量平衡的影响.生态学报,2018,38(16): - . Sun S C, Shao M A.Effects of heat storage on surface energy balance in *Caragana* forest land of northern Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (16): - .

热储通量对黄土高原北部柠条林地地表能量平衡的 影响

孙树臣¹, 邵明安^{2,3,4,*}

1 聊城大学环境与规划学院,聊城 252059

2 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100

3 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

4 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100190

摘要:地表能量平衡问题一直是陆面过程研究中的重点和难点问题。以 2014 年 8—10 月和 2015 年 4—6 月黄土高原北部水蚀 风蚀交错带柠条林地涡度相关通量观测数据为依据,分析柠条林地热储通量变化特征,在此基础上分析热储通量对能量闭合度 的影响。结果表明,柠条林地各热储通量均表现出明显的季节和日变化规律。在能量平衡方程中,考虑热储通量项后能显著提 高柠条林地能量闭合度,平均提高幅度为 11.91%。其中,土壤表层热储通量对能量闭合度的贡献最大,占总热储通量的 95.63%;光合作用热储通量和大气感热存储通量占总热储通量的比例不足 5%,光合热储通量略高于大气感热存储通量;而大 气潜热存储通量则降低了能量闭合度,平均降低幅度为 0.06%。因此,在分析黄土高原柠条林地能量平衡中热储通量项是不可 忽略的。影响柠条林地各热储通量的因素主要有太阳辐射、大气温度、土壤温度和水分。植被生长状况是影响柠条林地热储通 量各分量项季节和日变化的重要因素,并对能量闭合度产生影响。

关键词: 柠条; 涡度相关; 地表能量平衡; 黄土高原

Effects of heat storage on surface energy balance in *Caragana* forest land of northern Loess Plateau

SUN Shuchen¹, SHAO Ming'an^{2,3,4,*}

1 School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Yangling 712100, China

3 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Surface-energy balance has become a major and difficult problem in the study of surface land processes. The arbitrary neglect of terms for heat-storage flux is one of the main causes preventing closure of the energy balance during measurements or calculations. We analyzed the characteristics of the mean seasonal and daily variations of heat storage, and the influence of heat-storage flux on energy-balance closure, using eddy-covariance data for a *Caragana* stand in the wind-water erosion crisscross region of the northern Loess Plateau collected from August to October 2014 and April to June 2015. All terms for heat-storage flux of the *Caragana* stand varied considerably both seasonally and diurnally. The energy-balance closure increased at an average of 11.91% when the terms for heat-storage fluxes were included. The soil heat flux was the

收稿日期:2017-07-11; 网络出版日期:2018-00-00

基金项目:国家自然科学基金项目(41530854);国家自然科学基金项目(41571130081);聊城大学博士科研启动基金项目(318051748)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

largest contributor to the energy closure, accounting for 95.63% of the total heat-storage fluxes. The sum of the photosynthetic and atmospheric heat-storage fluxes accounted for less than 5% of the total fluxes, and photosynthesis contributed more than the atmosphere to perceptible heat storage. The latent heat-storage flux, however, decreased the energy-balance closure by 0.06%, indicating that the heat-storage flux should not be neglected when analyzing energy balances for the *Caragana* stands of the northern Loess Plateau. The heat-storage fluxes in the *Caragana* stand were influenced by solar radiation, air temperature, and soil temperature and soil moisture. The growing condition of the vegetation was another important factor that influenced the seasonal and diurnal variation of the terms for heat-storage flux, and which also affected energy closure.

Key Words: Caragana; eddy covariance; surface energy balance; Loess Plateau

地表能量平衡是地气间能量交换的基础与关键环节,反映了地气耦合过程中的能量纽带作用[1-2]。涡度 相关法作为测定地气间碳、水、热通量的标准方法[3],为研究全球气候变化提供了有效的观测数据[2]。因此, 涡度相关数据的可靠与否成为国内外学者关注的焦点。当前,基于能量平衡原理评价涡度相关数据的可靠性 已被国内外学者广泛接受[4-7]。然而,大量研究表明在利用涡度相关通量观测过程中,地表能量不闭合现象 普遍存在,能量不闭合率介于0.1—0.3之间[8-10],能量平衡方程中相关能量项的忽略是影响能量闭合度的重 要原因^[11-14],考虑热储通量后能量闭合度显著提高^[9,15-17]。Mayers等^[18]通过研究美国中西部玉米和大豆地 的能量平衡指出,大豆地热储通量占净辐射的比例为7%,而玉米地则为15%。高红贝等[17] 对黑河中游春小 麦热储通量的分析表明,热储通量占净辐射的7.5%—12%,0—5 cm 土壤热储通量在总热储通量中的贡献超 过95%;而大气热储通量对能量闭合度的贡献不足1%,光合作用热储通量占净辐射的比例介于0.17%-1.65%之间。Wilson 等^[10]的研究指出光合作用储能约占可利用能量的 1%—2%,且能量闭合度在下午某一时 段内出现"过闭合"现象。Dou 等^[19] 通过对热带雨林地表能量平衡的研究发现,在低温干燥季节 12 点前热储 通量占净辐射比例超过10%,最大可达38.8%;而在高温干燥季节均超过20%,最大可达54.3%。在森林生态 系统中加入热储通量后能量闭合度提高 5%—10%^[20-22]。岳平等^[23]通过对黄土高原半干旱区草地地表能量 通量的研究表明,0-5 cm 土壤热储通在草地生长季和非生长季对能量闭合度的贡献分别为11.3%和12.0%; 考虑空气、光合作用和土壤水分垂直输送热储存后,黄土高原自然植被区地表能量闭合度提高1.5%^[24]。因 此,不同生态系统中热储通量对能量闭合度的贡献存在较大差异,在分析能量平衡过程中热储通量是不可忽 视的。

黄土高原作为我国典型的气候敏感区和生态脆弱区,在该区域开展地表能量平衡特征分析,对于区域气候和全球变化研究具有重要意义。本文以黄土高原北部水蚀风蚀交错带柠条林地涡度相关通量观测数据为依据,结合土壤水分及微气象观测数据,对柠条林地(2014年8—10月和2015年4—6月,因5月底至6月初样地植被大面积破坏,自6月后未再对样地进行观测)热储通量变化特征进行分析,并探讨热储通量对能量闭合度的影响。

- 1 材料与方法
- 1.1 研究区概况

研究区地处黄土高原北部神木县六道沟小流域内(110°21′—110°23′E,38°46′—38°51′N,海拔1081— 1274 m),流域面积6.89 km²,北依长城,地处毛乌素沙地的边缘,是黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中 心。该区属中温带半干旱大陆性气候,年均气温8.4℃,月平均最低温-9.1℃(1月),冬季极端最低温 -28.1℃;月平均最高温23.7℃(7月),夏季极端最高温38.9℃。≥10°C积温3232°C,无霜期169天。全年日 照时数2836 h,年总太阳辐射5922 MJ/m²,年光合有效辐射2900 MJ/m²。多年平均降水量437 mm,其中6—9 月降水占全年降水的77.4%;降水年际变化大,年最大降水量819 mm(1967年),年最小降水量109 mm(1965 年)。秋末冬春盛行西北风,夏季盛行东南风。该区植被类型为灌丛草原,天然植被已被破坏殆尽,代而起之 的是以人工植被为主的退化草地和灌木林地。柠条、沙柳及沙蒿等灌木、半灌木植被在该区生态环境中占有 重要地位^[25]。

1.2 研究方法

试验区以 8—12 a 生柠条为主,间或有沙柳、沙蒿等植被,土壤质地为黄土,0—10 cm 平均土壤容重为 1.43 g/cm³。利用开路涡度相关系统测定柠条林地碳、水、热通量,安装高度为 2.2 m,采样频率为 10 Hz,采样 数据由数据采集器(CR3000, Campbell Scientific, Inc.)自动储存。利用土壤温度(Model 109ss, Campbell Scientific, Inc.)和水分(TDR)探头测定土壤温湿度,探头布设深度为 5、10、20、40、60 cm;土壤热通量由 2 块 相邻的土壤热通量版测定(HFP01-L, Campbell Scientific, Inc.),埋设深度为 5 cm。气象数据由微气象站获 取,观测内容包括大气温湿度(HMP15A, Vaisala, Inc.)和太阳辐射(CNR4, Kipp&Zonen, Inc. 荷兰),安装高度 1.5 m。上述数据由 CR1000(Campbell Scientific, Inc.)数据采集器自动记录。所有数据均为每 30 min 输出 一组。

1.3 数据处理

对涡度相关原始数据进行数据质量控制,详细过程见文献^[26]。

1.4 地表能量计算

根据能量守恒定律,生态系统能量平衡可表示为[17,19,27]:

$$R_n = LE + H + G + S + Q \tag{1}$$

式中, R_n 为净辐射,*LE*为潜热通量,*H*为感热通量,*G*为土壤热通量,可由涡度相关系统直接测定。*S*为总热储 通量,Q为与误差相关的通量的余项(通常忽略),单位均为 W/m^2 。因Q常忽略不计,式(1)可简化为:

$$R_n = G + H + LE + S \tag{2}$$

在能量平衡方程中,生态系统各组分热储能可表示为[17,27]:

$$S_s + S_a + S_a + S_p + S_p \tag{3}$$

式中, S_s 为一定深度范围内土壤热储能, S_a 为大气感热储能, S_q 为大气潜热储能, S_p 为植物光合热储能, S_v 为植 被冠层热储能,式中单位均为 W/m²。各热储能的计算方法如下:

S,表示地表到土壤热通量板之间的土壤热储能^[17,19,27],表示为:

S =

$$S_{s} = \int_{z_{p}}^{0} \frac{\partial}{\partial t} (C_{s} T_{s}) dz \cong C_{s} \frac{\Delta T_{s}}{\Delta t} z$$

$$\tag{4}$$

式中, C_s 为土壤比热(J kg⁻¹ K⁻¹),由公式(5)计算得到, ΔT_s 为相邻两次土壤温度差(\mathbb{C}), Δt 为相邻两次土壤 温度测定的时间差(s,取值 1800 s),z 为地表到土壤热通量之间的土层厚度(m)。 C_s 随土壤含水量的变化而 变化,确定体积含水量的土体的比热为:

$$C_s = \rho_b C_d + \theta_s \rho_w C_w \tag{5}$$

式中, ρ_b 表示土壤容重, C_d 表示干燥矿质土壤比热,取值 840 J kg⁻¹ K^{-1[28]}, θ_w 表示土壤体积含水量(cm³/cm³), ρ_w 表示水的密度(kg/m³), C_w 表示水的比热(J kg⁻¹ K⁻¹,取值 4.19×10³ J kg⁻¹ K⁻¹)。5 cm 土壤温度由温度探头 实测得到,表层土壤温度通过下式计算得出:

$$T_{surf} = \left[\frac{R\uparrow_{lw} - (1 - \varepsilon_g) R\downarrow_{lw}}{\varepsilon_g \sigma}\right]^{1/4}$$
(6)

式中, T_{surf} 表示地表 0 cm 土壤温度(℃), $R \uparrow_{lw}$ 表示向上的长波辐射(W/m²), ε_{g} 表示地表辐射率(取值 0.96), σ 表示 Stefan-Boltzmann 常数, 取值 5.67×10⁻⁸W/m², $R \downarrow_{lw}$ 表示向下的长波辐射(W/m²)。

S。是指由于空气温度变化而引起的大气储热的变化,由下式计算^[17,19,27]:

$$S_{a} = \int_{a}^{h_{e}} \rho \ C_{p} \ \frac{\partial T_{a}}{\partial t} dh \cong \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{n} \left(\rho \ C_{p} \Delta \ T_{ai} \Delta \ h_{i} \right)$$
(7)

式中, T_a 为近地大气温度(\mathcal{C}), $\partial T_a / \partial_i$ 为近地层大气温度变化率, ΔT_a 为第*i*层大气温度平均值, h_a 为涡度相关

安装高度, ρ为空气密度(kg/m³), C_p为大气比热(1.012×10³ J kg⁻¹ K⁻¹)。

S_a表示由空气中水汽量的变化而引起的大气热储能的变化,可表示为^[17,19,27]:

$$S_{q} = \int_{0}^{h_{e}} \rho \, \frac{C_{P}}{\gamma} \frac{\partial e}{\partial t} dh \approx \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\rho \, C_{P}}{\gamma} \Delta \, e_{i} \Delta \, h_{i} \right)$$
(8)

式中, ρ 为空气密度(kg/m³), C_p 为大气比热, γ 为干湿表常数(Pa/K),e为水汽压(Pa), Δt 为相邻2次观测时 差。 Δh_i 表示相邻2套涡度相关观测设备的高度差。

S。仅发生在有太阳辐射条件下,夜晚S。为0,表示为[17,19,27]:

$$S_p = -F_c C \tag{9}$$

式中, F_c 表示 CO₂通量(mg m⁻² s⁻¹),由涡度相关系统直接测定,C 表示光合作用能量转化参数,取值 11.2 W mg⁻¹ s^{-1[19,27]}。

*S*_{*x}*表示存储于作物冠层叶片和茎秆的净辐射能量,在低矮稀疏植被条件下可忽略^[17]。本研究中因植被 盖度较小且缺乏相关观测数据,未对 *S*_{*x*}做计算。</sub>

2 结果与分析

2.1 柠条林地大气温度、土壤温度与含水量日变化特征

由图 1 可知,观测期内柠条林地日均大气温度(T_a)具有明显的季节变化趋势,受太阳辐射的影响, T_a 在 4—6月呈逐渐增加的趋势,而在 8—10月呈逐渐降低的趋势。受 T_a 影响,5 cm 土壤温度(T_s)与 T_a 表现出一 致的变化规律,两者可用线性关系表示(2014年: T_s =0.8456 T_a +2.9307, R^2 =0.8558;2015年: T_s =0.9597 T_a + 3.6113, R^2 =0.8297)。两个观测期内,平均 T_a 和 T_s 分别为14.79℃、15.44℃(8—10月)和17.61℃、20.51℃ (4—6月)。受降水影响,5 cm 土壤含水量(*SWC*)呈现有规律的波动变化,在 8—10月份受雨季结束的影响, *SWC* 在波动中下降;4—6分,雨季尚未来临,而太阳辐射逐渐增强,*SWC* 逐渐降低。



图 1 柠条林地日均大气温度 (T_a) 、5 cm 土壤温度 (T_s) 和土壤含水量(SWC)变化特征



2.2 柠条林地热储通量季节变化特征

由图 2 可知, 柠条林地日均大气感热存储通量(*S_a*)在-0.3—0.3 W/m²之间变化, 正负值交替出现。对各 月 *S_a*日值取平均,结果见表 1。在 4 和 6 两个月 *S_a*表现为正直, 表明大气吸收热量;其余月份则表现为释放热 量。0—5 cm 日均土壤热储通量(*S_s*)与 *S_a*表现出相似的变化规律, 日均 *S_s*呈先降低后增加的趋势变化。在柠 条生长季(8—10 月)日均 *S_s*为负值, 表现为释放热量; 而在生长初期(4—5 月)表现为吸收热量, 但 5 月日均 *S*_s明显低于4月。受植被覆盖度下降的影响,6月日均*S*_s明显大于5月。*S*_a和*S*_s均表现出在植被覆盖度较高时波动较小,而在植被覆盖度较低时波动幅度较大。原因在于不同植被覆盖度对地-气间温差变化影响不同,加速或减缓冠层内部大气及土壤温差变化,*S*_a和*S*_s亦随之发生变化。



图 2 柠条林日均大气感热 (S_a) 和潜热 (S_q) 储能、土壤热储能 (S_s) 及光合作用热储能 (S_p) 变化特征

Fig.2 The variation characteristic of daily mean air sensible heat (S_a) and latent heat (S_q) storage, soil heat storage (S_q) and photosynthesis heat storage (S_n) of *Caragana* forest

表1 柠条林各月日均 $(\pm SD)$ 感热储量 (S_a) 、潜热储量 (S_g) 、土壤热储量 (S_s) 和光合作用热储量 (S_p)

Table 1 The daily mean air sensible heat (S_a) and latent heat (S_q) storage, soil heat storage (S_q) and photosynthesis heat storage (S_p) in each month of *Caragana* forest

时间 Time	感热储量 S _a Sensible heat storage /(W m ⁻² d ⁻¹)	潜热储量 S _q Latent heat storage /(wm ⁻² d ⁻¹)	土壤热储量 S _s Soil heat storage /(W m ⁻² d ⁻¹)	光和热储量 S _p Photosynthetic heat storage /(W m ⁻² d ⁻¹)
2014-08	-0.012±0.111	0.096±0.136	-0.327 ± 5.082	0.889±0.127
2014-09	-0.004 ± 0.061	-0.001 ± 0.163	-0.158 ± 2.950	0.871 ± 0.153
2014-10	-0.006 ± 0.072	-0.001 ± 0.112	-0.206 ± 3.693	0.397 ± 0.207
2015-04	0.038 ± 0.085	0.005 ± 0.042	2.062 ± 4.494	0.366 ± 0.123
2015-05	-0.003 ± 0.113	0.014±0.133	0.933 ± 5.906	0.643 ± 0.213
2015-06	0.011±0.115	0.027±0.157	6.207±6.324	0.556 ± 0.181

柠条林地日均大气潜热存储通量(*S_q*)表现出明显的季节变化规律,随着柠条生育期的推进呈先增加后降低的趋势变化。在柠条生长季波动较大(5、8—9月),其值在-0.4—0.5 W/m²之间波动;而在柠条生长初期(4月)和末期(10月)日变化波动幅度较小(图 2a, b;表 1)。主要是由于随柠条生育期的推进,净辐射增

加,土壤蒸发和植物蒸腾作用增强使大气中水汽含量增加,且在柠条生育期降水较多进一步促进了大气中水 汽含量的增多,S_q随之增加。而在柠条生育末期,柠条叶片衰老并干燥化,在净辐射减少的情况下,植被蒸腾 和土壤蒸发作用降低,导致大气中水汽含量下降最终使S_q减少。在植被遭受大面积破坏后(6月)S_q变化幅度 在前期较大,后期略有降低,但日均S_q仍高于5月份(表1)。主要是由于在植被破坏初期,土壤裸露导致土壤 蒸发强烈使大气中水汽含量增加,而随土壤水分的下降,土壤蒸发趋于稳定。虽然植被覆盖度的下降导致植 物总蒸腾作用减弱,但在净辐射和降水增加的共同作用下,相比5月份S_q升高。

由图 2d 可知, 柠条林地日均光合作用热储通量(*S_p*)表现出明显的季节变化规律, 随柠条生育期的推移, *S_p*呈先增加后降低的趋势, 日均 *S_p*在 0—1.4 W/m²之间波动。6 月因植被破坏导致总光合作用减弱, 与5 月相 比日均 *S_p*降低(表 1)。

2.3 柠条林地热储通量日变化特征

2.4 柠条林地地表能量平衡特征

由图 3 可知, 柠条林地各月 *S_a*、*S_a*和 *S_p*均表现出明显的日变化规律。*S_a*和 *S_s*日变化均呈"单峰型", 随着柠条生育期的推进, 日变化幅度呈先降低后增加的趋势变化, 最大为 4 月, 最小为 8 月。但 *S_s*日变化范围远大于 *S_a*, *S_s*日变化幅度介于-91.96—120.04 W/m²之间, 而 *S_a*仅为-1.11—1.80 W/m²。白天, 日出后随太阳辐射的增强, 气温和地温快速升高, *S_a*和 *S_s*增加迅速, 在 8:00—10:00 期间达到日最大值; 随后逐渐降低, 在 19:00前后达到日变化的最小值, 而后逐渐升高。夜间, 因无太阳辐射, 大气和土壤不断释放热量, *S_a*和 *S_s*表现为负值。6 月份 *S_a*和 *S_s*日变化幅度略有增加, 主要是由于植被遭受大面积破坏, 植被覆盖度降低, 大气和土壤

*S*_q日变化曲线波动剧烈,但仍表现出较为明显的"双峰型"日变化规律(图 3b)。第一个峰值出现在 7:00—8:00,之后随着太阳辐射的不断增强,大气温度增加导致大气中水汽含量降低,在 11:00—13:00 之间 降至日变化的最小值,随后 *S*_q又逐渐上升,在 17:00—19:00 之间达到日变化的第二个峰值。*S*_q日变化幅度随 着柠条生育期的推进表现为先增大后减小的趋势变化,8 月份达到最大,其值介于-0.69—0.84 之间;4 月份最 小。与 5 月份相比,6 月份 *S*_q日变化幅度略有降低,主要是由于植被遭受大面积破坏,植被覆盖度明显降低所 致。表明,植被覆盖度的大小对 *S*_q日变化特征有较大影响。

受太阳辐射及柠条生长状况的影响,柠条林地夜间 S_p为 0(图 3d)。日出后随太阳辐射的不断增强,S_p逐 渐增加,在 11:00—13:00 之间达到日变化的最大值;之后随太阳辐射减弱,S_p随之下降。随柠条生育期的推 移 S_p日变化幅度呈先增加后降低的趋势变化,与柠条生长季表现出很好的一致性。由于植被遭受大面积破 坏导致 6 月份 S_p略低于 5 月份,但仍高于 4 月份,说明植被状况对 S_p变化具有重要影响。

图 4a、b 反映了未考虑热储通量的柠条林地地表能量平衡特征。由图可知,两个观测期内能量闭合的散 点图绝大多数位于 1:1 线的下方,且 4—6 月份(图 4b)偏离 1:1 线的程度大于 8—10 月份(图 4a)。结合线性 拟合关系表明,8—10 月份能量闭合度高于 4—6 月份。可能是由于 8—10 月份柠条林地植被覆盖度较大,而 在 4—6 月份柠条处于生长初期植被覆盖度较低,且在 5 月底 6 月初柠条林地遭受大面积破坏,植被覆盖度进 一步降低,从而造成能量闭合度的差异。此外,观测期内 *T_a*和 *T_s*的较大差异也是造成能量闭合度存在差别的 重要原因。考虑热储通量(*S*)后(图 4c,d),柠条林地能量闭合的散点图向 1:1 线集中,然而散落在 1:1 线下方 的比例仍较高,且 4—6 月份的偏离程度仍然大于 8—10 月份。同时,考虑 *S* 后,柠条林地地表能量闭合度显 著提高,提高幅度分别为 14.37%(8—10 月,图 4c)和 9.45%(4—6 月,图 4d),平均提高幅度为 11.91%。结果 表明,地表覆盖条件、*T_a*和 *T_s*等的变化对热储通量在能量闭合度中所占比重有重要影响。

由表2可知,在各热储通量中*S*_s对能量闭合度的贡献最大,其值介于9.04%—13.73%之间;其次为*S*_p,但 与*S*_s相比较小,其贡献不足0.5%;*S*_a略小于*S*_p,其值在0.21%—0.24%之间变化。然而,*S*_q则在一定程度上降 低了能量闭合度,其降低幅度分别为0.05%和0.06%。因此,在分析地表能量平衡过程中,热储通量项不可 忽略。



图 3 柠条林各月感热 (S_a) 、潜热 (S_a) 、土壤热 (S_s) 和光合作用 (S_p) 热储量日变化特征

Fig.3 Diurnal variation of air sensible heat (S_a) and latent heat (S_q) storage, soil heat storage (S_q) and photosynthesis heat storage (S_p) in each month of *Caragana* forest

以上分析表明,虽然在加入热储通量项后柠条林地 能量闭合度得到了显著提高,但是仍有约11%—20%的 能量不闭合;且热储通量对能量闭合度的提高幅度受植 被生长状况及植被覆盖度的影响。

3 结论与讨论

本研究通过对黄土高原北部水蚀风蚀交错带柠条 林地热储通量变化特征及其对地表能量平衡特征的影 响进行分析,结果表明:

(1) 柠条林地各热储通量均表现出明显的季节和 日变化特征。受太阳辐射及柠条生长状况影响, S_a和 S_s 在柠条生长中期较低, 在柠条生长初期和末期较高; 而 S_q和 S_p则表现出与 S_a和 S_s相反的趋势。S_a、S_s和 S_p在柠 条不同生长阶段日变化均表现出明显的"单峰型", 日 变化峰值出现时间在柠条不同生长阶段无明显差异; 而 S_q日变化则表现为"双峰型", 且受柠条生长状况及太 阳辐射强度的影响, 其峰值出现时间略有差异。黄土高

表 2 柠条林地各热储通量项对能量闭合度的贡献



热储通量项 Heat storage fluxes	热储通量对能量闭合度的贡献 Contribution of heat storage flux to energy closure/%	
ficat storage fluxes	柠条 Caragana(2014)	柠条 Caragana(2015)
大气感热储能 S _a Atmospheric heat storage	0.24	0.21
大气潜热储能 S _q Atmospheric latent heat storage	-0.05	-0.06
土壤热储能 S _s Soil heat storage	13.73	9.04
光和热储能 S _p Photosynthesis heat storage	0.46	0.26
总热储通量 S Total heat storage	14.37	9.45



图 4 柠条林地地表能量平衡特征 Fig.4 The characteristic of surface energy balance of *Caragana* forest

原气候条件与植被状况是影响各热储通量项季节和日变化的主要因素。

(2)在能量平衡方程中加入热储通量项后能够显著提高柠条林地地表能量闭合度,平均提高幅度为 11.91%,但仍然约有 11%—20%的能量不闭合。这一结果与其他研究报道一致,生态系统能量不闭合率在各 生态系统中普遍存在,且考虑热储通量后能量不闭合率在 10%—30%之间变化^[14,17-19]。对于这部分能量损 耗,影响因素包括涡度相关系统的采样误差、湍流的水平和垂直平流输送损失、能量滞后等^[10,12,29]。虽然本 研究中发现 *S*_s对能量闭合度的贡献较大,分别为 9.04%(2014 年)和 13.73%(2015 年)。然而,由于土壤热通 量的测定与能量平衡方程中其他各项的测定不在同一平面上且随着土壤深度的增加而延迟,在将土壤热通量 换算到地表时所引起的滞后也将导致能量闭合度的下降^[29-31]。*S*_a和 *S*_p对能量闭合度的贡献不足 1%,且 *S*_p占 净辐射的比例小于 0.5%,低于 Wilson 等^[10]研究指出的 *S*_p占净辐射的 1%—2%,表明黄土高原柠条林地比已 有的陆面过程研究的光合作用热存储能力弱。此外,本研究发现 *S*_q在一定程度上降低了能量闭合度,平均降 低幅度约为 0.06%,这与高红贝等^[17]在黑河绿洲农田的研究结果 *S*_q可提高能量闭合度的 0.06%—0.18%不尽 相同。产生以上结果的原因可能与黄土高原特殊的气候条件和稀疏的植被状况及较低的土壤含水量有关,其 原因有待于进一步深入研究。

(3) 植被生长状况及植被覆盖度是影响柠条林地热储通量季节和日变化的重要因素,并对能量闭合度产 生影响。植被覆盖度的变化将导致地表反照率、粗糙度等地表属性发生变化,引起地表净辐射重新分配^[32]。 一方面,在植被覆盖度较大时,表层土壤接收到的太阳辐射少,地-气间温差亦较小,*S*_a和 *S*₃处在较低水平;同 时,植被蒸腾作用强烈,导致大气中水分含量增加,*S_q*随之增加,*S_p*亦较大。另一方面,在植被覆盖度较低时导 致表层土壤水分略增而根层以下土壤水分减少^[33],使土壤表面阻抗和灌层叶片阻抗增加^[32],植物蒸腾释放 到大气中的水分含量降低,从而降低*S_q*,*S_p*亦较小;此外,植被覆盖度降低使表层土壤接收到的太阳辐射能增 *多*,地-气间温差加大,*S_s和 S_a*随之增加。植被生长状况主要是通过对地表净辐射的再分配影响各热储通量项 的大小,从而对地表能量闭合度产生影响。

本文虽然证实了大气感热和潜热存储通量、光合作用热储通量及土壤热储通量对能量平衡具有一定的贡献,但仍然存在较大的能量不闭合现象。因此,如何提高不同下垫面条件下涡度相关站点的能量闭合度,进而 提高涡度相关系统观测数据的质量与可靠性仍是国内外学者需要进一步深入研究的重点和难点问题。

参考文献(References):

- [1] 乔娟, 张强, 张杰. 非均匀下垫面陆面过程参数化问题研究进展. 干旱气象, 2008, 26(1): 73-77.
- [2] 李英, 卢萍, 丁红英, 贺南, 郑丽英. 成都平原农田下垫面地表通量特征及能量平衡分析. 高原山地气象研究, 2013, 33(1): 35-40.
- [3] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future.
 Global Change Biology, 2003, 9(4): 479-492.
- [4] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, Rannik Ü, Moncrieff J, Foken T, Kowalski A S, Martin P H, Berbigier P, Bernhofer C, Clement R, Elbers J, Granier A, Grünwald T, Morgenstern K, Pilegaard K, Rebmann C, Snijders W, Valentini R, Vesala T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. Advances in Ecological Research, 1999, 30: 113-175.
- [5] 温学发,于贵瑞,孙晓敏.基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂交换量中的不确定性.地球科学进展, 2004, 19(4): 658-663.
- [6] 刘渡,李俊,于强,同小娟,欧阳竹. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5309-5317.
- [7] Anderson R G, Wang D. Energy budget closure observed in paired eddy covariance towers with increased and continuous daily turbulence. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 204-209.
- [8] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. Science, 1996, 271(5255): 1576-1578.
- [9] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, Longdoz B, Yernaux M, Laitat E. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108(4): 293-315.
- [10] Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [11] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 121-144.
- [12] Foken T. The energy balance closure problem: an overview. Ecological Applications, 2008, 18(6): 1351-1367.
- [13] 王介民,王维真,刘绍民,马明国,李新.近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析.地球科学进展,2009,24(7):705-713.
- [14] Lindroth A, Mölder M, Lagergren F. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. Biogeosciences, 2010, 7(1): 301-313.
- [15] Stoy P C, Katul G G, Siqueira M B S, Juang J Y, Novick K A, Uebelherr J M, Oren R. An evaluation of models for partitioning eddy covariancemeasured net ecosystem exchange into photosynthesis and respiration. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 141(1): 2-18.
- [16] 徐自为,刘绍民,徐同仁,丁闯.不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究.地球科学进展,2013,28(8): 875-889.
- [17] 高红贝,邵明安.黑河中游绿洲春小麦生育期农田热储通量分析.灌溉排水学报, 2015, 34(5): 33-40, 90-90.
- [18] Meyers T P, Hollinger S E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125(1/2): 105-115.
- [19] Dou J X, Zhang Y P, Yu G R, Zhao S J, Wang X, Song Q H. A preliminary study on the heat storage fluxes of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(S2): 163-173.
- [20] Kidston J, Brümmer C, Black T A, Morgenstern K, Nesic Z, McCaughey J H, Barr A G. Energy balance closure using eddy covariance above two different land surfaces and implications for CO₂ flux measurements. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 136(2): 193-218.
- [21] Li Y, Liu S H, Wang S, Miao Y C, Chen B C. Comparative study on methods for computing soil heat storage and energy balance in arid and semiarid areas. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(2): 308-322.

- [22] Eder F, De Roo F, Kohnert K, Desjardins R L, Schmid H P, Mauder M. Evaluation of two energy balance closure parametrizations. Boundary-Layer Meteorology, 2014, 151(2): 195-219.
- [23] 岳平,张强,杨金虎,李宏宇,孙旭映,杨启国,张建忠.黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率.生态学报,2011,31(22): 6866-6876.
- [24] 李宏宇, 张强, 王春玲, 阳伏林, 赵建华. 空气热储存、光合作用和土壤垂直水分运动对黄土高原地表能量平衡的影响. 物理学报, 2012, 61(15): 159201.
- [25] 霍竹, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带沟岸灌木林地土壤水分变化. 农业工程学报, 2005, 21(6): 45-49.
- [26] Sun S C, Shao M A, Gao H B. Energy and CO₂ exchanges and influencing factors in spring wheat ecosystem along the Heihe River, northwestern China. Journal of Earth System Science, 2016, 125(8): 1667-1679.
- [27] Oliphant A J, Grimmond C S B, Zutter H N, Schmid H P, Su H B, Scott S L, Offerle B, Randolph J C, Ehman J. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 126(3/4): 185-201.
- [28] Hanks R J. Applied Soil Physics: Soil Water and Temperature Application. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 159-159.
- [29] 朱岩, 左洪超, 郭阳, 武建军. 黄土高原半干旱区异常能量闭合率特征分析. 干旱气象, 2014, 32(5): 719-726.
- [30] Gao Z Q, Fan X G, Bian L G. An analytical solution to one-dimensional thermal conduction-convection in soil. Soil Science, 2003, 168(2): 99-107.
- [31] 岳平,张强,牛生杰,成华,王西育.半干旱草原下垫面能量平衡特征及土壤热通量对能量闭合率的影响. 气象学报, 2012, 70(1): 136-143.
- [32] 刘振元,张杰,陈立.青藏高原植被退化对高原及周边地区大气环流的影响. 生态学报, 2018, 38(1), doi: 10.5846/stxb201412222548.
- [33] 张法伟,郭竹筠,李以康,林丽,周国英,曹广民.青海湖芨芨草干草原植被退化对土壤温湿特征的影响.干旱区研究,2013,30(2): 219-225.