

基于涡度系统的干旱区枣林能量平衡分析

乔英, 张百和*, 邱凯, 王腾飞

(新疆理工学院, 新疆 阿克苏 843100)

摘要: 【目的】揭示干旱区枣林的能量循环与能量变化规律。【方法】利用涡度相关法得到干旱区枣林连续 2 a 的通量数据, 分析了能量变化规律、分配方式以及热存储项能量的日平均变化规律。【结果】①干旱区枣林生态系统的净辐射 R_n 、潜热通量 LE 、显热通量 H 、土壤热通量 G 在各月份的日均值变化均呈以净辐射变化规律为基础的单峰变化。②干旱区枣林 2018 年和 2019 年的整年度 30 min 尺度能量闭合率为 73.45%、73.11%, 计入热存储项后, 能量闭合率分别提高了 3.72%、2.75%, 达到了 77.17%、75.86%。③干旱区枣林的土壤热存储项日均值在生育期和休眠期变化规律相似; 潜热热存储项和显热热存储项在生育期和休眠期变化规律不同; 光合热存储项和冠层热存储项在休眠期均为 0, 但在生育期有典型的日变化。【结论】热存储项对干旱区枣林生态系统的能量平衡闭合程度贡献不大, 干旱区枣林的能量分配方案受水分条件、植被类型和气候特征的影响。

关键词: 干旱区; 枣林; 涡度相关法; 能量平衡

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023061

OSID: 

乔英, 张百和, 邱凯, 等. 基于涡度系统的干旱区枣林能量平衡分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 41-47, 62.

QIAO Ying, ZHANG Baihe, QIU Kai, et al. Using Eddy Covariance Method to Analyze Energy Balance of Jujube Orchard in Arid Areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 41-47, 62.

0 引言

【研究意义】生态系统中地表能量是陆-气之间能量和物质传输、转化的基础, 也是生态系统中一切过程和功能的动力, 而地表能量研究的核心问题是以太阳能输入为驱动的有机化学能循环及能量交换规律^[1]。所以, 深入探究生态系统的能量循环规律, 不仅有助于了解区域气候系统的能量和物质循环以及气候变化过程^[2], 而且还为维持生态系统的能量和水碳循环提供重要的科学依据^[3]。【研究进展】能量平衡闭合率 (Energy balance ratio, EBR), 表示为生态系统的地表有效能量 (潜热通量 LE +显热通量 H) 与可利用能量 (净辐射 R_n +土壤热通量 G) 的比值^[4], 国内外学者们深入分析了多种生态系统的能量平衡, Wilson 等^[4]对 FLUXNET 的 22 个通量站的 50 个站点年进行能量平衡分析, 结果显示 EBR 在 53%~99% 之间, 平均值为 79%; 李正泉等^[5]对 ChinaFLUX 的 8 个通量站进行能量平衡分析, 结果显示 EBR 平均约

为 73%。国内外学者们的研究结果均显示地表的能量均无法闭合, 能量平衡闭合率均在 52%~99% 之间^[4-8], 生态系统种类包括落叶阔叶林^[9]、农田生态系统 (稻麦轮作)^[10]、干旱区人工柠条林^[11]、热带季雨林^[12]等。

目前, 涡度协方差技术 (Eddy covariance technique, EC) 作为监测生态系统能量交换过程的最有效、最准确的方法, 已经得到了微气象学家和生态学家们的认可, 成为检验其他测定方法、评价各类模型模拟精度的标准方法^[13]。枣树因耐旱、喜光照、结果早, 兼顾经济和生态效益^[14]被成功引进新疆, 目前种植面积已达 50 万 hm^2 , 成为新疆特色经济林果业的支柱^[15]。阿克苏地区枣树的种植面积 (占全疆 34.34%) 和产量 (占全疆 54.70%) 均为新疆首位^[15]。

【切入点】当前国内外学者对农田生态系统的研究多为一年生作物, 对于人工经济林的研究相对较少, 干旱区枣林生态系统的能量平衡分析及各能量分项的变化规律还需进一步探索。

【拟解决的关键问题】综上, 本文以干旱区人工枣林生态系统为研究对象, 利用涡度相关系统在田间开展 2 a 的观测试验, 采用 REddyProc 包^[16]插补通量缺失数据, 计算干旱区人工枣林的热存储项, 评价枣林能量平衡闭合率, 并量化和分析枣林生态系统的能量变化规律和能量分配规律, 为干旱区枣林的水碳循环研究和优化水碳管理模式提供参考。

收稿日期: 2023-02-23 修回日期: 2023-05-04 网络出版日期: 2023-05-18
基金项目: 高校科研计划项目 (XJEDU2022P135); “两山理论与南疆高质量发展绿色发展研究中心” 科研项目 (JDZD202202); 新疆理工学院高层次人才项目 (XJLG2022G001)

作者简介: 乔英 (1983-), 女, 陕西凤翔人。讲师, 博士, 主要研究方向为干旱区人工林水碳。E-mail: xndns024@126.com

通信作者: 张百和 (1966-), 男, 江苏徐州人。农艺师, 硕士, 主要研究方向为农业农村经济学。E-mail: 1260685120@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆阿克苏市农业示范园 (80°18'—80°22'E, 41°05'—41°07'N, 海拔 1 198 m), 面积约 170 hm²。研究区气候干旱少雨属温带沙漠气候, 年均太阳总辐射量 5 671.36 MJ/m², 年均日照时间 2 911 h, 年均降水量 68.40 mm, 年均气温 11.20 °C, 年均蒸发量 1 993 mm^[17]。研究区土壤质地为砂土, 砂粒量 87.27%, 土壤密度为 1.63 g/cm³, 田间持水率为

8.93%, 地下水埋深大于 10 m。试验作物为枣树, 品种为灰枣, 株行距 2 m×4 m, 冠层高度为 (4±0.2) m^[18]。枣树每年 4 月 10 日—10 月 20 日为生育期, 10 月 21 日—次年 4 月 9 日为休眠期。

1.2 试验方法

1.2.1 数据采集

实验仪器有涡度相关系统 (IRGASON 型一体机)、四分量辐射计 (CNR4 型)、土壤温度计 (TCAV 型)、土壤热通量板 (HFP01 型)、土壤水分探头 (Hydra Probe II 型)、数据采集器 (CR3000 型)^[14], 详见表 1。

表 1 阿克苏站点实验仪器汇总

Table 1 Summary of experimental instruments at the Aksu site

测定项目	实验仪器及型号	厂家及产地	测量指标	数据采集频率	安装位置/m
能量通量	IRGASON	Campbell Scientific, 美国	能量通量	10 Hz	6.0
太阳辐射	CNR4	Campbell Scientific, 美国	入射长波、短波, 反射长波、短波	30 min	5.5
土壤温度	TCAV	Campbell Scientific, 美国	土壤温度	30 min	- (0.06, 0.08)
地表温度	HFP01	Campbell Scientific, 美国	土壤热通量	10 s	-0.08
土壤水分	Hydra Probe II	Stevens, 芬兰	土壤含水率	30 min	-0.025, -0.25, -0.50, -0.75, -1.00
数据采集	CR3000 型	Campbell Scientific, 美国	数据采集	30 min	1.5

1.2.2 通量数据计算及数据插补质量控制

使用软件 LoggerNet 4.5 (Campbell Science Inc, USA) 按照标准数据质量控制程序在线计算^[19], 并根据稳态测试、完整湍流特征、超声风速仪的水平定位等, 按照微气象学经验将数据质量划分为 0~9 级^[14]。根据数据质量分级, 将质量差的数据删除并使用 R 语言的 REddyPrco 包^[16]进行数据插补, 并采用交叉验证法来评价插补数据的质量^[14]; 同时, 使用能量闭合率来检验插补数据质量。

选择 2018 年和 2019 年的 30 min 尺度数据, 采用 Kljun 等^[20]和 Kormann 等^[21]的源区模型计算阿克苏站点的通量贡献区, 90% 的贡献区 (通量源区) 的圆形半径分别为 356.50、350.00 m。

1.2.3 能量平衡计算

根据能量守恒定律, 生态系统能量平衡可用式 (1) 表示^[22], 其中的热储存项 S 可用式 (2) 表示^[23], 热储存项的计算方法参见 Dou 等^[24]文献计算。能量平衡闭合率 (Energy balance ratio, EBR) 是指地表有效能量 (潜热通量 LE + 显热通量 H) 与可利用能量 (净辐射 R_n - 土壤热通量 G) 之比^[25], EBR 可用式 (3) 计算^[26]。为了提高能量平衡闭合率, 很多研究也将热储存项 S 记入可利用能量中, EBR 可用式 (4) 计算^[26]。

$$R_n - G = H + LE + Q + S, \quad (1)$$

$$S = S_s + S_a + S_e + S_c + S_p + S_t, \quad (2)$$

$$EBR = [\Sigma (H + LE) / \Sigma (R_n - G)] \times 100\%, \quad (3)$$

$$EBR = [\Sigma (H + LE) / \Sigma (R_n - G - S)] \times 100\%, \quad (4)$$

式中: R_n 为太阳净辐射 (W/m^2); G 为土壤热通量 (W/m^2); H 为显热通量 (W/m^2); LE 为潜热通量 (W/m^2); S 为热储存项 (W/m^2); Q 为其他来源

的能量 (忽略不计, W/m^2); S_s 为一定深度范围内的土壤热储存项 (W/m^2); S_a 为大气显热储存项 (W/m^2); S_e 为大气潜热储存项 (W/m^2); S_c 为冠层热储存项 (W/m^2); S_p 为植物光合储存项 (W/m^2); S_t 为树木枝干热储存项 (W/m^2)^[23]。

2 结果与分析

2.1 气温、降水量和灌溉量的变化情况

观测期 (2018、2019 年) 日平均气温、降水量、灌溉量如图 1 所示。观测期间, 日平均气温在 -12.72~29.16 °C 之间变化, 年平均气温为 10.99 °C, 其中月平均气温最低出现在 2018 年 12 月 (-8.36 °C) 和 2019 年 1 月 (-8.45 °C), 月平均气温最高出现在 2018 年 7 月 (24.07 °C) 和 2019 年 7 月 (24.74 °C), 6—8 月的月平均气温在 20 °C 以上。降水集中在 4—10 月 (生育期) 内, 2018、2019 年年降水量分别为 81.50、57.40 mm, 单日最大降水量为 13.20 mm。灌溉集中在 4—10 月, 2018、2019 年灌溉量分别为 847.15 mm (灌溉 31 次)、848.25 mm (灌溉 30 次)。

2.2 能量通量值

使用 REddyPrco 包插补后的通量数据及式 (2) 计算了干旱区枣林的能量分项, 详见表 2。由表 2 可知, 2018、2019 年净辐射 R_n 年度合计为 1 475 227.47、1 481 026.93 W/m^2 , 在生育期明显大于休眠期; 2018、2019 年潜热通量 LE 年度合计为 898 349.68、922 381.08 W/m^2 , 潜热通量主要集中在枣树生育期, 在休眠期较小; 2018、2019 年显热通量 H 年度合计为 205 778.37、183 786.36 W/m^2 , 主要集中在休眠期, 在生育期较小; 2018、2019 年土壤热通量 G 年度合计为 -15 839.17、

-13 877.22 W/m^2 ，在生育期为正，休眠期为负；且 R_n 、 LE 、 H 、 G 在 2018 年和 2019 年情况相似。由表 2 可知，显热热储存项 S_a 为 S 中的最大项，2018、2019 年 S_a 年度合计分别为 22 053.05、17 847.04 W/m^2 ，占净辐射 R_n 的 1.49%、1.21%；其次是植物光合热储

能 S_p ，2018、2019 年 S_p 年度合计分别为 13 153.85、11 345.06 W/m^2 ，占净辐射 R_n 的 0.89%、0.77%；土壤热储存项 S_s 、冠层热储存项 S_c 、潜热热储存项 S_e 在 2018 年和 2019 年的年度合计均较小。

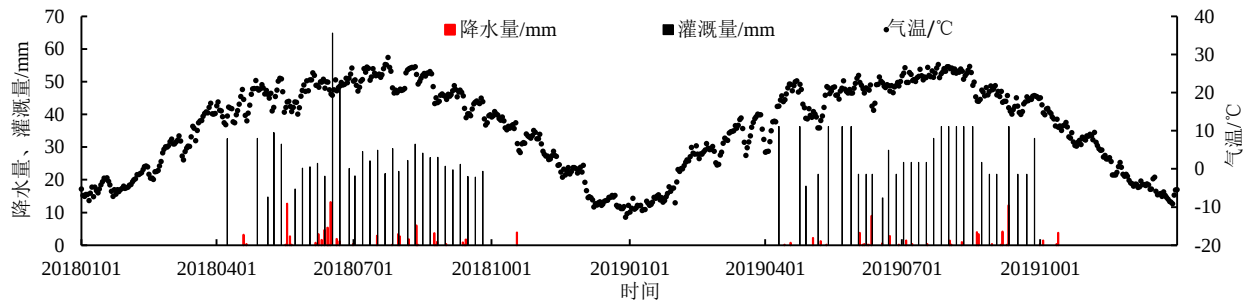


图1 研究区2018年和2019年气温、降水量及灌溉量

Fig.1 Distribution of temperature, precipitation and irrigation of the study area in 2018 and 2019

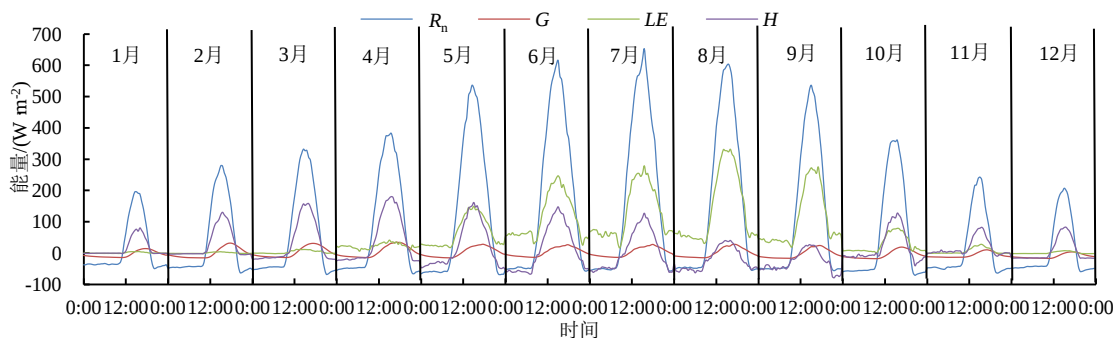
表2 干旱区枣林的能量分项

指标	2018 年			2019 年		
	整年度	生育期	休眠期	整年度	生育期	休眠期
净辐射 R_n	1 475 227.47	1 235 701.50	239 525.97	1 481 026.93	1 227 322.48	253 704.46
土壤热通量 G	-15 839.17	11 693.86	-27 533.03	-13 877.22	5 303.33	-19 180.54
潜热通量 LE	898 349.68	877 558.90	20 790.78	922 381.08	888 379.49	34 001.59
显热通量 H	205 778.37	36 397.68	169 380.69	183 786.36	38 944.21	144 842.15
土壤热储存项 S_s	-266.85	-517.49	250.64	155.78	-407.04	562.82
光合热储存项 S_p	13 153.85	11 345.06	0.00	11 345.06	11 345.06	0.00
冠层热储存项 S_c	5 738.69	5 738.69	0.00	4 630.17	4 630.03	0.14
潜热热储存项 S_e	2 897.16	2 893.91	3.25	3 168.69	3 159.33	9.36
显热热储存项 S_a	22 053.05	19 143.01	2 910.04	17 847.04	17 595.64	251.41

2.3 能量通量的月平均日变化特征

2018、2019 年 REddyProc 插补后的能量通量（净辐射 R_n 、潜热通量 LE 、显热通量 H 、土壤热通量 G ）的月平均日变化规律见图 2。由图 2 可知， R_n 、 LE 、 H 、 G 的月平均日变化均呈单峰变化趋势，2018 年和 2019 年各月的能量变化趋势相似。 R_n 、 LE 、 H 、 G 在白天为正，夜间为负，正负转换的交点与白昼变化的时间一致。各月 R_n 的最小值均为负，在 -74.16~-47.51 W/m^2 之间波动； R_n 在夜间为负值，在白天为正值，说明在夜间地表损失热量，而在白天吸收热量。2018 年 R_n 的最大值为 653.05 W/m^2 ，出现在 7 月；2019 年 R_n 的最大值为 638.98 W/m^2 ，出现在 6 月；2 a 最大值均出现在 15:30。2018 年和 2019 年 LE 的最大值

均出现在 8 月，最大值分别为 331.85、290.20 W/m^2 ，且最大值出现时间和 R_n 一致，均在 15:30。 LE 在生育期明显大于休眠期，在 5—9 月， LE 为 R_n 的主要分配项。 H 在 2018 年和 2019 年的变化幅度相似，在 -80.51~180.45 W/m^2 之间波动，2018 年 H 的最大值为 180.45 W/m^2 ，出现在 4 月；2019 年 H 的最大值为 165.06 W/m^2 ，出现在 5 月。 H 在 1—4 月和 10—12 月为 R_n 的主要分配项。 G 在 2018 年和 2019 年的变化幅度相似，在 -24.09~71.16 W/m^2 之间波动，2018 年 G 的最大值为 34.52 W/m^2 ，出现在 4 月；2019 年 G 的最大值为 71.16 W/m^2 ，出现在 3 月； G 占 R_n 的比值较小。



(a) 2018年

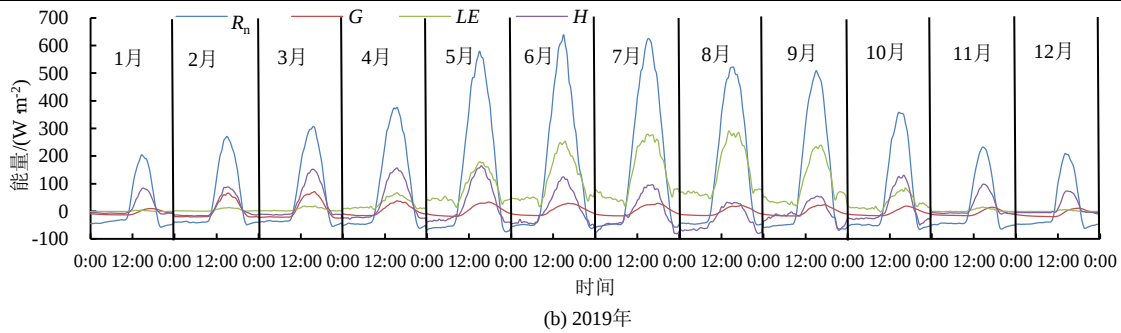


图2 2018、2019年干旱区枣林1—12月能量的月平均日变化规律

Fig.2 Monthly average daily variation of energy in jujube forests in arid areas from January to December 2018 and 2019

2.4 干旱区枣林生态系统的能量平衡分析

2018、2019 年干旱区枣林生态系统各月能量平衡闭合线性回归参数和能量平衡闭合率情况见表 3。表 3 显示, 未计入热储存项时, 各月的有效能量和可利用能量之间的统计回归斜率 k 为 0.32~0.69, 2018 年 k 值最低为 0.37, 出现在 1 月, 2019 年 k 值最低为 0.32, 出现在 12 月; 各月能量平衡闭合线性回归参数决定系数 R^2 为 0.60~0.92; 斜率 k 和 R^2 在 3—10 月之间变化较平缓, 极小值出现在 11—12 月、1—2 月。各月的能量平衡闭合率在 34.05%~80.78% 之间, 闭合率最高为 80.78% (2019 年 9 月); 闭合率最低

为 34.05% (2018 年 12 月); 未计入热储存项时, 表明各月的能量平衡闭合程度较好。由于受太阳高度、枣林生育期中地表覆盖度和叶面积指数、灌溉、气象等因素变化的影响, 各月的线性回归斜率和能量平衡闭合比率存在一定的波动。计入热储存项后, 各月的回归斜率 k 、 R^2 、能量平衡闭合率均有所提高, 但增加幅度较小。表 3 显示, 枣树生育期的能量平衡闭合率明显高于休眠期, 同时线性回归斜率和 R^2 也是生育期明显大于休眠期; 计入热存储项后, k 、 R^2 、 EBR 也均有提高。

表3 2018、2019年干旱区枣林各月能量平衡闭合线性回归参数和能量平衡闭合率

Table 3 Energy balance closure linear regression parameters and energy balance closure rates in arid region of jujube forests by month, 2018 and 2019

时间	2018 年						2019 年					
	未计入 S			计入 S			未计入 S			计入 S		
	线性回归 斜率 k	决定 系数 R^2	能量平衡 闭合率 $EBR/\%$	线性回归 斜率 k	决定 系数 R^2	能量平衡 闭合率 $EBR/\%$	线性回归 斜率 k	决定 系数 R^2	能量平衡 闭合率 $EBR/\%$	线性回归 斜率 k	决定 系数 R^2	能量平衡 闭合率 $EBR/\%$
1 月	0.37	0.77	75.92	0.51	0.86	75.99	0.37	0.79	59.17	0.47	0.81	59.22
2 月	0.45	0.83	77.22	0.60	0.91	78.43	0.46	0.60	44.31	0.48	0.89	44.83
3 月	0.52	0.90	62.25	0.64	0.93	62.66	0.69	0.64	76.59	0.70	0.90	77.06
4 月	0.57	0.82	79.14	0.67	0.87	80.37	0.62	0.89	74.58	0.69	0.90	76.36
5 月	0.59	0.91	70.18	0.64	0.92	73.11	0.60	0.84	77.27	0.66	0.87	79.91
6 月	0.65	0.91	76.56	0.70	0.92	79.73	0.63	0.89	75.16	0.68	0.91	77.87
7 月	0.65	0.87	79.37	0.69	0.88	82.63	0.65	0.90	75.09	0.69	0.91	78.28
8 月	0.65	0.88	76.44	0.71	0.88	80.98	0.64	0.89	74.08	0.69	0.90	78.27
9 月	0.59	0.92	66.35	0.66	0.92	72.19	0.58	0.83	80.78	0.64	0.85	86.19
10 月	0.54	0.83	75.67	0.62	0.84	83.91	0.57	0.88	69.10	0.65	0.90	72.59
11 月	0.39	0.64	75.31	0.46	0.67	75.33	0.44	0.85	75.83	0.56	0.89	77.45
12 月	0.42	0.92	34.05	0.50	0.91	34.66	0.32	0.77	60.95	0.43	0.83	61.20
生育期	0.62	0.89	74.67	0.68	0.90	78.61	0.62	0.88	75.88	0.67	0.89	79.34
休眠期	0.45	0.80	71.21	0.56	0.84	72.06	0.51	0.81	65.54	0.57	0.74	65.74
全年	0.60	0.91	73.45	0.70	0.95	77.17	0.61	0.91	73.11	0.70	0.92	75.86

干旱区枣林生态系统 30 min 尺度的能量平衡如图 3 所示。由图 3 和表 3 可知, 未计入热储存项的干旱区枣林生态系统 2018、2019 年 30 min 尺度上的有效能量 ($H+LE$) 与可利用能量 (R_n-G) 的直线拟合斜率为 0.60 ($R^2=0.91$) 和 0.61 ($R^2=0.91$), 能量平衡闭合率分别为 73.45%、73.11%。将热储存项计入可利用能量, 2018 年和 2019 年 ($H+LE$) 与 (R_n-G-S) 的直线拟合斜率为 0.70 ($R^2=0.95$) 和 0.70 ($R^2=0.92$), 记入热储存项后能量平衡闭合率有所提高, 干旱区枣林 2018 年和 2019 年的能量平衡闭合率分别为

77.17%、75.86%, 且 2 a 的闭合率相似。学者们^[5-10]认为生态系统能量平衡不闭合程度在 10%~30% 之间, 本文研究结果在此范围内, 说明涡度相关法在干旱区枣林生态系统通量观测中可靠性较高, 下垫面符合观测范围; 同时, 也证明 REddyPro 包插补的通量数据质量较好。

2.5 生育期和休眠期的热储存项分项分析

土壤热储存项 S_s 、显热热储存项 S_a 、潜热热储存项 S_e 、冠层热储存项 S_c 和光合热储存项 S_p 在枣树生育期和休眠期的日平均变化见图 4。

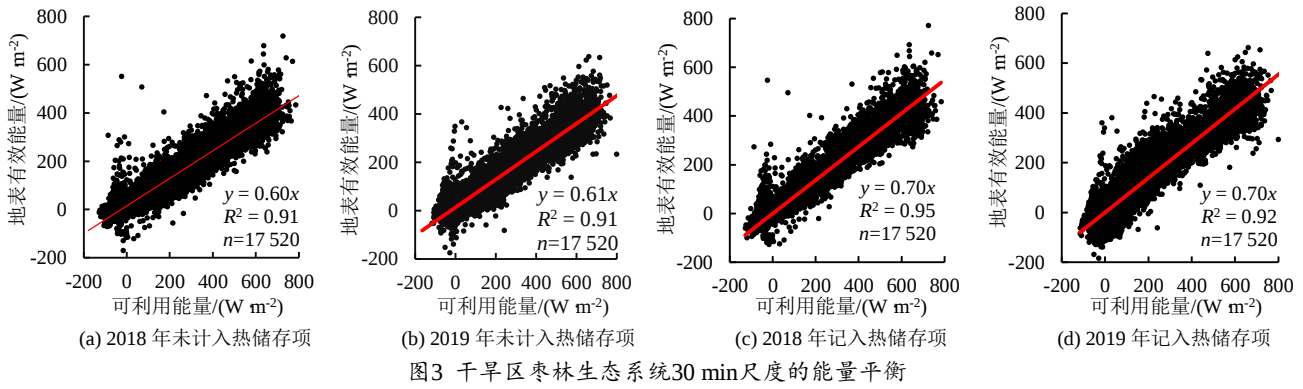


Fig.3 Energy balance of date Jujube forests ecosystems in arid areas at the half-hourly scale

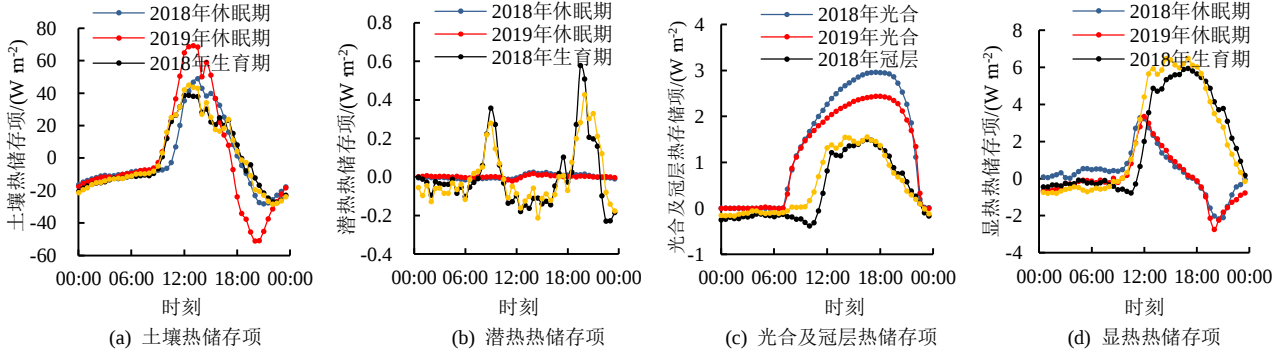


图4 枣林的能量分项在生育期和休眠期的日平均变化

Fig.4 Average daily changes in the energy subdivision of date Jujube forests during the reproductive and dormant periods

图4(a)显示, 2018年和2019年土壤热储存项 S_s 日平均变化在生育期和休眠期规律相似, 差异不大, 均在 $-51.17 \sim 69.15 \text{ W/m}^2$ 之间呈单峰变化, 与土壤热通量变化规律相似。 S_s 在白天为正值, 表示为吸收热量; 而在夜间为负值, 表示为释放热量。图4(b)显示, 2018年和2019年潜热热储存项 S_e 日平均变化规律在生育期和休眠期不同: 在休眠期潜热热储存项的变化范围在0附近, 变化幅度较小, 为 $\pm 0.05 \text{ W/m}^2$, 呈单峰变化; 在生育期潜热热储存项在 $-0.23 \sim 0.58 \text{ W/m}^2$ 之间呈双峰变化规律, 在09:00和20:00均有峰值, 说明在昼夜交替的时候潜热热储存项变化较大。光合热储存项 S_p 和冠层热储存项 S_c 在休眠期均为0, 所以图4(c)只绘制了生育期的光合热储存项和冠层热储存项的平均日变化。图4(c)显示, 光合热储存项 S_p 呈单峰变化规律, 在夜间为0, 处于 $0 \sim 2.95 \text{ W/m}^2$ 之间, S_p 随着净辐射的变化而变化, 当净辐射在15:00达到峰值时, S_p 继续升高在18:00左右达到峰值, 并随着净辐射的减小而迅速降低。2 a的冠层热存贮项 S_c 均较小, 在 $-0.39 \sim 1.55 \text{ W/m}^2$ 之间呈单峰型变化。 S_c 在夜间变化平缓, 变化幅度小; 白天随着净辐射的增大而增大, 到达峰值时间与净辐射一致。图4(d)显示, 2018年和2019年显热热储存项 S_a 在生育期和休眠期变化规律不同。生育期的显热热储存项在 $-0.80 \sim 6.50 \text{ W/m}^2$ 之间呈单峰变化; S_a 在夜间变化平缓幅度小, 白天随着净辐射的增大而迅速变大, 在12:00左右达到峰值, 峰值持续6 h左右, 在18:00之后缓

慢降低。休眠期的显热热储存项在 $-2.74 \sim 3.35 \text{ W/m}^2$ 之间变化, 其变化幅度比生育期小, 在夜间为负, 白天为正; 日出后, 随着净辐射迅速升高, S_a 也迅速增大, 在12:00左右达到峰值, 然后逐渐减小。

3 讨论

3.1 枣林生态系统的能量分配特征

在太阳辐射能量的驱动下, 农田生态系统内进行能量流动、物质合成转移和水碳循环等运动过程。因下垫面的作物类型、种植密度、生育期、季节、昼夜、气象、人为干扰等差异, 会导致净辐射进入生态系统后, 各个能量分项等在系统内的分配变化存在差异^[27]。同时, 生态系统的能量分配变化规律也可以反映下垫面的干湿状况^[28]。

5—10月, 干旱区枣林生态系统的 LE/R_n 的比值大于50%, LE/R_n 的比值最大出现在2018年8月(92.10%)和2019年9月(96.43%)。在4月和11月, LE/R_n 比值在17.33%~35.18%之间, 在1—3月和12月, LE/R_n 的占比均较小, 在3.35%~12.25%之间。分析其原因, 本文研究区是干旱区, 年降水量较小, 作物生长依赖于灌溉, 枣林只在生育期进行灌溉, 时间为每年的4—10月, 灌溉后, 土壤湿润, 土壤蒸发较大, 所以5—10月干旱区枣林 LE/R_n 的占比大于50%, 说明净辐射主要用于下垫面的 LE , 即蒸散(包括植株蒸腾和土壤蒸发)。而4月的 LE/R_n 为27.23%和33.41%, 是因为4月枣林虽然进行了灌溉, 土壤湿润导致土壤

蒸发较大,但是枣树处于萌芽期,叶面积指数较小导致植株蒸腾较小,综合起来表现为 LE/R_n 比 3 月有明显增加(增幅为 21.57%和 21.16%)。 LE/R_n 在 8—9 月最大,处于 86.47%~96.43%之间,此时也是枣林灌溉量最大、叶面积指数最大的时期。这表明在枣林的生育期(5—10 月)能量分配由 LE 占据主导。

在 1—4 月和 11—12 月,枣林生态系统中的 H 为 R_n 的最大支出项;在 1—3 月和 11、12 月, H/R_n 占比均大于 50%,在 4 月 H/R_n 占比接近 50% (2018 年为 47.59%, 2019 年为 45.19%), 这表明,在枣树休眠期,能量分配由 H 占据主导。Trenberth 等^[29]分析了全球能量收支,认为地表吸收的能量有近 1/2 消耗在潜热,同时,能量分配方式与生态系统中的水分平衡受大气水分供需影响。也有学者^[2,6,9]进一步研究表明,植被覆盖较好的生态系统(农田、森林和草甸等)能量分配由 LE 占据主导,这也验证了本文的研究结果,对于干旱区的枣林生态系统能量分配来说,水分条件是决定能量分配的关键因素,若生态系统水分充足,能量分配则以潜热通量为主,反之则以感热通量为主^[30-31]。干旱区枣林的能量分配方案由水分条件决定,受到水分条件、植被类型和气候特征的影响^[32]。

3.2 能量平衡闭合率

干旱区枣林生态系统在 2018 年和 2019 年的全年能量平衡闭合率为 73.45%、73.11%,这与前人^[4-12]在其他的生态系统中观测的能量平衡闭合率相似,在合理的范围内(能量平衡不闭合率处于 10%~30%之间)。根据 Kljun 等^[20]和 Kormann 等^[21]的源区模型计算出的下垫面 90%通量贡献区的圆形半径分别为 356.50、350.00 m,而实际试验区的面积覆盖 90%通量贡献区;试验区的下垫面范围是合适的,涡度仪器的观测高度也是合适的,这说明在干旱区枣林使用涡度相关观测系统测量能量是可行的,得到的观测数据可信度高。

干旱区枣林生态系统的全年能量平衡闭合程度不高,这可能是由于忽略了热存储项,于是本文利用式(4)重新计算了能量平衡闭合率,结果显示计入热存储项后,2018 年和 2019 年的 EBR 提高了 3.72%、2.75%,达到了 77.17%、75.86%,与美国温带落叶林^[33]、加拿大北部杨树林^[34]、西双版纳热带季节雨林^[24]的增幅范围相似;但是比黄土高原柠条林^[23]、黑河中游生育期的春小麦农田^[22]等的增幅低。多位学者指出^[13,22-23],下垫面土壤热储量 S_s 为热存储项中的最大占比,忽略 S_s 是造成地表能量平衡不闭合的主要原因。但是根据表 2 显示, S_s 占净辐射的比例小于 1%,这与岳平等^[2]、高红贝等^[22]研究结果不一致。这可能是由于本文研究区处于干旱区,作物需要

灌溉,枣林使用深井水进行滴灌,井水温度低于灌溉时的气温和土壤温度,导致枣林每次灌溉时降低了土壤热储量 S_s ,故本文虽然计算了 S_s ,但是 EBR 提高幅度小, S_s 占净辐射的比例小于 1%。

4 结 论

- 1) R_n 、 LE 、 H 、 G 的日均值均呈单峰变化趋势,2018 年和 2019 年的变化趋势相似。
 - 2) 未计入热存储项时,各月的有效能量和可利用能量之间的统计回归斜率为 0.32~0.70,决定系数 R^2 为 0.64~0.94,能量平衡闭合率在 34.05%~80.78%之间;计入热存储项后,各月的有效能量和可利用能量之间的统计回归斜率、决定系数、能量平衡闭合率均有所提高,但增幅较小。
 - 3) 2018 年和 2019 年未计入热存储项的全年能量平衡闭合率分别为 73.45%、73.11%;计入热存储项后,能量平衡闭合率有所提高,但增幅较小。
 - 4) 干旱区枣林生育期的能量平衡闭合率高于休眠期;计入热存储项后,生育期能量平衡闭合率的增幅也明显大于休眠期。
 - 5) 土壤热存储项的日平均变化在生育期和休眠期规律相似;潜热热存储项的日平均变化在休眠期呈单峰变化,生育期呈双峰变化;光合热存储项在生育期呈单峰变化;冠层热存储项在生育期呈单峰变化;显热热存储项在生育期呈单峰变化,休眠期波动幅度较小。
 - 6) 干旱区枣林的能量分配受水分条件、植被类型和气候特征的影响,且能量分配方案由水分条件决定,若生态系统水分充足,能量分配则以潜热通量为主,反之则以感热通量为主。
- (作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 于贵瑞,孙晓敏.陆地生态系统通量观测的原理与方法[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [2] 岳平,张强,杨金虎,等.黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率[J].生态学报,2011,31(22): 6 866-6 876.
YUE Ping, ZHANG Qiang, YANG Jinhui, et al. Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6 866-6 876.
- [3] 于贵瑞,张黎,何洪林,等.大尺度陆地生态系统动态变化与空间变异的过程模型及模拟系统[J].应用生态学报,2021,32(8): 2 653-2 665.
YU Guirui, ZHANG Li, HE Honglin, et al. A process-based model and simulation system of dynamic change and spatial variation in large-scale terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2 653-2 665.
- [4] WILSON K, GOLDSTEIN A, FALGE E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/2/3/4): 223-243.
- [5] 李正泉,于贵瑞,温学发,等.中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价[J].中国科学(D辑:地球科学),2004,34(S2): 46-56.
- [6] 徐菲楠,田志伟,王维真.西北干旱区玉米农田光合作用对地表能

- 量平衡的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 224-232.
- XU Feinan, TIAN Zhiwei, WANG Weizhen. Effect of the photosynthesis on the surface energy balance in corn farmland in the arid region of Northwest China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(2): 224-232.
- [7] 朱咏莉, 吴金水, 胡晶亮, 等. 亚热带稻田能量平衡闭合状况分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 536-539.
- ZHU Yongli, WU Jinshui, HU Jingliang, et al. Energy balance closure at rice paddy fields in subtropical region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(8): 536-539.
- [8] 童应祥, 田红. 寿县地区麦田能量平衡闭合状况分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(18): 384-387.
- TONG Yingxiang, TIAN Hong. Analysis of energy balance closure of Shouxian wheat field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(18): 384-387.
- [9] 李鑫豪, 田文东, 李润东, 等. 北京松山落叶阔叶林生态系统水热通量对环境因子的响应[J]. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1 191-1 202.
- LI Xinhao, TIAN Wendong, LI Rundong, et al. Responses of water vapor and heat fluxes to environmental factors in a deciduous broad-leaved forest ecosystem in Beijing[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(11): 1 191-1 202.
- [10] 徐敏, 徐敬争, 刘文菁, 等. 华东沿海稻麦轮作区生态系统能量闭合度和 CO₂ 通量特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 367-379.
- XU Min, XU Jingzheng, LIU Wenjing, et al. Characteristics of ecosystem energy closure and CO₂ flux in a rice-wheat rotation area along the coast of East China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 367-379.
- [11] 马启民, 李永山, 王海兵, 等. 鄂尔多斯沙地人工柠条林能量平衡与蒸散研究[J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1 511-1 521.
- MA Qimin, LI Yongshan, WANG Haibing, et al. Study on energy balance and evapotranspiration of an artificial *caragana korshinskii* shrub land in Ordos Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(6): 1 511-1 521.
- [12] 金艳, 廖立国, 张颖, 等. 西双版纳热带季雨林通量分配及能量平衡问题[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(4): 472-482.
- JIN Yan, LIAO Ligu, ZHANG Ying, et al. Studies on the flux distribution and energy closure in Xishuangbanna tropical seasonal rainforest, China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2022, 30(4): 472-482.
- [13] MASSMAN W J, LEE X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/2/3/4): 121-144.
- [14] 乔英. 干旱区滴灌枣林生态系统能量平衡及水碳通量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.
- QIAO Ying. Study on energy balance and water and carbon flux of jujube forest ecosystem under drip irrigation in arid area[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University.
- [15] 新疆维吾尔自治区统计局, 国家统计局新疆调查总队. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [16] WUTZLER T, LUCAS-MOFFAT A, MIGLIAVACCA M, et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc[J]. Biogeosciences, 2018, 15(16): 5 015-5 030.
- [17] 乔英, 马英杰, 辛明亮. 基于改进 S-W 与结构方程模型的干旱区枣园蒸散特征分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 307-317.
- QIAO Ying, MA Yingjie, XIN Mingliang. Analysis of evapotranspiration characteristics of ziziphus jujuba mill. orchards in arid areas based on improved S-W and structural equation model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 307-317.
- [18] 乔英, 马英杰, 辛明亮. 干旱区人工枣林蒸散及植株蒸腾的模型模拟[J]. 林业科学, 2022, 58(7): 51-62.
- QIAO Ying, MA Yingjie, XIN Mingliang. Model simulation of evapotranspiration and plant transpiration in planted jujube forests in arid zones[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(7): 51-62.
- [19] LEUNING R. Measurements of trace gas fluxes in the atmosphere using eddy covariance: WPL corrections revisited[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2006: 119-132.
- [20] KLJUN N, KORMANN R, ROTACH M W, et al. Comparison of the langrangian footprint[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 106(2): 349-355.
- [21] KORMANN R, MEIXNER F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(2): 207-224.
- [22] 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[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 33-40, 90.
- GAO Hongbei, SHAO Ming'an. Heat storage fluxes of spring wheat during growth periods in the oasis farmland in Heihe Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 33-40, 90.
- [23] 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[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5 782-5 791.
- SUN Shuchen, SHAO Ming'an. Effects of heat storage on surface energy balance in Caragana forest land of Northern the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): 5 782-5 791.
- [24] DOU J X, ZHANG Y P, YU G R, et al. A preliminary study on the heat storage fluxes of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(2): 163-173.
- [25] 曹寰琦, 何清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘夏秋季地表能量平衡闭合特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 830-839.
- CAO Huanqi, HE Qing, JIN Lili, et al. Surface energy balance closure of summer, autumn and winter in the Northern margin of Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 830-839.
- [26] 徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 等. 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[J]. 地球科学进展, 2013, 28(8): 875-889.
- XU Ziwei, LIU Shaomin, XU Tongren, et al. The observation and calculation method of soil heat flux and its impact on the energy balance closure[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(8): 875-889.
- [27] 徐敏, 徐敬争, 刘文菁, 等. 华东沿海稻麦轮作区生态系统能量闭合度和 CO₂ 通量特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 367-379.
- XU Min, XU Jingzheng, LIU Wenjing, et al. Characteristics of ecosystem energy closure and CO₂ flux in a rice-wheat rotation area along the coast of East China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 367-379.
- [28] 潘雨梦, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘稀疏灌丛能量平衡及蒸散特征[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11): 1 447-1 455.
- PAN Yumeng, XIAO Huijie, XIN Zhiming, et al. Characteristics of energy balance and evapotranspiration of sparse shrubs in the Northeastern edge of Ulan Buh desert[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(11): 1 447-1 455.
- [29] TRENBERTH K E, FASULLO J T, KIEHL J. Earth's global energy budget[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(3): 311-324.
- [30] 周甘霖, 李耀辉, 孙旭映, 等. 我国北方不同下垫面地表能量通量的变化特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 577-585.
- ZHOU Ganlin, LI Yaohui, SUN Xuying, et al. Characteristics of surface energy fluxes over different types of underlying surfaces in North China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(4): 577-585.
- [31] WANG X W, HUO Z L, SHUKLA M K, et al. Energy fluxes and evapotranspiration over irrigated maize field in an arid area with shallow groundwater[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105 922.
- [32] JIA X, ZHA T S, GONG J N, et al. Energy partitioning over a semi-arid shrubland in Northern China[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(6): 972-985.
- [33] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L H, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2 415-2 434.
- [34] BLANKEN P D, BLACK T A, NEUMANN H H, et al. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998, 89(1): 109-140.

photosynthesis of high-yield dwarf wheat cultivars. **【Method】** Pot experiments were conducted using three high-yield dwarf wheat cultivars: Bainong 207 (BN207), Bainong 307 (BN307), and Bainong 607 (BN607). For each cultivar, moderate regulated deficit irrigation was imposed at the seedling-winter period, jointing-beading, and flowering-filling stages (W1), or at the seedling-winter period and middle flowering-filling stage (W2), or at seedling-winter period and middle jointing-beading stage. The control (CK) was sufficient irrigation. In each treatment, we measured the photosynthetic rate (P_n) and chlorophyll fluorescence kinetic parameters of the leaves.

【Result】 Compared with CK, W3 significantly increased yield, biomass, SPAD values, and photochemical activity of all three cultivars, as opposed to W1 which reduced all these traits. The impact of the deficit irrigation on photosynthesis varied with cultivars, with BN207 showing resistance to limitations in photosynthetic electron transfer under long-term regulated deficit irrigation. Moderate regulated deficit irrigation at the early growth stage of BN607 enhanced its response to water deficit in the late growth stage. Deficit irrigation at the seedling-winter period and jointing - heading stage increased P_n of BN307. **【Conclusion】** Among the treatments we compared, W3 was optimal for achieving both high yield and photosynthesis of the three wheat cultivars investigated in this paper.

Key words: regulated deficit irrigation; biomass; chlorophyll fluorescence kinetic parameters; OJIP curves

责任编辑: 韩 洋

(上接第 47 页)

Using Eddy Covariance Method to Analyze Energy Balance of Jujube Orchard in Arid Areas

QIAO Ying, ZHANG Baihe*, QIU Kai, WANG Tengfei

(Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China)

Abstract: 【Objective】 Jujube is an important cash crop in the arid region in northwestern China. Understanding energy dynamics in it is hence crucial to improving water use efficiency. This paper is to analyze the energy balance in a jujube orchard using the eddy covariance. **【Method】** Flux from a jujube orchard was measured from 2018 to 2019 using the eddy covariance method. The data were used to analyze the patterns and distribution of the energy changes, and daily variations in the thermal storage. **【Result】** ① Daily average energy change in net radiation, latent heat flux, sensible heat flux, and soil heat flux exhibited a single-peaked pattern in each month, primarily driven by net radiation changes. ② The annual 30-minute energy balance ratio in 2018 and 2019 was 73.45% and 73.11%, respectively. Incorporating the heat storage term increased the energy balance by 3.72% and 2.75% to 77.17% and 75.86%, respectively, in 2018 and 2019. ③ The daily change in soil heat storage exhibited similar pattern during the fertility and dormancy stage. Latent and sensible heat storage showed different patterns between fertility and dormancy stage, while photosynthesis and canopy heat storage were zero during the dormancy stage and displayed typical daily variation during the fertility stage. **【Conclusion】** The thermal storage has a minimal contribution to the energy balance. Thus, the energy allocation to the jujube is influenced mainly by water, vegetation types and climate.

Key words: arid area; jujube forests; eddy covariance method; energy balance

责任编辑: 白芳芳