

黄土高原地表能量平衡分量年际变化 及其对气候波动的响应*

夏露^{1)2)†} 张强¹⁾²⁾³⁾

1) (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

2) (中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,
兰州 730020)

3) (甘肃省气象局, 兰州 730020)

(2013年11月14日收到; 2014年2月3日收到修改稿)

本文利用兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL站)2006—2012年陆面过程观测资料和榆中站气象资料,分析了7年间榆中气温降水的气候变化背景,讨论了陆面地表能量平衡分量的年际变化,研究了波文比、能量闭合度的年际波动,探讨了地表能量平衡分量以及各陆面过程参数对黄土高原气温、降水年际波动的反馈.结果显示,地表各能量分量都对气候背景的波动做出响应,但敏感性各有不同,净辐射与气温相关性最强,感热潜热与降水相关性较好.分为冬夏半年讨论后得出,冬半年地表平衡分量与气候波动的相关性更好.冬半年中,各分量又与气温有着较高的相关,可见该地区地表能量各分量对冬半年气温波动的响应更为敏感.波文比的上升趋势与该地区降水量减少的背景响应,说明干旱程度的加深.能量闭合度的波动变化显示了在气候变化的背景下该地区陆面能量不闭合程度的加深.

关键词: 能量平衡分量, 气候波动, 气候响应

PACS: 92.60.Fm, 92.70.Bc

DOI: 10.7498/aps.63.119201

1 引言

在气候系统中,地气相互作用占有极其重要的地位^[1-5],其能量、物质和动量的交换,深刻影响着全球大气环流以及气候系统^[6-8],对极端天气的形成以及气候变化的波动起到了关键的作用.随着时代的进步、科技的发展,最近20年以来,我国针对不同地表与大气动量、能量和物质的野外观测试验研究飞速发展,如黑河地区地气相互作用观测试验研究(HEIFE)、内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)、第二次青藏高原大气科学试验(TIPEX)和西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)以及全球范围的全球能量和

水循环试验(GEWEX)的附属计划CEOP计划等.其中CEOP计划开始于1997年,为开展水和能量循环研究和季风研究提供科学基础^[9-12].在我国,吉林通榆站最先纳入CEOP观测网^[13],通过长期观测实验获得了大量研究成果,刘辉志等^[14]分析了非生长季近地面层微气象及能量通量资料,涂钢^[11]讨论了近地面层气象要素和湍流观测资料并分析了近地面层微气象特征,孟祥新等^[15]利用CEOP观测资料对几个陆面过程模式进行了模拟检验与对比,考察了不同陆面过程模式对半干旱地区的模拟性能.除通榆站外,兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)也加入了CEOP观测网进行全年不间断的地表物质和能量交换的观测,李宏宇等^[16]分析了榆中地区陆面的相关物理参数,王

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:40830597)和国家重点基础研究发展计划(批准号:2013CB430200,2013CB430206)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xialuyiyu@163.com

文玉等^[17]利用观测资料分析了该地区最小有效降水量及降水转化率, 这些研究丰富了对陇中黄土高原陆面过程的认识, 加深了对陆面过程与气候和环境关系的理解. 2000年以后, 为增进对青藏高原地气相互作用、水文循环的定量理解, 我国与日本共同协作开始执行全球协调加强观测计划(CEOP)亚澳季风之青藏高原试验研究(CAMP/Tibet), 利用试验资料分析、卫星遥感及数值模拟等手段发展陆面过程模式、检验陆面过程参数^[18,19], 在研究青藏高原能量与水循环方面取得大量成果^[20], Yang等^[21]对参与CEOP的全球天气预报模式进行比较诊断分析, 从理解降水强度和降水频率的日变化过程、地表辐射平衡、以及地表能量平衡在全球尺度和区域尺度上的特征. 以上这些陆面过程的研究日益受到科学界的关注, 并逐渐成为国际研究热点之一^[6,22-24].

地表能量收支是地气相互作用的关键环节, 而黄土高原地处我国腹地, 幅员辽阔, 下垫面属于黄土高原丘陵沟壑区, 植被稀疏, 水土流失严重^[25], 因为其独特的地貌和气候特征闻名于世, 在世界范围内都是一个十分特殊的区域^[26-28]. 由于处在东南季风影响区的边缘, 该地区是东南湿润季风气候向西北内陆干旱气候的过渡带, 有着特殊的气候背景, 且生态系统脆弱^[29]. 该区域对全球气候的变化有着敏感的反应^[30], 研究该区域的气候生态环境有着重要的意义^[31].

以往针对黄土高原的研究主要集中在陆面物理量的个例分析上^[32-38], 由于资料的限制, 缺少对能量平衡分量年际波动的研究. 本文希望利用2006—2012年SACOL站陆面、气象资料, 在年际时间尺度上研究黄土高原半干旱区地表能量收支与气候波动的响应, 探讨该地区地表能量收支和水热特征的气候学意义^[31].

2 观测资料介绍

2.1 站点基本状况和观测资料

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL), 位于兰州大学榆中校区海拔1961 m的翠英山顶上(35.946°N, 104.137°E). 观测场占地约8 hm², 下垫面属于典型的黄土高原地貌, 塬面梁峁基本为原生植被, 属于温带半干旱气候. 山顶环境基本属于自然状态, 受人类活动的影响较小, 观测站的气候状态可代表方圆几百公里黄土高原半干旱区平均的

气候状态^[6]. 本站目前已被批准加入国际CEOP项目, 并作为参加此项计划的全球协同加强观测站之一.

本文的资料包括了土壤温度(STP01-L50, Hukseflux)、湿度(CS616-L, Campbell), 土壤热通量(HFP01SC-L50, Hukseflux), 近地层风温脉动(CSAT3, Campbell)和水汽脉动(L17500, Li-Cor)观测. 以上这些观测仪器的主要技术指标已有文献说明^[39]. 本文分析采用榆中常规气象站2006—2012年的平均降水和气温资料及SACOL站2006年4月至2012年12月的能量平衡分量和土壤湿度、温度资料, 处理得到逐月均值. 其中2011年11月至2012年1月潜热通量和感热通量数据缺失, 2006年4月及2012年6月土壤热通量数据缺失, 2012年6月土壤温湿度数据缺失.

2.2 资料数据处理

1) 地表净辐射

$$R_{n0} = (R_{sd} - R_{su}) + (R_{ld} - R_{lu}), \quad (1)$$

其中, R_{n0} 为净辐射, R_{sd} 为向下短波辐射, R_{su} 为向上短波辐射, R_{ld} 为向下长波辐射, R_{lu} 为向上长波辐射, 单位 W/m².

2) 感热通量 H_0 、潜热通量 λE_0

可由涡动相关法计算得到

$$H_0 = \rho_a C_p \overline{w'T'}, \quad (2)$$

$$\lambda E_0 = L \overline{w'\rho'_v}, \quad (3)$$

其中, ρ_a 表示干空气密度; ρ_v 为水汽密度, C_p 为空气定压比热; L 为汽化潜热; $\overline{w'T'}$, $\overline{w'\rho'_v}$ 均是温、湿脉动量的统计量.

3) 地表能量闭合度

在水平、均匀下垫面和大气定常条件下, 地表能量平衡方程通常表示为^[29,40]

$$R_{n0} = H_0 + \lambda E_0 + G_0, \quad (4)$$

其中, R_{n0} 为地表净辐射, H_0 为地表感热通量, λE_0 为地表潜热通量, G_0 为地表土壤热通量.

然而在现实条件下, 地表能量总存在着一定程度的不平衡性. 于是, 地表能量的平衡程度常用下式来表示:

$$E_c = (H_0 + \lambda E_0)/(R_{n0} - G_0), \quad (5)$$

其中, E_c 为地表能量闭合度.

关于地表能量闭合度 E_c , $E_c = 1$ 时, 为地表能量完全闭合, E_c 偏离 1 越大, 则闭合度越低.

4) 波文比

$$\gamma = H_0/\lambda E_0, \quad (6)$$

表示感热和潜热的比值, 表征某地区的干旱程度.

3 区域气候环境变化特征

3.1 大气温度降水变化

图 1 给出的是 2006—2012 年榆中年气温及降水量年际变化特征. 由图中可以看出该地区气温和降水都随年际变化呈现减小的趋势. 平均气温方面, 2006 年均值为显著正距平, 2012 年为显著负距

平, 其余各年份变化较为平缓. 气温呈现年际单峰结构, 最高值出现在每年的七月左右, 最低值大多出现在一月. 降水量方面, 单峰结构并不明显, 最小值大多对应气温最小值, 但最大值出现时间往往滞后于气温. 2007 年该年降水偏多, 为 556.63 mm, 而相对应的此年的气温较均值偏高但并不十分明显. 统观这 7 年的气温降水的年际变化, 除了 2007 和 2011 年之外, 其余的年份正距平降水都对应着负距平气温或反之. 以上可知该地区 2006—2012 年的气候变化背景, 再通过对这段时期的陆面过程参数的处理, 能得出 2006—2012 年黄土高原陆面过程与气温、降水变化的响应关系.

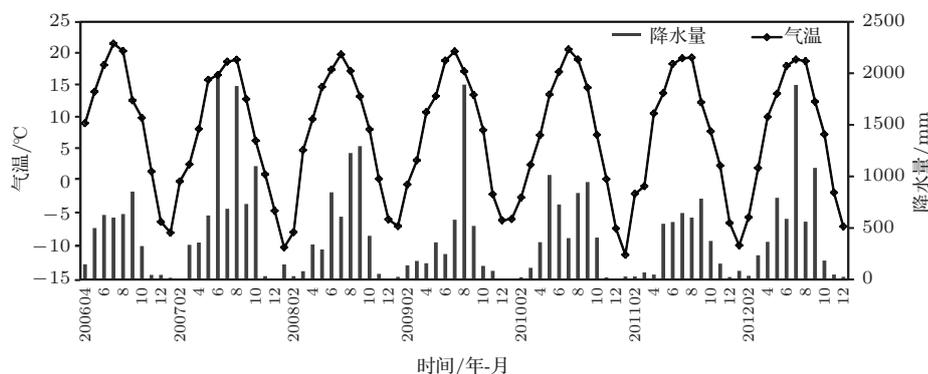


图 1 2006—2012 年榆中气温、降水量年际波动变化

3.2 土壤温度湿度变化

榆中地区气温、降水的变化特征会直接影响到陆面的物理特性. 而土壤的温度和湿度作为陆面过程中的重要物理特征, 也是影响陆面水、热过程的重要因素 [41,42], 对气候变化起着非常重要的作用 [31]. 图 2 (a) 给出了 2006—2012 年浅层土壤温度、湿度的逐月变化特征, 2012 年 6 月数据缺失. 可以看出, 在气温降水呈现减小趋势的背景下, 土壤温度和单位体积含水量也都相应的呈现减小的趋势, 可见气温、降水对于浅层土壤温度、湿度的影响是直接和明显的. 各层土壤温度 (图 2 (b)) 的变化差别不太明显, 温差较小. 而土壤各层湿度 (图 2 (c)) 则有较大的区别, 能发现 10 cm 处土壤含水量最多, 其次是 5 cm 处, 再依次为 20 cm, 40 cm, 而 80 cm 处体积含水量最少. 这是由于黄土高原草本植被根系主要分布在 10—40 cm 处, 造成了在干土层下始终维持着一个湿层 [29]. 而各层土壤湿度都随时间呈现减少趋势, 且浅层减少幅度较少, 随着深度加深, 除了 40 cm 处, 减少的幅度增加, 80

cm 处湿度减少最明显. 各层土壤湿度随时间减少与降水随时间的减少相呼应, 深层土壤含水量的累积效应显示明显 [33]. 各层土壤温度也随时间呈现减少趋势, 与湿度不同的是土壤温度的下降幅度随着土层的加深而减小. 这其中原因是由于浅层土壤与大气热量交换更充分, 与气温的相关更强. 由上可见, 土壤温湿的变化受大气温度和降水的综合影响, 其变化趋势与气温、降水的气候变化是一致的.

3.3 能量通量各分量年际变化

太阳辐射是地球表面能量的主要来源, 是全球系统中各种物理过程和生命活动的根本动力 [43—47]. 然而由于大气中各种因素的影响, 太阳辐射在全球各地分布极不均匀, 甚至在同一地区, 不同季节分布也有很大差异, 这就对地表能量平衡及气候的形成和变化产生重要影响 [31]. 黄土高原地区, 由于特殊的气候背景造成了其独特的地表能量通量日变化特征 [48,49], 并且由于显著的气候波动造成地表能量通量的年际变化特征 [25,30]. 为了更

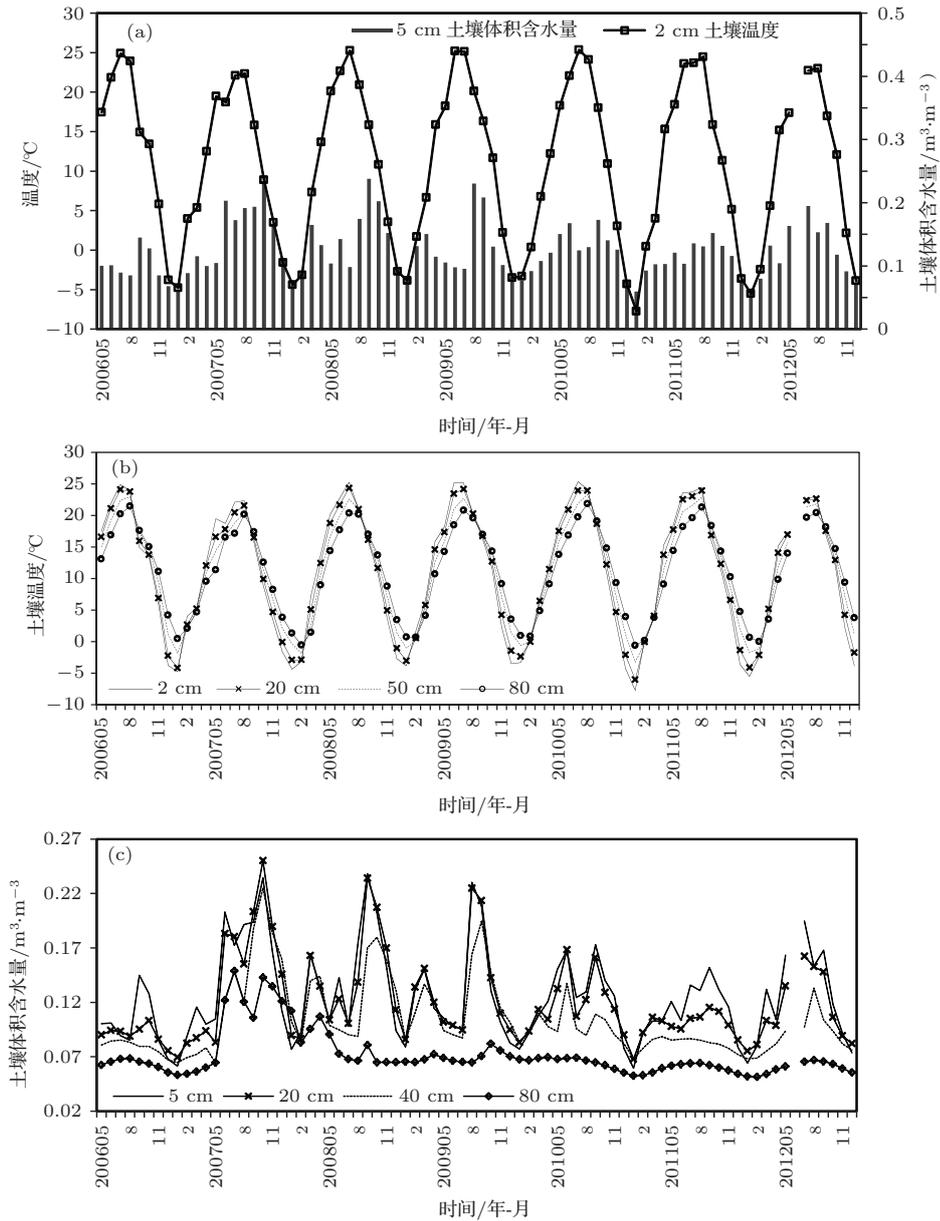


图2 2006—2012年浅层(a)及各层土壤温度(b)、土柱含水量(c)的 annual 变化

清楚的表现年际气候的变化, 这里将一年的时间根据降水的性质和水循环的特点分为冬夏半年, 每年的4—10月为夏半年, 11月至次年3月为冬半年^[29]. 下面就兰大SACOL站2006—2012年年平均、夏半年、冬半年地表能量平衡分量进行讨论.

图3(a)显示的是2006—2012年能量平衡分量逐月的变化, 2011年11月至2012年1月潜热通量和感热通量数据缺失, 2006年4月及2012年6月土壤热通量数据缺失. 相较于辐射分量的变化(图略), 能量通量变化幅度较大, 波动也更为厉害. 净辐射最多, 年均值在 $59\text{--}79\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间波动, 最少的是土壤热通量, 均值在 $-1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 与 $1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 潜热通量和感热通量所占比例相差不多, 维

持在 $30\text{--}40\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 间, 各占净辐射的50%左右, 除了少数月份外, 感热通量大都比潜热通量值略高. 图3(a)可以看出, 净辐射在2009年以后呈现明显上升状态, 2007—2011年感热也呈现上升趋势. 就全年的趋势来看, 净辐射的上升趋势最为明显, 幅度也最大; 其次是感热通量, 潜热通量及土壤热通量上升幅度不明显, 甚至有轻微下降趋势. 地表能量平衡分量的变化也与黄土高原地区暖干化的大背景相一致.

将能量通量分为冬夏半年讨论后, 发现各分量变化幅度区别明显, 首先夏半年(图3(b))各能量通量的值都高于冬半年(图3(c)), 最明显的为感热通

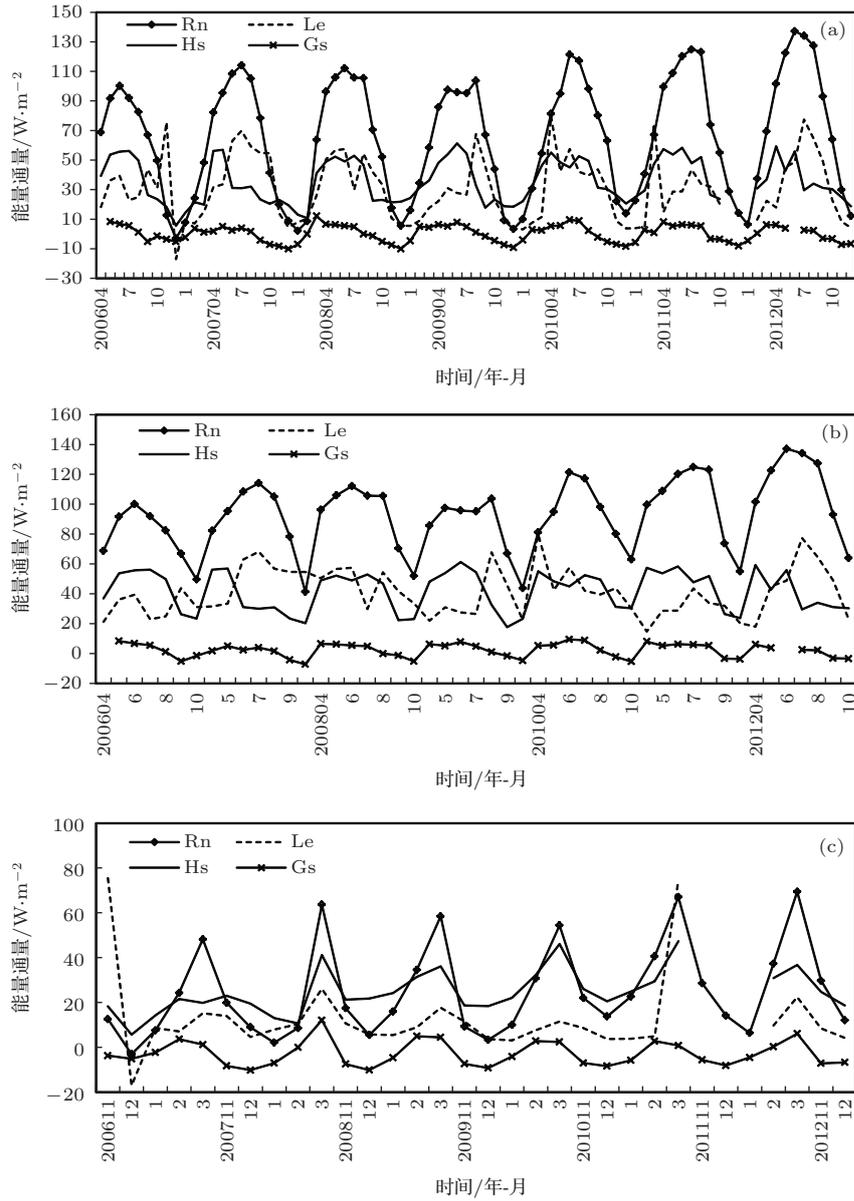


图3 地表能量平衡分量全年(a)、夏半年(b)、冬半年(c) 年际波动特征

量, 夏半年感热通量与潜热通量相差不多, 而冬半年感热通量则明显高于潜热通量, 与净辐射相差不多. 尽管各能量分量在冬半年都有减少, 但净辐射下降最为明显, 年均值减少了约75%. 各能量平衡分量冬夏变化的差距正是由于该地区季风性气候造成的, 夏半年受夏季风活动影响, 该地区降水增多, 潜热通量也相应增多, 造成夏半年潜热、感热所占净辐射比例相差不多. 而在冬半年, 降水较少, 地表能量以感热输送为主, 故感热通量占到净辐射的绝大比例, 占据主导位置. 造成冬半年感热通量与净辐射量级一致的另一个原因是感热、潜热通量的被低估, 该原因已有文献说明 [38].

由这7年的逐月变化趋势可以看出, 夏冬半年净辐射均呈现上升趋势, 且趋势较为明显. 感热通量冬半年增加较为明显, 与冬半年净辐射变化趋势较为一致, 但夏半年变化幅度并不明显. 潜热通量冬半年为下降趋势, 对应冬半年降水的减少, 夏半年虽有波动但整体趋势变化平稳. 土壤热通量冬半年变化都较为平稳, 但在2011—2012年间都呈现出减小的趋势. 对比年平均状态与冬夏半年波动趋势, 年平均状态与夏半年整体趋势较为接近, 可以得出, 冬半年虽然各分量波动幅度较大, 但由于数值不及夏半年, 对年总平均的影响略小.

3.4 波文比的年际变化

波文比是衡量区域气候特征的一个指标,能够在一定程度上表征地区干旱的程度^[29].波文比通常综合反映该地区陆面的水热特性^[25,29],反映总体气候特征的一个总体指标,且受降水波动明显.图4显示了7年来波文比的逐月变化特征.可见波文比都大多围绕1值波动,感热通量和潜热通量处于同一数量级.其变化总体趋势随时间的波动较为平缓,呈轻微上升趋势,这与降水减少的气候背景相符合,说明该地区近年来干旱化程度略有加深.分季节来看(图略),榆中波文比冬半年随时间的减

小较为显著,趋势线斜率达到 -0.15 ,且多数值大于1,说明感热大于潜热^[7],这是由于冬季降水较少的特性造成.在夏季,波文比则呈现增大趋势,与2006—2012年间的夏半年的降水减少相对应,说明夏季干旱程度略有加深.

表1 波文比与气温、降水的相关系数

	气温/ $^{\circ}\text{C}$	降水/mm
年际	-0.134	-0.148
夏半年	-0.057	-0.058
冬半年	0.05	-0.352

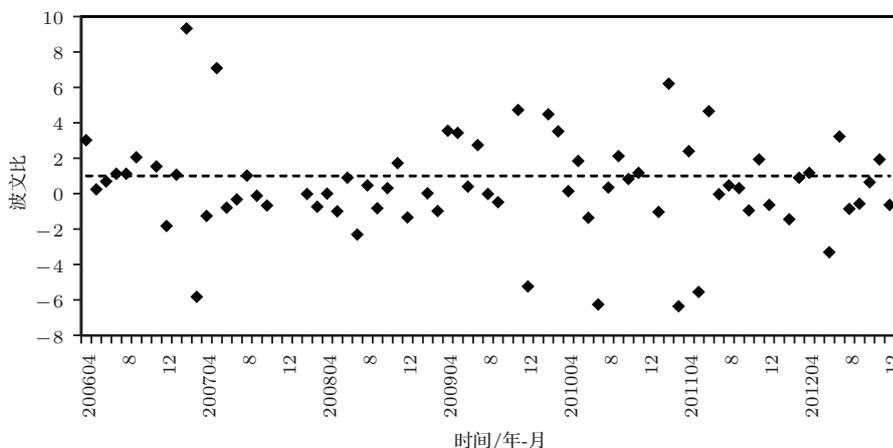


图4 2006—2012年榆中陆面波文比年际波动特征

由于陆面潜热感热数据的时间变化特征较为明显,用逐月波文比资料讨论与气温、降水的相关关系.对比波文比年际、冬夏半年逐月资料与气温、降水的相关系数表(表1)可以看出,2006—2012年波文比与气温降水的相关关系并不很好,且分为冬夏半年讨论后也并没有改善,都未能通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验.最高的相关关系为冬半年波文比与降水的相关,为 -0.352 ,夏半年波文比与气温降水的相关关系都小于0.1.可见气温降水对于黄土高原陆面过程的作用机理是较为复杂和综合的.

3.5 地表能量闭合度的年际变化

地表能量平衡是地表能量输送的连续性条件,也是陆气相互作用的基本准则^[25].理论上讲,地表能量收入和支出应当维持平衡,但事实上能量不闭合几乎是所有地表通量观测中存在的问题^[41].图

中显示的是2006—2012年地表能量闭合度的年际变化特征,筛选去除了数值异常点,2011年11月至2012年1月由于感热潜热数据缺失,导致能量闭合度为0值,在以下讨论中不予考虑.图中显示,地表能量闭合度呈现U状围绕1线波动,每年的12月或1月达到最大值,偏离1程度最大,随着气温的升高、降水的增多,逐渐向1靠近,能量闭合程度提高,6,7,8月最接近1,随着气温、降水的减少,闭合度又再偏离1.逐月波动特征显示能量不闭合度仍然较为显著,且大于1的数值中偏离程度更大,这说明地表有效能量被低估.分为冬夏半年讨论后(图略),冬半年能量不闭合程度较高,且波动幅度较大,夏半年则偏离1程度较小且较为稳定.而这7年能量闭合度与1的偏离程度呈现增大趋势,这与前文所得到的气温、降水的减少背景相符合,可见,随着气候背景的变化,该地区地表能量的不闭合程度是加深的.

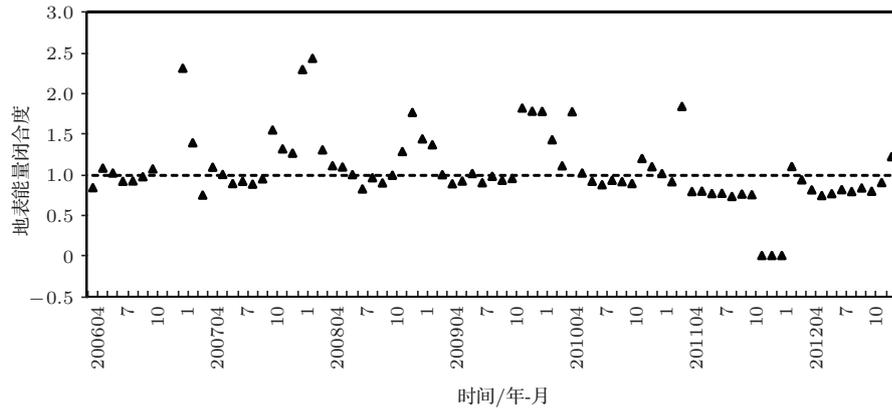


图5 2006—2012年地表能量闭合度年际变化特征

4 能量通量与气候波动的响应

图6和图7是2006—2012年逐月地表能量平衡分量与气温、降水的相关图。可以发现,各分量与气温、降水都有很好的相关性。除了感热通量、土壤热通量与降水的相关系数较小,分别为0.189和0.243,未能通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验,其他各分量都与气候要素响应较为敏感。与气温的相关

系数都较大,净辐射气温呈现正相关,相关系数最大,达到0.919。潜热、感热和土壤热通量与气温相关性不及净辐射,这是由于其不只受太阳辐射影响控制也受降水及其他因素的影响。与降水的相关方面,净辐射和潜热对降水响应较为敏感,分别为0.644, 0.683,可见净辐射与潜热相较于感热和土壤热通量受降水影响较大,这也符合潜热通量的原始定义。

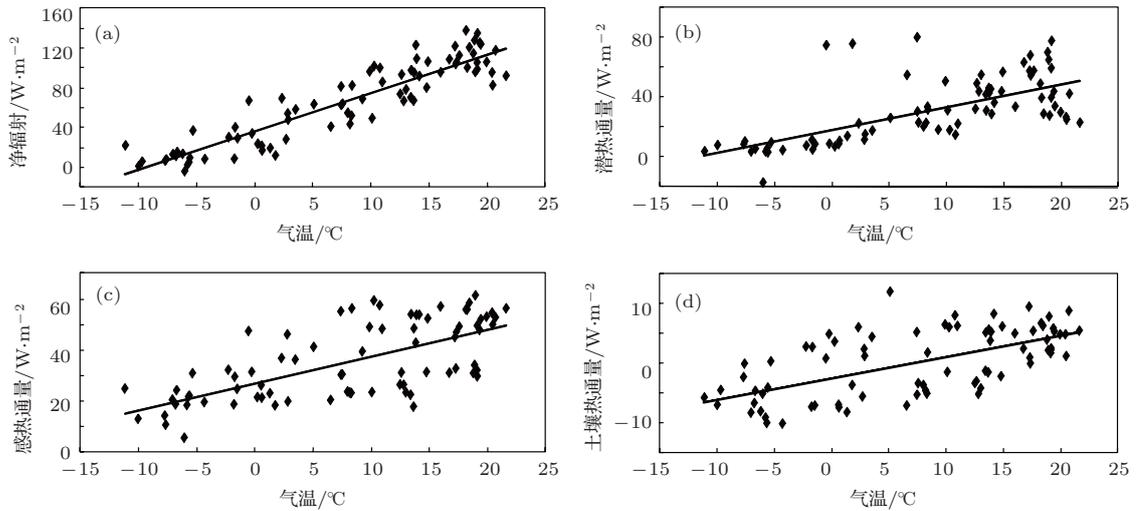


图6 地表能量平衡分量与气温的相关

表2 地表能量平衡分量与气温、降水的相关系数

地表能量平衡分量		Rn/W·m ⁻²	Le/W·m ⁻²	Hs/W·m ⁻²	Gs/W·m ⁻²
年际	气温/°C	0.919*	0.658*	0.671*	0.617*
	降水/mm	0.644*	0.683*	0.189	0.243
夏半年	气温/°C	0.721*	0.150	0.446*	0.542*
	降水/mm	0.259	0.432*	-0.18	-0.28
冬半年	气温/°C	0.692*	0.432*	0.582*	0.519*
	降水/mm	0.544*	0.167	0.251	0.415

* 标注为通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验.

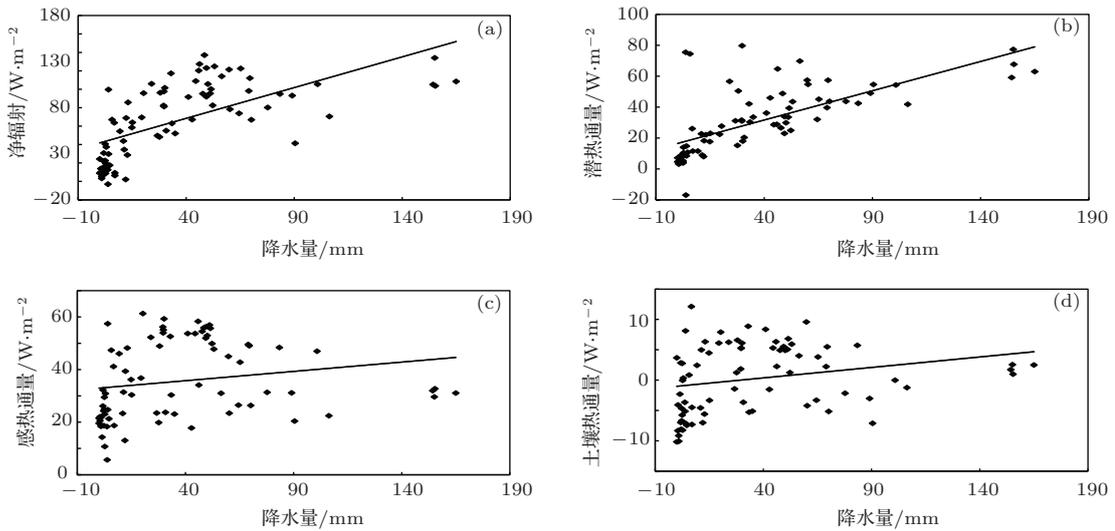


图7 地表能量平衡分量与降水的相关

对比冬夏半年逐月地表能量平衡分量与气温、降水的相关图(图略)与逐月年趋势的对比发现,净辐射无论冬夏半年受气温影响较大.潜热通量受气温、降水共同影响,但各季节却有差别,夏半年受降水影响较大,冬半年则受气温影响较大.感热通量与净辐射一致都主要受气温影响,但夏半年与降水呈轻微反相关.土壤热通量也主要受气温影响较大,但夏半年与降水反相关.各能量平衡分量与气温、降水的相关关系可见陆面过程对气候变化的背景响应较为明显.净辐射作为地-气间能量的外部驱动项,受太阳辐射的直接影响,感热通量主要受太阳辐射控制,而潜热通量则受气温、降水共同影响.地表平衡分量与气候波动的相关显示各分量与气温的相关普遍比与降水的相关性更好(表3),各分量对气温波动的响应更为强烈.而这其中,冬半年与气温的相关都大于与降水的相关,可见该地区地表能量各分量对冬半年气温的变化反应相较于降水的变化更为敏感.

关于气候暖干化对地表能量交换特征的影响,张强^[33]利用CLM模式模拟资料做出了研究,除了净辐射、感热通量与降水的相关,本文的结果与模式模拟结果具有一致性.净辐射与降水相关方面,模式模拟资料状态较为离散且并未通过检验,而本文观测资料趋势则较为明显并通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验.感热通量与降水的相关性方面,本文结果较为离散,未能通过显著性检验.与气温的相关性方面,本文观测资料与模式模拟资料结果一致,但模式模拟资料趋势并不明显,本文则趋势明显,敏感度也更高.模式结果显示该地区30年来

地表热通量对降水的响应较气温更强,而本文结论为气温波动特别是冬季气温波动地表能量平衡有着影响.可见在较长时间尺度上,气候干旱化对于地表能量平衡的影响较为显著,这也是黄土高原半干旱地区的季风降水的气候特点.而在短时间尺度内,气温的变化对该地区陆面过程的影响更主要.

5 结论与讨论

本文初步分析了2006—2012年黄土高原地区SACOL站2006—2012年气候背景变化特征、土壤温湿变化特征、能量平衡分量变化特征,探讨了陆面过程对于气候波动的响应,得出以下几点结论:

1) 2006—2012年SACOL站气温降水都随时间呈现减少趋势,但降水的波动更为强烈.相对应的各层土壤温度与湿度也呈现与气温、降水变化特征的一致性特征,浅层土壤对于气温降水的响应更为敏感.

2) 地表能量通量变化也随气候背景变化呈现波动状态,净辐射年际变化总体呈现最为明显的上升趋势.土壤热通量变化幅度最小,基本呈现平稳状态.分为冬夏半年讨论后可看出,年净辐射的明显增加是夏冬半年共同贡献的,年感热及年潜热通量的变化主要是冬半年的贡献.

3) 冬半年地表平衡分量与气候波动的相关性更好,气候背景的波动对冬半年各能量平衡分量的影响更为强烈.而冬半年中,各分量又与气温变化有较高的相关,可见该地区冬半年气温的波动对地表能量各分量的影响相较于降水的变化更为显著.

与模式模拟结果对比可以看出, 观测资料的结果相关性更强、趋势更为显著.

4) 波文比及地表能量闭合度等路面过程参数也对气候背景的变化产生了响应. 波文比近7年的上升趋势呼应了该地区降水量减少的背景, 显示了干旱程度的加深. 能量闭合度的波动变化显示了由于气温、降水的减少, 导致了陆面能量不闭合程度的加深.

虽然, 本文利用陇中黄土高原陆面过程观测资料分析了该地区能量平衡分量的年际变化特征, 探讨了陆面水、热过程对于区域气候变化的响应规律. 但由于缺乏更多代表性测站更长时间尺度的陆面过程资料, 导致结论有一定的局限性. 这需要在今后开展的工作中逐步完善.

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL站)提供了陆面过程资料, 甘肃省气象局信息中心提供了常规气象资料, 在此表示感谢.

参考文献

- [1] Wang S, Zhang Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 059203 (in Chinese)[王胜, 张强 2011 物理学报 **60** 059203]
- [2] Ma J Y, Liang H, Luo Y, Li S K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 069601 (in Chinese)[马金玉, 梁宏, 罗勇, 李世奎 2011 物理学报 **60** 069601]
- [3] Li H Q, Guo W D, Sun G D, Zhang Y C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 019201 (in Chinese)[李红祺, 郭维栋, 孙国栋, 张耀存 2011 物理学报 **60** 019201]
- [4] Yue P, Zhang Q, Niu S J, Wang R Y, Sun X Y, Wang S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 219201 (in Chinese)[岳平, 张强, 牛生杰, 王润元, 孙旭映, 王胜 2012 物理学报 **61** 219201]
- [5] Yue P, Zhang Q, Li Y H, Wang R Y, Wang S, Sun X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 099202 (in Chinese)[岳平, 张强, 李耀辉, 王润元, 王胜, 孙旭映 2013 物理学报 **62** 099202]
- [6] Li H Y 2012 *M. S. Thesis* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [李宏宇 2012 硕士学位论文(兰州: 兰州大学)]
- [7] Zhang Q, Wang S 2008 *Adv. Earth. Sci.* **23** 167 (in Chinese)[张强王胜 2008 地球科学进展 **23** 167]
- [8] Zhang Q, Hu X J, Wang S, Liu H Y, Zhang J, Wang R Y 2009 *Adv. Earth. Sci.* **24** 363 (in Chinese)[张强, 胡向军, 王胜刘宏谊, 张杰, 王润元 2009 地球科学进展 **24** 363]
- [9] Liu H Z, Xu G, Dong W J, Fu C B, Shi L Q 2006 *Chinese J. Atmos. Sci.* **30** 108 (in Chinese)[刘辉志, 徐刚, 董文杰, 符淙斌, 石立庆 2006 大气科学 **30** 108]
- [10] Liu H Z, Dong W J, Fu C B, Shi L Q 2004 *Climate And Environmental Research* **9** 378[刘志辉, 董文杰, 符淙斌, 石立庆 2004 气候与环境研究 **9** 378]
- [11] Xu G 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [徐钢 2007 博士学位论文(北京: 中国科学院研究生院)]
- [12] Guo D L, Yang M X, Qu P, Wang G N 2009 *Glaciol. Georyol.* **31** 1116 (in Chinese)[郭东林, 杨梅学, 屈鹏, 万国宁, 王学佳 2009 冰川冻土 **31** 1116]
- [13] Ye D Z, Ji J J 2005 *Adv. Earth. Sci.* **20** 1047 (in Chinese)[叶笃正, 季劲钧 2005 地球科学进展 **20** 1047]
- [14] Liu H Z, Dong W J, Fu C B, Shi L Q 2004 *Climatic EnvironRes* **9** 378 (in Chinese) [刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 石立庆 2004 气候与环境研究 **9** 378]
- [15] Meng X X, Fu C B 2009 *Climatic EnvironRes* **14** 352 (in Chinese) [孟祥新, 符淙斌 2009 气候与环境研究 **14** 352]
- [16] Li H Y, Zhang Q, Shi J S, Zhao J H, Wang S 2012 *Acta Meteor Sinica* **70** 1137 (in Chinese)[李宏宇, 张强, 史晋森, 赵建华, 王胜 2012 气象学报 **70** 1137]
- [17] Wang W Y, Zhang Q, Yang F L 2013 *Acta Meteor Sinica* **71** 952 (in Chinese)[王文玉, 张强, 阳伏林 2013 气象学报 **71** 952]
- [18] Ma Y M, Yao T D, Hu Z Y, Wang J M 2009 *Adv. Earth. Sci.* **24** 1280 (in Chinese)[马耀明, 姚檀栋, 胡泽勇, 王介民 2009 地球科学进展 **24** 1280]
- [19] Ma Y M, Yao T D, Wang J M 2006 *Plateau Meteor.* **25** 343 (in Chinese) [马耀明, 姚檀栋, 王介民 2006 高原气象 **25** 343]
- [20] Zhao T B, Fu C B, Ke Z J, Guo W D 2010 *Adv. Earth. Sci.* **25** 242 (in Chinese) [赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 郭维栋 2010 地球科学进展 **25** 242]
- [21] Yang K, Toshio KOIKE 2008 *Adv Atmos Sci.* **25** 974
- [22] Wang J M 1999 *Plateau Meteor* **18** 280 (in Chinese)[王介民 1999 高原气象 **18** 280]
- [23] Lv D Y, Chen Z Z, Chen J Y, Wang G C, Ji J J, Chen H B, Liu Z L 2005 *Acta Meteor. Sin.* **63** 571 (in Chinese)[吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜王庚辰, 季劲钧, 陈洪滨刘钟龄 2005 气象学报 **63** 571]
- [24] Zhang Q, Huang R H, Wei G A 2005 *Adv. Earth. Sci.* **20** 427 (in Chinese) [张强, 黄荣辉, 卫国安 2005 地球科学进展 **20** 427]
- [25] Li H Y, Zhang Q, Wang S 2010 *Adv. Earth. Sci.* **25** 1070 (in Chinese) [李宏宇, 张强, 王胜 2010 地球科学进展 **25** 1070]
- [26] Yang X G, Ma P L, Wang R Y, Yang Q G, Liu H Y 2005 *J. Desert Res.* **25** 55 (in Chinese)[杨兴国, 马鹏里, 王润元, 杨启国, 刘宏谊 2005 中国沙漠 **25** 55]
- [27] Zhao J B, Du J, Huang C C 2002 *J. Desert Res.* **22** 257 (in Chinese) [赵景波, 杜娟, 黄春长 2002 中国沙漠 **22** 257]
- [28] Zhao J B, Hou Y J, Huang C C 2003 *J. Desert Res.* **23** 612 (in Chinese) [赵景波, 侯雨坚, 黄春长 2003 中国沙漠 **23** 612]
- [29] Zhang Q, Li H Y, Zhang L Y, Yue P, Shi J S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 019201 (in Chinese)[张强, 李宏宇, 张立阳, 岳平, 史晋森 2013 物理学报 **62** 019201]
- [30] Wang S, Zhang Q, Yue P, Zen J, Li H Y 2011 *Plateau Meteor* **30** 982 (in Chinese)[王胜, 张强, 岳平, 曾剑, 李宏宇 2011 高原气象 **30** 982]

- [31] Sun Z X, Zhang Q 2011 *J. Desert Res.* **31** 1302 (in Chinese)[孙昭萱, 张强 2011 中国沙漠 **31** 1302]
- [32] Zhang Q, Huang J, Zhang L, Zhang L Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 139202 (in Chinese)[张强, 黄菁, 张良, 张立阳 2013 物理学报 **62** 139202]
- [33] Wei Z G, Wen J, Lv S H 2005 *Plateau Meteor.* **24** 494 (in Chinese) [韦志刚, 文军, 吕世华 2005 高原气象 **24** 494]
- [34] Wen J, Wei Z, Lv S H, Chen S Q, Ao Y H, Liang L 2007 *Advances in Atmospheric Sciences* **24** 301
- [35] Liu Y Y, Wen J, Wei Z G, Li Z C, Zhang T T, Liu R 2007 *Plateau Meteor.* **26** 928 (in Chinese) [刘远永, 文军, 韦志刚, 李振朝, 张堂堂, 刘蓉, 2007 高原气象 **26** 928]
- [36] Wang X W, Wang Y R, Zhang C J 2007 *J. Desert Res.* **27** 123 (in Chinese)[王锡稳, 王毅荣, 张存杰 2007 中国沙漠 **27** 123]
- [37] Yang X G, Zhang Q, Wang R Y, Ma P L, Yang Q G, Liu H Y 2004 *Plateau Meteor.* **23** 828 (in Chinese) [杨兴国, 张强, 王润元, 马鹏里, 杨启国, 刘宏谊 2004 高原气象 **23** 828]
- [38] Yang Q G, Yang X G, Ma P L, Wang R Y, Liu H Y 2005 *Adv. Earth. Sci.* **2** 1012 (in Chinese) [杨启国, 杨兴国, 马鹏里王润元, 刘宏谊 2005 地球科学进展 **2** 1012]
- [39] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, Bi J R, Shi J S, Wang X, Chang Z L, Huang Z W, Yang S, Zhang B D, Wang G Y, Feng G H, Yuan J Y, Zhang L, Zuo H C, Wang S G, Fu C B, Chou J F 2008 *Advances in Atmospheric Sciences* **25** 906
- [40] Zhang Q, Li H Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5888 (in Chinese)[张强, 李宏宇 2010 物理学报 **59** 5888]
- [41] Zhang Q, Zeng J, Zhang L Y, Yao T 2012 *Chin. Sci. Earth. Sci.* (in Chinese) 42 1385[张强, 曾剑, 张立阳, 姚彤 2012 中国科学:地球科学 **42** 1385]
- [42] Yue P, Zhang Q, Yang J H, Li H Y, Sun X Y, Yang Q G, Zhang J Z 2011 *Acta Ecol. Sin.* **31** 6866 (in Chinese)[岳平, 张强, 杨金虎, 李宏宇, 孙旭映, 杨启国, 张建忠 2011 生态学报 **31** 6866]
- [43] Liu Y, Huang J, Shi G, Takamura T, Khatri P, Bi J, Shi J, Wang T, Wang X, Zhang B 2011 *Atmos. Chem. Phys.* **11** 11455
- [44] Zuo J Q, Huang J P, Wang J M, Zhang W, Bi J R, Wang G Y, Li W J, Fu P J 2009 *Adv. Atmos. Sci.* **26** 679
- [45] Li S, Zhong Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 029201
- [46] Ran L K, Yang W X, Chu Y L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 079102
- [47] Dai X G, Wang P, Zhang K J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 119201
- [48] Zhang Q, Wang S 2007 *Prog. Nat. Sci.* **17**211 (in Chinese) [张强, 王胜 2007 自然科学进展 **17** 211]
- [49] Zhang Q, Zeng J, Zhang L Y 2012 *Sci. China Earth Sci.* **55** 1872

Plateau surface energy balance components and interannual variability in response to climate fluctuations*

Xia Lu^{1)2)†} Zhang Qiang²⁾¹⁾³⁾

1) (*College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2) (*Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China*)

3) (*Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China*)

(Received 14 November 2013; revised manuscript received 3 February 2014)

Abstract

In this paper land surface observations and meteorological data are received from Semiarid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) and Yuzhong Station from 2006 to 2012. The climate changes of temperature and precipitation in the seven years are analyzed in Yuzhong, and the inter-annual variation of the components of surface energy balance in land surface is discussed. The Bowen ratio and the energy inter-annual fluctuation imbalance are also studied. Explorations of surface energy balance components as well as the land surface process parameters feedback on the temperature, precipitation interannual fluctuations on the Loess Plateau are carried out. Results show that the surface energy components are responsible to the fluctuations of the climate background. But the sensitivity varies; the net radiation and air temperature are more relevant to each other, and the sensible heat and latent heat have a better correlation with precipitation. Discussions are divided into summer and winter half year results, in which the winter half year balance component surface has a better correlation with climatic fluctuations. In the winter half year, each component has a high degree of correlation with temperature, showing that in this area each component of the land surface energy balance component corresponding to the change of temperature is more remarkable. The rising trend of Bowen ratio is corresponding to the reduction of precipitation, indicating that the drought is deepened. The change of the energy closure shows that the deepening of energy balance unclosure is due to the change of the climate background.

Keywords: components of energy balance, climate fluctuations, climate response

PACS: 92.60.Fm, 92.70.Bc

DOI: [10.7498/aps.63.119201](https://doi.org/10.7498/aps.63.119201)

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40830597), and the State Key Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2013CB430200, 2013CB430206).

† Corresponding author. E-mail: xialuyiyu@163.com