

黄土高原地表能量不闭合度与垂直感热平流的关系*

张 强^{1) 2) 3)} 李宏宇^{1) 3)}

1) (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)

2) (甘肃省气象局, 兰州 730020)

3) (兰州大学 大气科学学院, 兰州 730000)

(2009 年 9 月 30 日收到; 2009 年 11 月 18 日收到修改稿)

地表能量不平衡问题一直是陆面过程研究的一个重要科学难题. 本文利用在陇中黄土高原观测的陆面过程资料, 分析了气候地表能量不闭合度和短期地表能量不闭合度的分布特征, 研究了地表能量不闭合度与垂直速度之间的关系, 发现地表能量不闭合与垂直速度具有很好的相关性. 并且, 估算了近地层垂直感热平流通量, 分析了考虑垂直感热平流后的地表能量平衡的特征, 发现引入垂直感热平流输送对地表能量不闭合度有明显的改进.

关键词: 黄土高原, 非均匀性, 垂直感热平流, 能量不闭合度

PACC: 9260F, 9260E

1. 引 言

地表能量平衡是气候系统能量过程的关键环节^[1]. 20 世纪 80 年代末, 人们发现野外试验观测的地表能量普遍具有显著的不平衡现象, 1994 年在法国格勒诺布尔市召开了地表能量不平衡专题研讨会^[2]. Sakai 等人^[3]综合了许多观测试验和数值模拟的研究结果认为, 地表能量不平衡程度一般处在 10%—30% 的范围^[4,5], 对天气气候分析和数值模式具有不可低估的影响. 为此, 21 世纪初在美国的佛罗里达州开展了专门针对地表能量不平衡问题的 EBEX-2000 观测试验研究^[6].

目前为止, 地表能量不平衡问题仍然是困扰气象学界的一个重要难题^[7]. 一般认为地表能量不平衡主要是由于仪器误差、观测误差、可利用能量高估、有效能量低估、忽视了热储存、非平稳性和地表非均匀性等众多因素所致^[8]. 围绕这些方面, 国内外科学家采取一系列措施, 通过提高观测技术和仪器精度^[9]、完善资料质量控制技术^[10]、平面拟合^[10]、高低频响应订正^[11]、痕迹分析^[10]、平流影响订正^[12]、攻角订正^[12]、估算冠层和土壤热储量^[13]、非平稳性检验^[13]、计入大涡输送贡献^[14]、补充有效

能量^[15,16]、调整位相^[17,18]等在一定程度上改善了地表能量不平衡状况. 然而, 即使这些方法综合考虑后也只能使地表能量不平衡程度降低 10%—20% 左右, 仍然有 10%—20% 的地表能量无法解释, 尤其对夜间地表能量不平衡情况基本上没有得到有效改进^[19]. 从理论上讲, 中尺度垂直能量平流输送及植物生理过程的能量利用和释放等也可能会影响到地表能量不平衡, 从这些方面探讨地表能量不平衡的原因和机制, 可能是弄清地表能量不平衡原因的重要突破口.

一般, 在假定下垫面均匀、大气定常的情况下, 大气接近静力平衡状态, 大气边界层几乎没有垂直运动, 所以近地层大气物质和能量垂直输送只考虑湍流输送过程, 而不考虑垂直运动引起的平流输送. 然而, 实际下垫面总是不均匀的, 大气作为高雷诺数的流体, 拥有各种不同形式的运动^[20-25], 是高度复杂而多变的^[26], 因此静力不平衡才是大气的真实状态. 热力强迫和地形作用往往会引起局地环流或中小尺度运动, 这种有组织的局地环流会形成量级较小但作用十分关键的垂直运动, 在局地环流较强时垂直运动速度甚至可能会达到与水平运动同样的量级^[27,28], 对物质和能量的垂直平流输送不可低估. 国际上, 最初主要对洋面中尺度运动引起

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40830957)资助的课题.

E-mail: zhangqiang@ cma. gov. cn; qzhang@ ns. lzb. ac. cn

的垂直平流热量输送比较重视^[29], 并且已用参数化方法估算了这种中尺度垂直速度对洋面能量输送的贡献^[30]. 然而, 对于陆面垂直平流能量输送对地表能量不平衡的影响基本上还没有被认真关注. 因此, 国家自然科学基金重点项目“黄土高原陆面过程试验研究(LOPEX)”^[31, 32]把黄土高原区地表能量不平衡问题及其影响因素研究作为其主要研究内容之一. 本文将试图利用陇中黄土高原榆中陆面过程综合观测资料, 分析垂直运动与陆面能量不平衡程度的关系, 研究和改进陆面能量平衡的分析方法.

2. 观测资料介绍

2.1. 观测场地和资料内容

本文研究资料来自甘肃榆中半干旱气候与环境观测站(SACOL), 该站是兰州大学建立的气候系统综合观测站, 也是“黄土高原陆面过程试验研究(LOPEX)”项目的代表性观测点之一, 已从2006年开始开展包括陆面过程在内的多圈层长期连续观测. 该站设在兰州大学榆中校区西面的萃英山上, 位于35.94°N, 104.13°E, 海拔高度为1961 m, 处在温带半干旱气候区. 观测场基本上均匀平坦, 地表生长着自然旱生植被, 受人类活动影响较小. 从更大范围看, 该观测站所代表的下垫面具有沟壑梁峁形成的显著不均匀性, 属于黄土高原典型地形地貌特征.

该站能够测量总辐射、反射辐射、大气向下长波辐射、地表向上长波辐射、直接辐射等地表辐射分量, 测量仪器架设在1.5 m高处; 6层土壤温度, 感应头分别埋设在地下2, 5, 10, 20, 50和80 cm深度; 5层土壤湿度, 感应头分别埋在地下5, 10, 20, 40和80 cm深度; 2层土壤热流量, 热流板分别埋置在5和10 cm两个深度. 近地层还有三维超声风速仪的观测, 感应头在3 m高处, 可得到近地层动量通量、感热通量、潜热通量、水平风速和垂直速度. 各种观测仪器主要技术指标见文献[33], 本文分析直接用半小时统计平均资料. 为了减少能量不平衡问题的复杂性, 本文排除了云和降水对地表能量收支的影响, 仅用2008年夏季6月1日—8月15日期间典型晴天的陆面过程观测资料来进行分析, 这段时间的观测资料相对可靠、连续, 基本能够代表典型

夏季晴天的特征. 由于这期间正是夏季风降水期, 典型晴天总共只有11天, 为便于分析, 把这11天按先后顺序编为1到11的时间序列. 本文所用时间均为北京时, 比观测站的地方时早大约一小时.

2.2. 资料处理方法

地表净辐射可由下式计算得到^[34]:

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

式中, R_n 为净辐射, R_{sd} 为总辐射, R_{su} 为反射辐射, R_{ld} 为大气向下长波辐射, R_{lu} 为地表向上长波辐射, 单位均为 W/m^2 . 近地层动量通量、感热通量 H 、潜热通量 E 可由涡动相关法^[33] 计算得到

$$\rho_0 = \overline{u^2} = ((\overline{wu})^2 + (\overline{wv})^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$H = C_p \overline{w\theta}, \quad (3)$$

$$E_0 = \overline{wq}, \quad (4)$$

这里, ρ_0 是空气密度, C_p 是定压比热, θ 是蒸发潜热; \overline{wu} , \overline{wv} , $\overline{w\theta}$, \overline{wq} 是风、温、湿脉动协方差, 能够直接观测或查算.

3. 地表能量不闭合度与垂直速度的关系

在均匀、平坦下垫面和定常大气条件下, 地表能量平衡方程可用下式^[34]表示:

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

上式中, R_{n0} 表示表面净辐射, H_0 是地表感热通量, E_0 是地表潜热通量, G_0 是地表土壤热通量. 在现实条件下, 下垫面和大气条件常常比较复杂, 地表能量总是存在一定程度不平衡性. Cave 等人曾用闭合度来表示地表能量平衡程度^[35]

$$E_c = (H_0 + E_0) / (R_{n0} - G_0), \quad (6)$$

这里, E_c 表示地表能量闭合度. 一般 E_c 等于1时, 表示地表能量完全闭合; 闭合度偏离1越大, 说明闭合度越低. 是由于以往观测的地表有效能量大多明显低于地表可利用能量^[36], 所以 E_c 既好用也比较简单. 但实际情况是地表有效能量有时候会被低估, 有时也会高估, 所以闭合度 E_c 往往会向1两边发散, 大于1时也没有上限约束, 不便于理解和应用. 同时, E_c 是从正面来表征地表能量平衡状态, 没有突出地表能量不平衡问题. 为此, 在这里提出能量不闭合度的概念, 并可用地表能量不平衡差额的相对值来表示

$$E_{nc} = (R_{n0} - G_0 - H_0 - E_0) / (R_{n0} - G_0), \quad (7)$$

上式中, E_{nc} 表示地表能量不闭合度. 当 E_{nc} 等于0

时不闭合度最小, 地表能量完全平衡; E_{NC} 的绝对值越大, 能量越不闭合, 但一般最大趋向于 1, 具有收敛性. 为了分析不同时间尺度地表能量不平衡性的表现特征, 根据 Cave 的研究^[35] 把半小时平均的地表能量不闭合度称为短期不闭合度即 $E_{NCshort}$, 它反映了天气演化和中小尺度运动的影响; 把不闭合度的日平均值称为气候不闭合度即 $E_{NCclimate}$, 它更多反映了气候即全球性的影响, 由于一天之内地表能量通量有时可能被低估, 也有时会被高估, 平均时会部分相互抵消, 所以一般比短期不闭合度小.

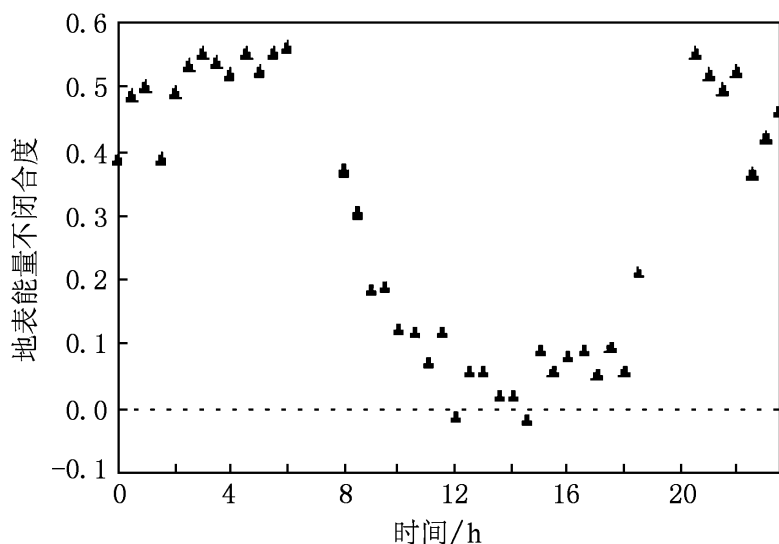


图 1 夏季地表能量不平衡量的平均日变化

图 1 是夏季地表能量不闭合度的平均日变化. 虽然, 以往很多研究认为地表能量不平衡主要是由于地表土壤热通量的低估引起^[37, 38]. 但从图 1 可以很容易发现, 即使已经用比较精确计算的土壤热储项对地表土壤热通量进行了较严格订正, 地表能量不闭合度仍然比较显著, 而且基本以正值为主, 这说明地表有效能量仍然被明显低估. 图 1 还表明, 全天平均不闭合度达 0.29 左右, 这对地气相互作用而言是十分严重的问题, 无疑会影响天气分析和气候评估^[39]. 并且, 地表能量不闭合度还具有明显的日变化特征, 白天较小, 有时甚至在 0 附近; 夜间却很大, 最大可以达到 0.56.

图 2 是晴天的气候不闭合度和短期不闭合度绝对值日平均比较. 该图表明, 气候不闭合度和短期不闭合度变化趋势大体一致, 在气候不闭合度较高时, 短期不闭合度也比较高. 不过, 它们之间定量差别也比较明显, 气候不闭合度绝对值最大为 0.35, 平均值为 0.27; 而短期不闭合度绝对值日平均最大值为 0.36, 平均值到达 0.31. 可见, 正如前面推测, 气候不闭合度比短期不闭合度小, 而且平均值偏少要更明显一些.

虽然 Foken 等人^[6] 从观测技术和资料处理方法

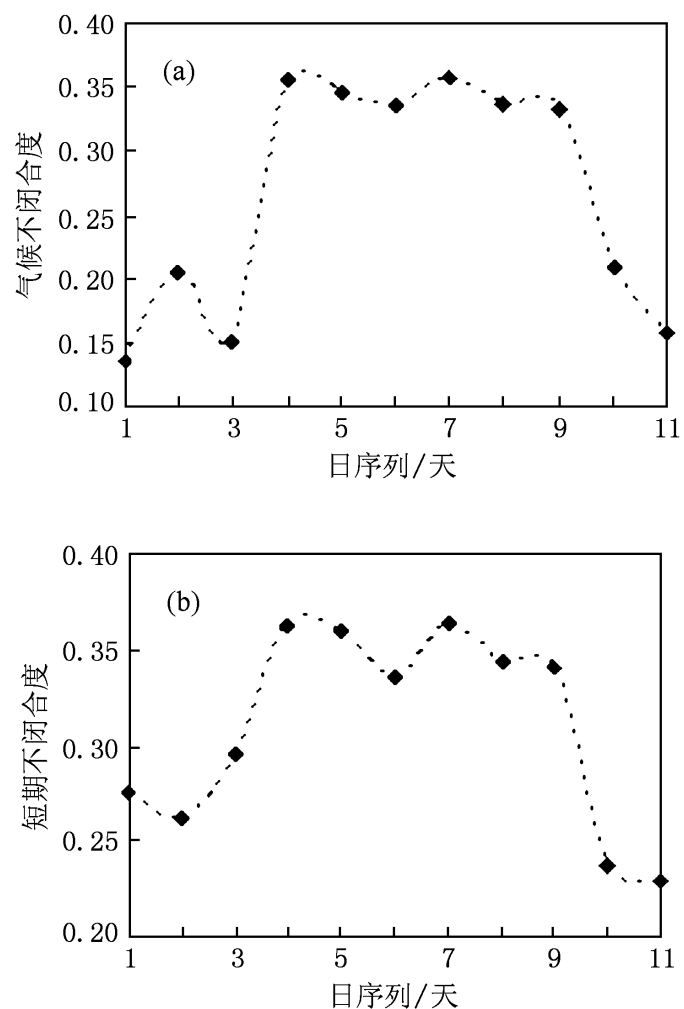


图 2 绝对值的日平均值比较 (a) 晴天气候不闭合度; (b) 短期不闭合度

等方面, 对经过地表土壤热通量修正后仍然保留的能量不闭合部分做过一些改进, 但效果并不十分理想. 这使我们有理由从中尺度垂直平流能量输送等物理过程方面来探索地表能量不闭合问题. 事实上, 热力强迫和地形作用往往很容易引起局地环流或中小尺度运动, 其形成的能量垂直平流输送对地表能量平衡的影响是不可低估的.

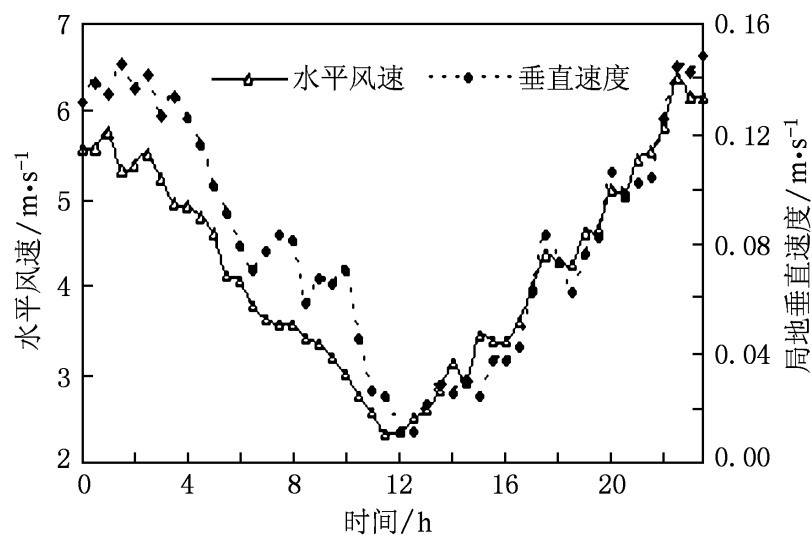


图 3 近地层 3 m 高处垂直和水平风速的平均日变化

图 3 是近地层大气垂直速度和风速的平均日变化特征. 该图显示, 近地层垂直速度平均在 0.1 m/s 左右, 最大可达 0.15 m/s 以上. 可见, 以黄土高原沟壑梁峁地形为特征的显著复杂地形引起的垂直运

动比较显著. 而且, 垂直速度在白天很小, 夜间较大, 变化趋势几乎与图 1 中能量不闭合度日变化趋势几乎完全一致. 这种夜间较大的中小尺度垂直运动与夜间较盛行的越山气流抬升有关^[40], 这从图 3 中给出的垂直与水平风速变化趋势的一致性可以充分证明.

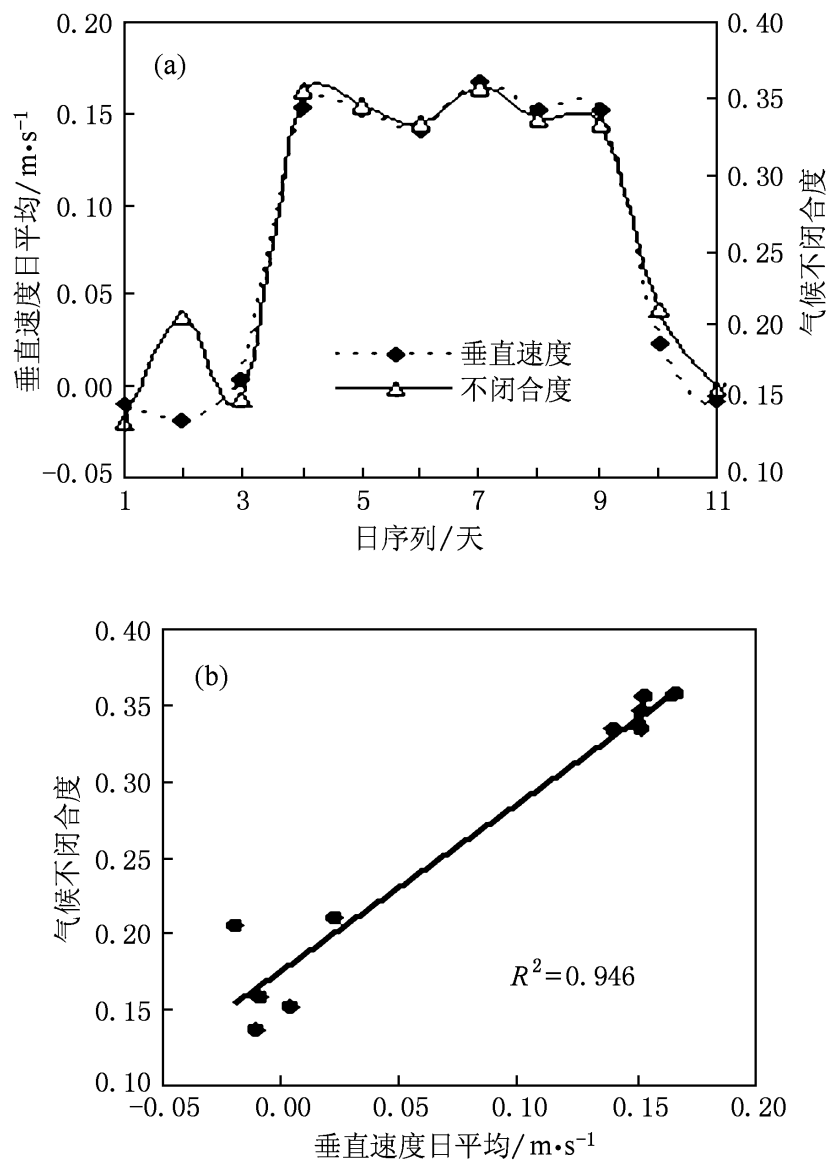


图 4 (a) 近地层垂直速度与气候能量不平衡度的比较; (b) 及其相关性

为了全面了解近地层垂直速度与地表能量不闭合度的关系, 在图 4 中给出了近地层垂直速度与气候能量不平衡度的比较 (a) 及其相关性 (b). 很显然, 近地层垂直速度与气候能量不闭合度要更加一致一些, 除在夜间有少量差异外, 其余时间几乎完全对应, 相关性高达 0.97.

同时, 还可以用 30 min 平均资料对能量不闭合度进行更细致地分析. 图 5 给出了近地层垂直速度与短期能量不闭合度的比较及其相关性, 可见, 尽管短期能量不闭合度不如气候能量闭合度与垂直速度相关性好, 但近地层垂直速度变化趋势与短期能量不闭合度变化趋势的相关性仍然接近 0.61, 在大多时候保持了很好的一致性, 并可以建立如下拟合关系式

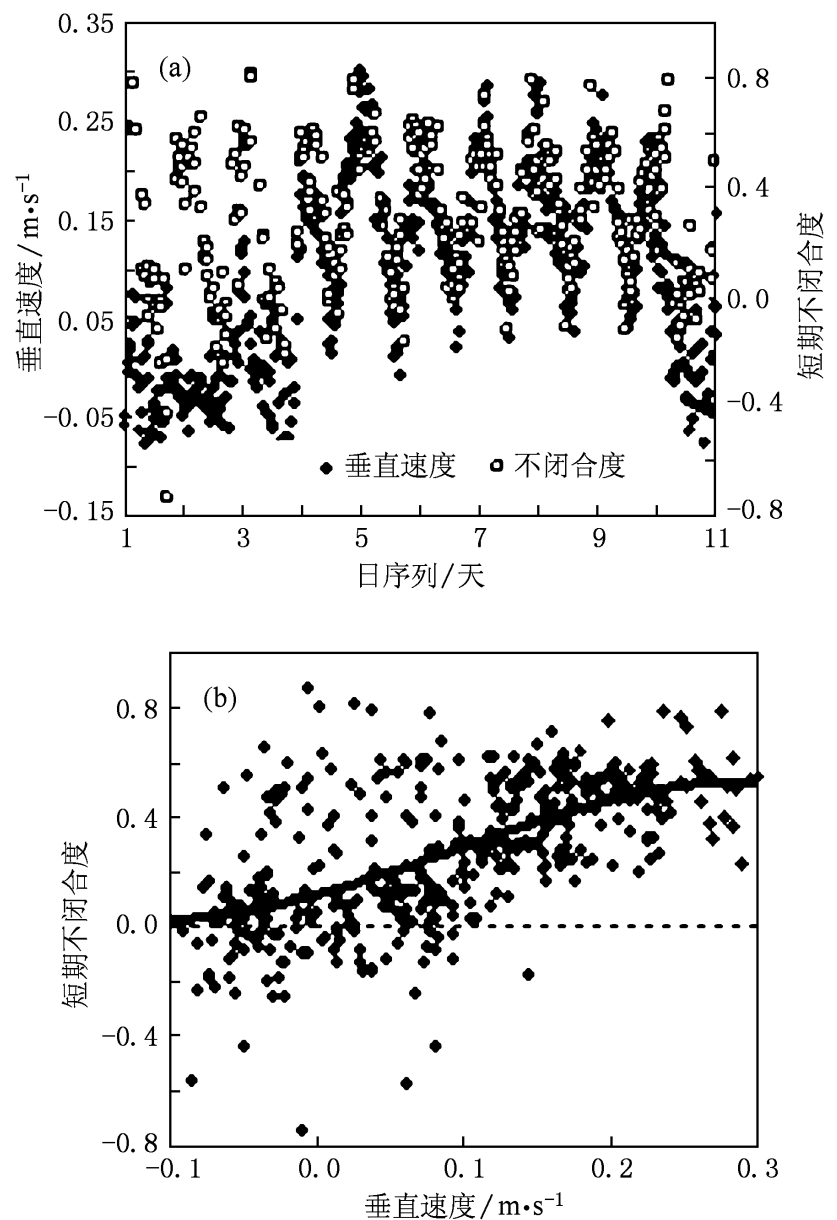


图 5 (a) 近地层垂直速度与短期能量不平衡度的比较; (b) 及其相关性

$$E_{NCshort} = 0.1201 + 1.4626 \bar{w} + 4.2899 \bar{w}^2 - 15.289 \bar{w}^3, \quad (8)$$

这里, \bar{w} 是近地层垂直速度. 这与以往研究在西北干旱区敦煌观测分析的结果似乎比较一致^[41, 42]. 另外, 短期地表能量不闭合度变幅明显比气候不闭合度大, 不闭合度最大可超过 0.8.

从上面分析基本可以断定, 垂直平流能量输送对地表热量输送的贡献比较显著, 在地表能量平衡分析中应该作为地表有效能量的分量之一被考虑.

4. 垂直平流能量输送及其对地表能量平衡的影响

如果考虑垂直平流的感热输送, 地表能量平衡方程就可由 (5) 式改写成下式:

$$R_{m0} = H_0 + E_0 + G_0 + H_{mv}, \quad (9)$$

在上式中, H_{mv} 是垂直感热平流通量, 单位为 W/m^2 . H_{mv} 可以表示为

$$H_{mv} = - C_p \int_0^{z_r} \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} dz, \quad (10)$$

其中, ρ 是空气密度, C_p 是空气定压比热; Z_r 为观测高度; \bar{w} 是垂直速度, \bar{T} 是近地层温度. 上式可改写为差分形式为

$$H_{mv} = - \rho C_p Z_r \bar{w}_{ave} \frac{\bar{T}}{Z}, \quad (11)$$

这里, \bar{w}_{ave} 是近地层空间平均垂直速度. 可近似认为垂直速度在近地层随高度线性变化, 因此 \bar{w}_{ave} 可用 $\bar{w}_r / 2$ 代替, \bar{w}_r 是脉动仪器观测的平均垂直速度; $\frac{\bar{T}}{Z}$ 是近地层温度梯度, 可用 1 m 和 3 m 两层温度梯度观测资料来计算.

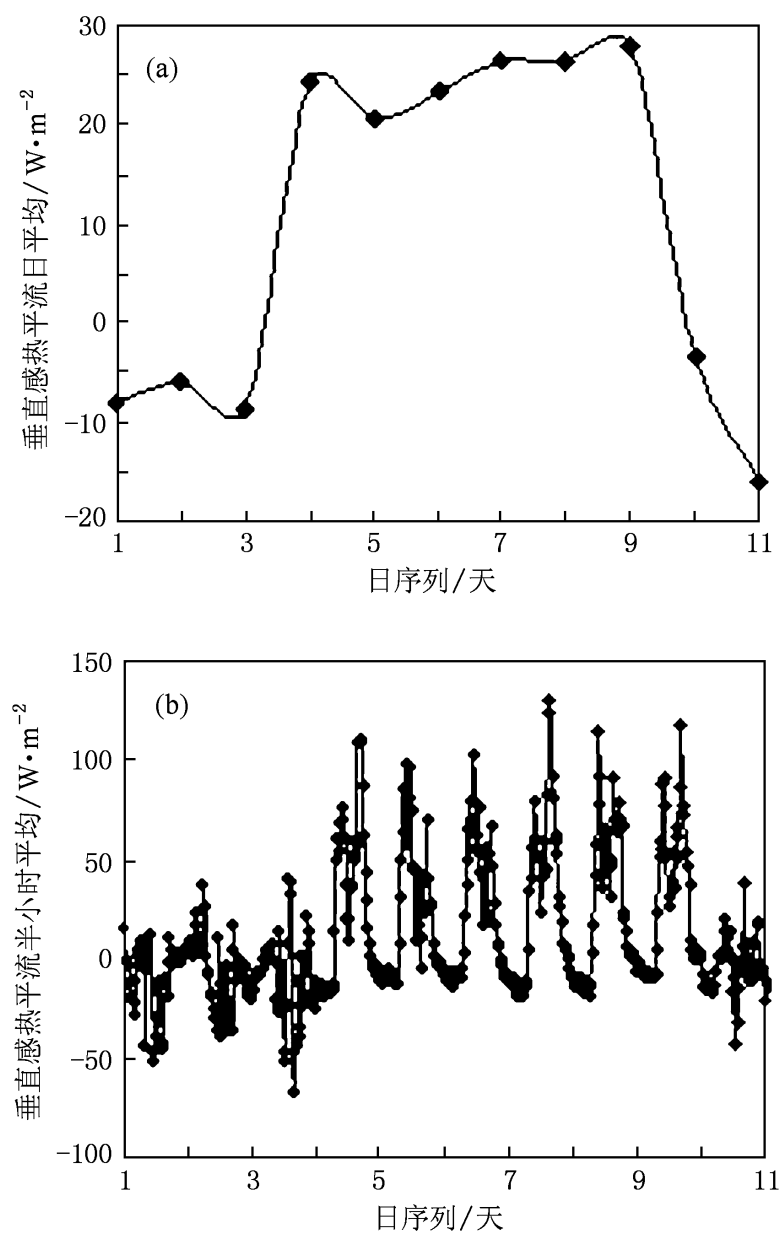


图 6 垂直感热平流通量 (a) 日平均; (b) 30 min 平均

图 6 是晴天日平均 (气候平均) 和半小时平均 (短期平均) 的垂直感热平流通量. 由图可见, 日平均的垂直感热平流平均在 10 W/m^2 左右, 最大超过 25 W/m^2 . 尤其, 日平均垂直感热平流基本以正值为主, 其日变化趋势也几乎与图 4 给出的气候能量不闭合度完全一致, 这说明垂直感热平流正好可以部分弥补被低估的地表有效能量. 30 min 平均的垂直感热平流通量的波动特征与图 5(a) 中的短期能量不闭合度的波动相一致, 最大可超过 100 W/m^2 ,

对低估的地表有效能量的弥补更显著.

图 7 是加入垂直感热平流改进后地表能量不闭合度的平均日变化特征. 图 7 表明, 加入垂直感热平流输送后, 平均值降低到了 0.13. 与未考虑垂直平流输送时的图 1 相比, 闭合度的平均值均降低明显, 缩小了 0.16, 占到了原不闭合度的 55%.

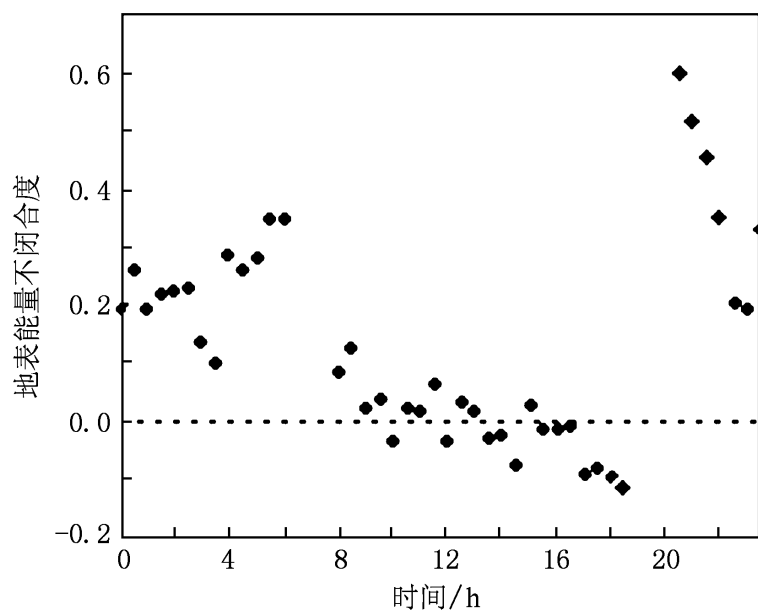


图 7 加入垂直感热平流改进后地表能量不闭合度平均日变化

为了进一步分析垂直感热平流对地表能量平衡的改进效果, 图 8 给出了加入垂直输送后气候不闭合度与短期不闭合度绝对值的日平均值. 改进后的地表能量气候不闭合度绝对值最大为 0.18, 平均值为 0.11. 与未考虑垂直感热平流的图 2(a) 相比改进十分明显, 气候不闭合度最大值和平均值分别缩小了 0.17 和 0.16, 分别占到了原不闭合度的 48.5% 和 59.3%. 地表能量短期不闭合度绝对值的日平均值最大为 0.28, 平均值为 0.21, 与未考虑垂直感热平流的图 2(b) 相比同样改进比较大, 但不如气候不闭合度改善明显. 短期不闭合度最大值和平均值分别缩小了 0.08 和 0.1, 分别占到原不闭合度的 22.2% 和 32.2%. 总之, 由上可见, 垂直感热平流输送对地表能量平衡的贡献十分重要.

在考虑垂直感热平流输送后, 可以在图 9 中给出更接近实际的地表能量不平衡特征. 可见, 无论是平均日变化还是日际变化, 垂直平流感热输送都达到了与地表土壤热通量同量级, 甚至在很多时候超过了地表土壤热通量的贡献; 地表能量收支的残余部分几乎比任何地表能量收支分量都小, 基本达到了可容忍程度.

同时, 从图 10 给出的地表能量分量对净辐射的利用比率可以看出, 湍流感热通量对地表净辐射的利用比率最高, 占到了 60% 左右, 而潜热通量、土壤

热通量和垂直感热平流似乎在同一个水平上, 大约分别占到 10%—20%; 能量收支残余部分占地表净

辐射的比率基本维持在 10% 左右, 地表有效能量仍然存在一定程度的低估。

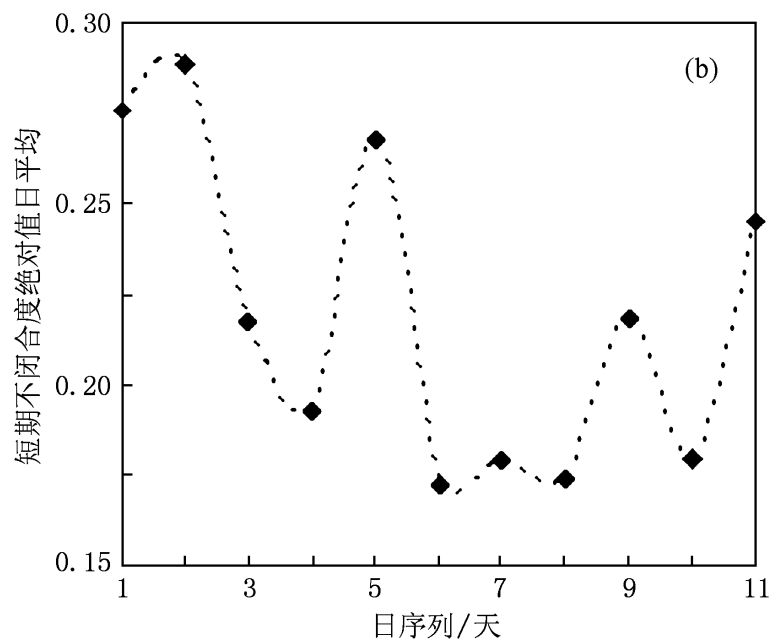
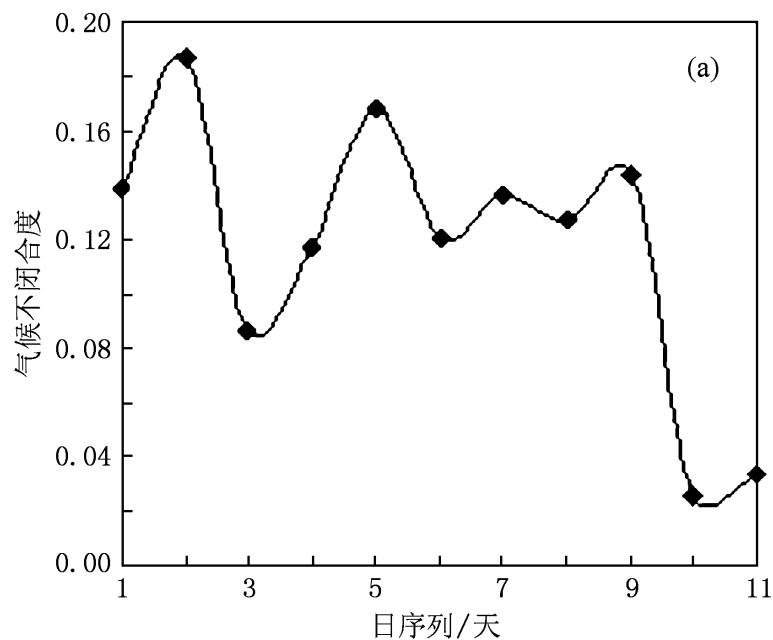


图 8 不闭合度绝对值日平均的比较 (a) 加入垂直感热平流后气候; (b) 短期

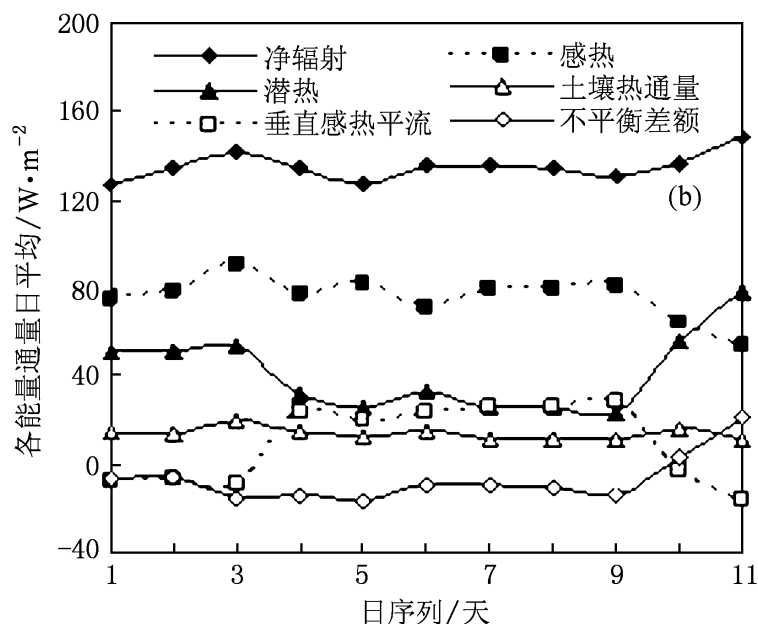
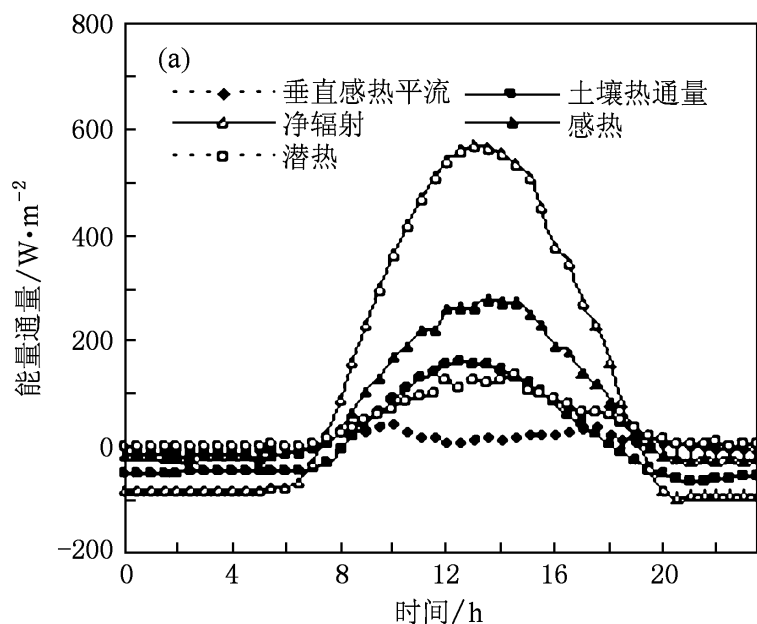


图 9 (a) 引入垂直感热平流改进的地表能量平衡平均日变化; (b) 日际变化特征

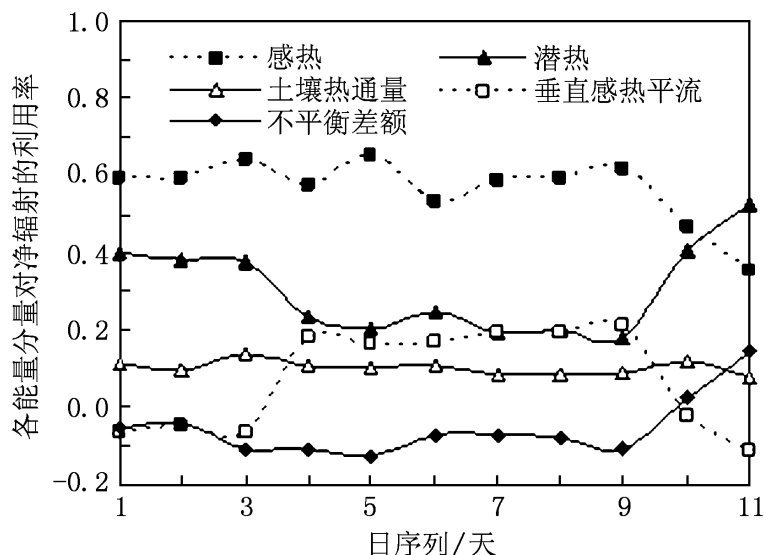


图 10 地表能量分量对净辐射利用率的日际变化

5. 结论与讨论

在黄土高原地区, 即使经过地表土壤热通量修正后, 地表能量收支仍然存在比较突出的不闭合现象, 气候不闭合度和短期不闭合度平均值分别达到了 0.27 和 0.31。虽然气候不闭合度比短期不闭合度小, 但不闭合度总体比较可观, 地表有效能量仍然显著偏低, 对天气分析、气候评估和数值模拟的影响均比较严重。

黄土高原地区下垫面特征比较复杂性, 沟壑梁峁纵横, 山峦起伏不断, 气流越山效应会形成比较显著的垂直运动, 近地层垂直速度平均可达到 0.1

m/s 左右. 而且, 近地层垂直速度与地表能量不闭合度变化趋势几乎完全一致, 相关性系数高达 0.97. 这说明黄土高原地表能量不闭合度与复杂地形地貌引起的垂直平流输送有比较密切的关系.

通过估算表明, 垂直感热平流通量相当可观, 其日平均值最大能够超过 25 W/m^2 , 甚至其半小时平均值最大可以超过 100 W/m^2 ; 而且其变化趋势几乎与地表能量不闭合度完全一致, 可以部分弥补被低估的地表有效能量. 考虑垂直感热平流输送后, 地表能量平衡有了明显改善, 气候不闭合度和短期不闭合度分别缩小了 0.16 和 0.1, 占到原不闭合度的 59.3% 和 32.2%. 能量收支残余部分仅占净辐射的 10% 左右, 大致可以容忍.

虽然, 本文在一定程度上证明了垂直感热平流

对地表能量收支具有重要贡献, 但地表有效能量仍然存在一定程度低估. 所以, 在今后研究中应该进一步完善观测方法和资料处理技术, 尽可能消除观测技术和计算方法对地表能量收支的影响. 同时, 本文分析所用资料主要代表了黄土高原地区的陆面过程特征, 垂直感热平流输送在其他地区陆面过程中的表现如何还需要更广泛的试验研究进行探讨. 另外, 还需要进一步利用数值模拟手段尝试模拟近地层垂直输送在地气相互作用中所扮演的角色, 深入探讨垂直平流输送到底能够在多大尺度上对地表能量输送有明显影响.

兰州大学大气科学学院 SACOL 站为本文提供了研究资料, 在此表示感谢.

- [1] Qiao J, Zhang Q, Zhang J 2008 *Arid Meteor.* **26** 73 (in Chinese) [乔娟、张强、张杰 2008 干旱气象 **26** 73]
- [2] Foken T, Oncley S P 1995 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **76** 1191
- [3] Sakai R K, Fitzjarrald D R, Moore K E 2001 *J. Appl. Meteor.* **40** 2178
- [4] Tsvang L R, Fedorov M M, Kader B A, Zubkovskii S L, Foken T, Richter S H, Zeleny J 1991 *Bound. -Layer Meteor.* **55** 141
- [5] Kanemasu E T, Verma S B, Smith E A, Fritschen L Y, Wesely M, Fild R T, Kustas W P, Weaver H, Stewart Y B, Geney R, Panin G N, Moncrieff J B 1992 *J. Geophys. Res.* **97** 18547
- [6] Oncley S P 2007 *Bound. -Layer Meteor.* **123** 1
- [7] Zhang Q, Wang S, Zhang J, Wang R Y, Liu H Y, Li Y Y 2009 *Adv. Earth Sci.* **24** 1185 (in Chinese) [张强、王胜、张杰、王润元、刘宏谊、李岩瑛 2009 地球科学进展 **24** 1185]
- [8] Foken T 2008 *Ecol. Appl.* **18** 1351
- [9] Brotzge J A, Crawford K C 2003 *J. Hydrometeor.* **14** 160
- [10] Wang J M, Wang W Z, Ao Y H, Sun F L, Wang S G 2007 *Adv. Earth Sci.* **22** 791 (in Chinese) [王介民、王维真、奥银焕、孙方林、王树果 2007 地球科学进展 **22** 791]
- [11] Foken T, Wimmer F, Mauder M, Thomas C, Liebethal C 2006 *Atmos. Chem. Phys.* **6** 4395
- [12] Moore C J 1986 *Bound. -Layer Meteor.* **37** 17
- [13] Nakai T, Molen M K, Gash J H C, Kodama Y 2006 *Agric. For. Meteor.* **136** 19
- [14] Liebethal C, Huwe B, Foken T 2005 *Agric. For. Meteorol.* **132** 253
- [15] Kanda M, Inagaki A, Letzel M O, Raasch S, Watanabe T 2004 *Bound. -Layer Meteorol.* **110** 381
- [16] Gao Z, Fan X, Bian L 2003 *Soil Sci.* **168** 99
- [17] Yang H W, Xie Z H 2003 *Prog. Nat. Sci.* **13** 615 (in Chinese) [杨宏伟、谢正辉 2003 自然科学进展 **13** 615]
- [18] Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, Leuning R, Cleugh H A 2003 *Bound. -Layer Meteor.* **107** 1
- [19] Guo J X, Bian L G, Dai Y J 2008 *Sci. Chin. Ser. D* (in Chinese) **38** 1103 (in Chinese) [郭建侠、卞林根、戴永久 2008 中国科学 (D) **38** 1103]
- [20] Ping F, Luo Z X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4319 (in Chinese) [平凡、罗哲贤 2009 物理学报 **58** 4319]
- [21] Lian Q X, Guo H 2004 *Acta Phys. Sin.* **57** 2226 (in Chinese) [连祺祥、郭辉 2004 物理学报 **57** 2226]
- [22] Meng Q G, Cai Q D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3090 (in Chinese) [孟庆国、蔡庆东 2004 物理学报 **53** 3090]
- [23] Chen J Y, Chen S G, Wang G R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3123 (in Chinese) [陈京元、陈式刚、王光瑞 2005 物理学报 **54** 3123]
- [24] Li L, Hu F, Cheng X L, Jiang J H, Ma X G 2006 *Chin. Phys.* **15** 149
- [25] Zhang G X, Zhao R F, Zhang Y C, Zhao P T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7390 (in Chinese) [张改霞、赵日峰、张寅超、赵培涛 2008 物理学报 **57** 7390]
- [26] Cui X P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2304
- [27] Mahrt L 1998 *J. Atmos. Oceanic. Technol.* **15** 416
- [28] Lee X H 1998 *Agric. For. Meteor.* **91** 39
- [29] Zhang Q, Zeng X B, Dickinson R E, Johnson D E, Tao W K 2001 *Acta Oceanol. Sin.* **23** 133 (in Chinese) [张强、Zeng X B, Dickinson R E, Johnson D E, Tao W K 2001 海洋学报 **23** 133]
- [30] Zeng X B, Zhang Q, Johnson D, Tao W K 2002 *Mon. Wea. Rev.* **130** 2125
- [31] 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]
- [32] Zhang Q, Hu X J, Wang S, Liu H Y 2009 *Adv. Earth Sci.* **24** 363 (in Chinese) [张强、胡向军、王胜、刘宏谊 2009 地球科学进展 **24** 363]

- [33] Huang J P 2008 *Adv. Atmos. Sci.* **25** 906
- [34] Stull R B (Translated by Yang C X) 1991 *Introduction to Boundary Layer Meteorology*(Beijing: Meteorological Press) (in Chinese) pp719—720 [Stull R B 著 杨长新译 1991 边界层气象导论 (北京: 气象出版社) 第 719—720 页]
- [35] Cava D, Contini D, Donato A 2008 *Agric. For. Meteor.* **148** 82
- [36] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, Cook D R, Houser P R, Meyers T P, Prueger J H, Starks P J, Wesely M L 2000 *Agric. For. Meteor.* **103** 279
- [37] Tanaka K, Tamagawa I, Ishikawa H, Ma Y M, Hu Z Y 2003 *J. Hydrol* **283** 169
- [38] Fimigan J J 2005 *Agric. For. Meteor.* **136** 108
- [39] Xiong K G, Yang J, Wan S Q, Feng G L, Hu J G 2009 *Acta Phys. Sin* **58** 2843 (in Chinese) [熊开国、杨 杰、万仕全、封国林、胡经国 2009 物理学报 **58** 2843]
- [40] Zhang Q, Lü S H 2001 *Plateau Meteor.* **20** 118 [张 强、吕世华 2001 高原气象 **20** 118]
- [41] Zhang Q, Wang S 2005 *Acta Ecol. Sin* **25** 2459 (in Chinese) [张 强、王 胜 2005 生态学报 **25** 2459]
- [42] Zhang Q, Wang S 2005 *J. Glac. Geoc.* **27** 282 (in Chinese) [张 强、王 胜 2005 冰川冻土 **27** 282]

The relationship between surface energy balance unclosure and vertical sensible heat advection over the loess plateau*

Zhang Qiang^{1) 2) 3)} Li Hong-Yu^{3) 1)}

1) (*Institute of Arid Meteorology, CMA; Key laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China*)

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

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

(Received 30 September 2009; revised manuscript received 18 November 2009)

Abstract

The surface energy imbalance problem has been an important challenge in the study of surface land process since it was found in the late 1980s. By utilizing the observed data in the land surface process experiment carried out over the Loess Plateau region in the middle part of Gansu, the characteristics of climate unclosure and short-term unclosure of the surface energy balance are analyzed and the relationship between surface energy balance unclosure and vertical velocity is studied in the paper. It is found that there is a good correlation between surface energy balance unclosure and vertical velocity. Furthermore, the paper estimates the values of vertical sensible heat advection in the surface layer. After considering the vertical sensible heat advection, characteristics of the surface energy balance condition are analyzed again and there is a significant improvement in the surface energy balance unclosure. This means vertical velocity plays an important role in the surface energy budget and the vertical sensible heat advection has a significant influence on the surface energy balance unclosure over the Loess Plateau region.

Keywords: loess plateau, heterogeneity, vertical, vertical sensible heat advection, energy balance unclosure

PACC: 9260F, 9260E

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40830957) .

E-mail: zhangqiang@ cma. gov. cn; qzhang@ ns. lzb. ac. cn