

# 淮河流域农田生态系统能量变化特征及闭合率分析

谢五三<sup>1,2</sup> 段春锋<sup>1,2,3</sup> 田红<sup>1,2</sup>

(1 安徽省气候中心, 合肥 230031; 2 安徽省气象科学研究所/大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031;  
3 寿县国家气候观象台/中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 寿县 232200)

**摘要:** 农田生态系统能量变化特征及闭合率对农田下垫面区域上大气边界层的动力、热力结构研究以及区域数值模式陆气交换参数化的改进等具有重要意义。基于寿县国家气候观象台2007年7月—2013年4月通量观测系统中的显热、潜热、土壤热通量以及辐射通量等观测资料, 分析淮河流域农田生态系统能量变化特征及闭合率。结果表明: 显热、潜热通量、波恩比以及土壤热通量日变化均呈单峰型分布, 年平均波恩比为0.43, 表明下垫面潜热通量占主导地位。各辐射分量和净辐射日变化幅度差异较大, 其中向下短波辐射变化幅度最大, 而向下长波辐射变化幅度最小; 从月变化来看, 均呈现单峰型分布, 地面向上长波辐射总平均值最大, 而向上短波辐射最小。有效能量和湍流通量线性回归线基本在1:1线以下, 表明能量存在不闭合, 且湍流通量小于有效能量。能量平衡比平均为94%, 5月最大, 12月最小; 春季的能量闭合率最大, 其次是夏季, 冬季最小。总体来看, 淮河流域农田生态系统能量闭合率相对较高, 通量观测系统资料质量是可靠的。

**关键词:** 热通量, 辐射通量, 闭合率, 农田生态系统, 淮河流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.019

## Analysis of Energy Change Characteristics and Closure Rate of Cropland Ecosystem in Huaihe River Basin

Xie Wusan<sup>1,2</sup>, Duan Chunfeng<sup>1,2,3</sup>, Tian Hong<sup>1</sup>

(1 Anhui Climate Center, Hefei 230031 2 Anhui Institute of Meteorological Sciences, Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

3 Shouxian National Climatology Observatory, Huaihe River Basin Typical Farm Eco-meteorological Experiment Field of CMA, Shouxian 232200)

**Abstract:** The energy change characteristics and closure rate of cropland ecosystem are of great significance to the study of the dynamic and thermal structure of the atmospheric boundary layer over the cropland underlying surface and the improvement of the parameterization of land-atmosphere interaction of the regional numerical model. Based on the observation data of sensible heat flux, latent heat flux, soil heat flux and radiation flux in flux observation system in Shouxian National Climatological Observatory from July 2007 to April 2013, this paper studies the energy change characteristics and closure rate of cropland ecosystem in Huaihe River Basin. Results show that the daily variation characteristics of sensible heat flux, latent heat flux, Bowen ratio and soil heat flux are all of unimodal distributions, and the annual average Bowen ratio is 0.43, which shows that latent heat flux of underlying surface is dominant. The daily variation amplitude of each radiation component and net radiation are quite different, among which the variation amplitude of downward shortwave radiation is the largest, while that of downward longwave radiation is the smallest. From the perspective of monthly variation, they all present the single peak distributions. The total average of the surface upward longwave radiation is the largest, while the upward shortwave radiation is the smallest. The linear regression

line of effective energy and turbulent flux is basically below 1:1, which indicates that there is no closure of energy and the turbulent flux is less than the effective energy. The average energy balance ratio is 94%, which is the largest in May and the smallest in December. The energy closure rate in spring is the largest, followed by that in summer, and it is the smallest in winter. In general, the energy closure rate of cropland ecosystem in Huaihe River Basin is relatively high, and the data in flux observation system is reliable.

**Keywords:** heat flux, radiation flux, closure rate, cropland ecosystem, Huaihe River Basin

收稿日期: 2020年5月19日; 修回日期: 2020年8月7日  
第一作者: 谢五三(1981—), Email: xiewusan\_2008@sina.com  
资助信息: 安徽省自然科学基金(1908085MD109); 安徽省重点研究和开发计划(201904a07020099); 中国气象局气候变化专项(CCSF201928); 安徽省气象局研究型业务科技攻关项目(201903); 安徽省气象局科研项目(KM201903); 淮河流域气象开放研究基金(HRM201804)

## 0 引言

全球变化的区域响应以及地表变化和人类活动对气候的影响均是通过大气边界层过程来实现的<sup>[1-2]</sup>。近年来,近地层通量的观测研究被越来越多的国家和国际组织所重视<sup>[3]</sup>,其中农田生态系统水热通量的研究是热点之一,主要包括农田下垫面的湍流结构和能量交换特征,以及以水汽和CO<sub>2</sub>为主的各种气体组分的通量输送规律等<sup>[4-5]</sup>。生态系统的能量平衡是系统水热耦合过程研究的基础,也一直是农田生态、农业气象和自然地理等学科研究的重点问题<sup>[6]</sup>。在农田生态系统中,净辐射与农田蒸散、土壤热通量、空气热交换以及极少部分储存的光合能相平衡<sup>[7]</sup>,近地层农田生态系统能量平衡特征及闭合率对农田下垫面区域上大气边界层的动力、热力结构,多圈层相互作用过程中各种能量、物质交换等研究具有重要意义<sup>[8]</sup>。根据热力学第一定律,能量闭合是指涡度相关仪器直接观测的显热通量和潜热通量与有效能量(土壤热通量、净辐射通量、冠层热储量三者之和)之间的平衡<sup>[9]</sup>,针对不同类型的农田生态系统,国内外学者对其能量平衡及闭合率特征进行了一系列研究,如吴东星等<sup>[10-11]</sup>对华北平原和黄淮海平原典型冬小麦农田、李阳等<sup>[12]</sup>对低丘红壤区集水区和田块、吴锦奎等<sup>[13]</sup>对黑河中游间作灌溉农田、安东等<sup>[14]</sup>对密西西比地区农田、丛宏斌等<sup>[15]</sup>对玉米秸秆地以及田红等<sup>[16-20]</sup>对寿县稻麦轮作等农田生态系统进行大量研究并取得系统性成果。

淮河流域是我国的重要农业区之一,该地区代

表东亚季风区的主要气候条件和生态环境状况,又是我国农业生产经营活动的典型区域之一,因而研究该区域的能量变化特征及闭合率具有重要意义。寿县国家气候观象台地处淮河中游南岸,属亚热带半湿润季风气候类型,寿县近地层通量观测场在2007年7月至2013年4月期间位于九龙观测站,在2013年5月至今位于窑口观测站,两个观测站下垫面均为平坦、开阔、一致的农作物种植区,一年两熟,稻麦轮作,基本代表了淮河流域农田生态系统。根据观测资料的连续性、一致性和缺测率等因素,本文以寿县九龙观测站为代表站,运用2007年7月至2013年4月连续7年的观测资料,选取通量观测系统中的显热通量、潜热通量、土壤热通量以及辐射通量等观测要素,分析能量变化特征及其闭合率,为淮河流域农田下垫面各种能量、物质交换的研究以及区域数值模式陆气交换参数化的改进等提供参考。

## 1 资料与方法

寿县近地面层通量观测系统由梯度观测系统和湍流观测系统组成。梯度观测系统由5层温度、风速、湿度传感器,5层铂电阻地温及土壤水分观测传感器,1层气压、风向传感器、光合有效辐射传感器、四分量长、短波(向上、向下)辐射传感器以及红外地表温度传感器等组成。湍流观测系统由红外H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>分析仪和三维超声风温仪等组成。主要仪器的基本技术性能见表1。

表1 寿县通量观测系统主要观测仪器的基本技术性能  
Table1 Technical performance of main instruments in Shouxian flux observation system

观测仪器	准确度	分辨率	安装高度或深度	平均时间/min	自动采样频率
HMP45C温湿度传感器	0.2 °C	0.1 °C	高度2 m、4 m、10 m、20 m、30 m	1	6次/min
I190SB 光合有效辐射传感器	5 %	1 W/m <sup>2</sup>	高度2 m	1	60次/min
CNR1净辐射传感器	15 %~20 %	1 W/m <sup>2</sup>	高度2 m	1	60次/min
CSAT3三维超声风速仪	风速水平分量: 4.0 cm/s; 风速垂直分量: 2.0 cm/s	风速水平分量1 mm/s; 风速垂直分量0.5 mm/s; 虚温 0.025 °C	高度4 m	30	10 Hz
LI-7500红外H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub> 分析仪	0.3 mg/kg (CO <sub>2</sub> ); 0.15 mmol/mol (H <sub>2</sub> O)	0.1 mg/kg (CO <sub>2</sub> ); 0.1 mmol/mol (H <sub>2</sub> O)	高度4 m	30	10 Hz
HFP01土壤热通量仪	±20%	1 W/m <sup>2</sup>	深度5 cm	30	1次/min

根据中国气象局《近地层通量观测规范》<sup>[21]</sup>,对所有数据进行质量控制,包括数据完整性检查、合理性检查、一致性检查、异常值剔除检验以及WPL通量修正等,满足研究需要。

波恩比(记为B)是Bowen于1926年提出的概念,将显热通量(H)除以潜热通量(LE),它是表征下垫面能量分配的参数,反映由于下垫面干湿状况而引起的热量分配的变化,公式如下:

$$B = H / LE, \quad (1)$$

波恩比表明热通量交换过程中潜热通量和显热通量各自的作用。

辐射通量分为大气向下长波辐射(L)、地面向上长波辐射(L<sub>o</sub>)、向下短波辐射(S)、向上短波辐射(S<sub>o</sub>)以及地表净辐射(R<sub>n</sub>),其中:

$$R_n = (S - S_o) + (L - L_o), \quad (2)$$

当R<sub>n</sub>为正值时,表明地面吸收的太阳辐射大于

发出的辐射，太阳辐射占主导作用； $R_n$ 为负值时则相反，地面向上长波辐射占主导作用。

根据热力学第一定律，地表能量平衡方程可表示为：

$$LE + H = R_n - G - Sc - Q, \quad (3)$$

式中： $R_n$ 为净辐射， $G$ 为土壤热通量， $Sc$ 为冠层热储能， $Q$ 为其他来源能量总和， $H$ 为显热通量， $LE$ 为潜热通量。对于农田生态系统， $Sc$ 和 $Q$ 可忽略不计，因而式(3)可简化为：

$$LE + H = R_n - G, \quad (4)$$

式中：右端即为有效能量、左端为湍流通量。能量平衡残余量( $Res$ )是指有效能量与湍流通量的差值，而将湍流通量与有效能量相除，即可得到能量闭合率( $EBR$ )，即：

$$EBR = \frac{\sum(LE + H)}{\sum(R_n - G)}. \quad (5)$$

## 2 热通量变化特征

### 2.1 显热、潜热通量日变化特征

淮河流域显热通量( $H$ )的日变化特征见图1a，由图可见， $H$ 值具有明显的日变化规律，呈单峰型结构，日变化幅度较大。从年平均来看， $H$ 白天均为正值，夜间均为负值。 $H$ 值在清晨日出前后(07:30)开始由负转正，而日出后太阳辐射逐渐增大，温度也随之上升，大气层结趋于不稳定， $H$ 值迅速增大，直至正午左右(12:30)，一般也是一天中温度最高的时间点，大气层结相对来说最不稳定， $H$ 也相应达到日内最大值(约为84.5 W/m<sup>2</sup>)，之后随着太阳辐射的减小， $H$ 值也随之减小，直至日落前后(17:00)转为负值，夜间大气层结相对稳定， $H$ 值变化较小。从各季节平均来看，随着季节的不同，峰值出现的时间略有不同，春季(3—5月)、夏季(6—8月)和冬季(12—2月)日最大值均出现在12:30左右，秋季(9—11月)日最大值出现在12:00左右。春季峰值最大(为105.5 W/m<sup>2</sup>)、秋季其次(为85 W/m<sup>2</sup>)、夏季最小(为70.5 W/m<sup>2</sup>)。各季节平均日变化幅度分别为118.5、78.0、92.5和84.5 W/m<sup>2</sup>，即春季最大，秋季次之，冬季第三，夏季最小。对于不同季节， $H$ 为正值的时间段也有所差别，由负转正的时间分别为07:30、07:00、08:00和09:00，而由正转负的时间分别为17:00、18:00、16:30和16:30， $H$ 为正的时长分别为10、11.5、9和8 h，表明由夏季至冬季， $H$ 为正的时段逐渐缩短，而由春季至夏季， $H$ 为正的时段逐渐加长。

潜热通量( $LE$ )的日变化特征见图1b，由图可

见， $LE$ 日变化特征明显，其值均为正，且白天的值远大于夜间。 $LE$ 值大约从07:00开始逐渐增大，至午后13:00左右达到最大值(约为166.7 W/m<sup>2</sup>)，之后随着太阳辐射的减小， $LE$ 值逐渐减小，日落后天气层结趋于稳定， $LE$ 值也趋于平稳。从各季节平均来看， $LE$ 均为正值，在不同的季节，其峰值出现的时间也有所不同，夏季峰值大约出现在12:00，其他各季节峰值均出现在13:00左右；夏季峰值最大(为253 W/m<sup>2</sup>)、春季和秋季峰值次之(分别为225和145 W/m<sup>2</sup>)、冬季峰值最小(为60 W/m<sup>2</sup>)。春、夏、秋季由于降水较多，其 $LE$ 值远大于冬季。四个季节平均日变化幅度分别为220、248、141和58 W/m<sup>2</sup>，即夏季>春季>秋季>冬季。以上是针对所有资料进行综合分析，得到的是平均状态下的显热、潜热通量日变化特征，然而对于特殊的天气类型，显热、潜热通量受到云、降水等因素的影响，呈不规则分布。

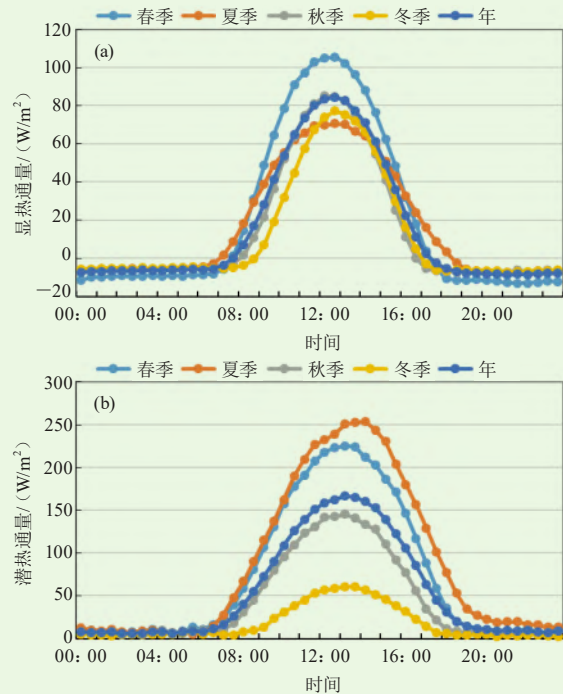


图1 显热通量(a)和潜热通量(b)日变化  
Fig. 1 Daily variation of sensible heat flux (a) and latent heat flux (b)

### 2.2 显热、潜热通量月变化特征

$H$ 从1月开始逐渐增加，6月达到最大值，其中6月上旬达到峰值，约为59 W/m<sup>2</sup>，之后开始下降，8月和9月多在10 W/m<sup>2</sup>以下。10月又明显增加，10月上旬达到一年中次高峰，约为33 W/m<sup>2</sup>，之后又明显下降(图2a)。6月和10月 $H$ 出现峰值与相应时段的下垫面变化有直接联系，6月和10月下垫面分别处于水稻收割到小麦分蘖期前和麦收割后的裸地，裸地下垫面土

壤较干燥，空气湿度小， $H$ 均有十分明显的增大。

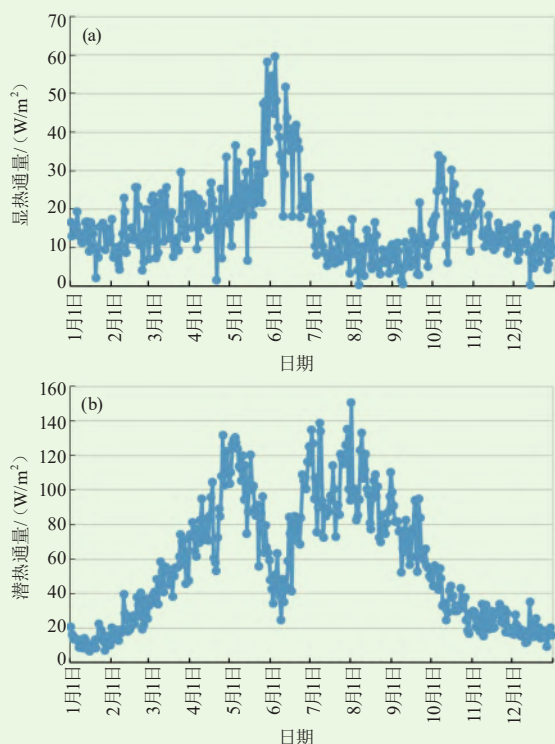


图2 显热通量 (a) 和潜热通量 (b) 月变化  
Fig. 2 Monthly variation of sensible heat flux (a) and latent heat flux (b)

$LE$ 从1到5月快速地增大，在5月初达到峰值，约为 $132 W/m^2$ ；之后5—6月有着明显的下降，6月上旬末只有 $25 W/m^2$ ；6月 $LE$ 突然下降与 $H$ 的突然增加均与下垫面处于小麦收割后的裸地有关。7—8月明显增加，8月初达到峰值，约为 $151 W/m^2$ ，之后又迅速下降，总体呈现M型（图2b）。

### 2.3 显热、潜热通量年变化特征

本文所用的资料为寿县国家气候气象台2007年7月—2013年4月连续7年的观测资料，由于2007年和2013年资料不完整，在分析各通量年变化特征时，选取2008—2012年共5年完整的资料。各年（2008—2012年）年均显热通量分别为14.1、13.8、16.4、20.1和 $18.6 W/m^2$ ，总体呈现增加趋势，线性趋势系数为1.54，即平均每年增加 $1.54 W/m^2$ 。各年（2008—2012年）年均潜热通量分别为58.3、58.4、58.0、54.5和 $43.1 W/m^2$ ，总体呈现减小趋势，线性趋势系数为-3.44，即平均每年减小 $3.44 W/m^2$ 。

### 2.4 波恩比变化特征

图3a为淮河流域波恩比日变化图，由图可见，波恩比存在明显的单峰型日变化特征。从年平均来看，07:30—17:00，波恩比 $<1$ ， $LE$ 占主导。波恩

比在中午11:30左右达到日最大值，为0.53。夜间 $H$ 为负值，波恩比也为负值。在02:00左右达到最小值-1.1，在昼夜交替时段（07:30和17:00）的波恩比绝对值则最小，接近于0。从各季节平均来看，白天冬季的波恩比峰值在各季中最大（达1.3），表明冬季热通量交换过程以 $H$ 为主，其他季节波恩比小于1， $LE$ 占主导地位；春秋季节波恩比峰值大于夏季，分别为0.51和0.62；夏季峰值最小，为0.35。在特殊天气状况下，显热、潜热通量受到云、降水等因素的影响，日变化呈不规则分布，波恩比也呈不规则分布。

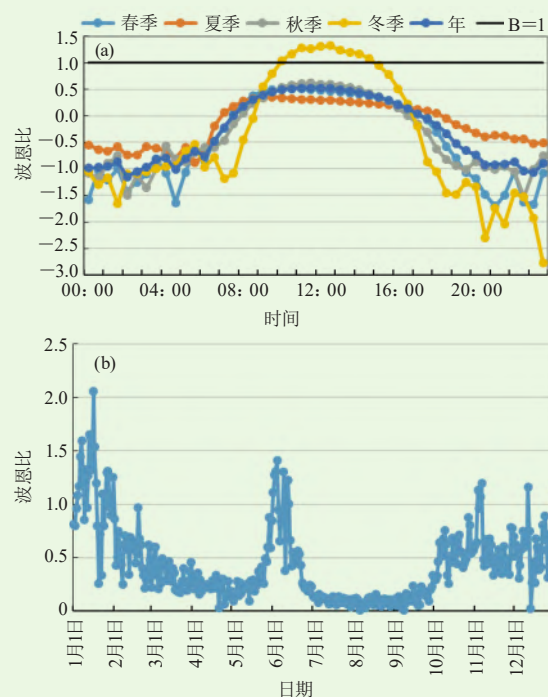


图3 波恩比的日 (a)、月 (b) 变化  
Fig. 3 Daily variation (a) and monthly variation (b) of Bowen ratio

年平均波恩比为0.43，表明 $LE$ 是淮河流域农田生态系统下垫面吸收能量的主要消费者。一年中，1月、6月和11月初波恩比大于1（图3b），表明 $H$ 是下垫面吸收能量的主要消费者。前者主要是由于1月降水是一年中最少月份， $LE$ 也很小；后者主要是由于6月和11月初下垫面为裸地而引起。其余时间波恩比均小于1，随气候状况的不同而波动变化，说明 $LE$ 是农田生态系统下垫面吸收能量的主要消费者。各年（2008—2012年）年均波恩比分别为0.36、0.38、0.59、0.68、0.39，总体呈现上升趋势，线性趋势系数为0.0367。

### 2.5 土壤热通量变化特征

土壤热通量 ( $G$ ) 是地表能量平衡的重要组成部分，为能量平衡分析中关键所在， $G$ 为正值，表明能

量由地表向土壤深层传导,  $G$  为负值则表明能量由土壤深层向大气传导。淮河流域土壤热通量具有明显的日变化特征(图4a), 且呈单峰型结构, 白天为正, 夜间为负, 且绝对值白天大于夜间, 说明  $G$  从深层向大气传导较弱, 而由地表向深层传导相对较强。年平均上, 08:30 左右由负转正, 13:00 左右达到最大值, 为  $45 \text{ W/m}^2$ , 18:00 左右由正转负。对于不同的季节, 正、负值转化的时刻也有所不同, 春、夏、秋、冬各季节由负转正的时刻依次为 08:30、08:00、09:30 和 10:30, 由正转负的时刻分别为 19:00、18:00、17:00、17:30; 夏季  $G$  的日变化峰值出现的最早, 在 12:30 左右, 其次为春季和秋季, 峰值出现在 13:00 左右, 冬季最晚, 峰值出现在 14:00 左右。春季  $G$  的峰值最大, 达  $62 \text{ W/m}^2$ , 其次为夏季和秋季, 分别为  $57$  和  $35 \text{ W/m}^2$ , 冬季峰值最小, 为  $27 \text{ W/m}^2$ 。四季的季平均日变化幅度分别为  $78, 73, 55$  和  $44 \text{ W/m}^2$ , 即春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季。土壤热通量年内分布呈现为明显的单峰型分布(图4b)。从 1 月逐渐增大, 5 月达到最大, 之后又逐渐减小, 12 月达到最小。1 月、9—12 月土壤热通量为负值, 2—8 月为正值。各年(2008—2012 年)年均土壤热通量分别为  $0.003, -0.083, 2.647, 0.405$  和  $7.710 \text{ W/m}^2$ , 总体呈现增加趋势, 线性趋势系数为  $1.59$ , 即平均每年增加  $1.59 \text{ W/m}^2$ 。

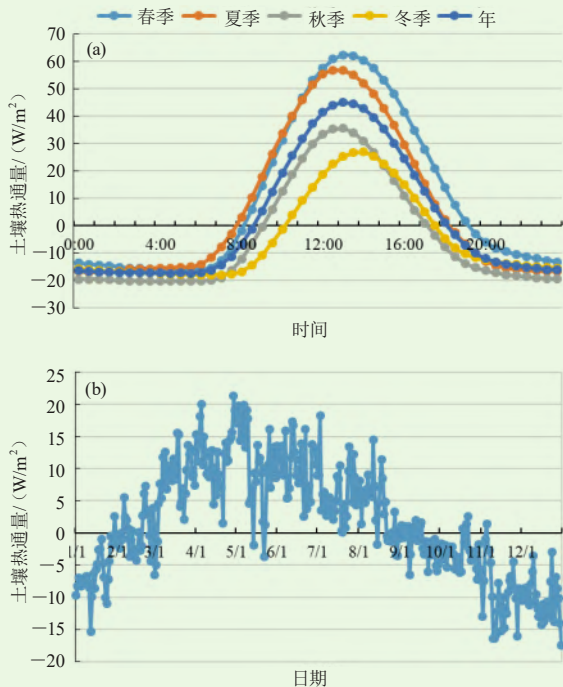


图4 土壤热通量的日(a)、月(b)变化  
Fig. 4 Daily variation (a) and monthly variation (b) of soil heat flux

### 3 辐射通量变化特征

#### 3.1 辐射通量日变化特征

图5为淮河流域各辐射分量的日变化图, 由图可见, 除  $L$  日变化幅度较小外, 其他各辐射分量和  $R_n$  均具有明显的日变化特征, 均呈单峰型分布, 日间变化较大, 夜间相对稳定。由整个观测期总平均的日变化可见,  $S, S_0$  和  $R_n$  均在 12:30 左右达到极值, 其值分别为  $520.9, 77.8$  和  $372.4 \text{ W/m}^2$ ; 而  $L_0$  滞后约 1 h, 在 13:30 左右达到最大值 ( $434.1 \text{ W/m}^2$ ),  $L$  相对更晚, 约在 14:30 左右达到最大值 ( $364.9 \text{ W/m}^2$ )。

$S$  在各季的日变化幅度最大, 其中春季峰值最大, 夏季次之, 冬季最小, 春、夏、秋、冬四季的极大值分别为  $620, 573, 481$  和  $394 \text{ W/m}^2$ 。  $S_0$  在各季节的日变化趋势与  $S$  基本一致, 各季日平均极大值分别为  $92, 80, 74$  和  $61 \text{ W/m}^2$ , 春季峰值最大, 夏季次之, 冬季最小。  $L$  在各季的日变化幅度均很小, 春、夏、秋、冬四季的季平均日变化幅度分别为  $22, 21, 14$  和  $10 \text{ W/m}^2$ , 四季最大值分别为  $353, 438, 370$  和  $290 \text{ W/m}^2$ , 夏季峰值最大、秋季次之、冬季最小。  $L_0$  在各季的日变化明显, 四季的季平均日变化幅度分别为  $75, 50, 57$  和  $55 \text{ W/m}^2$ , 春、夏、秋、冬最大值分别为  $436, 487, 439$  和  $366 \text{ W/m}^2$ , 夏季峰值最大, 春秋次之, 冬季最小。

$R_n$  的日变化特征明显, 白天  $R_n$  为正值, 太阳辐射起主导作用; 而夜间无太阳辐射,  $R_n$  为负值, 地面向上长波辐射起主导作用; 春、夏、秋、冬四季净辐射的日变化最大值分别为  $449, 443, 338$  和  $249 \text{ W/m}^2$ , 春季峰值最大, 夏季次之, 冬季最小; 四季  $R_n$  的季平均日变化幅度分别为  $489, 472, 375$  和  $291 \text{ W/m}^2$ , 春季最大, 夏季次之, 冬季最小。

#### 3.2 辐射通量月变化特征

整个观测期辐射通量各分量年内的逐月变化(图6)表明: 各个辐射值呈现单峰型的年变化特征, 变化幅度各不相同。就整个观测期总平均而言,  $L_0$  总平均值最大, 为  $395 \text{ W/m}^2$ ,  $L$  次之, 为  $351 \text{ W/m}^2$ ,  $S$  为  $148 \text{ W/m}^2$ ,  $R_n$  为  $79 \text{ W/m}^2$ ,  $S_0$  最小, 为  $23 \text{ W/m}^2$ ; 且各辐射分量均为正值,  $R_n$  亦为正值, 表明  $S$  是辐射平衡的主要贡献项。

$S$  在 1—5 月逐渐增大, 5 月达到最大, 为  $213 \text{ W/m}^2$ , 6—12 月  $S$  呈逐渐减小趋势, 由于水汽和云的影响,  $S$  最大值出现在 5 月, 而  $L$  在 7 月达到极值。  $S_0$  在 1—5 月逐渐上升, 6—7 月明显下降并稳定在  $20\sim 30 \text{ W/m}^2$ , 8 月以后迅速下降。第一个峰值出现在 4 月, 第二月峰值出现在 8 月。6—7 月的突然下降可能

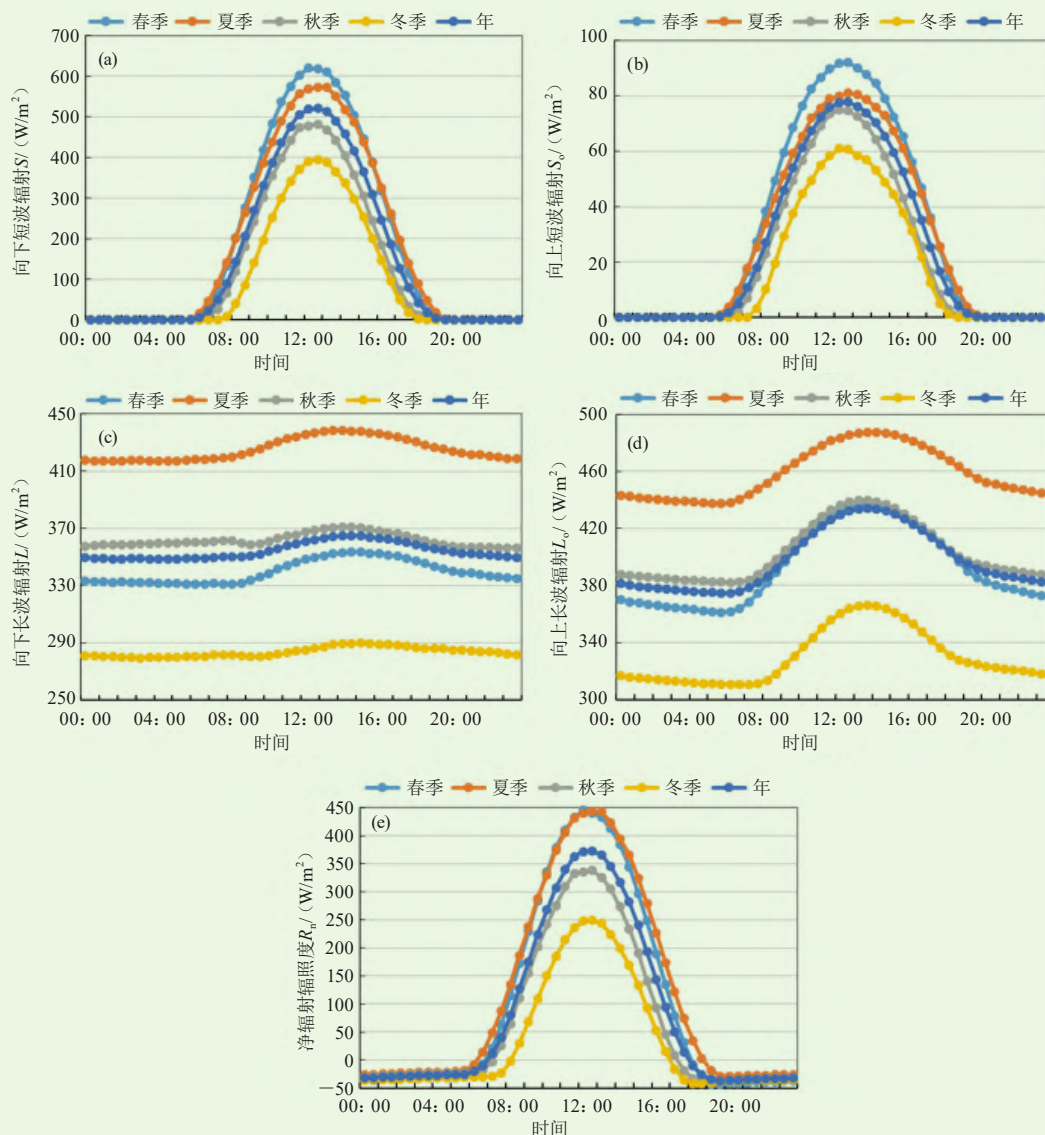


图5 向下短波 (a)、向上短波 (b)、向下长波 (c)、向上长波辐射分量 (d) 和净辐射 (e) 的日变化  
 Fig. 5 Daily variation of downward shortwave (a), upward shortwave (b), downward longwave radiation (d) and net radiation (e)

是由于 $S_0$ 与下垫面植被状况及土壤湿度有关, 6—7月是淮河流域降水最为集中的时期。 $L$ 和 $L_0'$ 年内变化较为相似, 呈现明显的单峰型分布, 1月最小, 分别为274和320  $W/m^2$ , 7月最大, 分别为434和463  $W/m^2$ 。 $R_n$ 在1—5月迅速增加, 6月有所下降, 7月后迅速减小。1月最小, 为25  $W/m^2$ , 5月最大, 为131  $W/m^2$ , 7月次之, 为125  $W/m^2$ 。

### 3.3 辐射通量年变化特征

向下短波、向上短波、向下长波、向上长波辐射分量和净辐射年变化特征见图7, 由图7可知, 各个辐射分量和净辐射的线性趋势系数均为正值, 由高到低分别为向下长波辐射 $L$  (2.75)、向上长波辐

射 $L_0'$  (2.02)、净辐射 $R_n$  (1.93)、向下短波辐射 $S_0$  (1.31)、向上短波辐射 $S_0'$  (0.42), 表明各个辐射分量和净辐射均呈现不同程度的上升趋势, 其中向下长波辐射 $L$ 上升幅度最大, 而向上短波辐射 $S_0'$ 上升幅度最小。

### 4 能量闭合率

图8a为淮河流域能量平衡残余量 ( $Res$ ) 的平均日变化图, 由图8a可以看出,  $Res$ 的日变化呈明显的单峰型分布特征, 其值在白天06:30左右由负转正, 之后逐渐增大, 至11:00左右达到日最大值 (约为95  $W/m^2$ ), 之后逐渐减小, 在15:30左右转为负值, 至18:00左右达到日最小值 (约为37  $W/m^2$ ),

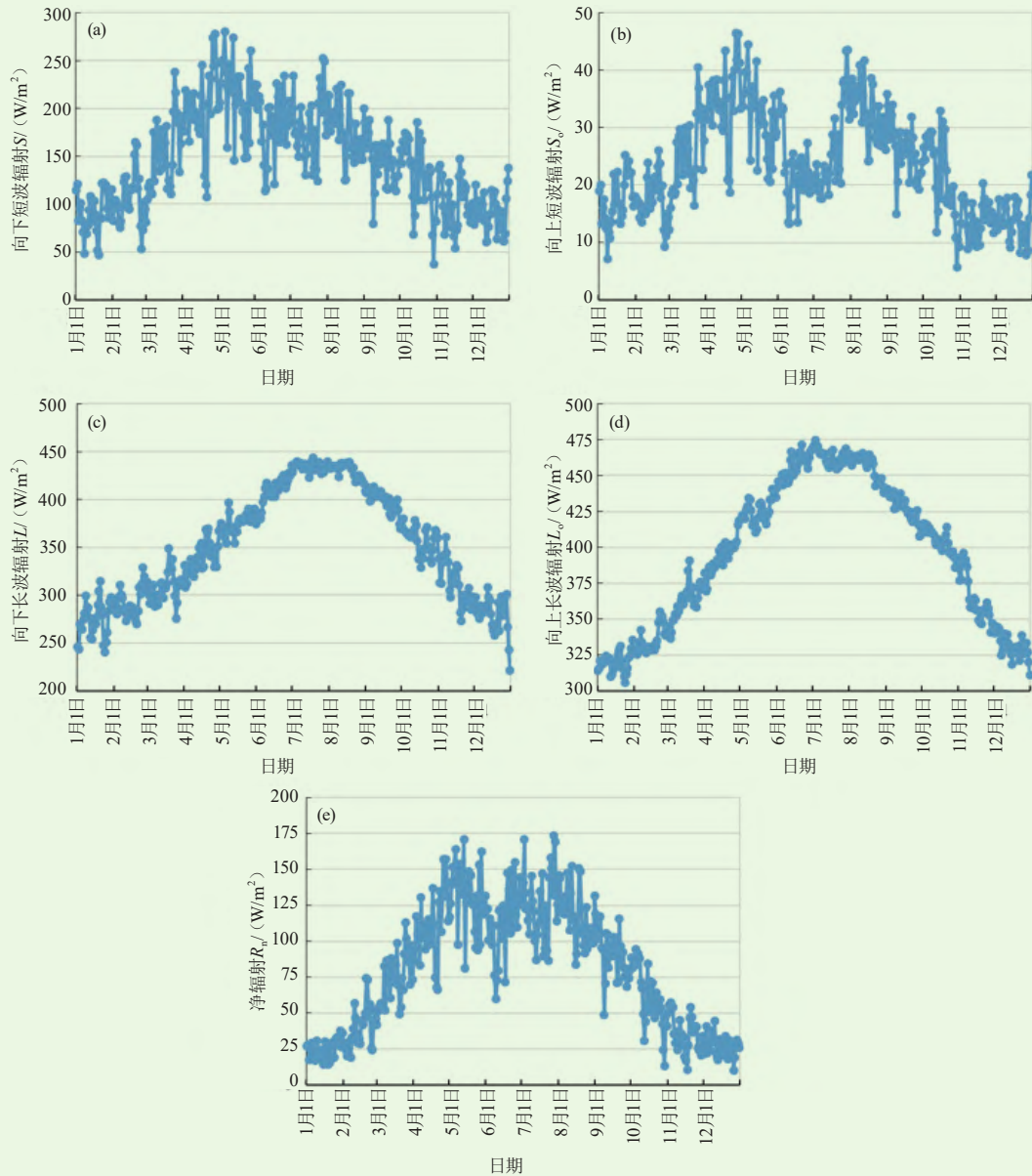


图6 向下短波 (a)、向上短波 (b)、向下长波 (c)、向上长波辐射分量 (d) 和净辐射 (e) 的月变化  
Fig. 6 Monthly variation of downward shortwave (a), upward shortwave (b), downward longwave (c), upward longwave radiation (d) and net radiation (e)

总体来看，白天能量残余量大于夜间。残余量的存在表明湍流通量和有效能量不相等，也即能量是不闭合的。从能量平衡残余量的月变化来看（图8b），4月和5月为负值，表明观测湍流量大于有效能；3月和6月接近于0；其他月份为正值，表明有效能大于湍流量。从四季来看，残余量春季最小，夏季次之，而秋季最大。

利用观测资料，计算淮河流域有效能量（ $R_n - G$ ）和湍流量（ $LE + H$ ）线性回归的关系式如下： $(LE + H) = (R_n - G) \times 0.9943 - 3.6819$ ，复相关系数达到0.905。线性回归线基本均在1:1线以下，说明湍流

通量小于有效能量，并且能量通量越小的时候，两者越接近，表面涡度相关仪器直接观测的湍流能量有被低估趋势（图9）。

整个观测期间（包括白天和夜间），能量平衡比EBR平均为94%，即是全天的能量平衡比，闭合率相对较好；白天和夜间分开计算可知，白天的能量平衡比为84%，夜间相对较差，仅为47%，白天能量平衡比明显优于夜间，这与湍流混合强度有很大关系，白天湍流较强，有利于能量闭合，而夜间湍流减弱，能量闭合率下降，早晨日出和傍晚日落时间段，由于有效能量（ $R_n - G$ ）接近于零，导致能量平衡比EBR

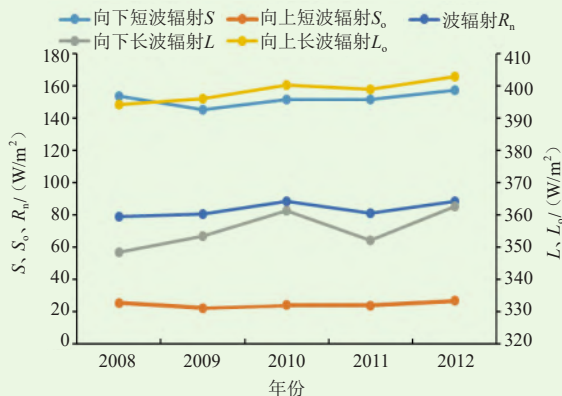


图7 向下短波、向上短波、向下长波、向上长波辐射分量和净辐射的年变化

Fig. 7 Annual variation of downward shortwave, upward shortwave, downward longwave, upward longwave radiation and net radiation

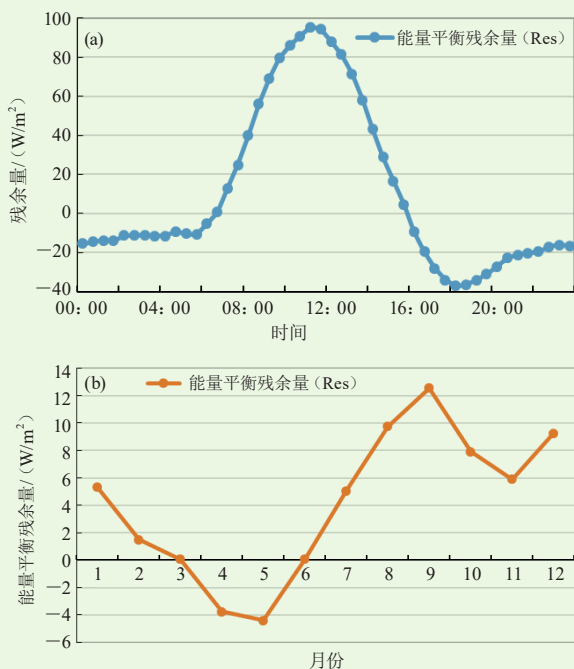


图8 能量平衡残余量的日 (a)、月 (b) 变化

Fig. 8 Daily variation (a) and monthly variation (b) of residual energy balance

变化非常剧烈。从各月和四季来看，能量闭合率5月最大，12月最小；春季最大，夏季次之，冬季最小。总体来看，淮河流域农田生态系统能量存在不闭合现象，但其闭合率相对较高，表明通量观测系统资料质量较好，代表性和可靠性强。

## 5 结论与讨论

1) 淮河流域农田生态系统显热通量呈单峰型日变化分布，白天为正，夜间为负。潜热通量同样呈单峰型结构，且均为正值。显热通量和潜热通量在月变化上均呈现M型双峰结构。显热通量年变化总体呈增

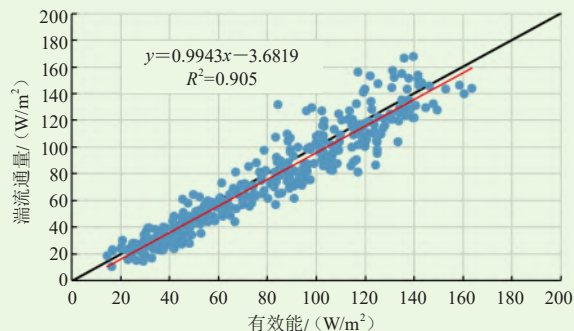


图9 湍流通量和有效能之间的关系

Fig. 9 The relationship between turbulent flux and effective energy

加趋势，而潜热通量总体呈减小趋势。显热和潜热通量的分布特征与日照密切相关，同时受云、降水等多种因素的影响。波恩比日变化呈明显的单峰型结构，年平均波恩比为0.43，且总体呈现上升趋势。土壤热通量日变化呈单峰型分布，白天为正，夜间为负；月变化亦呈单峰型分布，5月最大，12月最小，总体呈现增加的年变化趋势。

2) 向下短波辐射日变化幅度最大，白天大夜间小，向上短波辐射日变化趋势与其基本一致。地面向上长波辐射日变化幅度大于大气向下长波辐射，而大气向下长波辐射日变化幅度相对较小。净辐射的日变化特征明显，夜间为负，白天为正，中午达到最大。各个辐射分量和净辐射均呈现单峰型月变化特征，变化幅度各不相同，地面向上长波辐射总平均值最大，大气向下长波辐射次之，其次为向下短波辐射和净辐射，向上短波辐射最小，各辐射分量和净辐射均为正值。年变化上，各个辐射分量和净辐射均呈现不同程度的上升趋势。

3) 能量平衡残余量日变化呈单峰型分布，白天为正，夜间为负，残余量的存在表明有效能量和湍流通量是不相等的，能量平衡存在不闭合特征。有效能量和湍流通量线性回归线基本在1:1线以下，表明湍流通量小于有效能量。能量平衡比平均为94%，白天明显优于夜间；5月最大，12月最小；春季的能量闭合率最大，其次是夏季，冬季最小。总体来看，能量闭合率相对较高，通量观测系统资料质量是可靠的。

从理论上说，农田生态系统能量应是闭合的，但在实际观测中，由于多种因素影响，计算出的能量存在不闭合，淮河流域农田生态系统也是如此，导致能量不闭合的因素可能有：①仪器测量误差，主要包括技术性误差、仪器自身系统误差以及数据处理造成的误差等，仪器的不准确标定和数据处理的不规范直

(下转145页)

接影响能量平衡闭程度,对仪器的交叉标定和确保数据采集器的正常运行可以减少能量平衡闭合研究的不确定性<sup>[22]</sup>;②能量平衡各分量( $R_n$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $LE$ )观测的高度和时空尺度有差异,测量面积的不匹配等因素可能给能量闭合带来误差<sup>[8]</sup>;③忽略了其他能量吸收项而造成的误差,例如土壤热通量板上层土壤的热储量、冠层热储量中植被的热储量、植物的光合耗能等能量吸收项未加以考虑,给有效能量的估算带来误差<sup>[9]</sup>;④垂直平流造成的误差,在涡度相关技术通量观测中,认为垂直平流可以通过坐标旋转使得垂直风速为零而被忽略,然而垂直风速和垂直平流不为零是真实存在的,因而造成了误差<sup>[23]</sup>;⑤高频与低频湍流通量损失造成的误差,湍流通量由于低通滤波的作用和高通滤波的作用而被低估,此外,超声风速仪和红外气体分析仪的空间分离也会充当低通滤波的角色造成高频损失等<sup>[24]</sup>。淮河流域农田生态系统能量不闭合主要是由哪方面因素造成的?各影响因素对能量不闭合的贡献如何?这有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] 赵鸣,苗曼倩.大气边界层.北京:气象出版社,1992.
- [2] 张强.大气边界层气象学研究综述.干旱气象,2003,21(3):74-78.
- [3] 张旭东,彭镇华,漆良华,等.生态系统通量研究进展.应用生态学报,2005,16(10):1976-1982.
- [4] 张永强,沈彦俊,刘昌明,等.华北平原典型农田水、热与CO<sub>2</sub>通量的测定.地理学报,2002,57(3):333-342.
- [5] 伍琼,田红,严平,等.淮河流域农田CO<sub>2</sub>和热通量日、季节变化特征.中国农学通报,2009,25(1):211-216.
- [6] 王兵,刘世荣,崔向慧,等.全球陆地生态系统水热平衡规律研究进展.世界林业研究,2002,15(1):19-28.
- [7] 苑旭,朱元骏,刘文兆,等.黄土塬区麦田能量平衡特征.干旱地区农业研究,2017,35(2):227-233.
- [8] 王介民,王维真,刘绍民,等.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.
- [9] 李正泉,于贵瑞,温学发,等.中国通量观测网络(China FLUX)能量平衡闭合状况的评价.中国科学(地球科学),2004,34(z2):46-56.
- [10] 吴东星,李国栋,张茜.华北平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡与闭合研究.中国生态农业学报,2017,25(10):1413-1422.
- [11] 李国栋,史桂芬,吴东星,等.黄淮海平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡研究——以封丘地区为例.气象与环境学报,2017,33(1):93-100.
- [12] 李阳,景元书,李根,等.低丘红壤区集水区和田块尺度农田能量平衡特征比较.生态学杂志,2016,35(9):2393-2403.
- [13] 吴锦奎,丁永建,沈永平,等.黑河中游间作灌溉农田的能量平衡.冰川冻土,2006,28(3):443-449.
- [14] 安东,崔耀鹏,刘青,等.密西西比地区农田下垫面能量平衡特征研究.现代农业科技,2016,17:163-164.
- [15] 丛宏斌,赵立欣,姚宗路,等.玉米秸秆连续干馏条件下能量平衡分析.农业工程学报,2017,33(7):206-212.
- [16] 田红,伍琼,童应祥.安徽省寿县农田能量平衡评价.应用气象学报,2011,22(3):356-361.
- [17] 谢五三,田红,童应祥,等.基于淮河流域农田生态系统观测资料的通量研究.气象科技,2009,37(5):601-606.
- [18] 童应祥,田红.寿县地区麦田能量平衡闭合状况分析.中国农学通报,2009,25(18):384-387.
- [19] 童应祥,王东,田红,等.淮河流域农田光合有效辐射(PAR)的基本特征.中国农学通报,2010,26(23):331-335.
- [20] 余予,李扬云,童应祥,等.寿县地区小麦和水稻田地表面反射率观测分析.气候与环境研究,2009,14(6):639-645.
- [21] 中国气象局.近地层通量观测规范.北京:气象出版社,2007.
- [22] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. Advances in Ecological Research, 2000, 114-175.
- [23] Paw U KT, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. Corrections of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 2000, 97: 487-511.
- [24] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 37:17-35.