

麦田水热传输的控制效应及非线性特征分析

杨晓光

(中国农业大学资源与环境学院)

沈彦俊

(中国科学院石家庄农业现代化研究所)

张录达

(中国农业大学基础科技学院)

摘要 利用波文比-能量平衡法测定了太行山山前平原冬小麦农田生态系统辐射平衡各分量,并计算了波文比、农田蒸散。结果表明,土壤水分对波文比具有控制性效应,波文比与0~60 cm 土层土壤相对含水量呈线性负相关。农田生态系统的蒸散量随作物的生长发育而呈上升趋势,净辐射是控制农田蒸散的热力驱动因子。农田生态系统的净辐射、潜热通量和显热通量为典型的非线性过程,随时间序列具有自相似的变化趋势。

关键词 水热传输; 控制效应; 非线性特征

分类号 S162.4; S181

Controlling Effects and Nonlinear Characteristics of Water-Heat Transport in Wheat Field

Yang Xiaoguang

(College of Resource and Environmental Sciences, CAU)

Shen Yanjun

(Institute of Agricultural Modernization, CAS)

Zhang Luda

(College of Basic Sciences and Technology, CAU)

Abstract The components of radiation balance in agroecological system of winter wheat are measured using the method of Bowen Ratio Energy Balance in the Plateau on the foot of Taihangshan Mountain. The Bowen Ratio and field evapotranspiration are also calculated. The results showed that the soil water had controlling effects on the Bowen Ratio. There was negative liner correlation between the Bowen Ratio and the Relative soil moisture content in 0~60 cm. The evapotranspiration increased as the crop grew in the field. The net radiation was heat-driving factor controlling the field evapotranspiration. The relationships among the net radiation and the latent energy and heat were nonlinear, but with similar trends of variation. It has practical significance in analysis of field ecosystem.

Key words water-heat transport; controlling effects; nonlinear characteristics

农田生态系统处于近地面层,可分为土壤层和作物冠层,是维系于三相物质能量循环转换的界面活动带^[1]。在农田生态系统中,从外界获得的能量主要是净辐射能,用以支出消耗于农田蒸散、空气热交换、加热土壤以及极少部分储存为光合作用。净辐射能在系统内部各项的分配

收稿日期: 1999-03-25

国家自然科学基金“八五”重大资助项目(49391600)

杨晓光,北京圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

比例及规律一直是现代农田生态学、农业气象学和水文学等学科研究的热点问题,本研究从近地面层物理机制的角度透视农田生态系统内能量转化和水热传输的规律,分析麦田水热传输的控制效应及其非线性特征,为提高作物水分有效利用提供理论依据,对解析农田生态系统过程和生产过程具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验区背景

本试验于 1996~1997 年在中国科学院河北栾城农业生态系统试验站(北纬 37°53′、东经 114°40′、海拔 50.1 m)进行,试验站位于太行山山前平原,为华北地区典型高产区,种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟。本站属于暖温带大陆性季风气候,地势平坦,耕层深厚,为轻壤质,冬小麦生长季实测降水量为 122.8 mm,地下水位 24 m 左右。

1.2 试验设计

试验区面积为 24 m × 200 m,并与周围农田相连成片,为大面积均匀一致的冬小麦农田,平坦因子有利于数据采集保证瞬时资料精确可靠性^[2]。

冬小麦品种为高优 503,1996-10-10 播种,行距 0.14 m,按当地常规栽培措施管理。波文比观测装置安装在观测架上,置于试验区中部。观测架上装有日式 EKO 反射率表、澳式净辐射表、温度、湿度和风传感器。温湿风传感器置于作物冠层上方 0.5 m 和 2.0 m 处,随作物生长不断调整传感器高度,保持梯度为 1.5 m。2 块日本产 CN-81 型热流板分别放在作物的株间与行间测定土壤热通量。全部观测装置与 DT100 型数据采集器连接,每 5 min 采集并输出一组数据。利用英国 TH-II 型中子仪测定 0~2.0 m 土壤水分,同时监测作物生长发育动态。

1.3 波文比-能量平衡方程

下垫面能量平衡方程为:
$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

式中: R_n 为净辐射; LE 为农田与大气之间的潜热通量; H 为农田与大气之间的显热通量; G 为土壤热通量。将作物与地面作为一个蒸发面,根据边界层扩散理论,蒸发面上的潜热、显热通量表达如下^[3-5]:

$$LE = (L\rho\epsilon/P)k_w(\alpha/\alpha_s) \quad (2)$$

$$H = L C_p k_h(\theta/\alpha_s) \quad (3)$$

式中: L 为汽化潜热; ρ 为空气密度; C_p 为空气定压比热; ϵ 为水汽分子对于干空气分子的重量比; P 为大气压; k_w , k_h 分别为潜热和显热交换系数; θ , α_s 分别为温度和湿度梯度。

根据相似理论,假设 $k_w = k_h$,同时引入波文比 β (显热通量与潜热通量之比),并将微分化为差分^[6]得:

$$\beta = H/LE = (P C_p/L)(\Delta T/\Delta e) = \gamma(\Delta T/\Delta e) \quad (4)$$

$$\text{由(2)、(3)和(4)式可得: } LE = (R_n - G)/(1 + \beta) \quad (5)$$

$$H = (R_n - G)\beta/(1 + \beta) \quad (6)$$

由实测 R_n , G , ΔT 和 Δe 利用(4), (5), (6)式可得蒸发面与大气间的潜热及显热通量。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分对波文比的控制性

麦田所获得的净辐射,转化为土壤热通量、显热通量和潜热通量,波文比(β)表征了显热

通量与潜热通量的比例关系, 而潜热的实质是农田蒸散, 通过对波文比的影响因子分析可明确制约农田水分消耗的内在机制(表 1)。

表中为 0~ 60 cm 土层范围内不同深度土壤相对含水量与波文比的关系。由复相关系数可以看出, 波文比受 0~ 60 cm 土层平均相对含水量影响较大, 并随着该层土壤相对含水量的增加而线性减少, 而在 0~ 60 cm 土层中 20 cm 和 40 cm 的土壤水分与波文比的相关性较好。土壤水分是农田蒸散的水分源泉, 白天, 表层土壤温度随着太阳辐射的增强而提高, 由于蒸发的影响使地表水势比深层土壤水势低, 土壤水分由深层向表层运动, 表层高温, 深层低温的温度梯度使水流向低温区运动, 这样温度梯度起到了限制蒸发的作用。针对冬小麦而言, 拔节后裸露土壤较少, 表层土壤升温较慢, 温度梯度对蒸发的抑制作用较小。

表 1 土壤水分对波文比的影响

土壤深度 d/cm	回归方程	复相关系数 r^2
10 cm	$\beta = -1.0490\theta_{10} + 0.513$	0.885
20 cm	$\beta = -1.3520\theta_{20} + 0.828$	0.929
40 cm	$\beta = -9.5700\theta_{40} + 5.199$	0.908
60 cm	$\beta = -9.2000\theta_{60} + 4.123$	0.899
0~ 60 cm 平均	$\beta = -2.3410\theta_{0-60} + 1.278$	0.956
0~ 60 cm 平均	$\beta = -6.7910\theta_{0-60} + 1.208$	0.872

2.2 麦田蒸散的变化特征

农田蒸散是由作物蒸腾和土面蒸发两部分构成, 受大气等条件的制约, 日际间变化较大, 但随作物生长发育呈明显的上升趋势(图 1)。同时可以看出, 在整个观测时段内, 日蒸散量与净辐射的变化趋势非常一致, 证实净辐射是蒸散的能量驱动力。

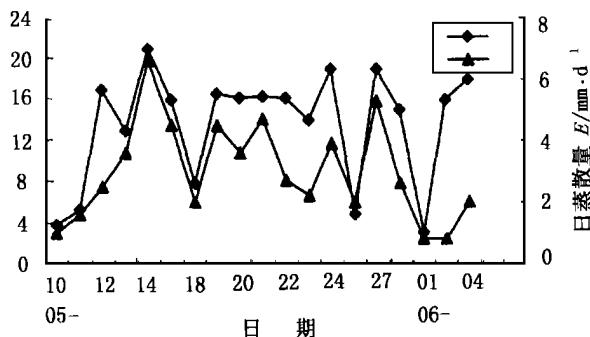


图 1 冬小麦日蒸散量随生育期的变化

土壤水分状况同样决定日蒸散量的变化趋势, 在灌溉和降水后 05-14 和 05-26 蒸散量明显增大。

利用实测资料建立了冬小麦潜热通量与净辐射的回归方程:

$$LE = 0.885 R_n - 41.291, \quad r^2 = 0.815 \quad (7)$$

方程表明潜热通量与净辐射呈明显的正相关, 随着净辐射的降低, 蒸散速率同步降低。

2.3 麦田水热传输的数学模拟

农田生态系统中存在着周期运动, 是系统的重要过程, 这种振动又可分为自律振动和强制振动, 水汽和能量的传输均为强制振动。根据经典物理学定义, 周期性包括了重复发生和时间空间上的不确定性, 可以用 Fourier 分析或跟踪状态参量的极限行为确定周期轨道^[7]。通过资料分析和迭代法计算, 我们建立了能量、物质运行过程的数学方程。对净辐射、潜热通量、显热通量及土壤热通量各项进行分析、模拟, 得到如下模型:

$$y = a \sin(bx + c) + d \sin(ex + f) \quad (8)$$

式中: y 为需模拟的物理量, x 为一天中的时间序列。模拟结果见表 2。

表2 能量平衡各项模拟结果值

1997-05-20

因变量	复相关系数 r^2	方 程 系 数					
		a	b	c	d	e	f
Rn	0.9295	5.49×10^2	-8.14×10^5	7.55	4.185	-9.74×10^{-3}	1.08
LE	0.8740	-3.77×10^2	-8.09×10^{-4}	2.7×10	-6.48	-7.46×10^{-3}	5.62×10
H	0.7279	-1.41×10^2	8.57×10^{-5}	4.86	8.85	-6.31×10^{-3}	-0.93
G	0.9672	-4.20×10	-7.40×10^{-5}	1.74	0.81	-7.58×10^{-4}	1.32

由此我们认为,无论是驱动水分运行的能量还是水分本身变化都是呈周期性变化,对季节和日变化都是随能量而呈随机模式,包括振幅位相,这证明水分运动具有非线性特征。

农田生态过程的数学表达形式虽然简单,但却启示我们,界面过程无疑是非线性的,是混沌行为,混沌并不是一个完全无规律的现象,而是一个比周期性更深刻的概念,它包括周期性和有序性;不仅如此,混沌既有有序的周期结构又有准周期的无序特点。陈兰荪、陈键证明,种群发展具有混沌周期特点^[7],因此在生态学中傅立叶过程模式具有普适性。正因为这些过程在年、日周期上的重复出现,才构成生态系统的生产力,有利用价值;振动的幅度也是可以调控的。

3 结论

利用波文比-能量平衡法通过对冬小麦生育期水热传输的连续监测,得到以下结论:

土壤水分是极其活跃的控制性因素,直接影响着表征能量分配比例的因子——波文比——的变化。

农田生态系统的蒸散量呈明显的季节变化规律,净辐射是控制农田蒸散的热力驱动力。

利用观测资料建立了冬小麦农田生态系统能量平衡各分量及水分传输随时间序列变化的非线性方程,净辐射、潜热通量和显热通量具有自相似的变化趋势,其振动位移是包含准周期和有序性的混沌过程。定量地揭示了水分在土壤—大气、作物—大气2个界面传输的非线性特征。

参 考 文 献

- Gutierrez M V, Meizer C F. Energy balance and latent heat flux partitioning in coffee hedgerows at different stages of canopy development. *Agric For Meteorol*, 1994, 173~ 186
- 孙晓敏,周树秀.高精度微气象梯度观测系统及试验研究. *中国农业小气候研究进展*.北京:气象出版社,1994,340~ 345
- 莫兴国,刘苏峡.麦田能量转化和水分传输特征. *地理学报*,1997,52(1),38~ 42
- Tanner C B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Sci Soc Amer Proc*,1960,1~ 9
- Kim J, Vemra S B. Components of surface energy balance in a temperate grassland ecosystem. *Bound, Layer Meteorol*,1990,51,401~ 417
- Nichols W E, Cuencan R H. Evaluation of the evaporative fraction for parameterization of the surface energy balance. *Water Resources Res*,1993,29:3681~ 3690
- 陈兰荪,陈键.非线性生物动力学系统.北京:科学出版社,1993