

李祎君. 2015. 雨养玉米农田水热交换的环境控制机理研究 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 71–79, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13181. Li Yijun. 2015. Environmental controls on water and heat exchanges over rainfed maize cropland in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (1): 71–79.

雨养玉米农田水热交换的环境控制机理研究

李祎君

国家气象中心, 北京 100081

摘 要 基于连续 3 年的涡相关观测数据分析了雨养玉米农田水热交换的环境控制机理。结果表明: 热量(辐射与温度)与水分(土壤含水量与大气水汽压亏缺)因子是控制农田水热交换的关键因子, 但随着研究时间尺度变化, 其作用强度显著不同。当研究时间尺度由小时一日一月一季一年逐渐增大时, 热量因子对玉米农田水热交换的影响逐渐减弱, 而水分因子的影响却逐渐增强。因而, 模拟玉米农田水热交换, 以小时时间分辨率模拟时, 能量输入应以辐射为主; 以月为时间分辨率时, 能量输入应以温度为主, 可以提高模拟精度。另外, 不同水文年型控制雨养农田水热交换的主要因子也有显著差异。湿润年, 土壤水分充足, 决定蒸发强度的可用能量是限制水分交换的关键因子; 偏干年, 农田水热交换受制于水分与能量的双重制约。因此, 在估算半干旱地区水热交换时, 同时还应关注不同水文年型的迥异环境控制机理, 以提高不同时间尺度模型模拟精度。

关键词 雨养农田 环境控制 潜热通量 感热通量

文章编号 1006-9585 (2015) 01-0071-09

中图分类号 P49

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13181

Environmental Controls on Water and Heat Exchanges over Rainfed Maize Cropland in Northeast China

LI Yijun

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Base on three-year eddy covariance system measurements, environmental controls on rainfed maize cropland have been analyzed. The results show that energy factors (radiation and temperature) and water conditions (rain, soil moisture, and vapor pressure deficit) are crucial to water and heat exchanges in different ways. The effects of energy factors on water and heat exchanges are gradually weakening with increasing time scales. While, change in the impacts of water conditions on water and heat exchanges in inverse way. In different hydrological years, there are significant distinctions in environmental controls on water and heat exchanges. In humid year, available energy is primary controls on water and heat exchanges without water stress; and in arid year, available energy and soil moisture all strongly affect on water and heat exchanges.

Keywords Rainfed cropland, Environmental control, Latent heat flux, Sensible heat flux

1 引言

地表热量、水分收支状况在很大程度上决定着

地理环境的组成和演变, 清楚地认识农田水热交换过程, 对了解较大范围内能量平衡和水分循环具有重要意义, 继而能更深入认识陆面过程, 对正确评估气候和人类活动对农田生态系统的影响等有重要意

收稿日期 2013-10-23; 网络预出版日期 2014-09-23

资助项目 公益性行业科研专项 GYHY201206018, 国家重点基础研究发展计划 2006CB400502

作者简介 李祎君, 女, 1978 年出生, 博士, 主要从事气候变化对农业生产影响研究。E-mail: daoshaodao@163.com

义。近十几年, 水热通量已经被作为水热交换及其关键的重要组成部分, 它联系着能量平衡、碳交换以及水分利用等过程, 是植被群体的关键调控因子 (Zhang et al., 2007)。另一方面水热交换与作物的产量也休戚相关 (Hunt et al., 2002), 且与全球变化关系密切, 对研究植被与全球变化间的相互关系意义重大 (Dow and DeWalle, 2000; 许振柱和周广胜, 2003)。

水热通量环境控制机制的研究已有很多 (Soegaard et al., 2003; Wang et al., 2004; Baker and Griffis, 2005; Haszpra et al., 2005; Kosugi et al., 2007), 多数研究主要关注森林、草原等自然生态系统, 对于单一农田生态系统, 这类受人为干扰较强的人工生态系统的研究较少。由于影响农田水热交换的因素多而复杂, 给农田水热交换计算模型的建立增加了难度 (段红星, 2005), 因而多数农田水热交换研究时段较短, 仅集中于主要生长季。非生长季的水热交换及其年际波动的研究较少。为了水分收支的定量化研究以及水管理政策的改善, 需要更加深刻地了解相应的生理过程 (Suyker and Verma, 2008)。因而, 长期的水热通量观测研究是必不可少的。另外, 改进已有水热交换模拟模型, 也需要了解不同时间尺度水热交换的关键环境因子。目前, 涡相关技术得到比较准确的水热通量数据, 是一种较为可靠的手段, 但是仪器造价高, 维护保养都需要资金支持, 并不适合广大台站进行水热通量的监测。因而, 应用这些先进仪器的观测数据, 分析水热通量与周围环境因子的相互关系是十分必要的, 对于模拟不同时间尺度的水热通量都是具有现实意义的 (Qian and Zhu, 2001; Wang et al., 2006)。

本研究以涡动相关系统野外观测数据为基础, 以中国东北雨养玉米农田为例, 分析不同时间尺度、不同水文年型控制雨养农田水热交换的环境机理。从近几十年来的降水蒸发情况来看, 中国东北地区干旱化趋势日益明显。东北地区是我国粮油主要产区, 温度升高、降水时空格局变化对未来东北地区农田生态系统的水循环带来严重的影响 (Alavi et al., 2006)。并且, 由此引发的各种效应仍不甚明确, 在当前的气候背景下, 研究雨养农田的水热交换过程为未来东北地区气候变化情境下水热交换研究提供参考。

2 研究区域及数据处理

2.1 研究区域概况

观测站点位于辽宁省锦州市中国气象局沈阳大气环境研究所锦州农田生态系统野外观测站 [(41°49'N, 121°12'E), 海拔 17.0 m]。该地区属温带季风型大陆气候, 四季分明, 降水年较差大。常年最高气温 35 °C, 最低气温 -29.9 °C, 温差较大, 全年平均气温 7.8~11.0 °C, 年降水量为 550~630 mm, 年蒸发量 1000~1186 mm。锦州处于西风带内, 地势为由蒙古高原倾向辽东湾和松辽平原的斜坡, 气流下坡易于产生下沉运动。较大的降水锋面和低压系统经过此地时, 降水量会明显减少或无降水, 是辽宁省降水量较少的地区之一, 部分地区常年出现干旱。

该地区无霜期约 180 d, 主要种植玉米等农作物, 一般在 5 月初播种, 9 月底成熟。生长季 (5~9 月), 样地内以及周围作物均为玉米, 植株最高可达 3 m 左右, 下垫面均一无遮蔽。在非生长季, 地表为裸土覆盖, 地势平坦开阔, 玉米残茬约为 10 cm。玉米耕层土壤主要以棕壤为主。样地栽种品种、农田管理措施以及施肥情况等与周围大田一致。样地以及周围农田均无灌溉, 以雨养为主, 实行免耕或者少耕。自 2004 年 6 月开始自动观测。

2.2 数据处理

通量数据采集使用开路式涡动相关通量观测系统。该系统由 CR5000 数据采集器、CSAT3 超声风速仪、LI-7500 CO₂/H₂O 分析仪 (Li-cor 公司) 和 1 个 1 G 的 PC 卡组成。CR5000 数据采集器主要是控制测量、运算及数据存储; CSAT3 超声风速仪 (Campbell 公司) 用以测量三维风速和超声虚温; LI-7500 测量 CO₂ 绝对密度、H₂O 绝对密度和大气压力。整个系统安装于距地面 3.5 m 高度处。仪器采样频率为 10 Hz, 由数据采集器自动存储 10 Hz 原始数据。CR5000 数据采集器有 2M 内存, 可以保存一段时间的观测数据。系统工作时由涡动相关原理计算在线通量, 并存储 30 min 的 CO₂ 通量 (F_c)、潜热通量 (L_E) 与显热通量 (H) 和 10 Hz 时间系列数据, 系统同时对在线通量自动进行虚温订正与空气密度变化订正。

同时, 研究站点还设有小气候梯度观测。分 3.5 m 与 5.0 m 两个高度进行风速、温度和湿度测定, 并

在 3.5 m 高度测定净辐射、光合有效辐射等, 降水量、土壤温度 (5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、40 cm 和 80 cm)、土壤体积含水量 (10 cm、20 cm、30 cm 和 40 cm) 等也有观测, 每半小时输出一组数据。

观测数据由于受到天气因素、地形条件以及仪器的物理限制等影响, 需先进行数据质量分析与控制, 才能用于研究分析。数据质量控制以涡度相关法通量观测原理以及涡度相关仪器本身局限性为依据, 对半小时数据进行剔除。参照通量资料剔除的普适标准 (郭家选等, 2004), 具体剔除标准详见文献 (李祎君等, 2007)。

2.3 气象条件

研究区域 1961~2006 年平均温度 9.5 °C, 降水量 570.1 mm, 属半干旱地区。2004、2005 与 2006 年 3 年温度均高于多年平均 (图 1a), 其中 2006 年的高温出现时段明显晚于其他两年, 出现在 8 月; 而 2005 年 7 月的温度高于其他两年。7 月为该地区玉米营养生长与生殖生长并重、群体丰产结构形成

的关键时期, 而 8 月是玉米产量 (大穗) 形成的关键期, 既而 7 月和 8 月的温度与水分的配合情况是决定玉米生长好坏的关键。研究期间年际间的降水量与分布差异明显, 2006 年全年降水偏少, 低于多年平均 12%, 其中 5 月与 7 月降水明显偏少 (图 1b), 2006 年属于偏干年份。而 2004 年与 2005 年全年降水量分别高出多年平均 20% 与 15%, 属于湿润年份。

降水量及其分布年际间差异 (图 1b) 造成 3 年的土壤含水量、大气饱和和水汽压差也存在着十分显著的差异 (图 2)。2004 年没有可用的土壤水分数据, 在此不作分析。2005 年生长季土壤含水量 (S_{wc}) 平均为 $0.33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 为田间持水量的 106%, 该年土壤十分湿润。而 2006 年除了生长季前期 (5 月) 降水严重偏少, 造成土壤水分不足, 其他大部时段土壤水分基本维持在田间持水量附近。同样地, 2005 年生长季大部时段的空气饱和和水汽压亏小于其他两年, 说明该年大气相对也比较湿润。半干

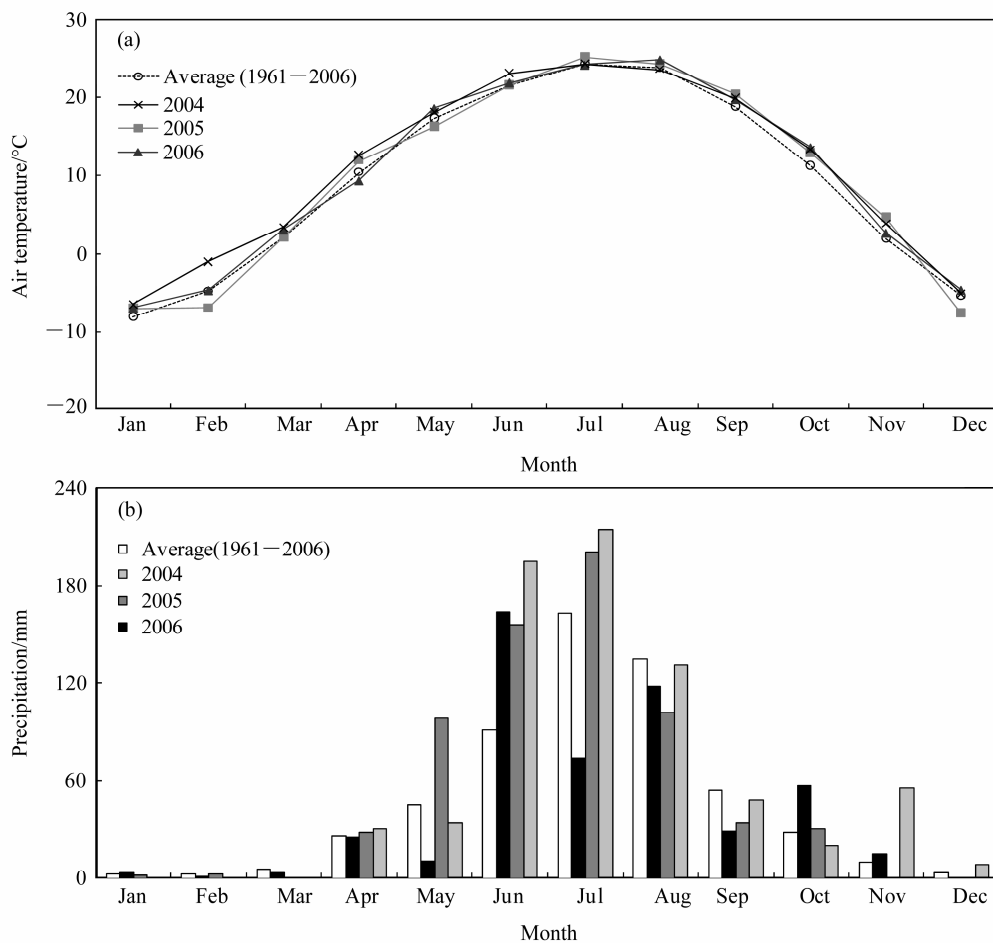


图 1 2004、2005 和 2006 年生长季 (a) 空气温度与 (b) 降水量

Fig. 1 (a) Air temperature and (b) precipitation during growth seasons in 2004, 2005, and 2006

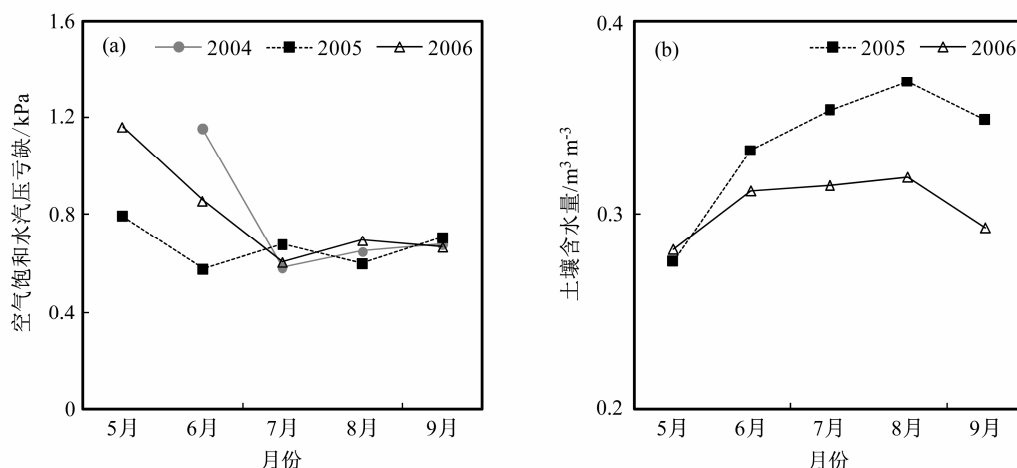


图2 (a) 2004年、2005年和2006年生长季空气饱和水汽压亏缺 (V_{PD}) 和 (b) 2005年和2006年生长季土壤含水量 (S_{WC})

Fig. 2 (a) Vapor pressure deficit (V_{PD}) during grow seasons in 2004, 2005, and 2006 and (b) soil water content (S_{WC}) during growth seasons in 2005 and 2006

旱、干旱地区水分蒸散量与降水量的比值 (R_{lep}) 可以表示该地区的干旱程度, 一般 R_{lep} 介于 1.54~20.0 之间表示该地区较为干旱。2004 年生长季 R_{lep} 为 1.05, 2005 年生长季 R_{lep} 为 0.92, 说明 2004、2005 年整个生长季水分条件较好, 属于湿润年; 而 2006 年生长季 R_{lep} 为 1.96, 存在程度较轻的干旱胁迫。年际间截然不同的水分条件差异, 将会对水热交换产生怎样的影响, 将在下面进行详细讨论。

3 结果与讨论

农田水热交换与 3 大因素有关: 作物因素、大气因素和土壤因素。作物因素, 也可称为内部因素, 包括作物种类、品种、生育期和生长状况等; 大气因素, 称为外部因素, 影响因子有太阳辐射、气温、日照、风速、湿度等; 土壤因素也属外部因素, 影响因子有土壤质地、结构、含水量、有机质含量等。鉴于资料与方法的制约, 本文主要研究大气因素对农田水热交换的影响。目前已有的农田水热通量环境条件影响研究表明, 水热交换过程受相互作用的生理、环境因子的影响, 包括土壤湿度 (S_{WC})、冠层导度、叶面积、净辐射 (R_n)、温度, 水汽压亏缺 (V_{PD}) 和风速 (u) 等 (Suyker and Verma, 2008)。

3.1 不同时间尺度水热交换的环境控制因子

3.1.1 潜热通量

采用因子分析法, 分析不同时间尺度环境变量对农田水热交换的作用强度, 发现存在显著差异

(表 1)。本文将辐射与温度归为一类, 称为能量因子或者热量因子; 将决定雨养农田水分状况的空气饱和水汽压亏缺 (V_{PD}) 与土壤含水量 (S_{WC}) 并称为水分因子, 它们的大小均仅依赖于降水的变化。热量与水分是作物生长发育不可或缺的条件, 也是决定地气之间水热交换的主要因子。在小时尺度, 净辐射 (R_n) 为主导因子, 是影响潜热通量的第一位因子。随着研究时间尺度的拉长, R_n 的影响逐渐减弱, 由主导因子逐渐变为非主导因子。而温度的影响正好相反, 随着时间尺度变长逐渐变为第一位控制因子, 主导着 L_E 的变化。由此可见, 虽然辐射与温度均可表征地表热量条件, 但它们在不同时间尺度上对水热交换的影响表现却明显不同。时间尺度越大, 温度的影响越显著, 这可能与在较长时间尺度上, 辐射的影响隐含于温度的影响之中有关。因而, 以小时为时间分辨率模拟水热交换时, 能量输入应以辐射为主; 若以月为时间分辨率模拟时, 能量输入应以温度为主。

随着研究时间尺度的拉长, 水分因子对 L_E 影响的强度也表现出较明显变化。在小时尺度上, 水分因子对 L_E 的影响程度远不及热量因子, 尤其是 S_{WC} 在小时尺度上变化缓慢, 与水分交换的关系并不显著。相对于土壤水分的缓慢变化, V_{PD} 在小时尺度上的变化比较大。因而, 在小时尺度上, V_{PD} 是控制 L_E 的主要因子, 其作用强度强于 S_{WC} 的。随着研究时间尺度的增大, 在季节尺度上, 水分因子跃居第二位主要控制因子, 其对 L_E 的影响也是设置的 3

个时间尺度中最显著的。 S_{WC} 与 L_E 的相关性随着时间尺度的增长而越来越显著, 可能在年尺度上 S_{WC} 将会成为控制该地区雨养农田水分交换的关键因子。降水虽然是雨养农田作物生长发育需水的主要来源, 但在较短时间尺度上 (小时或日), 影响降水的因素众多, 且降水分配过程及其复杂, 降水对水交换的影响又隐含于土壤以及大气水的影响之中, 只有在季节尺度上降水与 L_E 的关系才比较显著。总体来说, 在较短时间尺度上, 热量因子一直是关键控制因子, 主导着 L_E 的变化, 而在季节尺度上, 热量因子的这种优势被水分因子打破, 水分对 L_E 的影响作用逐渐增强, 取代了 R_n 的位置。

3.1.2 显热通量

热量因子对地气之间热交换 (H) 的影响与其对 L_E 的影响相似。在不同的时间尺度上, R_n 均为第一位的主导因子, 但其影响作用随着研究时间尺度的增大而变弱 (表 2)。可能在更长的时间尺度上, R_n 的主导地位将被其它因子所取代。温度对 H 的影响并不大, 且随着时间尺度增长, 它对 H 影响逐渐减弱直至不显著。热量因子对 H 的影响作用也是随着研究时间尺度的增长而逐渐削弱的, 且这种削弱比热量因子对 L_E 影响随时间尺度增长的削弱更快。

与热量因子的影响相反, 随着研究时间尺度的增长, 水分因子对 H 的影响越来越显著。若没有外来水进入农田生态系统, 随着作物生长耗水, 雨养农田的水分条件呈下降趋势, 只有在较长时间尺度上, 土壤水分的变化对 H 才有意义。同样地, 降水对 H 的影响也只有在季节尺度上才比较显著, 在其它时间尺度上几乎对热交换没有什么明显影响。

一些研究也得出与本研究类似的结论:

表 1 不同时间尺度潜热通量的环境控制因子及其相关系数

Table 1 Environmental control factors on latent heat flux at different time scales and their correlation coefficients

时间尺度	与潜热通量有关的因子 (相关系数)				
小时	净辐射 ¹ (0.83)	空气温度 ² (0.51)	水汽压亏缺 ³ (0.74)	风速* (0.24)	土壤含水量* (0.27)
日	净辐射 ¹ (0.80)	空气温度 ² (0.81)	土壤含水量* (0.59)	风速* (-0.20)	
季节	空气温度 ¹ (0.98)	土壤含水量 ² (0.74)	净辐射* (0.87)	水汽压亏缺* (0.85)	降水* (0.77)

注: 因子排列按照影响程度排序, 上标 1 表示第一主要控制因子, 2 为第二主要控制因子, 3 为第三主要控制因子 (下同)。

*表示非主要控制因子 (下同)。

表 2 不同时间尺度显热通量的环境控制因子与相关系数

Table 2 Environmental control factors on sensible heat flux at different time scales and their correlation coefficients

时间尺度	与显热通量有关的因子 (相关系数)			
小时	净辐射 ¹ (0.883)	水汽压亏缺 ² (0.493)	空气温度* (0.161)	
日	净辐射 ¹ (0.705)	水汽压亏缺 ² (0.409)	风速* (0.145)	叶面积指数* (-0.231)
季节	净辐射 ¹ (0.508)	土壤含水量* (-0.145)		

Amarakoon et al. (2000) 指出在 20 min 至几天时间步长上, 太阳总辐射 (SR)、气温 (T_a)、 V_{PD} 和 u 均为水热交换的影响因子; Choudhury (2000) 认为 R_n 是蒸发过程的主要驱动能量, 对年际间蒸发有十分重要的调控作用, 年蒸发量受可用能量与湿度条件的控制; 而温度通过影响作物产量组成以及碳水化合物的分布, 进而影响作物的产量。当土壤水分不受限制时, 冠层潜热通量主要受局地 V_{PD} 和冠层净辐射的影响 (Kellomäki and Wang, 1999)。当 $S_{WC} < 0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 且 $V_{PD} > 1.1 \text{ kPa}$ 时, 蒸腾作用将受到抑制 (Wang et al., 2004)。

3.2 不同水分年型水热交换的环境控制

3.2.1 小时尺度

不同的水文年型下, 控制 L_E 变化的环境因子也有一定差异。由前文可知, 2004 年与 2005 年是比较湿润的年份, 2006 年玉米生长前期出现了一定程度的水分亏缺, 仅降水量而言属偏干年份。小时尺度上, 温度对 L_E 的影响在湿润年要比偏干年更强, 且随着时间尺度的增大两者的强度差异也愈明显。以环境控制因子拟和 L_E , 湿润年的拟合度 ($R^2 = 0.84$) 远高于偏干年型 ($R^2 = 0.63$), 且引入的因子数也少于偏干年 (表 3)。湿润年, 土壤水分充足, 完全可以满足农田水分交换的需求, 因而, V_{PD} 对 L_E 的影响比 S_{WC} 对 L_E 的影响更显著。偏干年则相反, 在日、季节尺度上, S_{WC} 与 L_E 的相关性明显好于 V_{PD} 与 L_E 的关系。 V_{PD} 与 S_{WC} 均为水分因子, 但它们各自代表的意义并不相同, 它们在不同水文年型的迥异表现反映出最小因子限制法则在水热交换环境控制中的应用。也就是说在湿润年, 大气水分状况与充足的 S_{WC} 相比相对不足, 因而 V_{PD} 始终是控制 L_E 的关键水分因子; 而在偏干年, 土壤的水

表 3 不同水文年型潜热通量的环境控制因子与相关系数

Table 3 Environmental control factors on latent heat flux and their correlation coefficients in different hydrological years

年份	时间尺度	与潜热通量有关的因子 (相关系数)			
2005	小时	净辐射 ¹ (0.828)	空气温度 ² (0.509)	水汽压亏缺 ³ (0.736)	
	日	净辐射 ¹ (0.797)	空气温度 ² (0.805)		
	季节	净辐射 ¹ (0.873)	叶面积指数* (0.759)		
2006	小时	净辐射 ¹ (0.743)	空气温度 ² (0.492)	风速 ³ (0.132)	土壤含水量 ⁴ (0.350)
	日	净辐射 ¹ (0.705)	净辐射 ² (0.663)	水汽压亏缺* (0.455)	风速* (-0.294)
	季节	净辐射 ¹ (0.874)	水汽压亏缺* (0.492)	净辐射* (0.725)	风速* (-0.530)

表 4 不同水文年型显热通量的控制因子与相关系数

Table 4 Environmental control factors on sensible heat flux and their correlation coefficients in different hydrological years

年份	时间尺度	与显热通量有关的因子 (相关系数)				
2005	小时	净辐射 ¹ (0.88)	水汽压亏缺 ² (0.49)	空气温度 ³ (0.15)	风速* (0.38)	
	日	净辐射 ¹ (0.71)	水汽压亏缺 ² (0.41)	风速* (0.15)		
	季节	净辐射 ¹ (0.51)	土壤含水量 ² (-0.15)	风速* (0.72)	降水* (0.63)	
2006	小时	净辐射 ¹ (0.90)	土壤含水量 ² (0.05)	风速 ³ (0.42)	水汽压亏缺 ⁴ (0.50)	空气温度* (0.25)
	日	净辐射 ¹ (0.65)	风速 ² (0.33)	土壤含水量 ³ (0.19)	空气温度 ⁴ (0.27)	水汽压亏缺 ⁵ (0.54)
	季节	水汽压亏缺 ¹ (0.77)	风速 ² (0.67)	净辐射* (0.69)	土壤含水量* (0.37)	空气温度* (0.40)

分状况亏缺，其对水热交换的影响更为显著。

在小时尺度上，不同水文年型影响 H 的环境因子基本相似，但各因子的影响强度却显著不同。偏干年，土壤水分与大气水分因子均为控制 H 变化的主要控制因子；而湿润年， S_{WC} 的影响作用并不显著（表 4），这说明土壤水分状况对 H 的影响偏干年份比湿润年份要强。

3.2.2 日尺度的影响因子

在日尺度上，不同水文年型影响 L_E 的因子差别也十分明显。在偏干年份，温度替代辐射成为第一位的主导因子，且热量因子对 L_E 的影响作用偏干年强于湿润年。在湿润年， L_E 的日变化主要受制于热量因子而非水分条件。偏干年则不同，水分条件是影响 L_E 变化的关键因子。特别是土壤水分状况直接影响着作物的生长发育与土壤蒸发量，它是影响半干旱地区蒸发散的主要限制因子。该区域土壤水分含量与 L_E 有着很好的相关性，且在偏干年两者的关系更为显著。用一个指数的关系式来表示两者的相互关系：

$$L_E = ae^{bS_{WC}}, \tag{1}$$

其中， a 、 b 为待定参数（图 3），几乎可以解释 L_E 日变化的 50%。由此可见，土壤水分不受限制时，农田水分交换主要取决于可用能量的大小而非水分的多少；而在水分不足时，农田水分交换受到热量与水分条件的双重制约。

日尺度上影响 H 的控制因子偏干年远多于湿润年，但拟合度却没有湿润年高（表 2）。湿润年控

制热交换日变化的主要环境因子只有 R_n 和 V_{PD} ，而偏干年有 5 个主要控制因子，除了上述两个因子外还有 u 、 S_{WC} 和 T_a 。由此也可以看出，在偏干年份水分不足时，水分因子对热量交换的影响不可忽视且影响更为复杂。

3.2.3 季节尺度的影响因子

季节尺度上，湿润年影响 L_E 变化的主要控制因子只有 T_a 与 S_{WC} ，而偏干年则有 4 个因子控制着 L_E 的变化。相比较而言，温度的控制作用偏干年弱于湿润年，而水分因子的作用则相反。另一方面，在季节尺度上，表征土壤水分含量与大气水分状况的两类水分因子对水热交换的影响作用在不同的水文年型表现不同。湿润年，大气水分含量对农田水分交换的影响更显著，表明湿润年份土壤水分充足不会限制 L_E 的增加，水分因子的限制作用主要表现在大气水分含量多寡。 V_{PD} 值越大蒸发需求也越大，越有利于水分蒸发过程；偏干年则相反，土壤水分含量的多寡对农田水分交换的意义重大，几乎可以解释 90% L_E 的季节变化（图 4）。

季节尺度上， H 的影响因子在不同水文年型间差异也很大。湿润年，控制 H 的主要环境因子为 R_n 和 S_{WC} ，且 S_{WC} 与 H 呈负相关，当土壤水分含量较大时将抑制 H 的增加，表明土壤水分过多不利于农田热量交换。这也是降水之后，农田热交换显著降低的主要原因。而偏干年控制 H 的主要环境因子为 V_{PD} 与 u ，热量因子已经不是控制 H 变化的主要因子，水分因子的作用更加重要。农田热交换的水

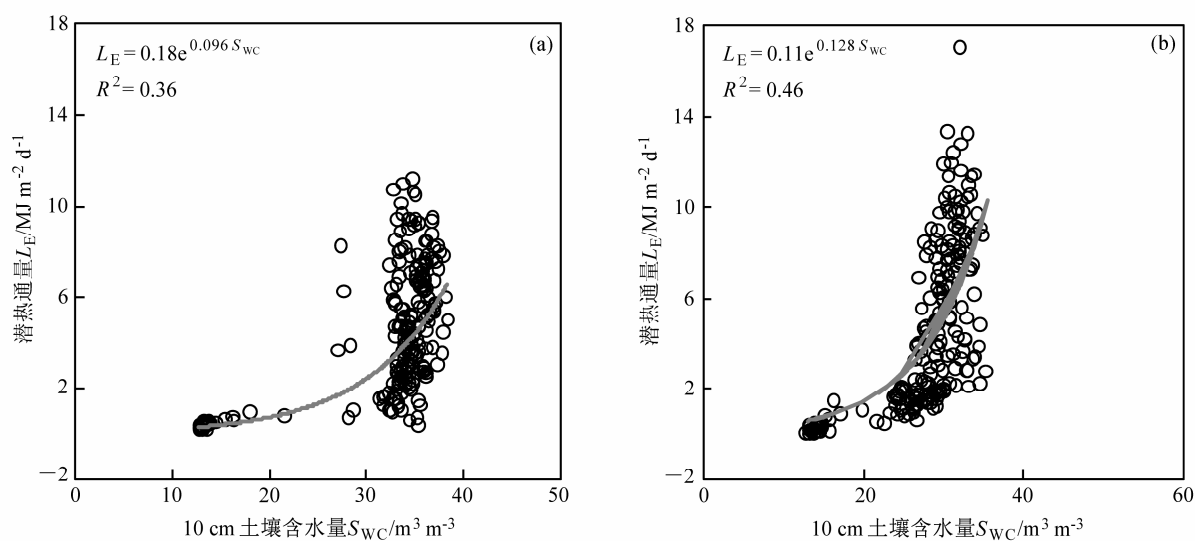


图3 (a) 2005 年和 (b) 2006 年潜热通量与土壤含水率的关系

Fig. 3 Relationships between soil water content and latent heat flux in (a) 2005 and (b) 2006

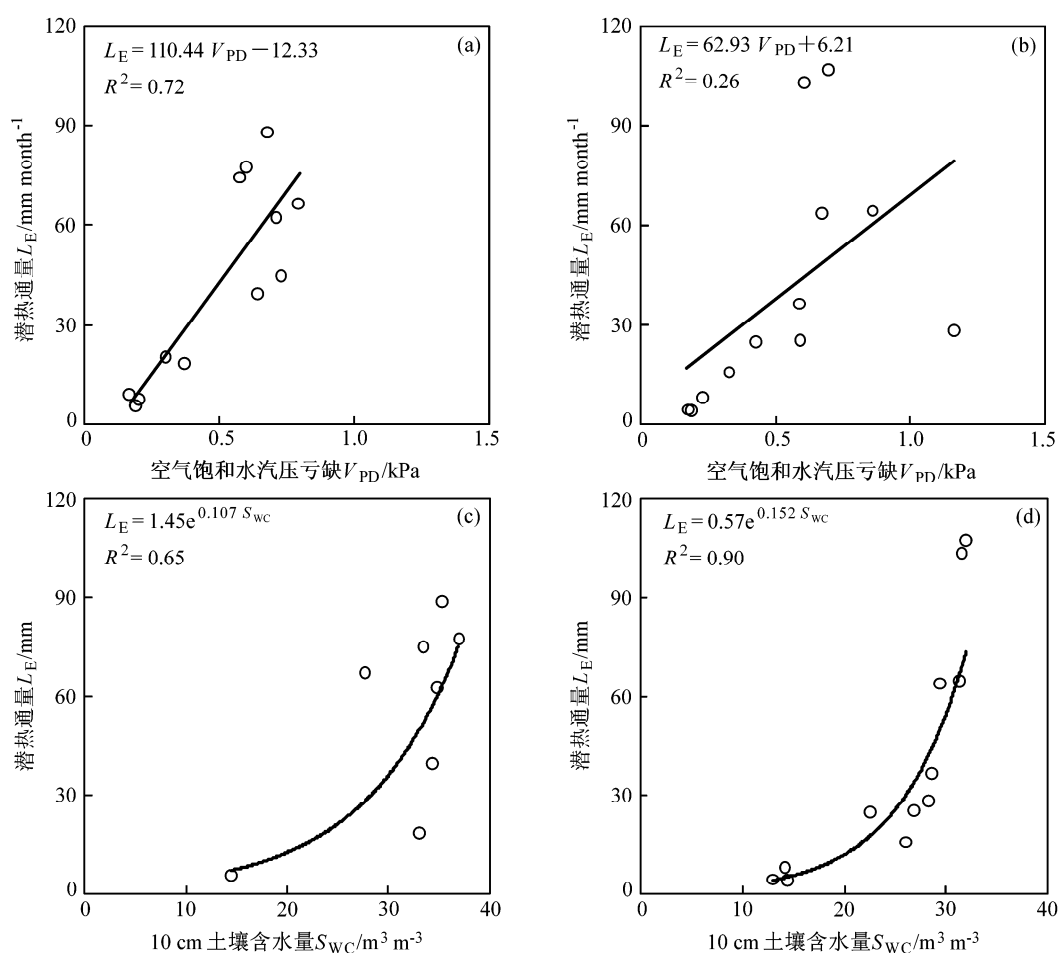


图4 2005 年(左列)和2006 年(右列)潜热通量与(a、b)饱和水汽压亏缺、(c、d)土壤含水率的关系

Fig. 4 Relationships between latent heat fluxes with (a, b) vapor pressure deficit and (c, d) soil water content in 2005 (left panel) and 2006 (right panel)

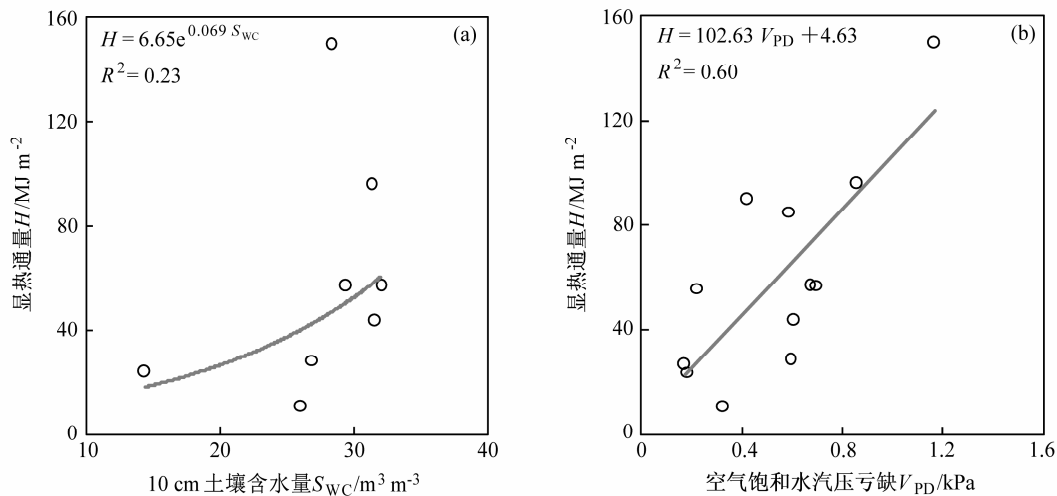


图5 2006年显热通量与(a)土壤含水率、(b)饱和水汽压亏缺的关系

Fig. 5 Relationships between sensible heat flux with (a) soil water content and (b) vapor pressure deficit

分控制因子与水分交换的截然不同,当土壤水分亏缺时,大气水分状况是影响热量交换的主要水分因子, V_{PD} 值越大大气越干燥越有利于地气间热量的交换;当土壤水分充足时,土壤含水量的多少直接影响着地气间的热量交换, S_{WC} 值越大土壤越湿润越不利于热交换。因而,在偏干年 S_{WC} 、 V_{PD} 与 H 均有很好的相关关系(图5)。同样地, H 也可用 S_{WC} 的指数关系式(a' 、 b' 为待定参数)

$$H = a' e^{b' S_{WC}} \quad (2)$$

来表达,只是这一关系式只适用于偏干年。不管是湿润年还是偏干年,土壤与大气干燥均有利于地气间的热量交换。

此外,偏干年风速对 L_E 的影响也十分显著,且这种影响作用随着研究时间尺度的增加逐渐增强,并由正相关转变为负相关。在小时尺度内,风速大利于水汽扩散,而较长时间尺度如季节,风速大反而不利于水汽蒸发。这表明阵风有利于加速表层水汽扩散,加强地气之间的水分交换;而长时间的持续大风,会将表层大量水汽带走,造成冠层干燥对水分扩散不利。对于热量交换而言,无论阵风还是持续长时间的大风均有利于热量的扩散。

4 结论

基于连续3年的涡动相关系统观测数据,分析雨养玉米农田水热交换在不同时间尺度、不同水文年型的环境控制机理。结果表明:雨养农田水热交

换在不同时间尺度、不同水文年型受不同的热量与水分因子的控制。随着研究时间尺度的增大,热量因子对农田水热交换的影响逐渐减弱,而水分因子的影响则逐渐增强,甚至替代热量因子成为控制雨养农田水热交换的主导因子。在湿润年,大气水分状况与蒸发可用能量是限制农田水分交换的主要控制因子;偏干年,土壤水分含量是决定农田水分交换强弱的主要因子。对热量交换而言,湿润年土壤含水量是限制其大小的主要因子,土壤越湿润越不利于地气间的热量交换;偏干年,大气含水量是控制热量交换的主要因子,大气越干燥地气间的热量交换越强。在模拟农田水热交换时,在不同的水文年型下应关注不同的关键环境控制因子,采用不同的函数形式可提高模型的模拟精度。

致谢 感谢中国科学院植物研究所周广胜研究员和 GCTE 研究组提供的数据以及大力帮助!

参考文献 (References)

- Amarakoon D, Chen A, McLean P. 2000. Estimating daytime latent heat flux and evapotranspiration in Jamaica [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102 (2-3): 113-124.
- Alavi N, Warland J S, Berg A A. 2006. Filling gaps in evapotranspiration measurements for water budget studies: Evaluation of a Kalman filtering approach [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141 (1): 57-66.
- Baker J M, Griffis T J. 2005. Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128 (3-4): 163-177.

- Choudhury B J. 2000. Seasonal and interannual variations of total evaporation and their relations with precipitation, net radiation, and net carbon accumulation for the Gediz basin area [J]. *Journal of Hydrology*, 229 (1–2): 77–86.
- Dow C L, DeWalle D R. 2000. Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in Eastern United States [J]. *Water Resources Research*, 36 (7): 1835–1843.
- 段红星. 2005. 作物蒸散量计算模型探讨 [J]. *山西水利*, (3): 83–84.
- Duan Hongxing. 2005. Calculation of crop evapotranspiration model [J]. *Shanxi Water Resources*, (3): 83–84.
- 郭家选, 梅旭荣, 卢志光, 等. 2004. 测定农田蒸散的涡度相关技术 [J]. *中国农业科学*, 37 (8): 1172–1176.
- Guo Jiaxuan, Mei Xurong, Lu Zhiguang, et al. 2004. Field evapotranspiration measurement based on eddy covariance technology [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 37 (8): 1172–1176.
- Haszpra L, Barcza Z, Davis K J, et al. 2005. Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132 (1–2): 58–77.
- Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, et al. 2002. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111 (1): 65–82.
- Kellomäki S, Wang K-Y. 1999. Short-term environmental controls of heat and water vapour fluxes above a boreal coniferous forest: Model computations compared with measurements by eddy correlation [J]. *Ecological Modelling*, 124 (2–3): 145–173.
- Kosugi Y, Takanashi S, Tanaka H, et al. 2007. Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. I. Eddy covariance fluxes and surface conductance characteristics for 3 years [J]. *Journal of Hydrology*, 337 (3–4): 269–283.
- Zhang Y S, Kadota T, Ohata T, et al. 2007. Environmental controls on evapotranspiration from sparse grassland in Mongolia [J]. *Hydrological Processes*, 21 (15): 2016–2027.
- 李祎君, 许振柱, 王云龙, 等. 2007. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析 [J]. *植物生态学报*, 31 (6): 1132–1144.
- Li Yijun, Xu Zhenzhu, Wang Yunlong, et al. 2007. Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agro ecosystem [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 31 (6): 1132–1144.
- Qian W H, Zhu Y F. 2001. Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental condition [J]. *Climatic Change*, 50 (4): 419–444.
- Soegaard H, Jensen N O, Boegh E, et al. 2003. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114 (3–4): 153–173.
- Suyker A E, Verma S B. 2008. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (3): 417–427.
- Wang J, Yu Q, Li J, et al. 2006. Simulation of diurnal variations of CO₂, water and heat fluxes over winter wheat with a model coupled photosynthesis and transpiration [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137 (3–4): 194–219.
- Wang K-Y, Kellomäki S, Zha T, et al. 2004. Seasonal variation in energy and water fluxes in a pine forest: An analysis based on eddy covariance and an integrated model [J]. *Ecological Modelling*, 179 (3): 259–279.
- 许振柱, 周广胜. 2003. 陆生植物对全球变化的适应性研究进展 [J]. *自然科学进展*, 13 (2): 113–119.
- Xu Zhenzhu, Zhou Guangsheng. 2003. Advances in terrestrial plant adaptation to global change [J]. *Progress in Natural Science*, 13 (2): 113–119.