

玉米农田蒸散过程及其对气候变化的响应模拟

米娜¹, 张玉书^{1,*}, 陈鹏狮¹, 纪瑞鹏¹, 蔡福¹, 李荣平¹, 王树森²

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2. Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, 588 Booth Street, Ottawa, Ontario K1A 0Y7, Canada)

摘要:应用基于生理生态学过程的 EALCO 模型,对玉米农田生态系统的蒸散(ET)过程进行了模拟,在模型检验基础上,使用该模型模拟了玉米农田生态系统 ET 过程对未来气候变化的响应。结果表明,EALCO 模型中能量与水过程的动态耦合机制使模型能够较好地模拟农田蒸散过程,基于涡度相关法的观测值与模型模拟值在小时、日尺度上均吻合较好,模型可以解释 67% 的日蒸散的变化特征。对土壤蒸发与冠层蒸腾的分别模拟显示,生长季土壤蒸发约占 ET 的 36%。温度的升高会引起 ET 与冠层蒸腾的增加,同时土壤蒸发减少;ET 对降水减少的响应较为敏感,主要表现在土壤蒸发的下降。大气 CO₂ 浓度升高对冠层蒸腾影响显著,该情景下冠层蒸腾下降幅度最大。研究所假设的 2100 年气候情景下,该农田生态系统生长季蒸散将减少,然而相对于降水的减少而言,蒸散的减少量较小,即水分支出项相对增加,因此,发生土壤水分匮乏的可能性加大,这可能会加剧该地区的暖干化趋势,给作物产量及生态环境带来威胁。

关键词:农田生态系统;生态系统模型;蒸散过程;模型检验;气候变化

A modeling study of evapotranspiration from maize cropping system and its response to climate change

MI Na¹, ZHANG Yushu^{1,*}, CHEN Pengshi¹, JI Ruipeng¹, CAI Fu¹, LI Rongping¹, WANG Shusen²

1 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China

2 Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, 588 Booth Street, Ottawa, Ontario K1A 0Y7, Canada

Abstract: A process-based physiological model, EALCO (Ecological Assimilation of Land and Climate Observation), was used to simulate the evapotranspiration from maize cropping system and to investigate the responses of evapotranspirational processes to projected climate change. Measured evapotranspiration from the maize cropping system by an eddy covariance system was used to test the model's performance. The results showed that EALCO has high capability to simulate the evapotranspiration in both hourly and daily scales, and explained 67% of daily evapotranspiration. By dividing the evapotranspiration into soil evaporation and canopy transpiration in growing season, simulated soil evaporation counted for 36% of evapotranspiration. Simulated evapotranspiration and canopy transpiration will increase due to the increase in air temperature, but soil evaporation tends to decrease. Simulated evapotranspiration was strongly sensitive to the decrease in precipitation, which mainly leads to the decrease in soil evaporation. The increase in atmospheric CO₂ concentration will significantly decrease canopy transpiration. Under the scenarios of future climate change in 2100, the model suggested that the evapotranspiration during the growing season will decrease; however, the decreased evapotranspiration can not compensate the decrease in precipitation. As a consequence, future climate change will increase the possibility of crop water stress, intensify the trends of warming and drying, and hence threaten crop production and ecological environment in the studied region.

Key Words: maize cropping system; ecosystem model; evapotranspiration; model testing; climate change

基金项目:中国气象局气候变化专项资助项目;中国气象局业务建设重点资助项目;中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目

收稿日期:2008-11-16; **修订日期:**2009-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yushuzhang@126.com

蒸散(ET)是陆地水循环过程的重要子过程,决定了从土壤和植被进入大气的水分的多少,及伴随着这一过程的潜热和感热的变化,从而显著地影响下垫面的气候和环境条件^[1]。对水和能量平衡过程的深入理解和模拟,是对气候变化进行可靠预测的前提。同时 ET 在数值天气预报(NWP)和大气环流模式研究中(GCMs)也起着重要的作用。在多数陆地生态系统中,通过 ET 形式实现的潜热通量是陆面与大气间能量交换的主要形式。潜热通量决定了下垫面的状况,如地面温度和土壤湿度。大量的数值模拟试验表明,ET 的变化会引起区域及全球气候的变化以及气候对大气 CO₂ 浓度升高敏感性的变化。通常来讲,ET 的下降(大气 CO₂ 浓度升高导致气孔阻力增加)会引起对流性的和大尺度的降水的减少,近地面温度升高、湿度下降等。此外,ET 在水循环及水资源管理中也起到了重要的作用。从年尺度上来讲,大多数陆地生态系统 ET 会消耗掉大部分的降水,在一些地区,ET 甚至会超过降水(由地下水供给)。Baumgartner 和 Reichel^[2]指出,在全球范围内,ET 将 64% 的陆面降水返回给大气,ET 的大小强烈的影响着溪流、地下水补给、污染物转移以及水质。

对于 ET 的模拟,依据应用的目的和数据的限制而有许多不同的方法。在水文和生态学中,最为常用的是比较简单的经验方法,此类方法需要输入的数据较少,易于计算,一般在潜在蒸散的基础上估算 ET^[3-6]。通常来讲,经验的方法不能很好的描述 ET 的动力过程以及 ET 过程中的许多影响与反馈机制。在 NWP 和 GCM 研究中,ET 的模拟大多是基于求解陆面能量平衡等式这种更具物理机制的方法。近年来,在气候模式中,陆面过程模型得到了发展,例如使用光合来描述冠层气孔导度对 ET 的控制^[7-8],并可与生态系统的氮循环联系起来,氮元素通过控制植物光合来影响气孔导度^[9-10],这大大提高了 ET 模拟的机理性与准确性。EALCO 模型就是这样一种基于生理生态学过程的机理模型,Wang^[11]使用该模型对北方落叶森林生态系统 ET 进行了成功的模拟,结论认为,在水分胁迫状况下,忽略水的动力传输机制会导致模型结果误差较大,因此在干旱和半干旱生态系统的模拟研究中考虑水的动力传输过程是非常必要的。

由于人类活动所导致的气候变化所产生的效应日益加重(如干旱等的发生),气候变化的影响是多方位、多层次和多尺度的,不仅影响整个自然生态系统,而且也影响着我国的社会经济系统。农田生态系统作为一种主要的生态系统类型在水循环研究中起着重要的作用,同时农田生态系统对国家的粮食安全及地区的经济社会可持续发展起到至关重要的作用。在全球气候变暖的背景下,东北地区的气候具有更为显著的变暖趋势,年降水量有减少趋势,降水事件还有向极端化发展的倾向,降水时间分布变得更不均匀。这可能引起更多更强的旱涝灾害,从而对东北地区的生态环境,尤其是农业生产带来不利的影响^[12]。我国从 20 世纪 90 年代初开始气候变化影响与适应性的评估研究^[13],多采用气候模式与作物模式相结合的研究方法就气候变化对主要粮食作物的生长发育及产量的影响进行模拟研究^[14-15],国外学者也有采用通过在现有气候背景下,将温度、CO₂ 浓度、降水等要素进行适当变化,来研究气候变化对生态系统的影响^[16-17]。近年来,我国学者对生态系统 ET 的研究较多集中在了 ET 大小与环境因子的关系^[18-19],然而为深入理解气候变化对农田生态系统水循环的影响,有必要将农田生态系统的能量和水通量观测与模型模拟相结合进行研究。本研究试图将基于生理生态学过程的 EALCO 模型应用在农田生态系统,同时进行模型模拟效果的检验,通过设置气候变化情景,探讨气候变化对农作物产区水分过程所产生的影响,这对准确理解农田生态系统蒸散在该地区水循环中的作用有重要的理论意义,同时也为模拟和预测农田生态系统对气候变化的响应和适应提供宝贵的科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

本研究以中国气象局锦州农田生态系统野外观测站(121°12' E, 41°49' N)为试验平台,采用涡度相关技术连续观测下垫面与大气之间的 CO₂、水汽、能量和动量通量。该研究区属温带季风型大陆性气候,四季分明,日平均温度介于 -29.9℃ 至 35.0℃ 之间,年均气温 7.8—11.0℃,年降水量介于 550 mm 至 630 mm 之间。主要作物为玉米,多年平均播种日期和成熟日期分别为 4 月 27 日和 9 月 16 日。玉米冠层最大高度可达 2.5 m。试验区的土壤为典型棕壤,有机质 0.6%—0.9%。

通量数据采集使用开路涡度相关通量观测系统,观测系统主要由 CO₂/H₂O 红外分析仪(Li-7500, Li-cor,

USA) 和三维超声风速仪 (CSAT3, Campbell, USA) 组成, 系统工作时由涡度相关原理在线计算通量, 所有 10 Hz 的原始数据均利用数据采集器 CR5000 记录和储存, 同时计算和输出 30 min 通量数据。该玉米农田通量观测呈现能量不闭合现象, 造成大约 15% 的能量损失^[20]。该试验区同时进行常规气象要素观测, 有关涡度相关系统和小气候要素观测系统详细介绍, 参见文献^[20]。本研究对于通量异常数据、降水期间的数据进行剔除, 缺失数据不进行插补, 用于检验模型模拟效果。采用 6:00—21:00 时间内的潜热通量来计算农田日蒸散量, 并用于同模型模拟结果进行比对。除以上观测外, 观测站还辅以土壤水分观测和其它生态调查。0—50 cm 平均土壤重量含水率采用土钻法测量, 每 5 d 观测 1 次, 采用线性内插法进行插值。

2007 年生长季(4—9 月份)气象要素变化情况如图 1 所示, 降水在 7、8 月份较为集中, 6 月初至 6 月底, 近一个月时间内无有效降水, 0—50 cm 平均土壤重量含水率降至 12.5% (土壤相对含水量为 53%) (图 1a, b), 玉米发生伏旱。2007 年温度与光照条件能够满足玉米生长需要(图 1 c, d)。

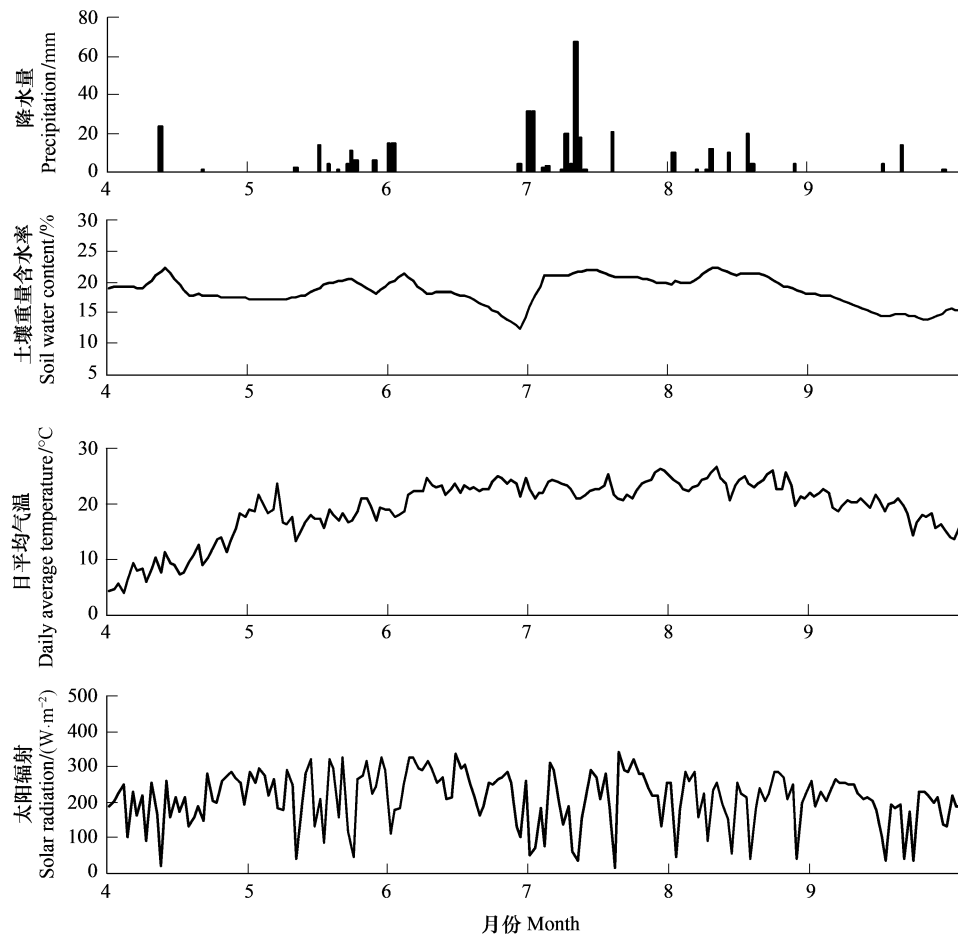


图 1 锦州农田生态系统野外试验站降水量、土壤重量含水率、日平均气温和太阳辐射的季节变化

Fig. 1 Variations of precipitation, soil water content, daily average of temperature and solar radiation at JinZhou site

1.2 模型描述

本研究使用的生态系统过程模型 EALCO (Ecological Assimilation of Land And Climate Observation) 由加拿大遥感中心开发, 适用于森林、草地、农田等生态系统, 该模型已经在森林生态系统得到了验证与应用^[21-22], 本研究试图将其应用在农田生态系统。EALCO 模型通过将植物的水平衡等式和能量平衡等式耦合起来, 从而实时地求出每个时间步长的植物冠层温度和冠层水势, 真正意义地将陆面碳、能量和水过程动态的耦合起来, 这种耦合机制不仅能提高光合和 ET 的模拟精度, 还为在现实中模拟陆地生态系统和大气之间反馈这一重要关系提供了解决办法。模型的模拟以 30 min 为时间步长, 输入数据包括入射的长波短波辐射、降水、温

度、风速、大气压和比湿,输出项包括能量通量和水汽通量等。有关模型的详细叙述参见文献^[8,10-11]。针对农田生态系统的主要模拟过程简要叙述如下:

(1) 从2007年1月1日到玉米出苗($LAI > 0$)之前,以及从叶面积指数凋落为零至2007年12月31日,模型将农田按照裸地处理。

(2) 玉米的出叶 使用空气温度、5d滑动土壤温度和出叶积温($T_{\text{sun}}^{\text{onset}}$)来决定玉米的出叶日期。即当空气温度大于出叶基础温度(式1),5d滑动土壤温度大于8℃(式2),且出叶积温大于某一特定值时(式3),玉米开始出叶。表达式如下:

$$T_a > T_{\text{base1}} \quad (1)$$

$$T_{\text{s5day}} > T_0 \quad (2)$$

$$T_{\text{sum}}^{\text{onset}} = \sum (T_{\text{a5day}} - T_{\text{base1}}) \quad (3)$$

$$T_{\text{base1}} = \max[0, \min(5.0, 5.0 \times (T_{\text{annual}} + 10.0)/20.0)] \quad (4)$$

式中, T_{a5day} 和 T_{s5day} 分别为5d滑动平均气温和5d滑动平均土壤温度; T_0 为8℃; T_{annual} 为年平均温度。

(3) 叶片的枯萎凋落 叶片枯萎原理与出叶基本相同,也采用积温来控制。当叶片枯萎积温大于某一特定值时,叶面积指数开始减少。

$$T_{\text{sum}}^{\text{fall}} = \sum (T_{\text{a5day}} - T_{\text{base2}}) \quad (5)$$

$$T_{\text{base2}} = \max[5, \min(15.0, T_{\text{july}} - 5.0)] \quad (6)$$

式中, T_{july} 为7月份平均温度。

(4) 在满足作物出叶条件之前,冠层叶面积指数为零,模型假设作物在生长旺季叶面积指数达到最大值。叶面积指数从零开始线性增长到叶面积指数最大值,在生长季末,叶面积指数线性下降到零。

(5) 模型中,光合作用的计算主要是基于Farquhar等^[23]发展的生物化学模型,冠层的蒸腾采用Ball-Berry^[24]模型进行计算,冠层能量平衡与水平衡过程的耦合机制,及冠层蒸腾、土壤蒸发的模拟具体方法详见文献^[11]。

1.3 模型参数化

模型参数和初始状态变量主要来源于锦州农田野外试验站的生理生态观测和相关文献以及本研究的估算(表1)。

1.4 气候变化情景设置

IPCC第四次评估报告指出,从现在开始到2100年,全球平均气温“最可能的升高幅度”是1.8—4.0℃,在B2情景下,全球平均气温的预测值将升高1.4—3.8℃。工业革命前大气中CO₂含量是280 μmol·mol⁻¹,如按目前增长的速度,到2100年将增加到550 μmol·mol⁻¹,即几乎增加1倍^[28]。对东北地区近44a年平均气温、降水量时间序列分析表明,东北地区气温存在明显的增加趋势,增温率为0.342℃·10a⁻¹;降水具有明显的减少趋势,气候倾向率为-11.815 mm·10a⁻¹^[29],总体上表现出暖干化气候趋势。对于降水而言,小雨雨日显著减少,同时暴雨日数基本不变,但暴雨强度明显增强^[12]。根据以上研究事实,在2007年气候条件基础上,气象要素做如下变化,以代表100a后的气候情景:

(1) 气温增加3.4℃;

(2) 降水减少20%;

(3) CO₂浓度增加180 μmol·mol⁻¹;

(4) 以上(1)和(3)的综合作用,同时将日降水量为0.1—10 mm的小雨日由23d减少为17d,增加7月1日和7月10日的降水强度,分别由31 mm和67.1 mm增加到44.5 mm和88.7 mm。在此基础上,除7月1日和10日外,降水量总体减少20%(假设代表2100年的气候状况)。

表 1 模型中使用的参数及其取值

Table 1 Parameters in the model

符号 Symbol	描述 Description	取值 Value	单位 Unit	来源 Source
$\psi_{c,min}$	[21] 中式(3)	-350	m H ₂ O	[25,26]
$\psi_{c,max}$	[21] 中式(3)	0	m H ₂ O	[25,26]
m	[21] 中式(6)	6.0		[24]
b	[21] 中式(6)	0.008	mol·m ⁻² ·s ⁻¹	[24]
A	[21] 中式(11)	17.9		
S	[21] 中式(11)	710	J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹	
H_a	[21] 中式(11)	57500	J·mol ⁻¹	
H_{dh}	[21] 中式(11)	214500	J·mol ⁻¹	
H_{dl}	[21] 中式(11)	196000	J·mol ⁻¹	
V_{cmax}	最大羧化能力	58	μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	[23]
J_{max}	最大电子传递速	1.64 V_{cmax} + 29.1 = 124	μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	[23,11]
PlantDesi	植株的密度	5.5	Plants·m ⁻²	本研究估算值
Clay	粘土百分含量	20	%	本研究估算值
Sand	沙土百分含量	40	%	本研究估算值
SOM	有机物质含量	0.75	%	[27]
LAI_{max}	叶面积指数最大值	3.99		本研究估算值
H_{max}	最大作物高度	2.5	m	本研究估算值
Ci/Ca	胞间 CO ₂ 浓度/大气 CO ₂ 浓度	0.5		[11]
H_{soil}	土层厚度	2.4	m	本研究估算值
CO ₂	大气 CO ₂ 浓度	380	μmol·mol ⁻¹	本研究估算值

2 模拟结果的检验

2.1 能量通量日变化

为了检验模型对农田生态系统能量通量的模拟效果,本研究使用净辐射、显热通量和潜热通量观测数据与模拟结果进行比对。分别选取玉米拔节期、抽雄期、灌浆期和乳熟期中的一段时间(7d)进行模拟值与观测值的比对(图2),4个时段代表了玉米不同发育时期以及不同大气(晴天、多云天和雨天)和土壤湿度下的状况。

玉米拔节期内(图2a),叶面积指数尚未达到最大值,能量通量同时分配给显热和潜热,大多时候潜热通量所占比重稍大,正午波文比在0.8至1.2之间变化。模型对净辐射、显热通量和潜热通量的模拟效果较好,观测值与模拟值之间的统计分析结果见表2。抽雄期内,玉米叶面积指数基本接近最大值,冠层光合作用增强,下垫面与大气之间的能量交换以潜热通量为主,此期间模型对潜热通量的模拟结果偏低(表2)。灌浆和乳熟期内,能量通量的分配仍以潜热通量为主,但所占比重小于抽雄期,模型对能量通量的模拟效果较好(表2)。

2.2 水汽通量季节变化

图3给出了玉米农田日蒸散的季节变化。总体上,模型对日蒸散的模拟效果较好,EALCO模型能够解释生长季内67%的日蒸散的变化(RMSE=0.59 mm d⁻¹, n=166)(图4)。日蒸散观测值与模拟值均在7月中旬至7月底达到最大值,2007年日蒸散最大观测值达5.4 mm d⁻¹,模拟值存在低估现象,其原因将在讨论部分分析。

玉米农田日蒸散包含土壤蒸发和植被蒸腾两部分,对这两部分的观测往往不容易实现。根据其物理过程,模型可以分别模拟农田蒸散的两个支出项,结果如图5所示。生长季内土壤蒸发及冠层蒸腾均呈现出单峰型变化趋势,土壤蒸发的峰值出现在5月初至5月中旬,即玉米生长高峰到来之前。此期间降水条件不稳定,时多时少,农田基本为裸地或出苗初期,此期间土壤蒸发强烈,至6月中旬后,随着玉米拔节生育期的到

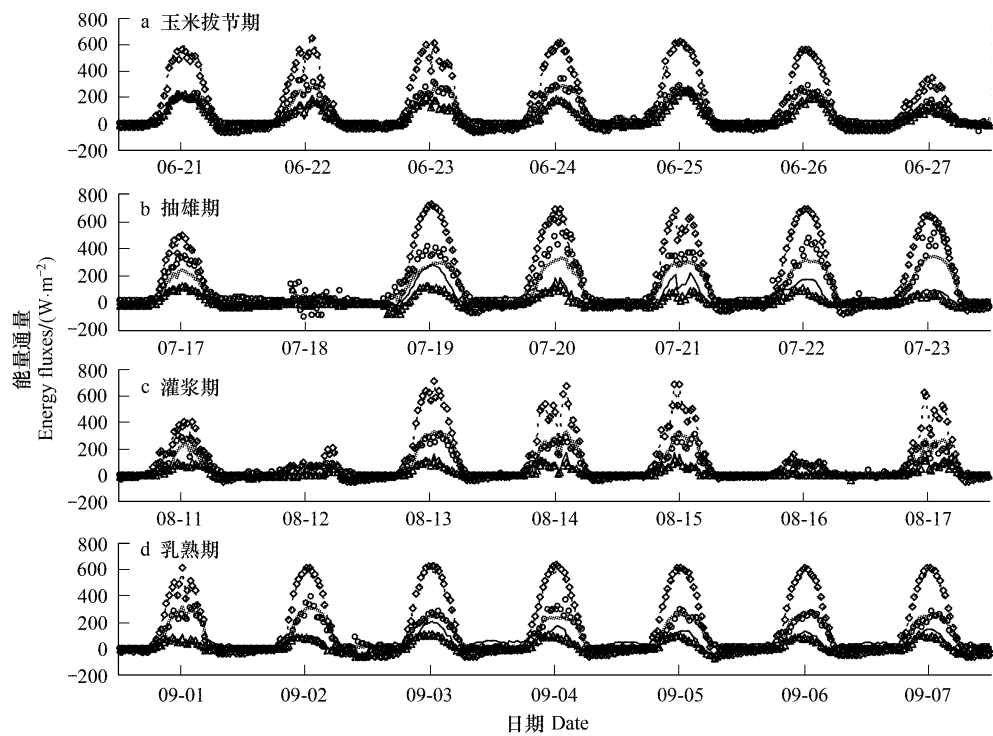


图2 不同生育期净辐射、潜热通量和显热通量的模拟值与观测值的比较; 净辐射、显热通量和潜热通量实测值分别用◇、△和○表示, 模拟值分别用虚线、细实线和粗实线表示

Fig. 2 Time series of simulated net radiation, R_n (broken line), LE (solid line), sensible heat, H (thick line), and observed R_n (diamonds), LE (circles) and H (triangles) of maize corps during different growing stages

表2 净辐射、显热通量和潜热通量观测值与模拟值的回归统计						
Table 2 Linear regression coefficients for modeled vs. observed hourly fluxes of net radiation, sensible heat and latent heat						
变量 Variables	时段 Period	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2	RMSE	n
R_n	A	1.04	-2.69	0.99	4.70	336
	B	0.97	-3.91	0.99	6.01	336
	C	0.94	-2.47	0.99	4.17	336
	D	0.93	-7.87	0.99	5.56	336
H	A	0.88	12.09	0.96	14.43	336
	B	1.30	31.89	0.78	29.08	336
	C	1.04	13.22	0.84	14.69	335
	D	1.07	28.26	0.74	25.04	336
LE	A	0.93	14.19	0.97	17.19	331
	B	0.69	14.90	0.90	35.43	330
	C	1.07	6.12	0.93	26.45	296
	D	0.94	11.58	0.95	23.76	336

A、B、C 和 D 分别代表玉米拔节期、抽雄期、灌浆期和乳熟期内的时段;RMSE:均方根误差

来,玉米叶面积指数增长加快,冠层郁蔽度增加,冠层蒸腾量超过土壤蒸发,并持续增加,至7月下旬达到最大值,之后逐渐减少。由此可见,模型的模拟结果与实际情况相符。模拟结果显示,4—9月份该农田生态系统土壤蒸发和冠层蒸腾量分别为151.1 mm和267.5 mm,土壤蒸发占总蒸散的36%。

地表径流和地下渗漏也是地表水循环的收支项目,利用EALCO模型对径流量和渗漏量的模拟结果显示,当降水强度较大($>50\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)或降水频率较高(连续2d降水量 $>50\text{ mm}$)的情况下,该农田水分将产生径流。本研究表明两次较强降水过程分别导致日径流量达2.7 mm和14.2 mm,2007年生长季内径流总量为

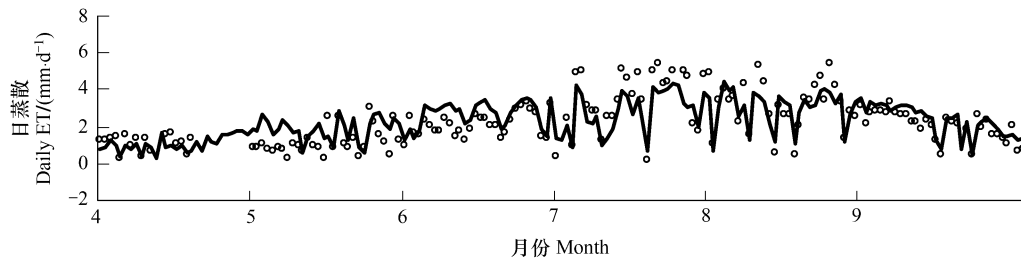


图3 玉米农田日蒸散的季节变化

Fig. 3 Simulated and measured daily ET for maize crops during the growing season in 2007

圆圈代表观测值,实线代表模拟值

22mm(图6)。除径流外,较大强度的降水还会产生地下渗漏,模型模拟结果显示,7月10日降水过程,农田渗漏量累计达28.6 mm。

3 气候变化对蒸散过程的影响

3.1 气候变化对年尺度水汽通量的影响

4种气候变化情景下,玉米农田水汽通量的年收支变化状况如图7所示。温度增加时,ET与冠层蒸腾均表现出增加的趋势,同时土壤蒸发减少;降水减少导致ET的下降,而冠层蒸腾基本不变,ET的下降主要由土壤蒸发的减少引起;大气CO₂浓度升高引起ET的下降,主要表现在冠层蒸腾的下降,这是由于CO₂浓度增加会引起气孔导度下降,因而冠层蒸腾下降明显;最后一种气候变化情景也导致了ET的下降,下降的幅度比降水与CO₂浓度单一因子的影响要小。4种气候变化情景中,对ET和土壤蒸发影响最大的均为降水减少,对冠

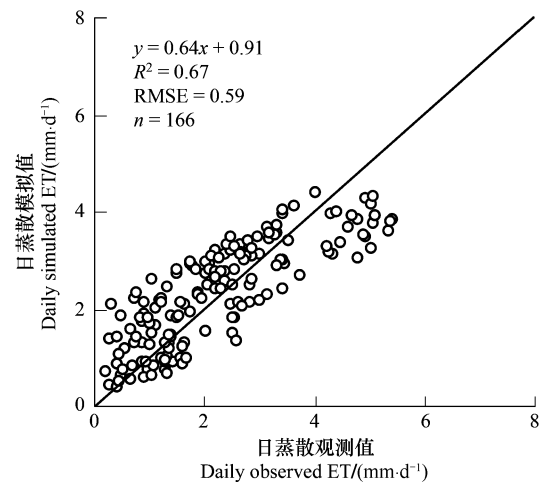


图4 玉米农田日蒸散量的观测值和模拟值

Fig. 4 Linear regression relationships between simulated and tower measured daily ET

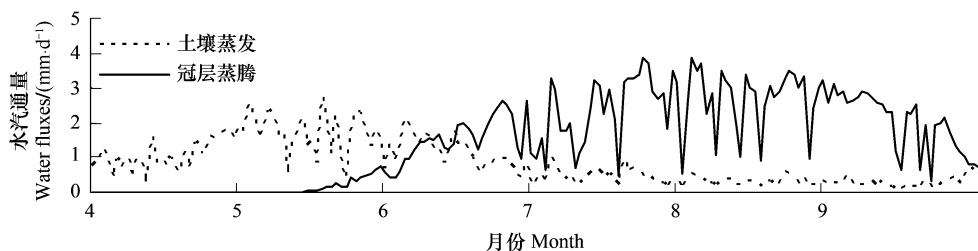


图5 玉米农田土壤蒸发和冠层蒸腾模拟值的季节变化

Fig. 5 Variations of simulated daily soil evaporation and canopy transpiration for maize crops during the growing season in 2007

层蒸腾影响最大的为大气CO₂浓度升高。

3.2 气候变化对日尺度水汽通量的影响

本研究通过设置气候变化情景,模拟了气温升高、CO₂浓度升高、降水总体上减少,暴雨强度增加、小雨日数减少综合影响下该试验站点玉米农田蒸散量的变化情况。结果显示,该气候变化情景下,生长季农田蒸散下降了11%(从418.7 mm下降到371.4 mm),日蒸散的下降主要发生在生长旺季,最大降幅大约达1 mm·d⁻¹(图8),土壤蒸发和冠层蒸腾均有所下降,但土壤蒸发占蒸散的比例基本不变,为35%。对径流和渗漏的模拟结果显示,气候变化情景下,水分径流稍有减少,地下渗漏消失(图9),这可能主要归因于,降水减少导致土壤水分含量下降,进而降低了地下渗漏发生的可能性。

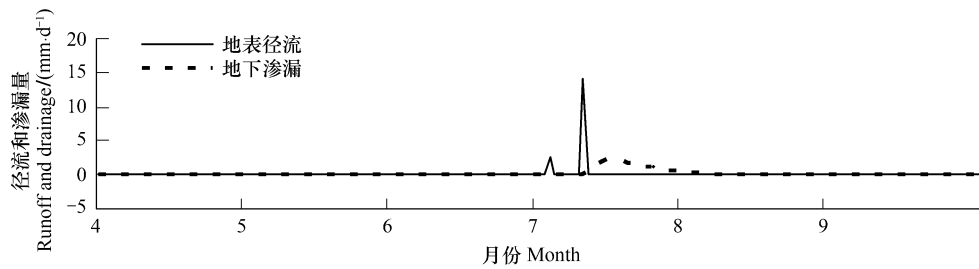


图6 玉米农田地表径流和地下渗漏日变化的模拟值

Fig. 6 Variations of simulated daily runoff and drainage for maize crops during the growing season in 2007

4 讨论

4.1 模型的优点

本研究将生态系统过程模型 EALCO 用于模拟农田生态系统蒸散过程,结果显示,该模型能够较好地模拟小时及日尺度上的能量和蒸散过程。冠层水势是决定叶片光合的重要因子,一些模型中,不直接进行冠层水势的模拟,而是以土壤湿度代替冠层水势进行叶片光合的计算,这种处理显然假设了植物水分与土壤水分变化一致,而忽略了植物水分特征例如植物水容量和水分阻力对土壤-植物-大气系统水传输的影响。这种假设的局限性在一些文献中做了阐述^[30-31],Wang 等^[8]将水传输等式进行了发展,并将其与能量平衡等式动态耦合起来,从而实时求出冠层温度与冠层水势,这种能量与水的动态耦合,并且使用冠层水势计算叶片光合作用,同时考虑了植物水分特征对上述耦合过程的影响,大大提高了陆面过程模型的机理性。Wang^[11]的研究表明,模型中引入能量与水的动态耦合机制可以在一定程度上提高模型对 ET 的模拟精度,尤其是在干旱和半干旱生态系统。本研究将此模型应用在半湿润地区农田生态系统,模拟效果较好。

4.2 观测数据的不确定性、模型敏感性的及不确定性分析

长期通量观测资料的获得为进一步检验和发展陆面过程机制提供了很好的机会。过去百余年时间里,电子技术和计算资源得到不断进步,这使得涡度相关技术日臻成熟^[32],尽管如此,通量观测数据仍然由于能量不闭合等原因存在不确定性,这也是模型的输出与观测值之间产生差异的原因之一。Baldocchi 和 Wilson^[33]在 CANOAK 模型的验证研究中指出,即使模拟值与观测值之间的吻合非常好,也不能说明模型已近乎完美,因为模拟与观测中还存在着大量的误差来源,如模型中参数取值和驱动变量的误差;在一定空间与时间尺度上模型物理过程的代表性如何以及通量观测数据会过小评价生态系统蒸散量^[34]等。针对锦州农田生态系统,李祎君等^[20]的研究表明该玉米农田通量观测呈现能量不闭合现象,大约有 15.5% 的能量损失,能量损失造成

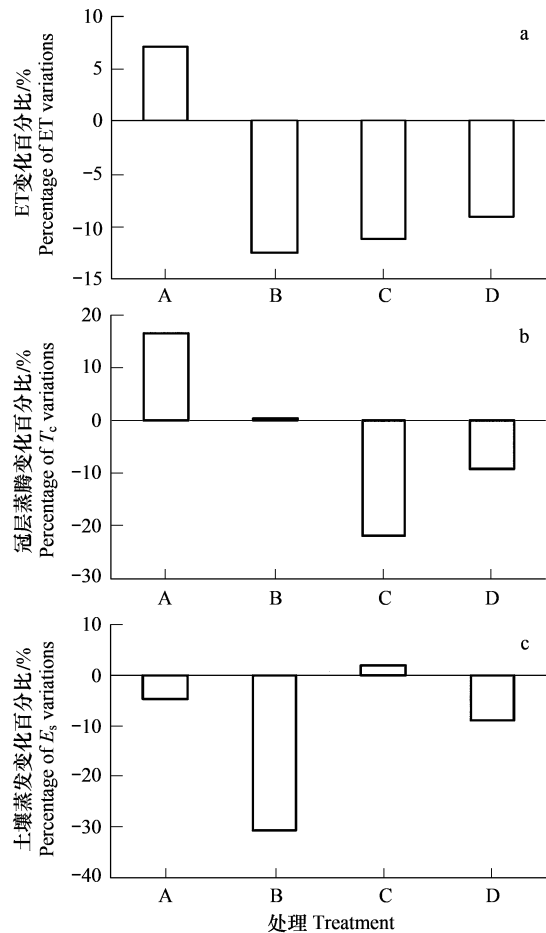


图7 气候变化情景下玉米农田水汽通量的变化

Fig. 7 Variations of yearly water budget under changing climate scenarios

a: ET; b: 冠层蒸腾, T_c ; c: 土壤蒸发, E_s ; A: 温度升高 3.4°C ; B: 降水减少 20%; C: CO_2 浓度升高 $180 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; D: 2010 年

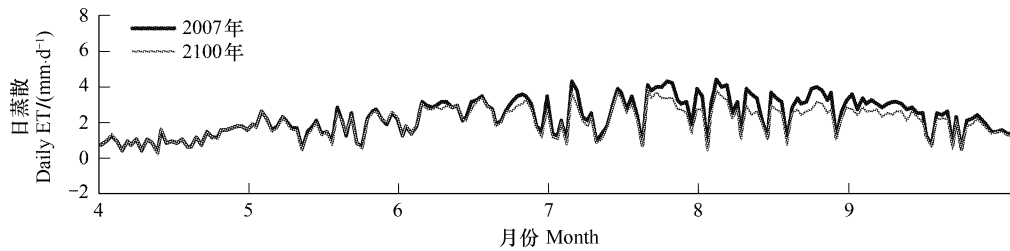


图8 当前和气候变化背景下玉米农田日蒸散的季节变化

Fig. 8 Variations of simulated daily ET under current and changing climate scenarios

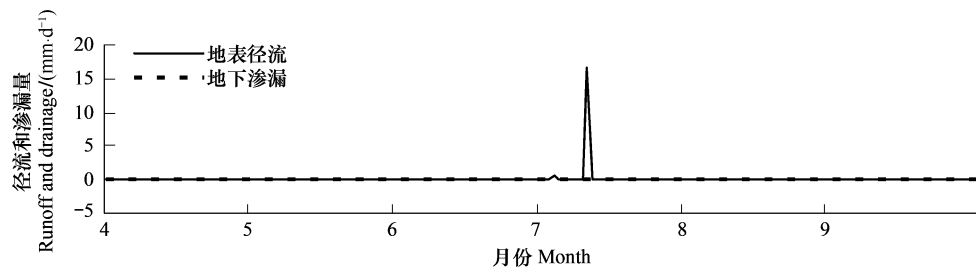


图9 气候变化背景下玉米农田地表径流和地下渗漏日变化的模拟值

Fig. 9 Variations of simulated daily runoff and drainage under the changing climate scenarios

的能量通量的低估,导致了模型模拟结果的高估(图4,日ET小于 $4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时)。

为了评价年ET对模型参数变化的敏感性,检验模型参数不确定性与模型预测结果准确性之间的关系,本研究对模型中3个主要参数进行了敏感性分析,结果如图10所示。进行敏感性检验的参数包括叶面积指数最大值($LAI_{\max}$)、最大羧化能力(V_{cmax})、决定气孔导度的参数(m)。分别对3个参数值进行减少20%、50%、增加20%、50%和100%的变化,分析表明,当参数值变化较小(增减20%)时,年ET的预测结果没有受到过大的影响,年ET的变化均小于10%,其中受 $LAI_{\max}$ 和 V_{cmax} 影响,年ET变幅均小于5%。与参数值升高相比,参数值下降对年ET的影响更大些,可见年ET对参数值下降更加敏感。3个参数中,年ET对 m 的响应最为敏感,这是因为 m 的增加会导致气孔导度的增加,进而对冠层的蒸腾产生影响。

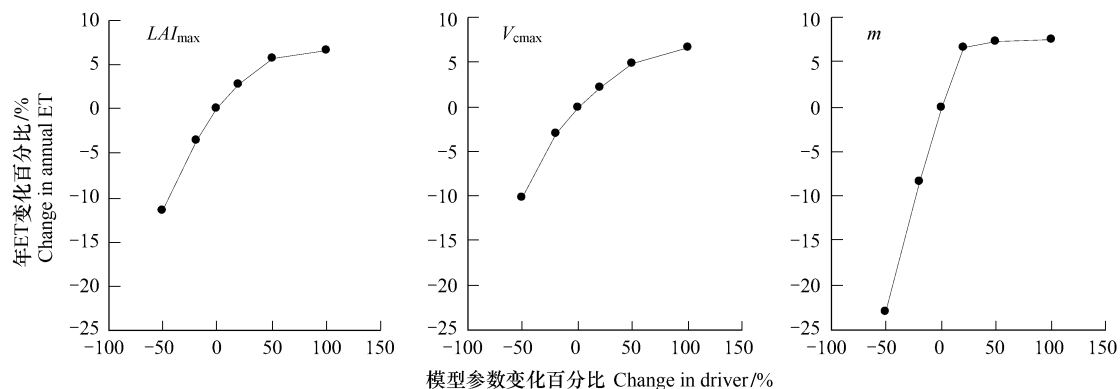


图10 年ET对模型主要参数变化的敏感性分析

Fig. 10 Analysis of the sensitivity of annual ET to changes in the values of three key parameters

模型中,假设玉米冠层叶面积指数在生长旺季达到最大值,叶面积指数从零开始线性增长到叶面积指数最大值,生长季末,叶面积指数线性下降到零。然而,实际观测显示,叶面积指数并不一定线性增加到最大值,它受到各个生长阶段天气状况的影响,本研究中,该站点在6月份经历了较严重的干旱,0—50 cm 平均土壤

水分质量百分率下降到 12.5% 的低值,此期间,玉米叶面积指数增长缓慢,而 7 月份土壤水分得到缓解后,叶面积指数增长较快。由于农田蒸散的大小与叶面积指数关系密切,因此叶面积指数模拟的误差会导致 ET 模拟的不准确,模型对 6 月份 ET 的模拟存在高估现象,而 7 月份又存在低估现象,叶面积指数模拟的误差是导致这一结果的原因之一。在 Kothavala 等^[35]的研究中也存在类似的情况,由于 LAI 模拟的误差导致了 ET 模拟值与观测值的略微不匹配。

4.3 玉米农田生态系统 ET 对气候变化情景的响应

本研究根据 IPCC 评估报告及东北地区近 50a 来气候变化的研究事实,对气象因子按照气候变化趋势进行了 4 种气候变化情景设置,以研究未来气候变化情景下农田生态系统蒸散过程的响应。气候变化的各种影响通过诸多不同的方面作用在模型上。温度的升高在模型中通过改变控制 V_{cmax} 的温度函数值、叶片气孔导度以及物候来改变光合作用与蒸散。本研究表明,温度的升高会引起 ET 与冠层蒸腾的增加,同时土壤蒸发减少,这与以往的研究结果相一致^[17,36]。降水控制水分匮乏的程度以及持续时间,这些会对光合作用、气孔导度和蒸散产生影响。本研究所关注的玉米农田生态系统 ET 对降水减少的响应较为敏感(图 7a),主要表现在土壤蒸发的下降(图 7c)。光合作用模型与导度模型的耦合使得大气 CO_2 浓度的升高会激增光合作用,同时也降低了气孔导度。因此大气 CO_2 浓度升高对冠层蒸腾影响显著,该情景下冠层蒸腾下降幅度最大(图 7b)。温度和降水以及 CO_2 浓度的变化对生态系统过程的交互影响非常复杂,预测难度较大,因此根据模型预测气候变化对生态系统过程的影响是有效的手段之一^[36]。本研究设置了温度、降水与大气 CO_2 浓度共同发生变化的气候情景,假设代表 2100 年的气候状况,结果表明,未来(约 100a)该农田生态系统生长季蒸散将减少 11%,然而相对于降水的减少而言,蒸散的减少量较小,即水分支出项相对加大,因此,发生土壤水分匮乏的可能性加大,产生地下渗漏的可能性较小,这可能会加剧该地区的暖干化趋势,对作物产量及生态环境带来威胁。Shukla 和 Mintz^[37]也指出,农田的蒸散速率是影响区域气候的重要因素,未来的气候状况可能会导致 ET 的增加,从而引起美国中西部地区土壤水分匮乏,进而影响该区域的作物产量^[38]。基于未来农业生产可能面临的水短缺状况,应更加关注水分利用效率的提高和定量化研究^[39]。

5 结论

基于生理生态学过程的 EALCO 模型将水平衡等式与能量平衡等式动态耦合起来,从而实时求出冠层温度(T_c)与冠层水势(ψ_c),该模型使用冠层水势计算水分对叶片光合作用的影响,同时考虑了植物水分特征对上述耦合过程的影响,大大提高了陆面过程模型的机理性。本研究将此模型应用在半湿润地区农田生态系统,结果表明,该模型可以较好的模拟农田生态系统小时、日尺度的蒸散过程,模型能够解释 ET67% 的变化特征。由于缺乏一些相关的观测资料如液流观测、地下渗漏观测,本研究没有检验模型对冠层蒸腾等模拟结果的模拟效果,在今后的研究中应继续加强观测,为进一步理解农田水过程及模型验证提供基础数据。

在模型检验基础上,使用 EALCO 模型模拟了 4 种气候情景设置下,玉米农田生态系统蒸散过程对未来气候变化的响应。得出的主要结论如下:温度的升高会引起 ET 与冠层蒸腾的增加,同时土壤蒸发减少;该农田生态系统 ET 对降水减少的响应较为敏感,主要表现在土壤蒸发的下降。大气 CO_2 浓度升高对冠层蒸腾影响显著,该情景下冠层蒸腾下降幅度最大。本研究所假设的 2100 年气候情景下,该农田生态系统生长季蒸散将减少,然而相对于降水的减少而言,蒸散的减少量较小,即水分支出项相对加大,因此,发生土壤水分匮乏的可能性加大,这可能会加剧该地区的暖干化趋势,给作物产量及生态环境带来威胁。尽管 EALCO 模型对生态系统碳水过程模拟的机理性保证了模型模拟结果的可靠性,但由于气候变化情景的不确定性,以及生态系统植物生理参数、植物器官对长期气候变化下的协同与适应反应^[17,40]没有体现在模拟过程中,这会引入模型预测的误差。在以后的研究中应将站点控制试验与模型模拟相结合,同时利用区域气候模式准确预估气候要素变化,更加准确地对未来气候变化下生态系统的响应做出预测。

致谢:本研究在野外观测中得到了锦州生态与农业气象中心史奎桥、刘景利、梁涛和张丽华同志的热情帮助,在此深表感谢。

References:

- [1] Liu S H, Yu F, Liu H P, Zhang C Y, Liang F M, Wang J H. Study of evapotranspiration processes simulation in arid and semi-arid regions. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(3): 359-366.
- [2] Baumgartner A, Reichel E. The world water balance. R. Oldenbourg-Verlag, 1975: 179.
- [3] Monteith J L. Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms: symposium of the society for experimental biology, Vol. 19, G. E. Gogg, ed. Academic Press, 1965: 205-234.
- [4] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Month Weather Review.*, 1972, 100: 81-92.
- [5] Allen R G, Perira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 1998.
- [6] Wang Q X, Watanabe M, Ouyang Z. Simulation of water and carbon fluxes using BIOME-BGC model over crops in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131: 209-224.
- [7] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, Dazlich D A, Zhang C, Berry J A, Field C B, Collelo G D, Bouuoua L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 1996, 9: 676-705.
- [8] Wang S, Grant R, Verseghy D L, Black T A. Modeling carbon-coupled energy and water dynamics of a boreal aspen forest in a General Circulation Model land surface scheme. *International Journal of Climatology*, 2002, 22: 1249-1265.
- [9] Dickinson R E, Berry J A, Bonan G B, Collatz G J, Field C B, Fung I Y, Goulden M, Hoffmann W A, Jackson R B, Myneni R, Sellers P J, Shaikh M. Nitrogen Controls on Climate Model Evapotranspiration. *Journal of Climate*, 2002, 15: 278-295.
- [10] Wang S, Grant R, Verseghy D L, Black T A. Modeling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS-the Canadian Land Surface Scheme. *Ecological Modelling*, 2001, 142: 135-155.
- [11] Wang S S. Simulation of evapotranspiration and its response to plant water and CO₂ transfer dynamics. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 9: 426-443.
- [12] Sun F H, Qu Z J, Yang S Y. Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in Northeast China in last 50 years. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 779-784.
- [13] Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, He Y. Simulation of the yields change of China' main crops under climate change scenario. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(5): 901-905.
- [14] Liu T J, Yin X Y, Qi C H, Tang J J, Chen M Q. Relationships between climate change and rice development and its yield formation: A simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 486-490.
- [15] Xiong W, Xu Y L, Lin E D, Lu Z G. Regional simulation of maize yield change under IPCC SRES A2 and B2 Scenarios, 2005, 26(1): 11-15.
- [16] Grant, R F, Nalder, I A, Climate change effects on net carbon exchange of a boreal aspen-hazelnut forest: estimates from the ecosystem model *ecosys*. *Global Change Biology*, 2000, 6: 183-200.
- [17] Hanson P J, Wullschlegel S D, Norby R J, Tschaplinski T J, Gunderson C A. Importance of changing CO₂, temperature, precipitation and ozone on carbon and water cycles of an upland-oak forest: Incorporating experimental results into model simulations. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1402-1423.
- [18] Liu C F, Zhang Z Q, Cha T G, Ge S, Chen J Q, Zhu J Z, Shen L H, Zhang J L, Chen J, Cai L J. Soil moisture affects energy allocation and diurnal evaporanspiraiotn of a poplar plantation-an eddy covariance-based study. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2549-2557.
- [19] Yu W Y, Zhou G S, Chi D C, Zhou L, He Q J. Evapotranspiration of *Phragmites communis* community in Panjin wetland and its controlling factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4594-4601.
- [20] Li Y J, Xu Z Z, Wang Y L, Zhou L, Zhou G S. Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agroecosystem. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1132-1144.
- [21] Mi N, Yu G R, Wang P X, Wen X F, Sun X M, Zhang L M, Song X, Wang S S. Modeling seasonal variation of CO₂ flux in a subtropical coniferous forest using the EALCO model. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1119-1131.
- [22] Mi N, Yu G R, Wen X F, Sun X M, Wang S S. Responses of subtropical conifer plantation to future climate change: A simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19, 9: 1877-1883.
- [23] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 1980, 149: 78-90.
- [24] Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmetal conditions//Biggens J ed. *Progress in photosynthesis research*, vol. 4. Martinus-Nijhoff, Dordrecht, 1987: 221-224.

- [25] Larcher W. *Physiological Plant Ecology*, 3rd. Springer, Austria, 1995.
- [26] Kimmins J P. *Forest Ecology: A Foundation for sustainable management*. 2nd, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1997.
- [27] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi G Q. Spatial heterogeneity of soil respiration and contribution of root respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural field. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5254-5261.
- [28] IPCC. *Climate change 2007: The physical science basis: Summary for policymakers*. 2007[EB/OL]. [2007-02-02]. <http://www.ipcc.ch>.
- [29] Sun F H, Yang S Y, Chen P S. Climatic warming-drying trend in Northeastern China during the last 44 years and its effects. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 751-755.
- [30] Tuzet A, Perrier A, Leuning R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26: 1097-1116.
- [31] Garcia-Quijano J, Barros A P. Incorporating vegetation dynamics into a hydrological model: Photosynthesis, dynamic respiration and stomatal sensitivity. *Ecological Modeling*, 2005, 185: 29-49.
- [32] Baldocchi D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479-492.
- [33] Baldocchi D, Wilson K B. Modeling CO₂ and water vapor exchanges of a temperate broadleaved forest across hourly and decadal time scales. *Ecological Modeling*, 2001, 142: 155-184.
- [34] Qi P T, Gu S, Tang Y H, Du M Y, Wu J B, Zhao L. Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 202-211.
- [35] Kothavala Z, Arain M A, Black T A, Verseghy D. The simulation of energy, water vapor and carbon dioxide fluxes over common crops by the Canadian Land Surface Scheme (CLASS). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 113: 89-108.
- [36] Johnson D W, Suskalk R B, Gholz H L, Hanson P J. Simulated effects of temperature and precipitation change in several forest ecosystems. *Journal of Hydrology*, 2000, 235: 183-204.
- [37] Easterling D R, Karl T R. Potential consequences of climate variability and change for the Midwestern United States//Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change, National Assessment Synthesis Team, Report for the US Global Change Research Program. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001, 167-188.
- [38] Shang Z B. The potential impacts of global climate change on spring-maize growth in Shenyang. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(3): 300-305.
- [39] Suyker A E, Verma S B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2008, doi:10.1016/j.agrformet.2008.09.010.
- [40] Chen Q S, Li L H, Han X G, Dong Y S, Wang Z P, Xiong X G, Yan Z D. Acclimatization of soil respiration to warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2649-2655.

参考文献:

- [1] 刘树华, 于飞, 刘和平, 张称意, 梁福明, 王建华. 干旱、半干旱地区蒸散过程的模拟研究. *北京大学学报*, 2007, 43(3): 359-366.
- [12] 孙凤华, 吴志坚, 杨素英. 东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征. *生态学杂志*, 2006, 25(7): 779-784.
- [13] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 何勇. 未来气候变化情景下我国主要粮食作物产量变化模拟. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 901-905.
- [14] 刘桃菊, 殷新佑, 戚昌瀚, 唐建军, 陈美球. 气候变化与水稻生长发育及产量形成关系的模拟研究. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 486-490.
- [15] 熊伟, 许吟龙, 林而达, 卢志光. IPCC SRES A2 和 B2 情景下我国玉米产量变化模拟. *中国农业气象*, 2005, 26(1): 11-15.
- [18] 刘晨峰, 张志强, 查同刚, Ge Sun, Chen J Q, 朱金兆, 申李华, 张津林, 陈军, 崔令军. 涡度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响. *生态学报*, 2006, 26(8): 2549-2557.
- [19] 于文颖, 周广胜, 迟道才, 周莉, 何奇瑾. 盘锦湿地芦苇 (*Phragmites communis*) 群落蒸发散主导影响因子. *生态学报*, 2008, 28(9): 4594-4601.
- [20] 李伟君, 许振柱, 王云龙, 周莉, 周广胜. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1132-1144.
- [21] 米娜, 于贵瑞, 王盘兴, 温学发, 孙晓敏, 张雷明, 宋霞, 王树森. 基于 EALCO 模型对中亚热带人工针叶林 CO₂ 通量季节变异的模拟. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1119-1131.
- [22] 米娜, 于贵瑞, 温学发, 孙晓敏, 王树森. 中亚热带人工针叶林对未来气候变化的响应. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1877-1883.
- [27] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 杨扬, 刘景利, 史奎桥. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献. *生态学报*, 2007, 27(12): 5254-5261.
- [34] 戚培同, 古松, 唐艳鸿, 杜明远, 吴力博, 赵亮. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较. *生态学报*, 2008, 28(1): 202-211.
- [40] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 董云社, 王智平, 熊小刚, 阎志丹. 土壤呼吸对温度升高的适应. *生态学报*, 2004, 24(11): 2649-2655.