

基于夏玉米叶片气孔导度提升的冠层导度估算模型

张宝忠, 刘 钰, 许 迪, 蔡甲冰, 赵娜娜

(国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048)

摘 要: 叶片气孔导度模拟及其向冠层导度的尺度提升是实现蒸散发尺度转换的基础, 对农业水资源高效利用与评价意义重大。本文依据夏玉米叶片气孔导度和冠层导度实测值, 在建立叶片气孔导度估算模型基础上, 构建冠层导度估算模型。结果表明, 夏玉米叶片气孔导度每日在 10:00—14:00 之间达到峰值, 其日变化趋势与光合有效辐射的一致性较好, 较大的饱和水汽压差对夏玉米叶片气孔导度具有一定的限制作用。根据光合有效辐射和饱和水汽压差建立的叶片气孔导度估算模型能较好反映当地夏玉米叶片气孔导度对主要环境因子的响应过程, 以光合有效辐射作为尺度转换因子构建的冠层导度估算模型可较好实现从叶片气孔导度向冠层导度的尺度转换提升。

关键词: 光合作用, 辐射, 模型, 饱和水汽压差, 叶片气孔导度, 冠层导度, 夏玉米

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.05.013

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-05-0080-07

张宝忠, 刘 钰, 许 迪, 等. 基于夏玉米叶片气孔导度提升的冠层导度估算模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 80—86.

Zhang Baozhong, Liu Yu, Xu Di, et al. Estimation of summer corn canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 80—86. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

气孔作为蒸散过程中水分循环和 CO₂ 交换的主要通道, 其导度受到生理和环境等因素的共同控制^[1]。单叶水平上的气孔对气体通量的控制主要通过叶片气孔导度量^[2], 大量研究测取了谷类作物^[3-4]、饲料与绿肥作物^[5-6]以及林木^[7-10]等各种植被的叶片气孔导度。由于叶片气孔导度测定受到诸多时空因素的限制, 故利用叶片气孔导度模型模拟其变化规律和特征显得尤为重要。目前, 用于描述叶片气孔导度的定量模型大体分为两类, 以 Jarvis 等人为代表建立了叶片气孔导度与环境因子的非线性模型^[5,7-8,11-14], 以 Ball 等人为代表则建立了叶片气孔导度与净光合速率和环境因子的线性相关模型^[5,7,15]。

当研究和模拟冠层尺度或更大尺度的冠层与大气间的相互作用时, 往往需要知道和了解冠层导度^[2]。为此, 有必要建立基于叶片气孔导度向冠层导度转换的尺度提升估算模型, 实现通过叶片气孔导度获得冠层导度的目的。目前, 在基于叶片气孔导度向冠层导度转换的研究中, 大多采用对叶片气孔导度实测结果进行统计分析的方法加以实现。在采用气孔计、光合仪等设备直接测定作物不同叶位处的叶片气孔导度数据基础上, 利用整体平均法、顶层阳叶分层采样法、权重法、有效叶面积指数法、水平冠层分层法、多冠层叶倾角分类法等计算获

得冠层导度^[3,14,16]。但该方法需在区域尺度布设大量测点以便覆盖植被群落, 测定成本高, 空间变异性大, 易产生测量误差^[16]。近年来, 很多研究者致力于探讨利用非线性模型实现叶片气孔导度向冠层导度转换的尺度提升^[2,8,17-21]。一些方法假定冠层叶片气孔导度仅由辐射的垂直分布所决定, 对其进行积分获得冠层导度^[2,19-21], 由于考虑的环境因子有限, 使得该法具有较大局限性和片面性。另一些方法则利用 Jarvis 叶片气孔导度模型等直接估算冠层导度^[8,22-23], 其虽然较为全面地考虑了环境因子的变化, 但需依据冠层尺度实测值对估算模型参数进行率定, 并未实现真正意义上的尺度提升。

本文以华北地区夏玉米为例, 在利用叶片气孔导度实测值对基于光合有效辐射和饱和水汽压差建立的叶片气孔导度估算模型进行率定和验证的基础上, 以光合有效辐射作为尺度转换因子, 构建起基于光合有效辐射和饱和水汽压差的冠层导度估算模型, 并对其验证, 为蒸散发尺度转换提供必要的方法和依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

田间观测试验于 2008—2009 年夏玉米生长期(6—10 月)在中国水利水电科学研究院节水灌溉试验研究基地进行。该基地位于北京大兴区, 地处 39°37' N, 116°26' E, 海拔 40.1 m。试验区属半干旱大陆性季风气候, 多年平均降雨量 540 mm, 且 80% 以上的降雨集中在夏玉米生长季, 夏玉米生育期内基本无需灌溉。试验区年均风速 1.2 m/s, 大于 10℃ 的有效积温 4 730℃, 无霜期 185 d, 年日照时数 2 600 h, 平均水面蒸发量 1 800 mm 以上, 多年平均气温 12.1℃, 呈现出“冬季寒冷少雨, 春季干燥

收稿日期: 2010-04-28 修订日期: 2011-03-03

基金项目: 国家 973 计划项目课题(2006CB403405); 国家自然科学基金项目(51009151, 50909098); 博士后基金项目(20100470379)

作者简介: 张宝忠(1981—), 男, 山西太原人, 博士后, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。北京 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 中国水利水电科学研究院水利研究所, 100048。Email: zhangbaozhong333@163.com

多风, 夏季炎热多雨”的气候特征。

1.2 试验观测与估值方法

1.2.1 叶片气孔导度

2008—2009 年夏玉米生育期内, 采用 Li-6400 光合作用测定系统 (Li-COR, USA) 每 10~15 d 测定一组叶片气孔导度 g_s 、光合有效辐射 PAR 、温度和湿度的日变化过程, 每次测定的时间范围在 8:00~16:00, 每 1 h 测定一次。每次测定时, 在涡度相关系统观测的范围内 (约 445 m²), 随机选取均匀分布的 8 株典型玉米作为代表植株, 从每株典型玉米上选取上、中、下共 3 片功能叶片, 测定位置为叶片中部, 测定时保持目标叶片始终垂直于太阳光线。并分别取均值作为该时刻冠层上层、中层和下层叶片的 g_s 和相关环境因子的测定结果。

1.2.2 冠层潜热通量和冠层导度

冠层潜热通量采用涡度相关系统测定, 其计算公式为

$$\lambda ET = \lambda \rho_a \overline{w'q'} \quad (1)$$

式中, λET 为潜热通量, W/m²; λ 为水的汽化潜热, J/kg; ρ_a 为空气密度, kg/m³; w' 为垂直风速脉动量, m/s; q' 为水汽密度脉动值, g/m³。

该涡度相关系统由 CSAT3 型三维超声风速仪 (campbell scientific inc, USA)、LI7500 CO₂/H₂O 开路气体分析仪 (LI-COR, USA)、HMP45C 空气温湿度传感器 (campbell scientific inc, USA) 和 CR5000 型数据采集器 (campbell scientific inc, USA) 等组成。根据试验区盛行东北风和西北风的气候特点, 将该系统安装在试验区中南部, 确保较大的风浪区长度。三维超声风速仪、开路气体分析仪和空气温湿度传感器的探头安装高度在地表以上约 3.1 m。净辐射 R_n 由 CNR4 净辐射传感器 (Kipp and Zonen, Netherlands) 测定, 安装高度为地表以上 4.0 m 处。土壤热通量 G 由 2 块位于地表以下 2 cm 处的 HFP01 土壤热通量板 (huksefluxusa, inc, USA) 测定, 全部测定项均取 30 min 的平均值作为每次记录值。在涡度相关实际数据处理过程中, 依据以下原则对异常数据进行剔除: 1) 降水时段以及前后各 1 h 的数据; 2) 明显超出物理含义的数据; 3) 传感器状态出现异常的数据。此外, 采用“波文比法”修正潜热通量来消除能量不闭合引起的误差^[25]。

利用涡度相关系统实测的冠层尺度潜热通量, 并基于 Penman-Monteith 公式 (以下简称 P-M 方程) 反推获得冠层导度 g_c

$$g_c = \frac{\gamma \cdot \lambda ET \cdot g_a}{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p VPD \cdot g_a - (\Delta + \gamma) \cdot \lambda ET} \quad (2)$$

式中, g_a 为空气动力学导度, m/s; VPD 为饱和水汽压差, kPa; γ 为湿度比常数, kPa/°C; Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率, kPa/°C; R_n 为净辐射, W/m²; G 为土壤热通量, W/m²; C_p 为空气的定压比热, J/kg/K。

式 (2) 中空气动力学导度 g_a 采用下式计算^[24]

$$g_a = \frac{k^2 u}{\ln((z-d)/(h_c-d)) \ln((z-d)/z_0)} \quad (3)$$

式中, k 为卡曼常数, 取值为 0.40; z 为参照高度, 即风速与温湿度测量高度, m; d 为零平面位移, m, u 为参考高度处的水平风速, m/s; z_0 为动量传输粗糙度长度, m; h_c 为作物高度, m。

零平面位移 d 和粗糙度长度 z_0 随作物高度 h_c 的改变而变化, 其表达式为^[16]

$$d = 0.63h_c \quad (4)$$

$$z_0 = 0.13h_c \quad (5)$$

1.2.3 株高和叶面积指数

株高 h_c 和叶面积指数 LAI 每 5 天测定 1 次, 每次选取 51 株有代表性的植株, 测取各植株株高, 取其均值作为农田整体水平的株高, 同时测取各植株所有有效叶片的长宽, 并根据实测的折算系数计算每株玉米的叶面积并取其平均值, 再根据种植密度得到整体叶面积指数。

1.2.4 消光系数

消光系数 K 采用 SunScan 冠层分析系统 (Dynamax, Inc., USA) 测定, 每 5 天测定 1 次, 每次选取 45 个测点, 并于 10:00~12:00 之间连续测定冠层顶部和底部的光合有效辐射并取其平均值, 最后根据实测的叶面积指数, 求得冠层消光系数^[26]。

2 结果与分析

2.1 叶片气孔导度估算模拟

2.1.1 叶片气孔导度与环境因子的日变化趋势

叶片气孔导度除受植物自身生物学特性影响外, 还对环境因子的变化十分敏感^[5]。通常影响叶片气孔导度的环境因子主要包括辐射、饱和水汽压差、土壤湿度和气温等, 当土壤水分充足时, 辐射和饱和水汽压差是决定叶片气孔导度的最关键因子^[10,27]。由于 2008—2009 年夏玉米生长期内的根区土壤含水率始终保持在田持的 65% 以上, 故此期的叶片气孔导度主要与光合有效辐射 PAR 和饱和水汽压差 VPD 关系密切。

太阳辐射作为下垫面蒸散发能量的来源, 既能诱导叶片气孔开闭, 又决定着空气温度与相对湿度的变化, 故 g_s 与 PAR 的日变化一致性相对较好, 而 VPD 在一定程度上反映了水分进入大气的难易程度, 亦对 g_s 有重要调节作用^[3]。从图 1 和图 2 给出的 2009 年夏玉米生长期典型日的冠层上部、中部和下部叶片气孔导度 g_s 、光合有效辐射 PAR 和饱和水汽压差 VPD 日变化趋势可见, 随着 PAR 的增加, g_s 逐渐增大, 并在 10:00~14:00 之间达到峰值, 此后随着 PAR 的减小和 VPD 的持续增加, g_s 迅速下降, 该日变化趋势在水稻^[4]、牧草^[28]等作物上也有所表现。这主要是由于作物自身具有一定的调节能力所致, 晴朗天气午后的 VPD 较大, 作物为避免自身水分过度散失而减小气孔开度, 导致 g_s 减小较快, 较大的 VPD 对 g_s 具有一定的限制作用。同时我们发现, 冠层各层以及不同时期的叶片气孔导度对 PAR 和 VPD 的响应大小稍有差别, 这可能与测定叶片的叶序、叶龄等不同有关。此外, 如图 1 和图 2 的所示, 上午 8:00 左右的 g_s 较大, 与此时的 PAR 和 VPD 变化趋势不太协调, 这或许与叶片表面比

较潮湿、叶内细胞水分较为充足有关,也与叶片表面的湿气蒸发导致蒸腾速率观测偏大有关联。随着太阳辐射

的增强,叶片表面水汽逐渐散失,9:00以后的 g_s 与 PAR 和 VPD 的一致性得到增强^[27]。

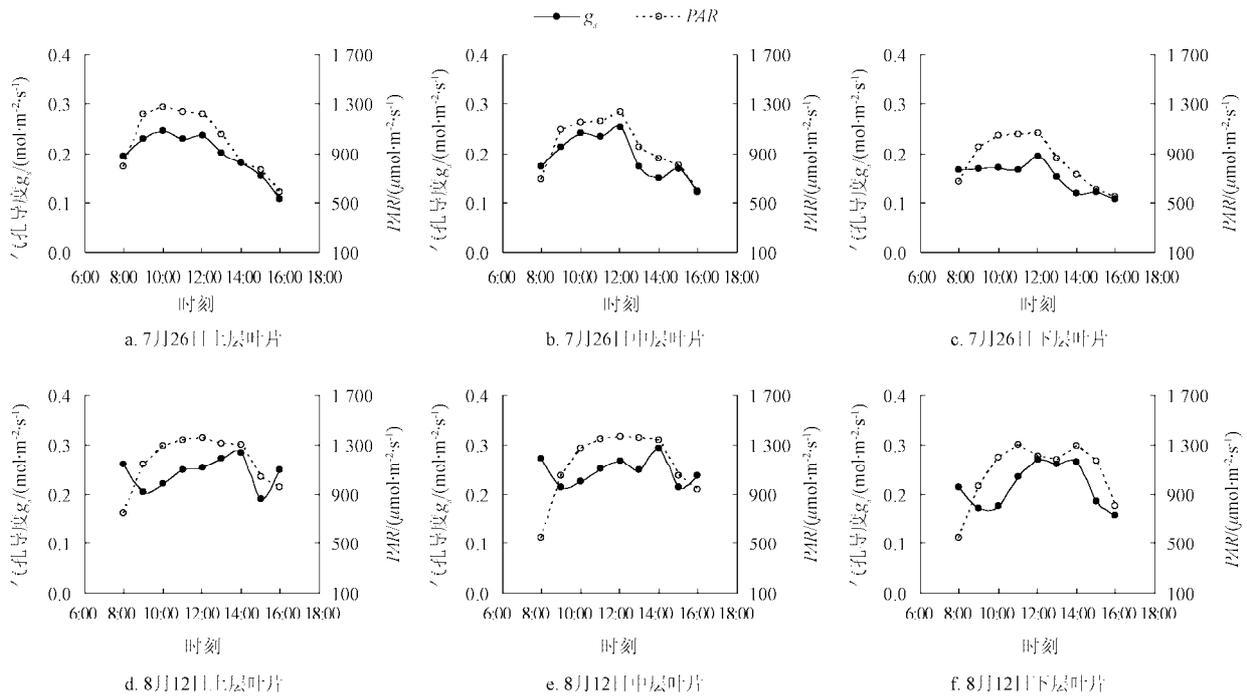


图1 2009年夏玉米生长期典型日不同叶序的叶片气孔导度 g_s 与光合有效辐射 PAR 的日变化趋势

Fig.1 Diurnal trend of leaf stomatal conductance (g_s) and photosynthetically active radiation (PAR) for corn at different canopy layers on July 26 and August 12, 2009.

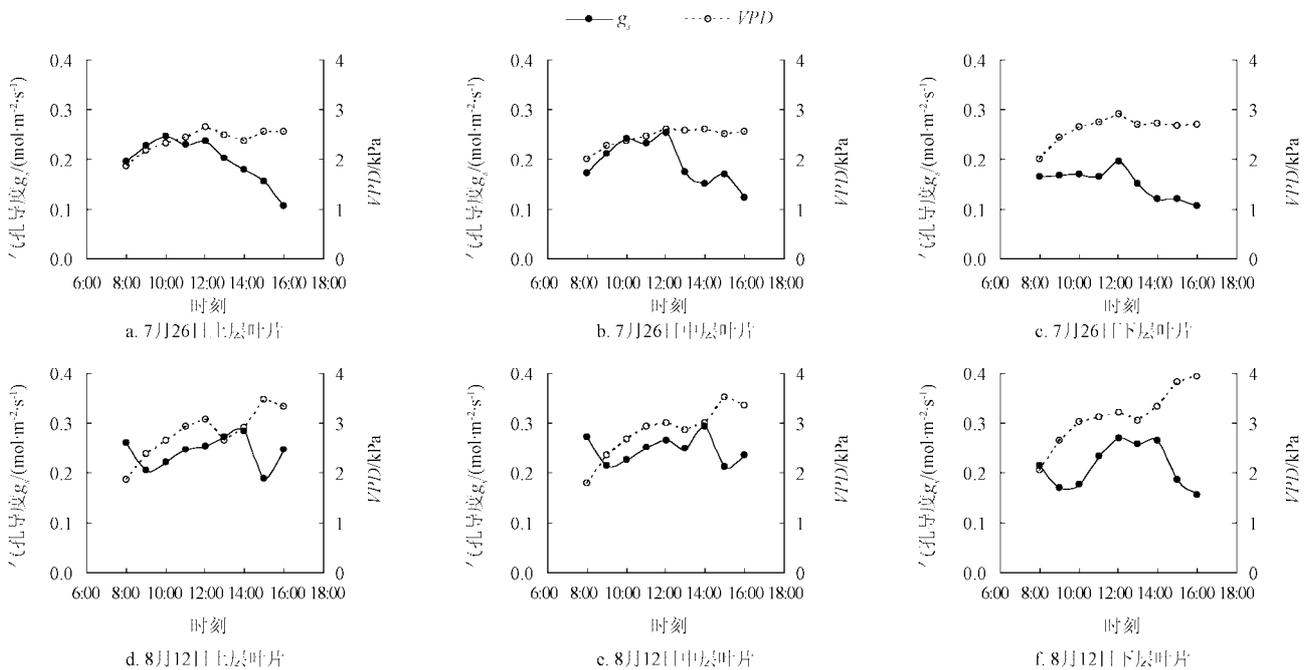


图2 2009年夏玉米生长期典型日不同叶序的叶片气孔导度 g_s 与饱和水汽压差 VPD 的日变化趋势

Fig.2 Diurnal trend of stomatal conductance (g_s) and the water vapor deficit (VPD) for corn at different canopy layers on July 26 and August 12, 2009.

2.1.2 叶片气孔导度估算模型

基于光合有效辐射 PAR 和饱和水汽压差 VPD 构建的夏玉米叶片气孔导度 g_s 估算模型如下^[5,7,11]

$$g_s = g_s(PAR_a) f(VPD) = \frac{PAR_a}{PAR_a + \alpha_1} f(VPD) \quad (6)$$

式中, PAR_a 为叶片截获的光合有效辐射, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; α_1 为经验系数; VPD 为饱和水汽压差, kPa ; $f(VPD)$ 为饱和水汽压差对叶片气孔导度的影响函数^[22], 其形式如下 $f(VPD) = e^{-\alpha_2 \cdot VPD}$, 其中 α_2 为经验系数。

光合有效辐射 PAR 在冠层内的衰减趋势可由下式表

示^[29]

$$PAR = PAR_h \cdot e^{-K\xi} \quad (7)$$

式中, PAR 和 PAR_h 分别为冠层内某一高度处和冠层顶处的光合有效辐射, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; ξ 为冠层某一高度到冠层顶的叶面积指数; K 为消光系数。

则式 (6) 中叶片截获的光合有效辐射 PAR_a 由下式计算

$$PAR_a = -dPAR/d\xi = PAR_h \cdot e^{-K\xi} \cdot K = K \cdot PAR \quad (8)$$

应用 2009 年夏玉米生育期同步监测的光合有效辐射、饱和水汽压差以及叶片气孔导度对式 (6) 各经验系数进行率定, 其结果为: $\alpha_1=1480.36$, $\alpha_2=0.2688$, 相关系数 $R=0.704$ (显著性检验: $F=157.07$, $P<0.0001$, 样本数 $n=162$)。则构建的夏玉米叶片气孔导度估算模型为

$$g_s = \frac{PAR_a}{PAR_a + 1480.36} \cdot e^{-0.2688VPD} \quad (9)$$

2.1.3 叶片气孔导度估算模型验证

利用 2008 年夏玉米生育期实测的数据对建立的叶片气孔导度估算模型进行验证。从图 3 和表 1 给出的结果可以看出, 模型估算的叶片气孔导度与实测值间较为一致, 二者间相关方程的斜率为 1.051, 决定系数 $R^2=0.545$, 一致性指数 $d_1=0.636$, 均方根误差 $RMSE=0.059 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均绝对误差 $MAE=0.026 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 这表明该估算模型可较好反映本地区夏玉米叶片气孔导度对环境因子的响应。图 3 显示的结果也表明, g_s 模拟值的变化相对较为平缓, 未能完全反映出叶片气孔导度对环境因子的响应过程, 这或许是由于在建立的叶片气孔导度模型中只考虑了辐射和饱和水汽压差两个环境因子所致。此外, 叶片气孔导度模型的构建与验证没有充分考虑叶位和叶龄等作物本身的影响, 也在一定程度上导致了估算误差。

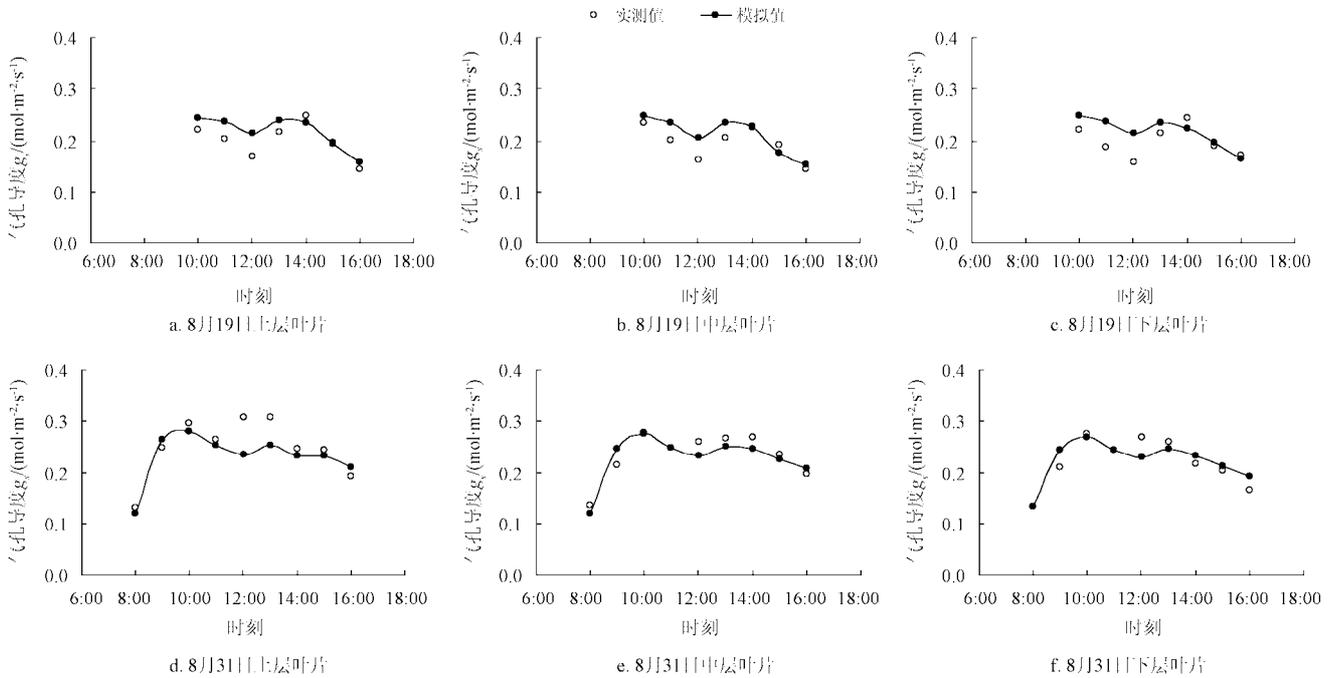


图 3 2008 年夏玉米生长期典型日不同叶序的叶片气孔导度模拟值与实测值的日变化趋势对比

Fig.3 Diurnal trend of estimated and measured g_s for corn at different canopy layers on August 19 and August 31, 2008.

表 1 2008 年夏玉米生长期叶片气孔导度模拟值与实测值的统计分析
Table 1 Correlation between the estimated and measured g_s for corn in 2008

相关方程	R^2	d_1	$RMSE/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$MAE/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\overline{O_s}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\overline{P_s}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
$g_{sP}=1.051g_{sO}$	0.545	0.636	0.059	0.026	0.217	0.223

注: g_{sO} 为利用光合仪实测的叶片气孔导度; g_{sP} 为模拟的叶片气孔导度; $\overline{O_s}$ 为光合仪实测值的平均值; $\overline{P_s}$ 为模拟值的平均值; 样本数 $n=129$ 。

2.2 冠层导度估算模拟

2.2.1 冠层导度估算模型

以 PAR 作为尺度转换因子, 在假定下垫面均匀分布且忽略土壤蒸发影响以及冠层内 VPD 变化状况下, 对式 (6) 进行积分, 获得冠层导度 g_c 估算模型如下

$$g_c = \int g_s(PAR_a) f(VPD) dPAR_a = \int_0^{LAI} f(VPD) g_s(\xi) d\xi \quad (10)$$

将式 (7) - (9) 代入式 (10), 则冠层导度 g_c 估算模型为

$$g_c = \frac{\exp(-0.2688VPD)}{K} \cdot \ln \left(\frac{KPAR_h + 1480.36}{KPAR_h \exp(-K \cdot LAI) + 1480.36} \right) \quad (11)$$

2.2.2 冠层导度估算模型验证

利用 2008-2009 年夏玉米生育期实测的数据对构建

的冠层导度估算模型进行验证。图 4 显示的结果表明冠层导度模拟值与实测值间的日变化趋势基本一致，二者间相关方程的斜率为 0.95，决定系数 $R^2=0.513$ ，一致性指数 $d_1=0.588$ ，均方根误差 $RMSE=2.29 \text{ mm}\cdot\text{s}$ ，平均绝对误差 $MAE=1.43 \text{ mm}\cdot\text{s}$ (图 4 和表 2)，这表明该估算模型

较为适合当地特定条件下应用。但是，模拟值与实测值间也存在一定误差，特别是当冠层导度 g_c 较大时，这或许是由于利用 P-M 方程反推冠层导度的过程中含有来自地表阻力的影响，而采用尺度提升方法模拟的冠层导度中却并未考虑土壤蒸发所致。

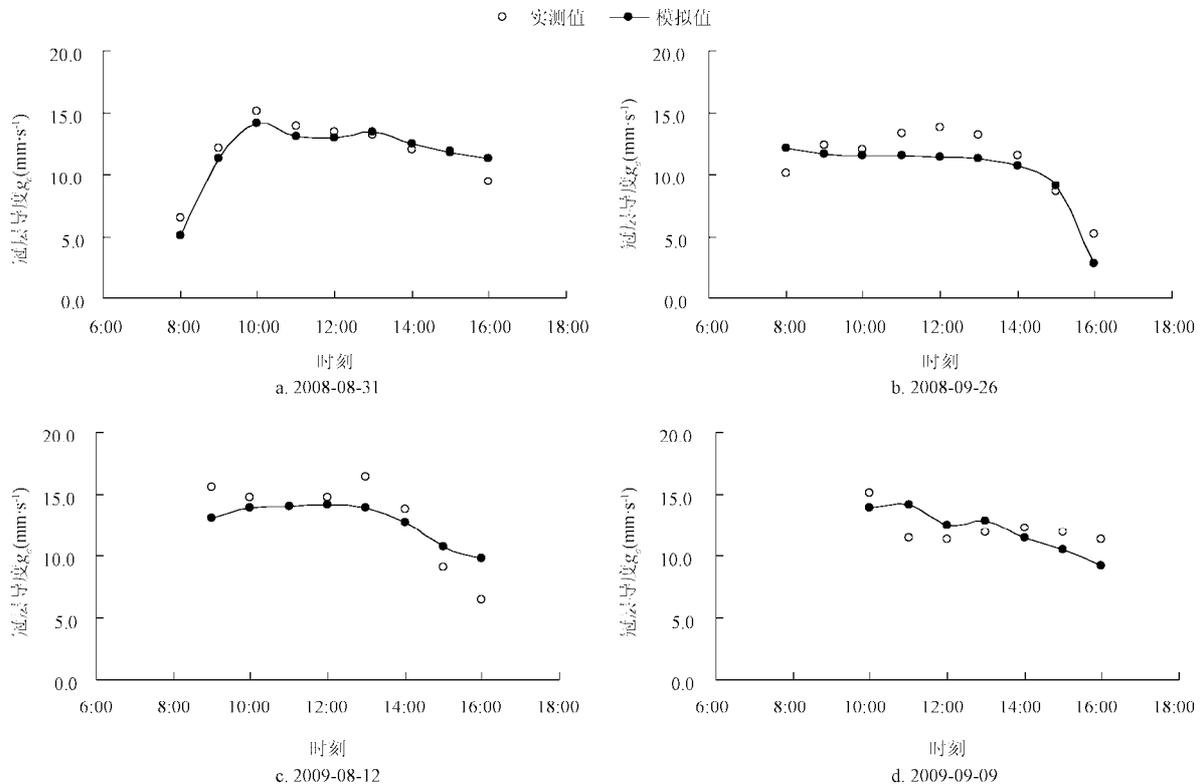


图 4 2008—2009 年夏玉米生长期典型日的冠层导度模拟值与实测值的日变化趋势对比

Fig.4 Diurnal trend of estimated and measured g_c for corn on 2008-08-31, 2008-09-26, 2009-08-12 and 2009-09-09

表 2 2008—2009 年夏玉米生长期冠层导度模拟值与实测值的统计分析

Table 2 Correlation between the estimated canopy conductance and measured canopy conductance for corn in 2008—2009

相关方程	R^2	d_1	$RMSE/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$MAE/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\overline{O_c}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\overline{P_c}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
$g_{cP}=0.95g_{cO}$	0.513	0.588	2.29	1.43	11.73	11.28

注： g_{cO} 为利用 P-M 方程反推的冠层导度； g_{cP} 为基于叶片气孔导度尺度转换提升的冠层导度； $\overline{O_c}$ 为利用 P-M 方程反推的冠层导度平均值； $\overline{P_c}$ 为利用叶片气孔导度尺度转换提升的冠层导度平均值。

3 结论

1) 辐射和饱和水汽压差是决定当地夏玉米叶片气孔导度的关键因子。夏玉米叶片气孔导度每日在 10:00—14:00 之间达到峰值，其日变化趋势与光合有效辐射的一致性较好，较大的饱和水汽压差对夏玉米叶片气孔导度具有一定的限制作用。

2) 依据光合有效辐射和饱和水汽压差建立的叶片气孔导度估算模型模拟值与田间实测值之间的误差较小，该估算模型能够较好地反映本地区夏玉米叶片气孔导度对主要环境因子的响应过程。

3) 在当地气候、气象、土壤等特定条件下，光合有效辐射是实现夏玉米叶片气孔导度向冠层导度尺度转换提升的关键因子，基于光合有效辐射和饱和水汽压差构建的冠层导度估算模型可较好实现从叶片气孔导度向冠层导度的尺度转换提升。

[参 考 文 献]

- 王笑影, 李丽光, 谢艳兵, 等. 植被-大气相互作用中的气孔导度及其尺度转换[J]. 生态学杂志, 2008, 27(3): 454—459.
Wang Xiaoying, Li Liguang, Xie yanbing, et al. Stomatal conductance and its scaling in vegetation-atmosphere interaction: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(3): 454—459.
- Kelliher F M, Leuning R, Raupach M R, et al. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 73(1/2): 1—16.
- Irmak S, Mutiibwa D, Irmak A, et al. On the scaling up leaf stomatal resistance to canopy resistance using photosynthetic photon flux density[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(6/7): 1034—1044.
- Maruyama A, Kuwagata T. Diurnal and seasonal variation in

- bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6/7): 1161–1173.
- [5] 王玉辉, 周广胜, 何兴元. 羊草叶片气孔导度特征及数值模拟[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 517–521.
Wang Yuhui, Zhou Guangsheng, He Xingyuan. Characteristics and quantitative simulation of stomatal conductance of *aneurolepidium chinense*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4): 517–521.
- [6] Alonso R, Bermejo V, Sanz J, et al. Stomatal conductance of semi-natural Mediterranean grasslands: Implications for the development of ozone critical levels[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 146(3): 692–698.
- [7] 唐凤德, 武耀祥, 韩士杰, 等. 长白山阔叶红松林叶片气孔导度与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5649–5655.
Tang Fengde, Wu Yaoxiang, Han Shijie, et al. Relationship of stomatal conductance of leaf with environmental factors in broadleaved Korean pine forest at Changbai Mountain[J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5649–5655.
- [8] Infante J M, Rambal S, Joffre R. Modelling transpiration in holm-oak savannah: scaling up from the leaf to the tree scale[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(4): 273–289.
- [9] Johnson T B, Auge R M, Green C D, et al. Correlations of stomatal conductance with hydraulic, chemical and environmental variables in five urban tree species[J]. *Scientia Horticulturae*, 2001, 90(3/4): 305–320.
- [10] Mielke M S, Oliva M A, de Barros N F, et al. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation[J]. *Trees-Structure and Function*, 1999, 13(3): 152–160.
- [11] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 1976, 273(927): 593–610.
- [12] Yu G R, Nakayama K, Matsuoka N, et al. A combination model for estimating stomatal conductance of maize (*Zea mays* L.) leaves over a long term[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92(1): 9–28.
- [13] Matsumoto K, Ohta T, Tanaka T. Dependence of stomatal conductance on leaf chlorophyll concentration and meteorological variables[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(1/2): 44–57.
- [14] Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model[J]. *Agricultural water management*, 2004, 65(3): 173–191.
- [15] Ball J T. An Analysis of Stomatal Conductance[D]. Stanford: Stanford University, 1988.
- [16] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] Furon A C, Warland J S, Wagner-Riddle C. Analysis of scaling-up resistances from leaf to canopy using numerical simulations[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(6): 1483.
- [18] Magnani F, Leonardi S, Tognetti R, et al. Modelling the surface conductance of a broad-leaf canopy: effects of partial decoupling from the atmosphere[J]. *Plant Cell and Environment*, 1998, 21(8): 867–879.
- [19] Raupach M R. Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy and regional scales[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 73(3/4): 151–179.
- [20] Shuttleworth W J, Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116(492): 497–519.
- [21] Choudhury B J, Monteith J L. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces[J]. *Royal Meteorological Society, Quarterly Journal*, 1988, 114(480): 373–398.
- [22] Magnani F, Leonardi S, Tognetti R, et al. Modelling the surface conductance of a broad-leaf canopy: effects of partial decoupling from the atmosphere[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21(8): 867–879.
- [23] 黄辉, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 华北平原冬小麦冠层导度的环境响应及模拟[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5209–5221.
Huang Hui, Yu Guirui, Sun Xiaomin, et al. The environmental responses and simulation of canopy conductance in a winter wheat field of North China Plain[J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5209–5221.
- [24] Perrier A. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. Evaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles[J]. *Annales Agronomiques*, 1975, 26(1): 1–18.
- [25] 祁红彦, 周广胜, 许振柱. 北方玉米冠层光合有效辐射垂直分布及影响因子分析[J]. *气象与环境学报*, 2008, 24(1): 22–26.
Qi Hongyan, Zhou Guangsheng, Xu zhenzhu. Vertical distribution characteristics of photosynthetically active radiation in maize canopy and its controlling factors[J]. *Journal of Meteorology and Environment*. 2008, 24(1): 22–26.
- [26] Whitehead D. Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies[J]. *Tree Physiology*, 1998, 18(8): 633–644.
- [27] Wright I R, Manzi A O, Da Rocha H R. Surface conductance of Amazonian pasture: model application and calibration for canopy climate[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 75(1/3): 51–70.
- [28] Monsi M, Saeki T. über den lichtfaktor in den pflanzen-gesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion[J]. *Japanese Journal of Botany*, 1953, 14: 22–52.

Estimation of summer corn canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance

Zhang Baozhong, Liu Yu, Xu Di, Cai Jiabing, Zhao nana

(National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Simulation of leaf stomatal conductance (g_s) and scaling it up to canopy conductance (g_c) were very important for understanding the corn evapotranspiration scaling transformation. Measurements of leaf stomatal conductance (g_s) and canopy conductance (g_c) were made at a summer corn field. The effect of the photosynthetically active radiation (PAR) and the water vapor deficit (VPD) on g_s were analyzed, and the variation of g_s was simulated and a model of scaling up g_s to g_c was developed. Results indicated that g_s showed typical diurnal pattern with peaks occurred around 10:00-14:00. The g_s increased with the increase of PAR , but decreased with the increase of VPD . And the diurnal variation of g_s could be better expressed by the developed g_s model using PAR and VPD . The scaling model was developed by integrating to achieve scaling up from g_s to g_c .

Key words: photosynthesis, radiation, models, water vapor deficit, leaf stomatal conductance, canopy conductance, corn