

# 基于叶片气孔导度提升的冬小麦冠层阻抗估算模型的应用和对比

魏征<sup>①②</sup>, 刘钰<sup>①\*</sup>, 许迪<sup>①</sup>, 蔡甲冰<sup>①②</sup>, 张宝忠<sup>①②</sup>

① 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

② 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048

\* 联系人, E-mail: liuyu@iwahr.com

2012-11-19 收稿, 2013-03-28 接受

国家重点基础研究发展计划(2006CB403405)、水利部“948”项目(201009)和国家自然科学基金(91125017, 51109225, 51009151, 50909099)资助

**摘要** 为了筛选适合华北典型地区冠层阻抗基于叶片气孔导度的提升方法, 依据两个生长季的冬小麦田间试验资料, 以 Leuning-Ball 和 Jarvis 叶片气孔导度模型为基础, 构建了冠层阻抗估算模型, 对比了不同冠层阻抗估算模型的应用效果. 结果表明: 冬小麦叶片气孔阻抗日变化整体高于冠层阻抗, 两者具有显著的尺度差异性; Leuning-Ball 气孔导度模型能够更好地解释气孔导度对环境因子的响应; 以光合有效辐射作为尺度转换因子, 基于 Leuning-Ball 气孔导度模型提升的冠层阻抗估算模型能够有效地模拟冠层阻抗, 可应用于华北典型地区冬小麦水汽传输阻抗尺度提升研究.

## 关键词

模型  
辐射  
叶片气孔导度  
冠层阻抗  
尺度提升  
冬小麦

蒸散是植物群体与外界环境物质、能量交换的一个重要组成部分, 其准确估算对于理解水碳耦合、物质能量循环具有重要的意义. 蒸散的模型有单层模型<sup>[1]</sup>、双层模型<sup>[2]</sup>和多层模型<sup>[3]</sup>等, 这些模型均是通过不同的阻抗来描述土壤蒸发和植株蒸腾. 尽管冠层阻抗( $r_c$ )已经用于计算参考作物蒸发蒸腾量和实际作物蒸发蒸腾量中, 但是目前没有不同作物在不同生育阶段冠层阻抗( $r_c$ )的推荐值<sup>[4]</sup>, 冠层阻抗( $r_c$ )在不同环境下的可用性决定蒸散的精度. 因此, 可靠的冠层阻抗( $r_c$ )估算成为一个非常重要的研究课题, 其中基于叶片气孔导度向冠层阻抗提升的估算模型则是该研究中的热点.

基于叶片气孔导度向冠层阻抗(或冠层导度)提升的研究中, 一是在采用气孔计、光合仪等设备直接测定作物不同叶位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<sup>[5,6]</sup>统计分析获取; 二是利用非线性模型实现叶片气孔导度向冠层阻抗转换的尺度提升, 其中一些方法把叶片尺度到冠层阻抗的提升模型视为不同的气象、土壤以及作物生长特性的函数<sup>[7-9]</sup>, 如 Jarvis 叶片气孔导度模型在冠层阻抗( $r_c$ )估算中的应用, 但是 Jarvis 模型多是基于短时期的观测资料, 讨论冠层阻抗(导度)对叶温、饱和差、光合有效光量子密度、叶水势响应函数, 及多变量函数乘合的冠层阻抗(导度)模型的最优化方法<sup>[10]</sup>, 和长时间尺度条件下, Jarvis 模型的应用性和适用性<sup>[11]</sup>. 另一些方法则是从环境和能量平衡的角度推出尺度提升模型<sup>[12,13]</sup>, 如通过测定感热和潜热通量或利用辐射平衡和其他相关变量由 Penman-Monteith 公式或梯度原理重新计算得到冠层阻抗<sup>[14]</sup>.

现有研究多集中在以 Jarvis 气孔导度(气孔阻抗)模型为基础, 考虑冠层光合有效辐射分布<sup>[5,15]</sup>、阴阳叶<sup>[5,16,17]</sup>以及叶面积<sup>[18,19]</sup>等实现冠层阻抗的尺度提升,

**引用格式:** 魏征, 刘钰, 许迪, 等. 基于叶片气孔导度提升的冬小麦冠层阻抗估算模型的应用和对比. 科学通报, 2013, 58: 1775-1783

**英文版见:** Wei Z, Liu Y, Xu D, et al. Application and comparison of winter wheat canopy resistance estimation models based on the scaling-up of leaf stomatal conductance. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-5858-3

或以 Leuning-Ball 气孔导度(气孔阻抗)模型为基础, 建立叶片尺度或冠层尺度单一尺度光合-蒸腾-气孔导度耦合模型<sup>[20-22]</sup>, 而建立叶片尺度 Leuning-Ball 气孔导度提升的冠层阻抗估算模型研究较少. 本文以华北典型地区冬小麦为例, 率定 Leuning-Ball 和 Jarvis 气孔导度模型的参数, 以光合有效辐射作为尺度转换因子, 构建 Leuning-Ball 和 Jarvis 的冠层阻抗提升模型, 对比和验证两种尺度提升模型的应用效果, 筛选适合华北典型地区的冠层阻抗基于叶片气孔导度的提升方法.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

华北地区为我国的主要粮食产区之一, 典型试验区中国水利水电科学研究院大兴节水灌溉试验研究基地(北纬 39°37', 东经 116°26')主要是冬小麦-夏玉米轮作制度种植. 田间观测试验于2007~2008年和2008~2009年冬小麦主要生长季进行. 试验区为半干旱大陆性季风气候, 年平均气温为 12.1℃, 全年大于 10℃ 的有效积温为 4730℃, 无霜期平均为 185 d, 全年日照时数约为 2600 h. 0~100 cm 深度为砂壤土, 平均田间持水率和土壤容重分别为 30.58% 和 1.58 g cm<sup>-3</sup>.

### 1.2 试验观测

(i) 蒸散量  $ET$ . 采用涡度相关仪(美国 Campbell Scientific 公司)测定, 其计算公式为

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

式中,  $ET$  为蒸散量, mm s<sup>-1</sup>;  $\lambda$  为水的汽化潜热, J kg<sup>-1</sup>;  $\rho_a$  为空气密度, kg m<sup>-3</sup>;  $w'$  为垂直风速脉动量, m s<sup>-1</sup>;  $q'$  为水汽密度脉动值, g m<sup>-3</sup>.

本研究采用的涡度相关仪观测冬小麦生长季的温度、湿度、三维风速的脉动值以及土壤热通量. 仪器田间安装高度为 3.1 m, 采样频率是 10 Hz, 统计平均时间是 30 min, CO<sub>2</sub> 通量和潜热通量实时进行 WPL(空气密度脉动)修正, 显热通量进行超声虚温(湿度影响)修正<sup>[23]</sup>. 利用当地冬小麦田间观测数据, 对使用的涡度相关仪进行了能量闭合校核, 能量闭合度达到 80%, 表明该设备工作性能良好<sup>[24]</sup>. 在涡度相关仪数据处理过程中, 依据以下原则对异常数据进行剔除: ① 降水日观测数据; 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; ④

冬小麦灌水日的数据. 此外, 通过计算日内波文比修正潜热通量来消除能量不闭合引起的误差<sup>[25]</sup>.

(ii) 叶片气孔导度、净光合速率. 在涡度相关仪观测范围内, 随机选取均匀分布的 6 株典型冬小麦作为代表植株, 采用 Li-6400 光合作用测定系统(LI-COR, USA), 在冬小麦生长旺盛季节, 选择晴朗无云天气每 5 天测定叶片气孔导度( $g_s$ )、净光合速率( $P_n$ )、光合有效辐射(PAR<sub>a</sub>)、温度和湿度, 选择大小均匀且受光方向一致的 3~4 片旗叶从 8:00~16:00 每 2 小时测定 1 次, 数据稳定后开始记录, 并分别取均值作为该时刻冬小麦叶片  $g_s$ ,  $P_n$  和相关环境因子的测定结果.

(iii) 株高和叶面积指数. 选取 10 株有代表性的植株, 每 15 天测定其株高( $h_c$ )和叶面积指数(LAI). 作物株高用钢卷尺测量, 叶面积用长×宽×修正系数的方法计算, 根据种植密度得到整体叶面积指数, 修正系数取值为 0.78.

(iv) 消光系数. 采用 SunScan 冠层分析系统(Dynamax, Inc., USA)测定消光系数, 在冬小麦生长旺盛期, 每 15 天测定 1 次, 于 10:00~12:00 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.

## 2 数学模型

以光合有效辐射作为尺度转换因子, 以 Leuning-Ball 气孔导度模型为基础, 联立光响应修正模型, 光合有效辐射观测衰减模型, 实现冠层阻抗的估算, 同时建立以 Jarvis 气孔导度为基础的冠层阻抗估算模型.

### 2.1 叶片气孔导度估算模型

(i) Leuning-Ball 气孔导度模型. 由于相对湿度和低 CO<sub>2</sub> 浓度对 Ball 气孔导度模型的限制问题, Leuning 对 Ball 模型进行修正, 建立 Leuning-Ball 气孔导度模型:

$$g_s = m \frac{P_n}{(C_s - \Gamma)(1 + VPD_s/VPD_0)} + g_{s0}, \quad (2)$$

式中,  $g_s$  是气孔导度, mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>;  $P_n$  是净光合速率, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>;  $\Gamma$  是 CO<sub>2</sub> 补偿点, μmol mol<sup>-1</sup>;  $C_s$  为叶表面 CO<sub>2</sub> 浓度, μmol mol<sup>-1</sup>; VPD<sub>s</sub> 是叶面的水汽压差, kPa;  $m$  和 VPD<sub>0</sub> 为经验常数,  $g_{s0}$  是在光补偿点处的  $g_s$  值, 相关计算公式见文献[26].

(ii) Jarvis 气孔导度模型. Jarvis 认为气孔导度是多个环境因子综合作用的产物, 可通过气孔导度对单一环境因子反应叠加得到多个环境因子同时变化时对叶片气孔导度的综合影响, Yu 等人<sup>[27]</sup>认为对于短时期而言, 选择双因子 Jarvis 模型, 其精度已经满足要求. 因此, 参考张宝忠等人<sup>[28]</sup>建立的双因子 Jarvis 模型, 基于光合有效辐射  $PAR_a$  和饱和水汽压差 VPD 构建冬小麦叶片气孔导度  $g_s$  估算模型:

$$g_s = g_s(PAR_a) f(VPD) = \frac{PAR_a}{PAR_a + \alpha} \exp(-\beta \cdot VPD), \quad (3)$$

式中,  $PAR_a$  为叶面截获的光合有效辐射,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; VPD 是饱和水汽压差, kPa;  $\alpha, \beta$  为经验系数.

## 2.2 光响应修正模型

考虑直角双曲线模型以及非直角双曲线模型光响应模型无法较好地描述光抑制现象及给出的光饱和点小于实测值, Ye 等人<sup>[29]</sup>提出了光响应修正模型:

$$P_n = a \times \frac{1 - c \times PAR_a}{1 + b \times PAR_a} \times PAR_a - R_d, \quad (4)$$

式中,  $R_d$  为暗呼吸速率,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $a, b$  和  $c$  为修正系数, 其余变量含义同上.

## 2.3 光合有效辐射冠层衰减模型

光在作物冠层衰减规律服从 Beer-Lambert 定律, 因此, 叶片截获的光合有效辐射  $PAR_a$  由式(5), (6)计算:

$$PAR = PAR_h \exp(-K\xi), \quad (5)$$

$$PAR_a = -dPAR/d\xi = K \cdot PAR_h \cdot \exp(-K\xi), \quad (6)$$

式中,  $PAR, PAR_h$  为冠层某一高度以及冠层顶部的光合有效辐射,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $\xi$  为冠层某一高度到冠层顶的叶面积指数;  $K$  为消光系数.

## 2.4 冠层阻抗估算模型

以光合有效辐射作为尺度转换因子<sup>[5,30]</sup>, 假定下垫面均匀分布且忽略土壤蒸发影响、冠层内水汽压变化以及  $\text{CO}_2$  浓度变化状况下<sup>[31,32]</sup>, 对式(3)进行积分, 获得基于冬小麦叶片气孔导度提升的冠层阻抗( $r_c$ )的估算模型:

$$1/r_c = \int g_s d\xi = \int_0^{LAI} g_s d\xi. \quad (7)$$

将式(2), (4)和(6)代入式(7), 则 Leuning-Ball 尺度提

升模型为

$$1/r_c = (g_{sw} - R_d) \times LAI + \frac{m \times a \times (k \times c \times PAR_h - 1)}{K \times b \times (C_s - \Gamma)(1 + VPD_s/VPD_0)} \times \ln(1 + K \times b \times PAR_h \times \exp(-K \times LAI) / 1 + K \times b \times PAR_h). \quad (8)$$

将式(3)和(6)代入式(7), 则 Jarvis 尺度提升模型为

$$1/r_c = \frac{\exp(-\beta \times VPD)}{K} \times \ln\left(\frac{K \times PAR_h + \alpha}{K \times PAR_h \times \exp(-K \times LAI) + \beta}\right). \quad (9)$$

## 2.5 冠层阻抗

冠层阻抗( $r_c$ )通过 Penman-Monteith 模型推算:

$$r_c = \frac{r_a(\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p VPD/r_a - \lambda ET(\Delta + \gamma))}{\gamma \lambda ET}, \quad (10)$$

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z-d}{h_c-d}\right) \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)}{k^2 u_z}. \quad (11)$$

零平面位移高度( $d$ )和下垫面粗糙长度( $z_0$ )随作物高度( $h_c$ )的改变而变化, 其表达式为<sup>[33]</sup>

$$d = 0.63h_c, \quad (12)$$

$$z_0 = 0.13h_c, \quad (13)$$

式中,  $r_a$  为空气动力学阻抗,  $\text{s m}^{-1}$ ;  $r_c$  为冠层阻抗,  $\text{s m}^{-1}$ ;  $R_n$  为净辐射,  $\text{W m}^{-2}$ ;  $G$  为土壤热通量,  $\text{W m}^{-2}$ ;  $\gamma$  为湿度计常数,  $\text{kPa}^{-1}$ ;  $\Delta$  为饱和水汽压-温度曲线的斜率,  $\text{kPa}^{-1}$ ;  $C_p$  为空气的定压比热,  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $k$  为 Karman 常数, 取值为 0.41;  $z$  为参考高度, 取值为 2 m;  $u_z$  为参考高度处的风速,  $\text{m s}^{-1}$ ;  $h_c$  为冠层高度, m; 其余变量含义同上.

## 2.6 模型评价指标

模型模拟效果主要采用确定系数( $R^2$ ), 均方根误差(RMSE), 平均绝对误差(AAE), 平均相对误差(ARE)以及模型有效性指数(EF)进行模型评价, 其计算公式详见参考文献[34].

## 3 结果与讨论

### 3.1 叶片气孔阻力和冠层阻抗日变化的差异性

冬小麦叶片气孔阻力( $r_L$ )和冠层阻抗( $r_c$ )的日变

化过程如图1所示, 2007~2008年和2008~2009年冬小麦叶片气孔阻力( $r_L$ )和冠层阻抗( $r_c$ )的日变化过程在不同的生育阶段(叶龄)以及不同的气象条件下呈现较一致的变化, 两个生长季冬小麦叶片气孔阻力( $r_L$ )高于冠层阻抗( $r_c$ ), 增幅分别为0.85%~487.46%和-24.54%~223.26%。采用非参数检验的Friedman(F)检验类型对冬小麦叶片气孔阻力和冠层阻抗的日变化进行差异性分析(图1), 两个生长季的冬小麦典型日叶片气孔阻力和冠层阻抗在 $\alpha=0.05$ 水平上显著差异的组数为4组。因此, 叶片以及冠层尺度水汽传输阻力存在显著的尺度差异, 叶片尺度的 $r_L$ 不能代替冠层尺度 $r_c$ , 需要进行尺度转换研究。

2008年5月20日14时叶片气孔阻力值较大(图1(b)), 该时刻测量重复值分别为378.76, 458.22以及1134.38  $s\ m^{-1}$ , 同期风速分别是0.45, 0.43和0.13  $m\ s^{-1}$ 。徐惠风等人<sup>[35]</sup>认为气孔阻力与风速呈显著负相关关系, 因此风速的降低致使14时气孔阻力均值变大。同时刻冠层阻抗与其余时刻的数值差别较小, 冠层阻抗的计算是基于涡度相关仪30 min统计平均时间进行反推。表明从叶片尺度到冠层尺度空间尺度转换的同时, 带来响应的的时间尺度转换问题, 导致时空尺度转换的同时进行<sup>[36]</sup>。

### 3.2 叶片气孔导度模型的率定与验证

(i) 叶片气孔导度模型的率定. 利用2007~2008年冬小麦生育期实测的数据( $n=990$ )对Leuning-Ball和Jarvis叶片气孔导度模型进行参数率定, 得到Leuning-Ball模型参数 $m=15.293$ ,  $VPD_0=0.657\ kPa$ 和 $g_{s0}=0.123$ , Jarvis模型参数 $\alpha=265.668$ 和 $\beta=0.4$ 。由叶片气孔导度模拟值与实测值回归关系(图2)和不同气孔导度模型评价统计指标(表1)可知, Leuning-Ball模型和Jarvis模型实测值和模拟值间相关方程的斜率分别为0.95和0.93, 确定系数( $R^2$ )为0.65和0.47, 均方根误差(RMSE)为0.08和0.09  $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ , 平均绝对误差(AAE)为0.06和0.07  $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ , 模型有效性指数(EF)为0.71和0.61。因此, Leuning-Ball模型和Jarvis模型能够有效模拟冬小麦叶片气孔导度对环境因子的响应。

(ii) 叶片气孔导度估算模型的验证. 利用2008~2009年冬小麦生育期实测的数据( $n=1440$ )对Leuning-Ball和Jarvis叶片气孔导度估算模型进行验证, 由叶片气孔导度验证值与实测值回归关系(图3)和不同气孔导度模型评价统计指标(表1)可知, Leuning-Ball模型和Jarvis模型实测值和模拟值间相关方程的斜率分别为1.06和0.84, 确定系数( $R^2$ )为0.67和0.18, 均方

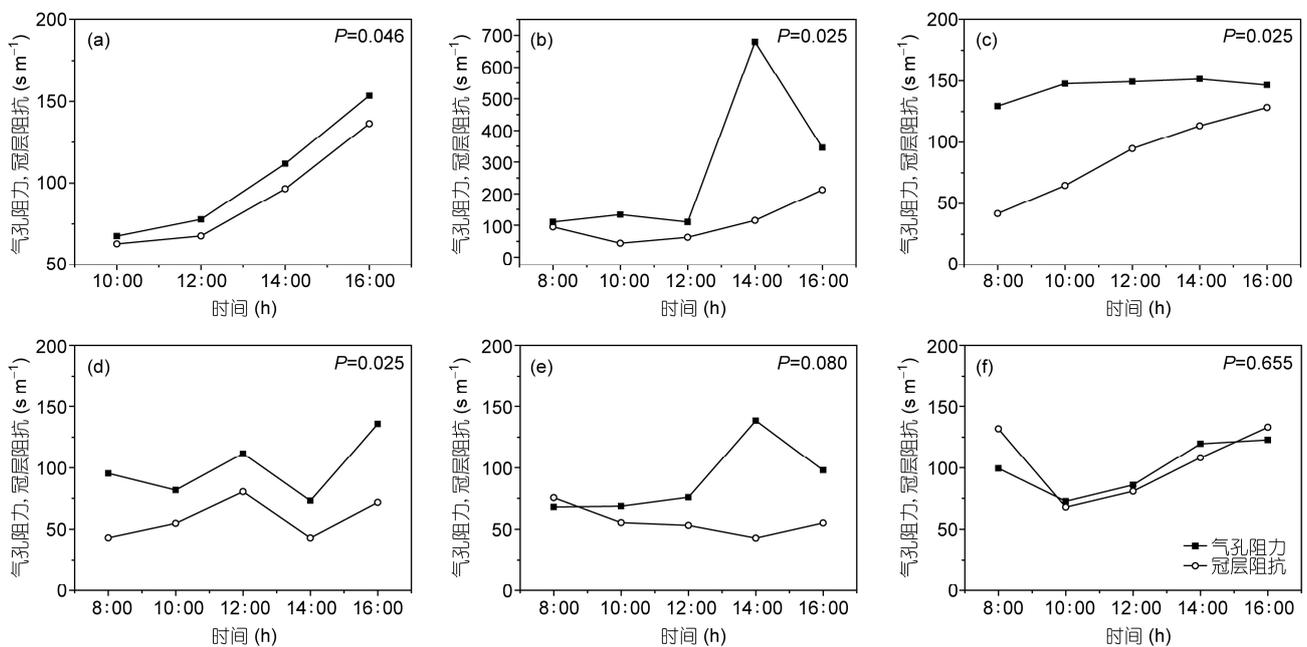


图1 典型日冬小麦叶片气孔阻力和冠层阻抗日变化曲线

(a) 2008-05-05; (b) 2008-05-20; (c) 2008-06-11; (d) 2009-05-02; (e) 2009-05-08; (f) 2009-05-30

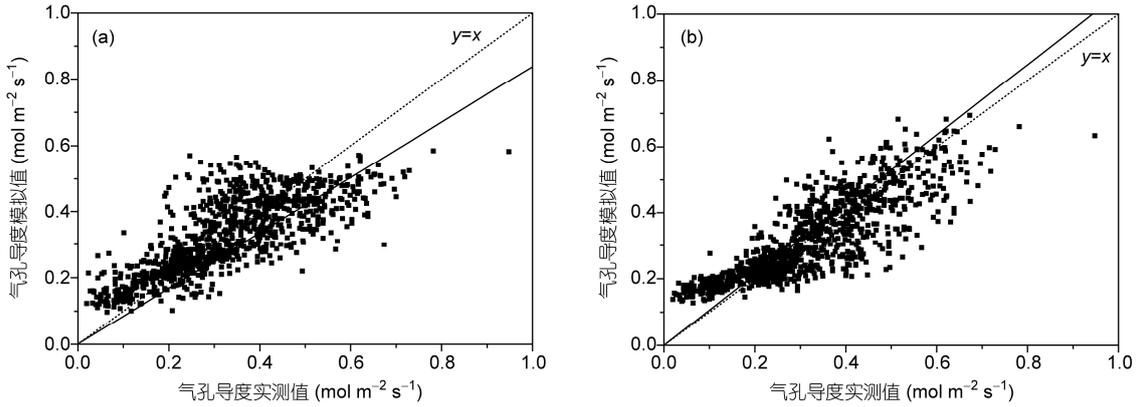


图2 2007~2008年冬小麦生长期叶片气孔导度实测值与模拟值关系图  
(a) Jarvis 气孔导度估算模型; (b) Leuning-Ball 气孔导度估算模型

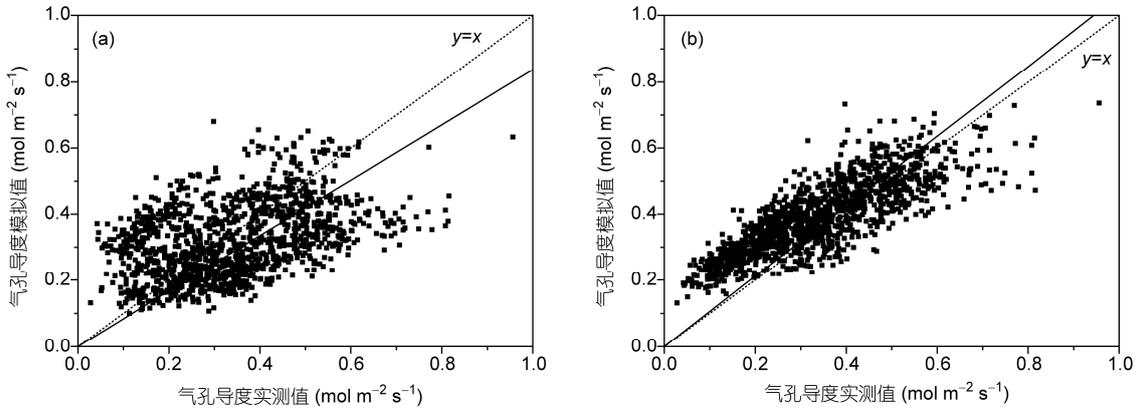


图3 2008~2009年冬小麦生长期叶片气孔导度实测值与模拟值关系图  
(a) Jarvis 气孔导度估算模型; (b) Leuning-Ball 气孔导度估算模型

表1 两个冬小麦生长季叶片气孔导度模拟值与实测值的统计分析

		<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	RMSE (mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	AAE (mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	ARE(%)	<i>EF</i>
2007~2008年	Leuning-Ball 模型	0.95	0.65	0.08	0.06	2.03	0.71
	Jarvis 模型	0.93	0.47	0.09	0.07	3.46	0.61
2008~2009年	Leuning-Ball 模型	1.06	0.67	0.10	0.09	1.53	0.55
	Jarvis 模型	0.84	0.18	0.15	0.12	2.69	0.07

根误差(RMSE)为 0.10 和 0.15 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 平均绝对误差(AAE)为 0.09 和 0.12 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 模型有效性指数(*EF*)为 0.55 和 0.07. Leuning-Ball 模型能够较 Jarvis 模型更好地解释华北地区冬小麦叶片气孔导度对环境因子的响应变化, Jarvis 双因子(光合有效辐射和饱和水汽压)模型不能反映 2008~2009 年冬小麦叶片气孔导度的变化特点, 其模型参数具有一定的年际限

制, 这点与 Yu 等人<sup>[37]</sup>研究认为 2 变量模型的估算精度可满足短时间尺度要求, 而对于长时间尺度, 3~4 变量模型的估算精度较低类似.

### 3.3 冠层阻抗估算模型验证

结合不同时期冬小麦消光系数和叶面积指数(表 2), 构建的 Leuning-Ball 和 Jarvis 尺度提升模型, 利

表2 不同时期冬小麦消光系数和叶面积指数

日期	消光系数	叶面积指数
2008-05-05	0.69	5.01
2008-05-20	0.83	6.21
2008-06-11	0.78	4.83
2009-05-02	0.56	4.68
2009-05-08	0.69	5.73
2009-05-30	0.58	5.12

用2007~2008年和2008~2009年冬小麦生育期冠层阻抗实测值对模型进行验证,由冬小麦生长期典型时刻冠层阻抗实测值与模拟值变化过程(图4)可知,基于Leuning-Ball气孔导度模型构建的冠层阻抗估算模型的模拟值与实测值的日变化趋势基本一致。由不同冠层阻抗估算模型评价统计指标(表3)可知,模拟值与实测值的相关方程的斜率分别为1.01和1.12,确定系数为0.77和0.46,均方根误差为23.37和31.73  $s\ m^{-1}$ ,平均绝对误差为17.84和23.38  $s\ m^{-1}$ ,相对误差为19.67%和32.10%,这表明基于Leuning-Ball气孔导度模型构建的冠层阻抗估算模型(简称Leuning-Ball尺度提升模型)较为适合当地的应用,但在 $r_c$ 实测值较大时,两者的误差增加,这也说明以Leuning-Ball气孔导度模型为基础,以PAR作为尺度转换因子的尺度提升模型只能阐述麦田冠层内水汽传输阻力,未考虑土壤水分、土壤蒸发的影响,而Penman-Monteith方程反推 $r_c$ 值的过程中包含地表阻力的影响。因此,Leuning-Ball气孔导度模型应耦合土壤水分因子,考虑水分胁迫对叶片气孔导度的影响,如Egea等人<sup>[38]</sup>在式(2)方程右边第一项引入水分胁迫因子 $\beta'$ ,改进了净光合速率-气孔导度耦合模型。

基于Jarvis气孔导度模型构建的冠层阻抗估算模型(简称Jarvis尺度提升模型)的模拟值与实测值的变化趋势基本一致,但差别显著,两者间相关方程的斜率为0.62和1.76,确定系数为0.63和0.34,均方根误差为67.38和97.41  $s\ m^{-1}$ ,平均绝对误差为49.33和64.92  $s\ m^{-1}$ 、平均相对误差为50.69%和76.14%。表明

基于Jarvis气孔导度模型构建的冠层阻抗估算模型(简称Jarvis尺度提升模型)的模拟值与实测值的变化趋势基本一致,但差别显著,两者间相关方程的斜率为0.62和1.76,确定系数为0.63和0.34,均方根误差为67.38和97.41  $s\ m^{-1}$ ,平均绝对误差为49.33和64.92  $s\ m^{-1}$ 、平均相对误差为50.69%和76.14%。表明

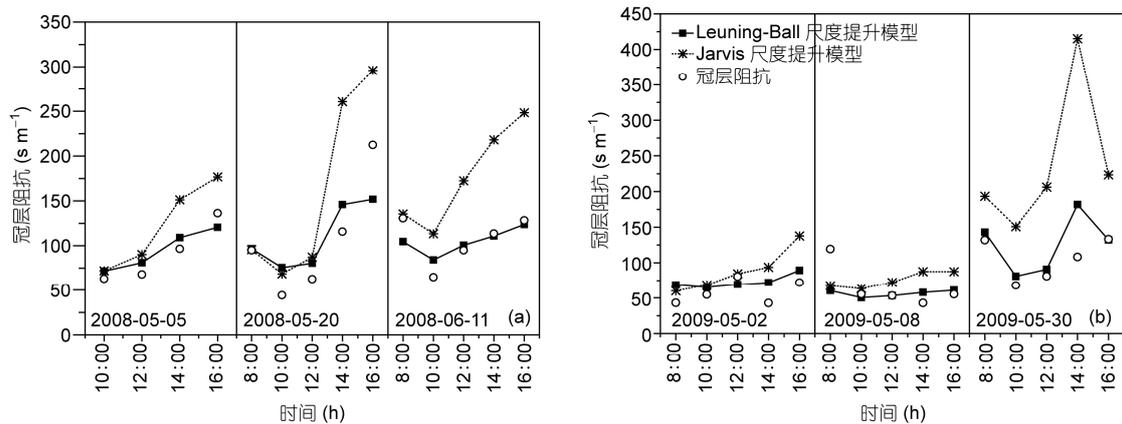


图4 两个生长季冬小麦典型时刻冠层阻抗实测值与模拟值变化过程 (a) 2007~2008年; (b) 2008~2009年

表3 两个冬小麦生长季冠层阻抗模拟值与实测值的统计分析<sup>a)</sup>

	相关方程	$R^2$	RMSE ( $s\ m^{-1}$ )	AAE ( $s\ m^{-1}$ )	ARE (%)	EF
2007~2008	Leuning-Ball 尺度提升模型	$r_{co}=1.01r_{cp}$	23.37	17.84	19.67	0.66
	Jarvis 尺度提升模型	$r_{co}=0.62r_{cp}$	67.38	50.69	49.33	0.42
2008~2009	Leuning-Ball 尺度提升模型	$r_{co}=1.12r_{cp}$	31.73	23.38	32.10	0.57
	Jarvis 尺度提升模型	$r_{co}=1.76r_{cp}$	97.41	64.92	76.14	0.22

a)  $r_{co}$ 为利用P-M方程反推的冠层阻抗;  $r_{cp}$ 为基于叶片气孔导度尺度转换提升的冠层阻抗

应用以光合有效辐射(PAR<sub>a</sub>)和饱和水汽压差(VPD)为主要影响因子的 Jarvis 气孔导度模型估算冬小麦冠层阻抗具有一定的困难, 这与 Rochette 等人建立的阴阳叶模型<sup>[5,39,40]</sup>能够有效解释作物冠层导度有一定差别, 原因在于阴阳叶模型区分了自然状态下作物阴阳叶的气孔导度、光合有效辐射以及叶面积指数, 这能够提高冠层导度(阻抗)的模拟精度。

### 3.4 敏感性分析

当 Leuning-Ball 尺度提升模型和 Jarvis 尺度提升模型输入项分别变化±10%时, 冠层阻抗模拟值相对误差(ARE)变化范围如表 4 所示. 对比两个模型可知, Jarvis 模型对辐射以及叶面积指数两输入项的敏感性要高于 Leuning-Ball 模型. 因此, 区分阴阳叶可以更有效地提高 Jarvis 经验模型的精度。

当 Leuning-Ball 尺度提升模型和 Jarvis 尺度提升模型参数分别变化±10%时, 冠层阻抗模拟值相对误差(ARE)变化范围如表 4 所示. 其中以 Leuning-Ball 气孔导度模型参数( $m$  和  $g_{s0}$ ), 光响应修正模型参数( $a$ )以及 CO<sub>2</sub> 补偿点( $\Gamma$ )对 Leuning-Ball 尺度提升模型的影响程度较大, 光响应修正模型参数( $c$  和  $R_d$ )次之; 叶片尺度 Leuning-Ball 模型参数( $m$ , VPD<sub>0</sub> 和  $g_{s0}$ )和 Jarvis 气孔导度模型参数( $\alpha$ 和 $\beta$ )在-10%~10%变化时, 冠层阻抗模拟值相对误差变化范围为-9.06%~8.22%

和-5.84%~6.13%, 因此, Jarvis 模型的参数( $\alpha$ 和 $\beta$ )在冠层尺度上的敏感性较小。

## 4 结论

通过 2007~2008 年和 2008~2009 年两个生长季冬小麦田间试验研究, 揭示了叶片和冠层尺度冬小麦水汽传输阻抗的差异性, 率定了 Leuning-Ball 和 Jarvis 气孔导度模型的参数, 得到了冠层阻抗的 Leuning-Ball 和 Jarvis 尺度提升模型, 验证和对比了两种尺度提升模型的应用效果, 筛选了适合华北典型地区冠层阻抗基于叶片气孔导度的提升方法。

两个生长季的冬小麦叶片气孔阻抗整体高于冠层阻抗, 幅度为 0.85%~487.46%和-24.54%~223.26%, 利用非参数检验的 Friedman 检验类型进行检验, 叶片、冠层尺度水汽传输阻力存在显著的尺度差异;

两个生长季的冬小麦叶片 Leuning-Ball 气孔导度模型具有较 Jarvis 气孔导度模型更好地解释田间冬小麦叶片气孔导度的能力, Jarvis 气孔导度模型对长时期气孔导度的估算精度比较低. 以光合有效辐射作为尺度转换因子, Leuning-Ball 尺度提升模型具有较 Jarvis 尺度提升模型更有效地估算冠层阻抗变化的能力, Jarvis 尺度提升模型参数在冠层尺度上的敏感性较小. 基于 Leuning-Ball 气孔导度尺度提升模型可应用华北典型地区冬小麦水汽传输阻抗尺度提升研究。

表 4 叶片气孔导度提升的冠层阻抗模型输入项和参数敏感性分析

输入项	相对误差(%)		模型参数	相对误差(%)	
	10	-10		10	-10
Leuning-Ball 尺度提升模型	$K$	-2.16~-0.37	$m$	-6.81~-2.35	2.46~7.14
	LAI	-8.59~-5.44	VPD <sub>0</sub>	-4.66~-1.72	1.88~5.40
	VPD <sub>s</sub>	-3.07~4.87	$g_{s0}$	-9.06~-2.62	2.77~8.22
	PAR <sub>h</sub>	-9.61~-1.70	$a$	-7.26~-3.01	3.20~8.49
	$C_s$	3.34~8.82	$b$	0.57~4.73	-4.93~-0.59
			$c$	3.63~7.70	-6.67~-3.38
			$R_d$	-1.84~2.35	-2.09~5.16
		$\Gamma$	-8.0~-0.65	-5.83~1.43	
Jarvis 尺度提升模型	$K$	-14.2~-0.58	$\alpha$	2.97~5.11	-4.10~-2.97
	LAI	-16.51~-5.20	$\beta$	2.67~6.13	-5.84~-2.60
	VPD	-1.25~14.13			
	PAR <sub>h</sub>	-17.57~-0.75			

参考文献

- 1 Rana G, Katerji N, Mastrorilli M, et al. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. *Agr Forest Meteorol*, 1997, 86: 215–224
- 2 Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops—An energy combination theory. *Q J Roy Meteor Soc*, 1985, 111: 839–855
- 3 Brenner A J, Incoll L D. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands. *Agr Forest Meteorol*, 1997, 84: 187–205
- 4 Shuttleworth W J. Towards one-step estimation of crop water requirements. *T Asabe*, 2006, 49: 925–935
- 5 Irmak S, Mutiibwa D, Irmak A, et al. On the scaling up leaf stomatal resistance to canopy resistance using photosynthetic photon flux density. *Agr Forest Meteorol*, 2008, 148: 1034–1044
- 6 Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model. *Agr Water Manage*, 2004, 65: 173–191
- 7 Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under mediterranean climate: A review. *Eur J Agron*, 2000, 13: 125–153
- 8 Anadranistakis M, Liakatas A, Kerkides P, et al. Crop water requirements model tested for crops grown in Greece. *Agr Water Manage*, 2000, 45: 297–316
- 9 Furon A, Warland J S, Wagner-Riddle C. Analysis of scaling-up resistances from leaf to canopy using numerical simulations. *Agron J*, 2007, 99: 1483–1491
- 10 Avissar R, Pielke R A. The impact of plant stomatal control on mesoscale atmospheric circulations. *Agr Forest Meteorol*, 1991, 54: 353–372
- 11 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. *Agr Forest Meteorol*, 1998, 92: 9–28
- 12 Beven K. A sensitivity analysis of the penman-monteith actual evapotranspiration estimates. *J Hydrol*, 1979, 44: 169–190
- 13 Black T A. Estimation of Areal Evapotranspiration. Budapest: IAHS Press, 1989
- 14 Oltechev A, Ibrom A, Constantin J, et al. Stomatal and surface conductance of a spruce forest: Model simulation and field measurements. *Phys Chem Earth*, 1998, 23: 453–458
- 15 Raupach M R. Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy and regional scales. *Agr Forest Meteorol*, 1995, 73: 151–179
- 16 申双和, 孙照渤, 陈镜明, 等. 北方黑云杉冠内空气 CO<sub>2</sub> 浓度及其上方通量模拟. *气象学报*, 2005, 63: 6–17
- 17 Whitehead D, Okali D, Fasehun F E. Stomatal response to environmental variables in two tropical forest species during the dry season in Nigeria. *J Appl Ecol*, 1981, 18: 571–587
- 18 Zhang B Z, Kang S, Li F, et al. Comparison of three evapotranspiration models to bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest china. *Agr Forest Meteorol*, 2008, 148: 1629–1640
- 19 Zhou M C, Ishidaira H, Takeuchi K. Estimation of potential evapotranspiration over the yellow river basin: Reference crop evaporation or shuttleworth-wallace? *Hydrol Process*, 2007, 21: 1860–1874
- 20 Leuning R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C<sub>3</sub> plants. *Plant Cell Environ*, 1995, 18: 339–355
- 21 于强, 王天铎. 光合作用-蒸腾作用-气孔导度的耦合模型及 C<sub>3</sub> 植物叶片对环境因子的生理响应. *植物学报*, 1998, 40: 740–754
- 22 Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SIB2) for atmospheric gcms. Part I: Model formulation. *J Clim*, 1996, 9: 676–705
- 23 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 85–100
- 24 刘国水. 作物蒸散量测定与计算方法研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学, 2008
- 25 郭家选, 梅旭荣, 卢志光, 等. 测定农田蒸散的涡度相关技术. *中国农业科学*, 2004, 37: 1172–1176
- 26 Yu G R, Zhuang J, Yu Z L. An attempt to establish a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior for maize and soybean plants grown in field. *J Plant Physiol*, 2001, 158: 861–874
- 27 Yu G R, Nakayama K, Lu H Q. Modeling stomatal conductance in maize leaves with environmental variables. *J Agr Meteorol*, 1996, 52: 321–330
- 28 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. *农业工程学报*, 2011, 27: 80–86
- 29 Ye Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in oryza sativa. *Photosynthetica*, 2007, 45: 637–640

- 30 Meidner H, Mansfield T A. *Physiology of Stomata*. Maidenhead: McGraw Hill, 1968
- 31 Warland J S, Furon A C, Wagner-Riddle C. Analysis of scaling-up resistances from leaf to canopy using numerical simulations. *Agron J*, 2007, 99: 1483–1491
- 32 Kaufmann M R. Leaf conductance as a function of photosynthetic photon flux density and absolute humidity difference from leaf to air. *Plant Physiol*, 1982, 69: 1018–1022
- 33 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006
- 34 Mccuen R H, Knight Z, Cutter A G. Evaluation of the nash-sutcliffe efficiency index. *J Hydrol Eng*, 2006, 11: 597–602
- 35 徐惠风, 刘兴土, 沙策, 等. 遮荫条件下乌拉苔草叶片气孔阻力与脯氨酸、叶绿素含量的研究. *农业系统科学与综合研究*, 2004, 20: 232–234
- 36 许迪. 灌溉水文学尺度转换问题研究综述. *水利学报*, 2006, 37: 141–149
- 37 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. *Agr Forest Meteorol*, 1998, 92: 9–28
- 38 Egea G, Verhoef A, Vidale P L. Towards an improved and more flexible representation of water stress in coupled photosynthesis-stomatal conductance models. *Agr Forest Meteorol*, 2011, 151: 1370–1384
- 39 Zhang B Z, Liu Y, Xu D, et al. Evapotranspiration estimation based on scaling up from leaf stomatal conductance to canopy conductance. *Agr Forest Meteorol*, 2011, 151: 1086–1095
- 40 Rochette P, Pattey E, Desjardins R L, et al. Estimation of maize (*Zea mays* L.) Canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance. *Agr Forest Meteorol*, 1991, 54: 241–261