

基于根系加权土壤水分有效性的冬小麦水分生产函数

吴 训¹, 许艳奇¹, 石建初¹, 张 婷¹, 王利春², 薛绪掌², 左 强^{1*}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘 要: 为了准确评估作物水分亏缺程度及其敏感性动态对作物产量的影响, 该研究结合基于根系加权土壤水分有效性的植物水分亏缺指数 (Plant Water Deficit Index, PWDI) 与基于归一化热单元指数的 S 型累积水分敏感指数, 建立了 3 种不同形式的作物水分生产函数 (Crop Water Production Function, CWPF), 即 Blank 加法模型 (PWDI-B)、Jensen (PWDI-J) 和 Rao (PWDI-R) 乘法模型。通过 2 a 冬小麦栽培田间蒸渗仪试验 (北京昌平) 和 1 a 冬小麦栽培田间滴灌试验 (山东黄河三角洲), 优化了土壤水分胁迫修正系数中参数, 进而对 PWDI 估算精度及 CWPF 产量估算效果进行检验与评价。结果表明: 蒸渗仪试验基于根系加权估算的 PWDI 与实测值吻合良好, 决定系数 R^2 为 0.78, 标准化均方根误差 (Normalized Root Mean Squared Error, NRMSE) 为 0.16; 滴灌试验 PWDI 均值与作物株高 ($r=-0.95$)、生物量及产量 ($r\leq-0.79$) 均具有较好的相关性, 表明根系加权 PWDI 能较准确地反映不同试验条件下冬小麦的水分亏缺程度及其对作物生长的影响; 此外, 无论是蒸渗仪试验还是滴灌试验, 所建的 3 个 CWPF 对冬小麦产量的估算精度均在可接受范围内 ($R^2\geq 0.78$, $NRMSE\leq 0.11$), 且 PWDI-R 估算精度依次高于 PWDI-J、PWDI-B、以及线性回归模型 (即 PWDI 均值与产量的线性拟合模型)。因此, 根系加权 PWDI 与 S 型水分敏感指数累积函数融合可用于合理构建冬小麦水分生产函数, 其中 PWDI-R 乘法模型可优先推荐用于研究区冬小麦产量估算和灌溉制度优化, 从而为当地冬小麦田间水分管理提供理论依据。

关键词: 土壤水分; 亏缺; 模型; 水分敏感指数; 冬小麦

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.015

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-08-0124-11

吴训, 许艳奇, 石建初, 等. 基于根系加权土壤水分有效性的冬小麦水分生产函数[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 124-134. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.015 http://www.tcsae.org

Wu Xun, Xu Yanqi, Shi Jianchu, et al. Water production function of winter wheat based on root-weighted soil water availability[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 124-134. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.015 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国灌溉水资源短缺日益加剧, 农田水分的高效利用对农业可持续发展的重要性不言而喻。灌溉制度是影响作物水分利用时间分布格局及最终产量的重要因素, 其合理制定是促进农业稳产高产和提高水分利用效率 (Water Use Efficiency, WUE) 的关键举措^[1-2]。在供水量有限的情况下, 追求相对较高的产量和 WUE 是制定灌溉制度的核心目标, 目前主要通过试验和模拟两种途径来获取^[3]。前者直接、可靠且易于操作但过程往往较为费时费力、成本高昂, 通常所获得的结果只能适用于特定的土壤和气候条件; 后者利用模型定量或再现农田水分状况及其调控措施与作物生长及产量之间的关系, 由于经济高效、合理可靠, 已被广泛应用于各类不同条件下灌溉制度的评估和优化^[4-5]。无疑, 其可靠性应主要依赖于作物水分关系的准确评估。

自 20 世纪 50 年代至今, 诸多模型被相继开发用于模

拟不同灌溉调控措施下的作物产量, 包括较为复杂的机理性作物生长模型^[6-8]和相对较为简单的经验性作物水分生产函数 (Crop Water Production Function, CWPF)^[9-10]。相较于作物生长模型, CWPF 通过直接经验性地量化水分产量关系, 可明显简化估产过程。灌水量^[11]、土壤储水量^[9,12]、蒸散^[13-14]或蒸腾^[15-16]等指标常被用于衡量水分有效性对作物产量的影响。其中, 蒸腾属作物生理性耗水过程, 与光合产物 (即产量) 形成的关系更为密切, 因而更适用于评估作物产量^[16]。

根据土壤-植物-大气连续系统 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC) 理论, 植物蒸腾速率可表征为潜在蒸腾速率 (T_p) 与土壤水分胁迫修正系数 (γ) 的乘积, 其中 T_p 多基于气象数据、作物系数和叶面积指数等参数通过彭曼公式^[17-18]计算, γ 则主要采用根区算术平均含水率评估^[19-20]。尽管这种方法在实际生产中已得到广泛应用, 但由于只考虑了根区土壤水数量而忽略了根系与土壤水分相对分布关系的影响, 可能导致蒸腾及产量的评估结果出现较大偏差^[18,21]。利用基于根系分布的根系吸水模型来估算蒸腾^[3,16], 进而根据相对产量与相对蒸腾的关系来构建不同形式的 CWPF, 或许可在一定程度上较为有效地解决上述问题。CWPF 一般包括全生育期模型和生育阶段模型。与全生育期模型相比, 生育阶段模型考虑了作物不同生育期的水分敏感性差异, 可更

收稿日期: 2021-11-22 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1706211, 51790532)

作者简介: 吴训, 博士, 讲师, 研究方向为土壤-作物水分关系与节水灌溉。

Email: wuxun232425@163.com

*通信作者: 左强, 博士, 教授, 研究方向为多孔介质中的质量运移与能量传输。Email: qiangzuo@cau.edu.cn

全面合理地描述水分产量关系^[13-14]。然而, 其在农业生产中的实际应用仍然受到一定的限制:

1) 作为 CWPF 中的重要参数, 水分敏感指数的优化过程需以繁重耗时的田间试验为基础, 参数准确性易受生长阶段时长及其划分数量的影响^[22]; 阶段划分太少(间隔长)不利于捕捉作物水分敏感性动态, 导致阶段内敏感信息缺失; 阶段划分过多(间隔短)则极易导致优化参数不稳定, 甚至会出现超出合理范围的情形。研究表明, 小麦、玉米、棉花、大豆、水稻等作物的水分敏感指数在全生育期内多呈低-高-低的钟形分布^[23-24], 随时间的累积过程大致符合 S 型曲线^[25-26]。通过 S 型水分敏感指数累积函数可以评估获得较小时间步长(如每天)内的水分敏感指数, 从而在一定程度上避免阶段划分随机性所导致的敏感信息缺失或参数不稳定等问题。然而, 以往研究常将累积水分敏感指数表示为物理时间(如种植后天数)的函数, 但由于作物生长周期容易随气候条件变化而变化, 易导致模型参数不稳定, 特别是变化剧烈时问题更加突出, 基于有效积温计算的归一化热单元指数可更为稳定地刻画作物生长物候期^[26], 从而有望较好地解决上述问题。

2) 根长密度分布是根系吸水模型估算蒸腾进而评估作物水分亏缺程度所必需的信息, 但要准确获取绝非易事。然而, 已有大量统计分析结果表明作物相对根长密度分布较为稳定, 基本不依赖环境条件而变化, 可概化为一个具有明确物理意义的函数^[27-28]。为此, Shi 等^[21]借鉴相对根长密度分布函数对土壤水分加权来表征根区土壤水分有效性, 从而改进基于土壤水分状况评估作物水分亏缺程度的方法, 使植物水分亏缺指数(Plant Water Deficit Index, PWDI)的估算更为准确和便捷。该指数已在华北平原冬小麦、内蒙古农牧交错带春玉米和苜蓿以及新疆盐碱地棉花水分胁迫程度诊断及灌溉调控中得到成功应用^[29-31], 应有助于 CWPF 的合理构建。

3) γ 是 PWDI 评估不可或缺的重要变量, 多采用分段线性函数表征^[32-33]。实际上, 植物根系吸水与蒸腾耗水对土壤水分状况的响应规律并不仅仅只由土壤含水率唯一决定, 还会受到植物生理生态过程如抗旱、耐旱和避旱等适应机制的影响^[34-36]。与线性函数相比, 非线性函数包含至少一个以上的形状参数, 在一定程度上反映了这种自适应机制, 往往可以更准确地表征土壤水分胁迫对作物根系吸水或蒸腾的影响^[32-33], 因而具有更强的适用性。

综上, 在 PWDI 评估中综合考虑 γ 的非线性和根系分布对土壤水分有效性的影响, 并与 S 型水分敏感指数累积函数相结合, 可建立新的 CWPF。为了检验该思路在 CWPF 构建和产量评估中的合理性与可靠性, 本文通过在北京市国家精准农业示范基地和山东省黄河三角洲现代农业试验示范基地开展的田间试验, 在优化非线性土壤水分胁迫修正系数 γ 中拟合参数的基础上, 对基于根系加权土壤水分有效性的 PWDI 评估方法进行检验与验证, 进而将 PWDI 与水分敏感指数累积函数结合起来构建 CWPF, 并对之进行参数率定与评估, 以期为当地亏缺灌溉条件下冬小麦田间水分管理与农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 模型描述

1.1.1 目前的作物水分生产函数(CWPF)

目前, 分阶段 CWPF 主要有加法和乘法两种形式, 本文选用 3 种常用模型, 分别为 Blank 加法模型^[37]、Jensen^[13]和 Rao 等^[38]乘法模型, 具体公式如下:

$$Y_a/Y_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i (T_a/T_p)_i \quad (1)$$

$$Y_a/Y_p = \prod_{i=1}^n (T_a/T_p)_i^{\lambda_i} \quad (2)$$

$$Y_a/Y_p = \prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i (1 - T_a/T_p)_i) \quad (3)$$

式中 Y_a 和 Y_p 分别为实际和潜在产量, kg/hm^2 ; i 为生育阶段划分序号, 全生育期共分为 n 个阶段; T_a 和 T_p 分别为平均实际和潜在蒸腾速率, cm/d ; $1 - T_a/T_p = \text{PWDI}$, 即植物水分亏缺指数, 表示作物水分亏缺程度^[21]; λ_i 为第 i 阶段的水分敏感指数。

1.1.2 基于根系加权水分亏缺指数与累积水分敏感指数的 CWPF 构建

在式(1)~式(3)的基础上, 本文结合根系加权法估算的 PWDI 与水分敏感指数累积函数构建相应的 CWPF, 即 PWDI-B 加法模型和 PWDI-J、PWDI-R 乘法模型, 表达式分别如下:

$$Y_a/Y_p = \sum_{t=1}^T \lambda_t (1 - \text{PWDI}_t) \quad (4)$$

$$Y_a/Y_p = \prod_{t=1}^T (1 - \text{PWDI}_t)^{\lambda_t} \quad (5)$$

$$Y_a/Y_p = \prod_{t=1}^T (1 - \lambda_t \text{PWDI}_t) \quad (6)$$

式中 t 为时间, d ; T 为种植至成熟的天数, d ; PWDI_t 为第 t 天的 PWDI; λ_t 为第 t 天的水分敏感指数, 通过 S 型水分敏感指数累积函数 C_t 计算。

1) PWDI 估算

基于根系加权土壤水分有效性评估 PWDI 可描述为^[21,29]

$$\text{PWDI} = 1 - \frac{T_a}{T_p} = 1 - \int_0^1 \gamma(h) L_{\text{nd}}(z_r) dz_r \quad (7)$$

式中 h 为土壤水基质势, cm ; z_r 为相对深度, $z_r = z/L_r$, z 为土层深度, cm ; L_r 为最大扎根深度, cm 。蒸渗仪试验冬小麦 L_r 基于土壤质地和土壤含水率等数据通过 Asseng 根系生长模型模拟^[29,39], 滴灌试验则通过根钻取样实测获得; L_{nd} 为相对根长密度分布; $\gamma(h)$ 为土壤水分胁迫修正系数, 本文选用一种较为常用的非线性函数如下^[40]:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h_H < h \leq 0 \\ 1 & h_L < h \leq h_H \\ 1 - \left(\frac{h - h_L}{h_W - h_L} \right)^\rho & h_W < h \leq h_L \\ 0 & h \leq h_W \end{cases} \quad (8)$$

式中 h_H 、 h_L 和 h_W 分别为适宜作物生长的土壤水基质势上限、下限和萎蔫系数, 取值为 -50 、 -400 和 $-15\ 000\ \text{cm}^{[41]}$ 。 ρ 为拟合参数, 取值范围为 $0 < \rho < 10$ 。当 $0 < \rho < 1$ 时, $\gamma(h)$ 为凹函数; 当 $\rho = 1$ 时, $\gamma(h)$ 为线性函数; 当 $1 < \rho < 10$ 时, $\gamma(h)$ 为凸函数。

相对根长密度分布 L_{rd} 可用如下归一化函数予以描述^[27]:

$$L_{\text{rd}}(z_r) = p(1 - z_r)^{p-1} \quad (9)$$

式中 p 为地表的相对根长密度。对于冬小麦, $p = 3.85$ ^[27]。

2) 水分敏感指数累积函数

基于生长度日 (Growing Degree Days, GDD) 计算的归一化热单元指数 (H_t , 介于 $0 \sim 1$ 之间) 可较为稳定地刻画作物生长周期^[26]。因此, 本文将累积水分敏感指数 C_t 描述为 H_t 的函数如下^[25]:

$$C_t = \frac{m}{1 + k(1/H_t - 1)^b} \quad (10)$$

式中 k 、 b 和 m 为拟合参数。由式 (10) 可知, 当 $H_t \rightarrow 0$ 时, $C_t \rightarrow 0$, 表示种植时水分亏缺对产量几乎没有影响; 当 $0 < H_t < 1$ 时, C_t 随 H_t 增加呈先缓慢增加, 再迅速增加, 最后趋于平稳的变化趋势, 呈 S 形; 当 $H_t \rightarrow 1$ 时, $C_t \rightarrow m$, 此时 C_t 几乎不再改变, 表示成熟或生育期结束时水分亏缺对产量的影响已十分微弱。 H_t 通过式 (11) 计算:

$$H_t = \frac{\sum_{j=1}^t \text{GDD}_j}{H_m} \quad (11)$$

$$\text{GDD} = \begin{cases} T_u - T_b & T_{\text{ave}} > T_u \\ T_{\text{ave}} - T_b & T_b \leq T_{\text{ave}} \leq T_u \\ 0 & T_{\text{ave}} < T_b \end{cases} \quad (12)$$

式中 j 为从播种至 t 时刻的天序数; H_m 为种植至成熟所需有效积温, 根据田间实测结果, 蒸渗仪和滴灌试验冬小麦的 H_m 分别设定为 $1\ 750$ 和 $2\ 250\ ^\circ\text{C}$; T_{ave} 为日均温度, $^\circ\text{C}$; T_u 为适宜作物生长的温度阈值, $^\circ\text{C}$; T_b 为作物生长所需的基础温度, $^\circ\text{C}$ 。 T_u 和 T_b 根据已有研究分别取为 $30\ ^\circ\text{C}$ 和 0 ^[42]。

通过式 (11), 逐日水分敏感指数 λ_t 可计算为

$$\lambda_t = C_t - C_{t-1} \quad (13)$$

由于累积水分敏感指数 C_t 随时间呈“前段缓慢-中段提速-后段趋缓”的 S 型递增趋势, 因此对应的日水分敏感指数 λ_t 表现为“低-高-低”的分布趋势。

由式 (4)~式 (6) 可知, 构建 CWPF 的关键在于确定 PWDI 和 λ_t 。本文先基于实测的日蒸腾量 (蒸渗仪试验) 或阶段蒸腾量 (滴灌试验) 等数据通过非线性最小二乘法优化土壤水分胁迫修正系数 γ (式 (8)) 中的拟合参数 (ρ), 从而完成对各处理 PWDI 动态的评估和验证; 在此基础上, 基于经验证的 PWDI 估算值和实测的冬小麦产量等数据, 同样采用非线性优化方法确定 S 型累积函数 (式 (10)) 中的 3 个未知拟合参数 (k 、 b 、 m), 从而完成 λ_t 的评估以及 CWPF 的构建和评价。

需要指出的是, 式 (1)~式 (3) 所示原 CWPF 中的 λ_t 多按生育阶段主观划分, 是需要拟合的参数, 经改进为日水分敏感指数 λ_t 后, 已成为 CWPF 的状态变量, 主要依赖如式 (10) 所示的归一化热单元指数 H_t 及 3 个拟合参数 k 、 b 和 m 而变化。

1.2 冬小麦栽培田间蒸渗仪试验

1.2.1 试验条件与处理

冬小麦田间蒸渗仪试验于 2014—2015 和 2015—2016 年 (共两个生长季) 在北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地 ($40^\circ 10' 31''\text{N}$, $116^\circ 26' 10''\text{E}$, 海拔 $50.1\ \text{m}$) 进行。该基地位于华北平原北部, 属暖温带大陆性季风气候, 年均降水量 $500 \sim 600\ \text{mm}$, 主要集中在 6—9 月。冬小麦生长季内 (每年 10 月一次年 6 月) 的降水量只能满足其水分需求的 $25\% \sim 40\%$ ^[43], 灌溉是必不可少的田间水分调控措施。冬小麦 (品种: 农大 212) 分别于 2014 年 9 月 29 日和 2015 年 9 月 29 日点播于 14 个规格相同的称重式蒸渗仪 (长 $1\ \text{m}$ 、宽 $0.75\ \text{m}$ 、深 $2.3\ \text{m}$, 量测精度 $0.05\ \text{mm}$) 中, 种植密度为 $6.67 \times 10^6\ \text{株}/\text{hm}^2$ 。播种前各蒸渗仪灌溉充足的底墒水, 以维持冬小麦苗期的正常生长。蒸渗仪内填装原状土壤取自周边农田, 各层土壤的物理性质见表 1。其他相关试验信息可参阅 Wu 等^[29]的描述。

表 1 田间试验供试土壤的物理性质

Table 1 Soil physical properties in the field experiments

田间试验 Field experiments	深度 Depth/cm	颗粒组成 Particle composition/%			容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 Saturated water content /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	残余含水率 Residual water content /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水量 Field water capacity /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity /($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	拟合参数 Fitting parameter ^[44]	
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay						a/cm^{-1}	n
蒸渗仪试验 Lysimetric experiment	0~30	49.44	45.04	5.52	1.43	0.495	0.029	0.316	5.13	0.014	1.315
	>30~80	34.82	44.20	20.98	1.40	0.541	0.068	0.394	1.86	0.013	1.245
	>80~230	31.92	49.90	18.18	1.56	0.548	0.060	0.410	0.12	0.020	1.177
滴灌试验 Drip irrigation experiment	0~30	39.08	33.84	27.08	1.48	0.490	0.050	0.247	5.98	0.011	1.486
	>30~70	36.10	53.28	10.62	1.49	0.530	0.043	0.218	6.27	0.017	1.675
	>70~120	27.08	64.25	8.67	1.47	0.530	0.045	0.300	4.69	0.022	1.354

为了获得充足的试验数据来构建冬小麦 CWPF, 本研究使用的数据涉及了前期基于不同研究目的而设置的一系列灌溉处理, 主要包括两个子试验, 第一个子试验主要用于分析基于两种不同方法 (包括基于根区算术平

均土壤水基质势的传统方法和基于根系加权平均土壤水基质势的加权方法^[29]) 估算获得的 PWDI 进行控制灌溉所产生的效果, 包括第一季的 T1~T2 处理和第二季的 T7~T9 处理, 其中 T1 和 T7 分别自抽穗期 (播种后 203 d)

和起身期 (191 d) 开始每 1~3 d 灌溉一次, 保持水分充分供应, T2、T8、T9 分别采用改进 (PWDI 阈值为 0.46)、传统 (PWDI 阈值为 0.40)、改进 (PWDI 阈值为 0.40) 方法估算的 PWDI 进行指导灌溉。由于两种方法指导灌溉的本质差异在于所导致的灌水时间和灌水定额不同, 因此这里仅列出具体的灌水时间和灌水定额 (表 2), 更多灌溉方法与处理的细节可参见 Wu 等^[29]相关描述; 第二个子试验主要用于分析灌水定额 (依据当地习惯设为 72 mm) 一定时灌水时间和灌水次数对冬小麦产量的影响, 共包括第一季的 T3~T6 处理和第二季的 T10~T13 处理, 具体地, 第一季的处理 T3 分别在越冬期 (播种后 47 d)、拔节期 (197 d) 和扬花期 (217 d) 灌溉; T4 分别在越冬期 (47 d) 和拔节期 (197 d) 灌溉; T5 仅在越冬期 (47 d) 灌溉; T6 全生育期地膜覆盖且不进行灌溉。第二季的处理 T10 分别在越冬期 (47 d)、拔节期 (201 d)、扬花期 (218 d) 和灌浆期 (234 d) 灌溉; T11 分别在越冬期 (47 d)、拔节期 (201 d) 和扬花期 (218 d) 灌溉; T12 仅在越冬期 (47 d) 灌溉; T13 全生育期地膜覆盖且不进行灌溉 (表 2)。冬小麦起身后, 利用透明的滑动式遮雨棚阻隔降雨。其他田间管理措施与当地农田保持一致。所有处理均用来对各 CWPf 进行参数优化, 以便获得一套更稳定适用的参数进而评估不同模型的产量估算效果。

表 2 蒸渗仪试验各处理灌溉时间和灌水量

Table 2 Irrigation time and quota under each treatment in lysimetric experiments mm

DAS/ d	第一季 (2014-2015)						第二季 (2015-2016)						
	First season (2014-2015)						Second season (2015-2016)						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
47	51	51	72	72	72	-	30	30	72	72	72	-	-
188	-	-	-	-	-	-	-	51	51	-	-	-	-
196	-	-	-	-	-	-	-	74	-	-	-	-	-
197	-	-	72	72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
201	-	-	-	-	-	-	-	-	72	72	-	-	-
207	-	-	-	-	-	-	自 191 d	67	-	-	-	-	-
213	-	-	-	-	-	-	开始, 每	-	96	-	-	-	-
215	自 203 d	45	-	-	-	-	1~3 d	-	-	-	-	-	-
217	开始, 每	-	72	-	-	-	灌溉 1	-	-	-	-	-	-
218	1~3 d	-	-	-	-	-	次, 每	-	-	72	72	-	-
222	灌溉 1 次,	-	-	-	-	-	次约	-	-	-	-	-	-
224	每次约	-	-	-	-	-	35 mm,	81	-	-	-	-	-
229	31 mm,	52	-	-	-	-	共 607 mm	-	-	-	-	-	-
233	共 376 mm	-	-	-	-	-	-	-	97	-	-	-	-
234	-	-	-	-	-	-	-	81	72	-	-	-	-
238	-	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注: DAS: 播种后天数。-, 不灌溉。下同。

Note: DAS: days after sowing. -, no irrigation. Same as below.

1.2.2 观测项目与方法

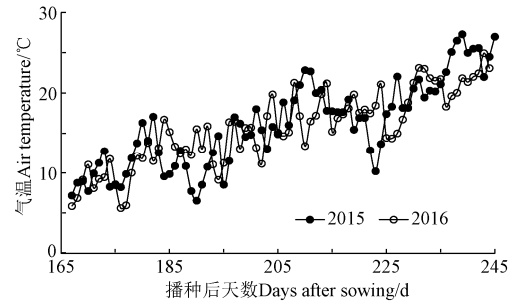
试验期间, 主要观测指标有气象数据、土壤含水率、日蒸腾量及作物生长和产量等, 具体方法描述如下:

气象数据: 太阳辐射、温度、湿度、风速等气象数据采用基地安装的自动气象站 (WeatherHawk 500, Campbell Scientific, USA) 监测。其中每日温度的动态变化如图 1a 所示。

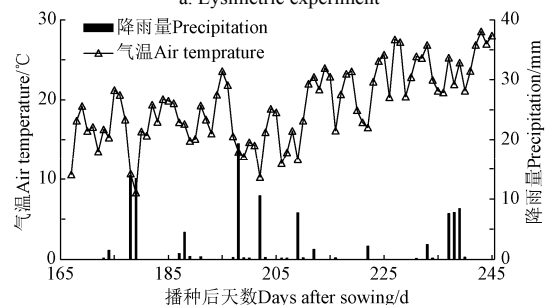
土壤含水率: 自第一个生长季抽穗期 (播种后 197 d) 和第二个生长季起身期 (187 d) 开始, 每天利用土壤水分速测仪 (Diviner 2000, Sentek, Australia) 以 10 cm 为

间隔测定各蒸渗仪 0~150 cm 剖面内的土壤含水率。

日蒸腾量: 通过蒸渗仪自动称重系统获得冬小麦日蒸散量, 然后利用实测的表层土壤含水率、叶面积指数及气象数据根据修正彭曼公式计算日蒸发量^[34], 日蒸腾量等于日蒸散量与日蒸发量之差。



a. 蒸渗仪试验
a. Lysimetric experiment



b. 滴灌试验
b. Drip irrigation experiment

注: 因使用了遮雨棚, 蒸渗仪试验中的降雨可忽略不计。

Note: Precipitation is ignorable in lysimetric experiment as a result of the use of movable rain-shelter.

图 1 不同田间试验冬小麦返青后气温和降雨量的动态

Fig.1 Dynamics of daily air temperature and precipitation from greening of winter wheat in different field experiments

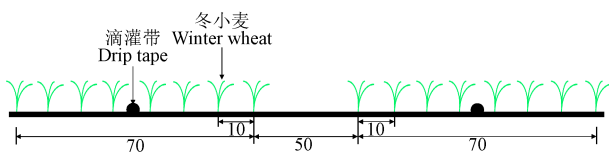
作物生长与产量: 每 5~7 d 从各蒸渗仪中选 5 株小麦, 测量所有绿叶的长和宽, 并根据实测的转化系数 (0.77) 计算每株小麦的叶面积^[29], 进而换算为叶面积指数; 收获时, 将各蒸渗仪中的植株全部割下用于测定小麦籽粒产量。

1.3 冬小麦栽培田间滴灌试验

1.3.1 试验条件与处理

冬小麦栽培田间试验于 2020—2021 年 (一个生长季) 在山东省东营市广饶县山东省农科院黄河三角洲现代农业试验示范基地 (37°19'17"N, 118°38'41"E, 海拔 14.0 m) 进行。黄河三角洲地处山东北部、渤海之滨, 属暖温带半干旱半湿润季风性气候, 全年无霜期 231 d, 年均气温 12.3 °C, 降雨量约 556 mm, 主要分布在 6—9 月, 特殊的地理位置使得黄河三角洲滨海盐碱土分布十分广泛。2021 年 3—6 月冬小麦生长季内, 试验区地下水埋深基本维持在 75 cm 以下, 受播前较强降雨 (2020 年 8—9 月降雨约 400 mm) 的影响, 土壤盐分被大量淋洗至根区以下, 致使根系层平均土壤含盐量仅 1.26 g/kg, 属轻度盐渍土, 表明试验期内土壤盐分对冬小麦水分吸收利用和生长状况的影响较小, 本研究暂不予考虑。试验区各层土壤的物理性质见表 1。为方便水肥一体化自动控制, 选用滴灌方式对冬小麦进行灌溉。2020 年 10 月 7 日, 以宽窄行的

形式播种冬小麦(济南17),其中宽行距50 cm、窄行距10 cm(图2),株距1 cm,种植密度 6.67×10^6 株/hm²。滴灌带铺设于小麦窄行的中心位置,滴头间距30 cm,出流量2.34 L/h。为了了解基于不同PWDI阈值控制灌溉对冬小麦生长和产量的影响,滴灌试验共设置6个灌溉处理:W1、W2、W3、W4、W5、W6,对应PWDI灌溉阈值分别为0.38、0.45、0.48、0.53、0.55和0.56(PWDI的估算需基于 $\gamma(h)$,试验前 $\gamma(h)$ 中的拟合参数 ρ 未知,暂按 $\rho = 1$ 即线性函数设置,试验结束后在优化获取 ρ 值后对PWDI阈值进行校核,因而呈现出不太规则的变化梯度)。各处理3次重复,共18个试验小区(9 m × 6 m),各处理的具体灌溉时间和数量列于表3中。与蒸渗仪试验类似,所有处理均用来优化各CWPFI中的拟合参数。



注:单位:cm。
Note: Unit: cm.

图2 冬小麦田间滴灌试验种植模式

Fig.2 Schematic diagram of drip-irrigated winter wheat planting pattern

表3 2020—2021 滴灌试验各处理灌溉时间和灌水量

DAS/d	W1	W2	W3	W4	W5	W6
188	8	13	-	-	-	-
191	-	-	11	-	15	-
197	-	-	-	20	-	-
198	-	-	11	-	-	-
216	-	-	-	26	-	-
218	-	-	14	-	-	-
221	22	-	-	-	21	-
222	-	17	-	-	-	32
227	-	-	-	16	-	-
228	-	-	10	-	-	-
233	25	17	-	-	-	-
236	-	-	-	-	22	-

1.3.2 观测项目与方法

本试验观测指标及具体方法描述如下:

气象数据:通过试验基地安装的气象站(与前试验同款)自动监测。每日温度和降雨量的动态变化如图1b所示。

土壤含水率:从每个处理中选择一个试验小区,在滴头正下方自地表以下5、10、20、30、50、70、90 cm处理设时域传输(Time Domain Transmission, TDT)水盐传感器(SDI12, Swstek, Canada),实时监测土壤含水率的动态变化。

阶段累积蒸腾量:试验期内不同生育阶段各处理的蒸腾依然通过蒸散减蒸发获得,其中土面蒸发计算方法与上述蒸渗仪试验一致,蒸散采用水均衡方法估算,水均衡方程中涉及到的分项包括降雨(源于气象站观测)、地表径流(未观测到地表产流故忽略不计)、深层渗漏或补给(根据均衡深度上下土层含水率的实测结果采用

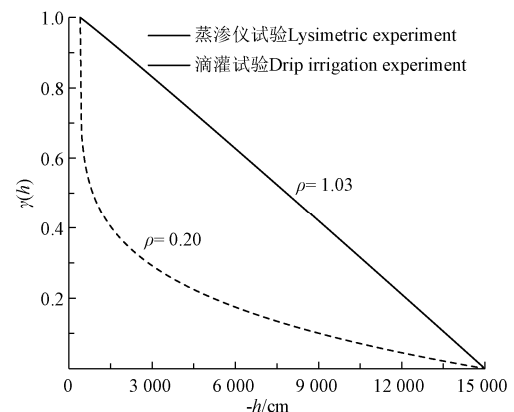
达西定律计算)、土体贮水量变化量(根据实测含水率分布计算)。

作物生长和产量:在苗期、返青期、拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期(分别对应于播种后106、150、181、209、227和241 d),分别从各处理中随机选取5株小麦测量叶片长和宽,用于确定叶面积指数,具体计算方法与田间蒸渗仪试验相同。收获时,从各处理冬小麦植株中随机选取5株用以测定最终株高和地上部生物量;此外,在每个小区中间区域选取4.8 m²矩形区域作为测产样方,刈割测产样方内所有小麦植株,全部脱粒、烘干至恒质量以确定籽粒产量。

2 结果与分析

2.1 土壤水分胁迫修正系数中参数 ρ 的优化

土壤水分胁迫修正系数 $\gamma(h)$ 中参数 ρ 的优化是评估PWDI的基础。根据式(7)可知,冬小麦田间蒸渗仪试验中,优化 ρ 所需要的数据包括土壤水基质势(h)、实际蒸腾速率(T_a)、潜在蒸腾速率(T_p)和相对根长密度(L_{rd})等。 h 可由实测的土壤含水率经水分特征曲线(表1)转化获得, T_a 通过蒸渗仪实测蒸散及彭曼公式计算蒸发获得, T_p 利用叶面积指数对充分灌溉处理(T1和T7)实测的 T_a 进行修正从而考虑不同水分处理作物生长差异而获得^[29], L_{rd} 采用式(9)计算。以估算(式(7))与实测 T_a 间的残差平方和最小为目标,通过非线性最小二乘法寻优可获得参数 $\rho = 1.03$,所对应的 $\gamma(h)$ 已近似线性函数(图3)。基于优化 ρ 估算的 T_a 与实测值的对比结果如图4a所示,二者之间的决定系数(Determination Coefficient, R^2)为0.92,均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)为0.09 cm/d,标准化均方根误差(Normalized Root Mean Squared Error, NRMSE)为0.16,表明基于优化参数获得的 $\gamma(h)$ 较为可靠,可用于准确评估不同亏缺灌溉条件下冬小麦的蒸腾耗水动态。



注: $\gamma(h)$ 为土壤水分胁迫修正系数, ρ 为拟合参数, h 为土壤水基质势,cm。
Note: $\gamma(h)$ is the soil water stress correction coefficient, ρ is the fitting parameter, h is the soil matrix potential, cm.

图3 土壤水分胁迫修正系数 $\gamma(h)$ 曲线

Fig.3 Curves of soil water stress reduction function $\gamma(h)$

冬小麦田间滴灌试验中,为了获得参数 ρ ,从各处理中选取2个时段:192~198和205~213 d,分别通过

水量平衡法和彭曼公式计算蒸散和蒸发，最终获得各阶段内不同处理冬小麦累积蒸腾量 (CT_a , cm) 的实测值。同样以 CT_a 实测值和估算值间的残差平方和最小为目标，优化得 $\rho = 0.20$ ，与之对应的 $\gamma(h)$ 是一个凹函数 (图 3)。相较于线性函数，凹函数 $\gamma(h)$ 随土壤水基质势 h 降低的衰减趋势更加明显，即作物根系吸水和蒸腾耗水更易受土壤水分胁迫的限制。两个试验优化获得的 ρ 值存在较大差异可能是因为供试冬小麦品种、土壤性质以及气候特征等因素均不同所致^[29]。基于优化 ρ 估算的 CT_a 与基于水均衡计算获得的 CT_a 实测值吻合良好 (图 4b)，两者间的 $R^2 = 0.65$ ，RMSE = 0.29 cm，NRMSE = 0.11，均在可接受范围之内，说明滴灌试验条件下优化获得的参数合理可靠，可用于估算不同水分处理 PWDI 的动态变化。

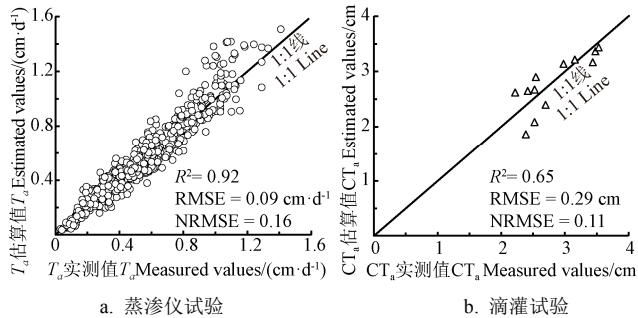


图 4 实际蒸腾速率和阶段累积蒸腾量估算值与实测值对比
Fig.4 Comparisons of measured and estimated actual transpiration rates and cumulative transpiration

2.2 PWDI 的评估与验证

蒸渗仪试验中，基于优化的参数 ρ (1.03)、土壤水基质势 h 、相对根长密度 L_{rd} (式 (9))，利用式 (7) ~ 式 (9) 估算了各亏缺灌溉处理 (包括第一季的 T2~T6 和第二季的 T8~T13) PWDI 的变化动态，其与实测值 (根据各亏缺灌溉处理实测 T_a 以及考虑叶面积差异修正获得的 T_p 进行计算^[18,29]) 变化过程的对比如图 5 所示 (因各处理趋势类似，仅展示了 2015 年 T2、T5 处理和 2016 年 T8、T13 处理的结果)。结果表明，PWDI 估算值均呈现出因灌溉而迅速下降，然后随着土壤水分不断消耗而逐渐上升的变化趋势，且大体都与实测值吻合良好，各处理 PWDI 估算值与实测值之间的 R^2 不低于 0.42，RMSE 不超过 0.12，NRMSE 不超过 0.23 (表 4)；整体上，所有亏缺灌溉处理 PWDI 估算值与实测值之间的 R^2 、RMSE、NRMSE 分别为 0.78、0.10、0.16。

滴灌试验中，基于优化的参数 ρ (0.20)、土壤水基质势 h 、相对根长密度 L_{rd} 估算了各处理 PWDI 的动态变化 (图 6，因各处理趋势类似，仅展示了 W1、W6 处理的结果)。与蒸渗仪试验类似，各处理 PWDI 估算值也表现出明显的起伏变化，即灌溉或降雨后估算值迅速降低，之后随着土壤水分不断消耗而逐渐升高。冬小麦返青至成熟期间，处理 W1~W6 估算 PWDI 的均值分别为 0.39、0.30、0.39、0.45、0.48、0.42，收获时实测的株高分别为 60.9、

63.8、62.5、59.8、58.6、61.0 cm，地上部生物量为 12.5×10^3 、 12.4×10^3 、 11.9×10^3 、 11.1×10^3 、 10.9×10^3 、 10.7×10^3 kg/hm² 产量分别为 5.59×10^3 、 5.58×10^3 、 5.52×10^3 、 4.79×10^3 、 4.79×10^3 、 4.75×10^3 kg/hm²。相关性分析结果显示，PWDI 均值与冬小麦株高 ($r = -0.95$, $P < 0.01$)、地上部生物量 ($r = -0.79$, $P < 0.1$) 和产量 ($r = -0.81$, $P < 0.1$) 之间均存在较明显的负相关关系。

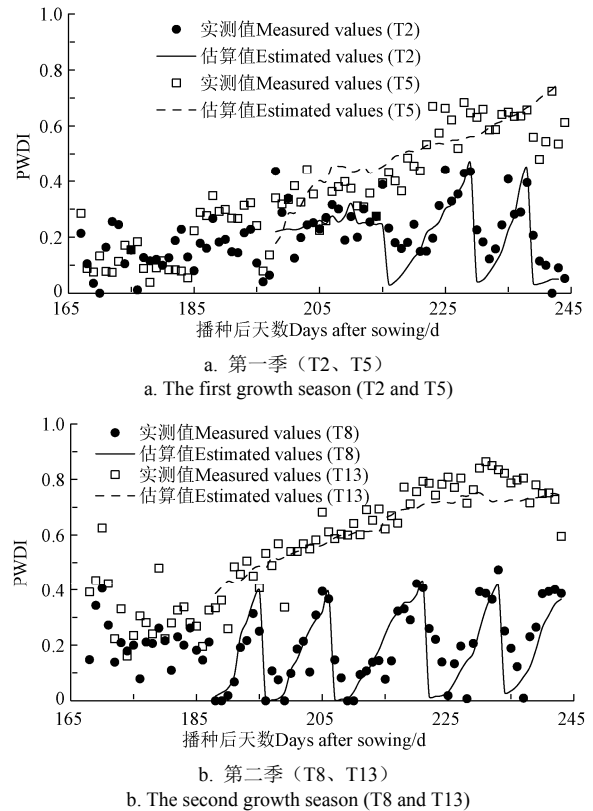


图 5 蒸渗仪试验部分亏缺灌溉处理基于根系加权土壤水分有效性估算的植物水分亏缺指数与实测值的变化
Fig.5 Dynamics of measured and estimated Plant Water Deficit Index (PWDI) based on root-weighted soil water availability under chosen deficit irrigation treatments in lysimetric experiment

表 4 蒸渗仪试验各亏缺灌溉处理基于根系加权土壤水分有效性估算的 PWDI 误差分析

Table 4 Error analysis on estimated PWDI based on root-weighted soil water availability under various deficit irrigation treatments in lysimetric experiment

生长季 Growing seasons	处理 Treatments	决定系数 (R^2) Determination Coefficient	均方根误差 (RMSE) Root Mean Squared Error	标准化均方根误差 (NRMSE) Normalized Root Squared Error
2014—2015	T2	0.52	0.09	0.12
	T3	0.66	0.11	0.12
	T4	0.74	0.09	0.14
	T5	0.55	0.10	0.19
	T6	0.70	0.08	0.14
2015—2016	T8	0.64	0.09	0.11
	T9	0.68	0.10	0.15
	T10	0.58	0.12	0.19
	T11	0.55	0.12	0.21
	T12	0.42	0.10	0.23
	T13	0.82	0.07	0.20

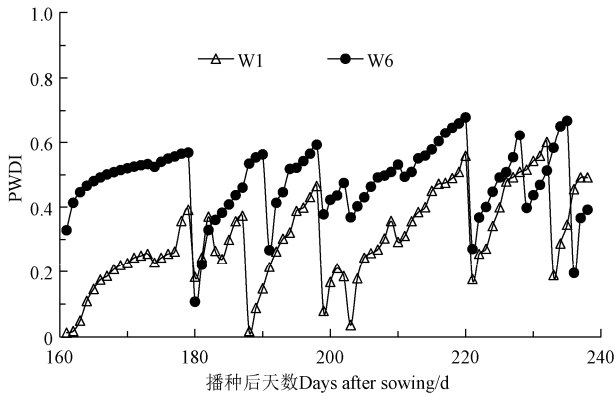


图6 滴灌试验 W1、W6 处理基于根系加权土壤水分有效性(式(7))估算的 PWDI 的变化

Fig.6 Dynamics of estimated PWDI based on root-weighted soil water availability (Eq. (7)) under treatment W1 and W6 in drip irrigation experiment

每个灌溉周期内,根区土壤水分条件会在灌溉后迅速得以改善,之后随蒸散逐步消耗水分而趋于干燥,从而导致基于式(7)估算的 PWDI 表现为先迅速下降至最低然后再缓慢上升的趋势(图5和图6)。作物生长期 PWDI 均值越高意味着所遭受的水分胁迫越重,以致株高、干物质积累量等生长指标及籽粒产量均会降低,与 PWDI 均值呈明显负相关关系。事实上,作物蒸腾耗水不仅与根区土壤水分多少有关,还明显受剖面土壤水分与根系之间相对分布关系的影响^[45]。如式(7)所示,土壤水分与根系分布越一致(根系分布较多处土水势或含水率也高),根系吸水阻力越小、蒸腾作用越强,相应地, PWDI 值越低;否则(根系分布较多处土水势或含水率却偏低)根系吸水越困难,蒸腾速率越低,而 PWDI 则越高^[46-47]。与传统基于根区算术平均土壤含水率(仅代表根区土壤水数量)估算作物水分亏缺程度的方法不同,式(7)通过引入相对根长密度作为权重因子对剖面土壤有效水(γ)进行加权,很好地兼顾了土壤水数量及其与根系的相对空间分布格局对作物水分状态的影响,从而可更合理地表征不同亏缺灌溉条件下冬小麦水分亏缺程度以及水分胁迫对作物生长状态和产量形成的影响。

然而,仍存在少数误差较大的情形,主要原因可能在于估算的 PWDI 还不能准确捕捉到因气象条件剧烈变化而发生的波动^[29,48]以及由前期水分胁迫和后期复水所导致的蒸腾滞后效应或缓慢恢复过程^[29,49]。例如,蒸渗仪试验 T13 处理的 PWDI 实测值在播种后 190 和 199 d(0.26 和 0.34)这两天出现突然的下降,明显低于对应的估算值(0.43 和 0.54,图 5b),很可能是由于太阳辐射从前一天的 10.4 和 14.2 MJ/(m²·d)分别急剧下降至 6.7 和 9.6 MJ/(m²·d)从而显著降低冬小麦水分需求的缘故。此外,尽管灌溉后根区土壤水分条件很快得以显著改善,相应的 PWDI 估算值迅速降至最低,但前期水分胁迫的滞后效应使得 PWDI 实测值只能缓慢降低(即实际蒸腾缓慢恢复),达最低点的真实时间较估算值约延迟 2~4 d(如图 5a 中 T2 处理 216~218、230~232 d;图 5b 中 T8 处理 222~225、234~237 d),即作物水分状态不仅与当

前土壤水分条件有关,也与作物经历的前期水分胁迫密不可分^[48-49]。因此,有必要进一步考虑气象因素以及前期水分胁迫滞后效应的影响以更准确地评估 PWDI。

2.3 CWPf 的构建与评价

2.3.1 水分敏感指数动态

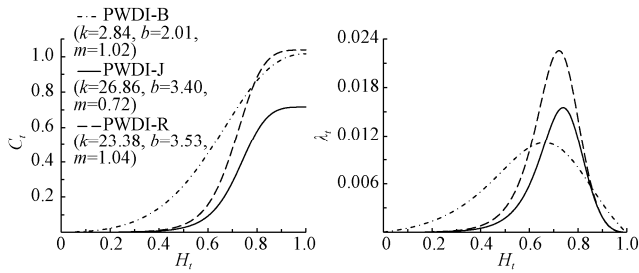
冬小麦播种前,充足的底墒水和越冬水(蒸渗仪试验)或降雨量(滴灌试验)基本可满足作物出苗至返青期间的正常生长需求,故不考虑这一阶段水分条件对作物产量的影响,主要根据返青后基于实测土壤含水率估算的 PWDI 来对冬小麦产量进行评估。蒸渗仪试验中,由于返青前期土壤水分监测设备进行校准调试而导致一段时间内土壤水分数据监测缺失,故 2015 和 2016 年 PWDI 估算分别从 199 和 189 d 开始,即返青后的一段时间内(2015 年 167~198 d、2016 年 168~188 d)均无法估算 PWDI,只能利用实测蒸腾速率计算获得的 PWDI 实测值(图 5)予以代替。

冬小麦产量可分别选用 PWDI-B、PWDI-J 和 PWDI-R 3 个 CWPf 予以估算,其中每个 CWPf 都有各自的水分敏感指数 λ_i 需要评估,其关键在于优化确定累积水分敏感指数 C_i (式(10))中的 3 个未知参数 k 、 b 、 m 。蒸渗仪试验中,将 2015 和 2016 年的冬小麦潜在产量 Y_p 近似为 2 个充分灌溉处理 T1 和 T7 实测产量的平均值(10.7×10³ kg/hm²)。以各 CWPf 的产量估算值与实测值间的残差平方和最小为目标,利用非线性最小二乘法对上述参数进行优化,相应结果标于图 7a 之中。基于上述优化参数,由式(10)和式(13)可获得 C_i 及 λ_i 随归一化热单元指数 H_i 的动态变化过程分别如图 7a 和图 7b 所示。由于 CWPf 数学形式各异,所对应 C_i 或 λ_i 随 H_i 的动态变化规律不尽一致。两个乘法模型(PWDI-J 和 PWDI-R) λ_i 峰值出现时间的差异很小,稍滞后于加法模型(PWDI-B)。总体来看,所有模型的 λ_i 峰值均介于 0.011~0.023 之间,与之对应的 H_i 为 0.66~0.73(图 7b),大致对应于冬小麦的扬花-灌浆期(即 216~225 d)。

滴灌试验中,在充分检索当地冬小麦最高产量数据的基础上,将冬小麦的潜在产量 Y_p 设置为 7.5×10³ kg/hm²^[40]。进一步通过上述非线性最小二乘法优化获得各 CWPf 中的 3 个参数 k 、 b 、 m ,及与之对应的 C_i 和 λ_i 随 H_i 的动态变化过程分别如图 7c 和图 7d 所示。不同 CWPf 对应的 C_i 或 λ_i 随 H_i 的变化差异明显,但所有模型 λ_i 峰值(0.028~0.052)所对应的 H_i 基本集中在 0.73~0.76 之间(图 7d),大致处于冬小麦的灌浆期。

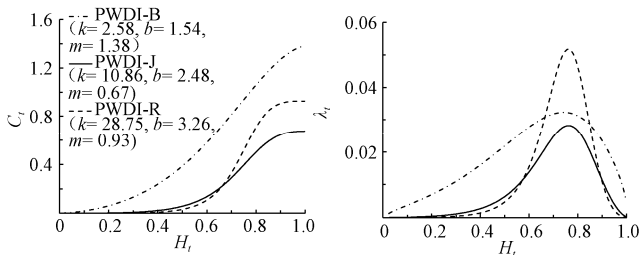
两试验优化获得的冬小麦水分最敏感时期基本都处于扬花-灌浆期。从冬小麦生长生理过程来看,扬花-灌浆期是冬小麦授粉及籽粒产量形成的关键时期,此时大气蒸发潜力一般较大,需要充足的水分供应来维持冬小麦正常授粉和较长时间充足的灌浆过程,因此对水分亏缺十分敏感^[43,50-51]。相较于蒸渗仪试验,滴灌试验另一品种冬小麦最敏感时期稍有滞后,这种差异可能是由于田间试验环境条件(如气候、土壤、灌溉处理等)和不同品种固有的水分敏感遗传特性等因素综合作用的结果,

但无论是华北平原还是黄河三角洲，冬小麦都需要注意扬花-灌浆期充分供水，以促进冬小麦籽粒灌浆饱满，从而提高千粒质量和作物产量。



a. 蒸渗仪试验累积水分敏感指数(C_t)
a. Cumulative water sensitivity index (C_t) in lysimetric experiment

b. 蒸渗仪试验日水分敏感指数(λ_t)
b. Daily water sensitivity index (λ_t) in lysimetric experiment



c. 滴灌试验累积水分敏感指数(C_t)
c. Cumulative water sensitivity index (C_t) in drip irrigation experiment

d. 滴灌试验日水分敏感指数(λ_t)
d. Daily water sensitivity index (λ_t) in drip irrigation experiment

注：PWDI-B 为 Blank 加法模型，PWDI-J 为 Jensen 乘法模型，PWDI-R 为 Rao 乘法模型。

Note: PWDI-B is Blank additive model, PWDI-J is Jensen multiplicative model, and PWDI-R is Rao multiplicative model.

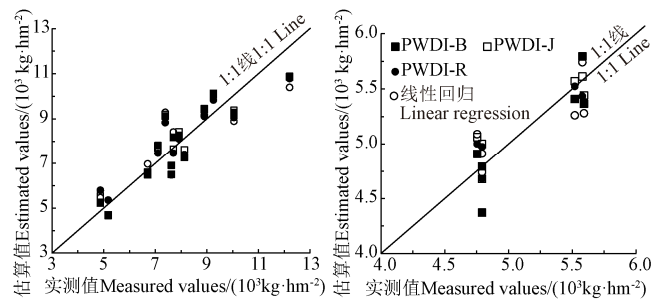
图 7 不同试验中基于不同作物水分生产函数评估获得的累积水分敏感指数和日水分敏感指数随归一化热单元指数 (H_t) 的变化过程

Fig.7 Changing processes of cumulative and daily water sensitivity index with the normalized heat unit index (H_t) based on different Crop Water Production Functions (CWPFs) in different experiments

2. 3. 2 冬小麦产量评估

为了展示不同 CWPf 的评估效果，将 PWDI-B、PWDI-J 和 PWDI-R 模型参数优化过程中蒸渗仪试验各灌溉处理冬小麦产量的估算值与实测值分别展示对比于图 8a。结果表明，PWDI-R 模型对产量的评估精度最高 ($R^2=0.84$, $RMSE=769 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE=0.09$)，PWDI-J 模型次之 ($R^2=0.81$; $RMSE=822 \text{ kg/hm}^2$ 和 $NRMSE=0.10$)，PWDI-B 模型最低 ($R^2=0.79$; $RMSE=857 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE=0.11$)。此外，通过对返青后 PWDI 均值与产量进行线性拟合可建立产量评估的线性回归模型。与三个非线性 CWPf 相比，线性回归模型对产量的评估误差更大，据之估算的产量与实测值之间的 R^2 仅为 0.73, $RMSE$ (964 kg/hm^2) 与 $NRMSE$ (0.12) 均有所升高(图 8a, 表 4)。滴灌试验中，PWDI-B、PWDI-J 和 PWDI-R 模型参数优化过程中估算的各灌溉处理冬小麦产量与实测值的对比结果表明(图 8b, 表 5)，两个乘法模型对产量的评估精度大致相当(其中 PWDI-R 模型的 $R^2=0.83$, $RMSE=171 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE=0.03$; PWDI-J 模型的 $R^2=0.83$, $RMSE=173 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE=0.03$)，但均明显优于 PWDI-B 模型 ($R^2=0.78$, $RMSE=227 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE=$

0.04) 和线性回归模型 ($R^2=0.66$, $RMSE=231 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE=0.03$)。



a. 蒸渗仪试验
a. Lysimetric experiment

b. 滴灌试验
b. Drip irrigation experiment

注：线性回归模型指冬小麦生长期 PWDI 均值与产量的线性拟合模型。
Note: Linear regression model refers to the linear fitting relationship between seasonal mean PWDI and grain yield of winter wheat.

图 8 不同试验基于不同 CWPf 及线性回归模型估算产量与实测值的对比

Fig.8 Comparisons of the measured and estimated yields based on different forms of CWPf and linear regression model in different experiments

表 5 不同试验基于不同作物水分生产函数及线性回归模型估算的产量误差分析

Table 5 Error analysis on estimated grain yield based on different CWPf and linear regression model in different experiments

田间试验 Field Experiments	模型 Models	R^2	RMSE/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	NRMSE
蒸渗仪试验 Lysimetric experiment	PWDI-B	0.79	857	0.11
	PWDI-J	0.81	822	0.10
	PWDI-R	0.84	769	0.09
	线性回归	0.73	965	0.12
滴灌试验 Drip irrigation experiment	PWDI-B	0.78	227	0.04
	PWDI-J	0.83	173	0.03
	PWDI-R	0.83	171	0.03
	线性回归	0.66	231	0.03

各产量估算模型模拟效果差异主要源于函数形式及其所能揭示的生理机制不同，其中无论是加法模型还是乘法模型，均明确顾及了作物水分亏缺及其敏感性动态对作物产量的影响。加法模型 PWDI-B 假定不同阶段的水分亏缺对产量的影响相对独立并通过累加的方式予以表示，忽略了各阶段水分亏缺的交互作用与产量的关系，因而可能导致对产量评估的效果较差，而乘法模型可以较好地顾及这一方面^[52-53]。线性回归模型用 PWDI 均值来代表返青后冬小麦遭受的整体水分胁迫程度，假定作物产量对不同生育时期水分胁迫的敏感性一致，即忽略了水分敏感性在生长过程中的变化特征和差异，估产精度低于 3 个非线性模型，但该模型较为简单，因避免了繁琐的参数拟合优化过程而十分方便应用，当实测资料有限或水分敏感指数不易获取时也可参考用于产量估算。

综上所述，结合基于根系加权土壤水分有效性估算的 PWDI 与基于水分敏感指数累积函数计算获得的日水分敏感指数，可改进冬小麦 CWPf，得到 PWDI-B 加法模型及 PWDI-J、PWDI-R 乘法模型。整体而言，3 种 CWPf 估算获得的产量与实测值之间的误差都在可接受范围之内，但与其他模型相比，无论是田间蒸渗仪试验还是滴灌试验，

PWDI-R 模型对产量的估算精度都表现更好。该模型可用于评估不同灌溉措施对冬小麦产量的影响,进而可优化亏缺灌溉条件下的灌溉制度,具有十分广阔的应用前景。

3 结 论

本文依托不同气候类型区开展的冬小麦栽培田间蒸渗仪试验和滴灌试验,在优化非线性土壤水分胁迫修正系数参数的基础之上,对基于根系加权土壤水分有效性的植物水分亏缺指数(Plant Water Deficit Index, PWDI)估算方法进行了检验和验证,进而通过耦合根系加权 PWDI 与基于归一化热单元指数提出的 S 型水分敏感指数累积函数,建立了 Blank 加法模型(PWDI-B)、Jensen 和 Rao 乘法模型(PWDI-J 和 PWDI-R) 3 种不同形式的作物水分生产函数(Crop Water Production Function, CWPf),并对不同试验条件下的冬小麦产量进行了估算,得到主要结论如下:

1) 基于非线性根系加权土壤水分有效性估算的 PWDI 与实测值吻合良好,二者间的 R^2 几乎都不低于 0.42, NRMSE 不超过 0.23, PWDI 均值与冬小麦株高、生物量及产量均具有明显的负相关关系,表明根系加权 PWDI 可较好地表征冬小麦的水分亏缺程度及其对作物生长的影响。

2) 所构建的 3 个 CWPf 均可较为可靠地估算冬小麦产量,估算值与实测值间的 R^2 不低于 0.78, NRMSE 不超过 0.11,其中 PWDI-R 估算效果最好,可被推荐用于所涉两个气候类型区冬小麦的产量估算。

另外,围绕 PWDI-R 模型与土壤水分运移模型耦合和灌溉制度全局优化及其气候变化响应,本小组已开展了部分卓有成效的工作,相关结果将后续陆续报道。需要指出的是,本文所述根系加权 PWDI 估算方法仍难以反映气象条件变化的影响及前期水分胁迫的滞后效应,与之相关的机制及定量表征方法仍有待进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 朱嘉伟, 赵聪佳, 郭蕊蕊, 等. 水资源约束条件下的县域冬小麦节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 92-100.
Zhu Jiawei, Zhao Congjia, Guo Ruirui, et al. Water-saving irrigation regime for winter wheat in county areas under water resources constraints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 92-100. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张岁岐, 周小平, 慕自新, 等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 1-6.
Zhang Suiqi, Zhou Xiaoping, Mu Zixin, et al. Effects of different irrigation patterns on root growth and water use efficiency of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [3] Arora V K, Prihar S S, Gajri P R. Synthesis of a simplified water use simulation model for predicting wheat yields[J]. Water Resources Research, 1987, 23(5): 903-910.
- [4] 邵东国, 乐志华, 徐保利, 等. 基于 AquaCrop 模型的有机稻灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 114-122.
Shao Dongguo, Le Zhihua, Xu Baoli, et al. Optimization of irrigation scheduling for organic rice based on AquaCrop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 114-122. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周始威, 胡笑涛, 王文娥, 等. 基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 121-129.
Zhou Shiwei, Hu Xiaotao, Wang Wen'e, et al. Optimization of irrigation schedule based on RZWQM model for spring wheat in Shiyang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 121-129. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王相平, 黄冠华, 于利鹏, 等. 土壤水氮迁移转化与作物生长耦合模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 19-25.
Wang Xiangpin, Huang Guanhua, Yu Lipeng, et al. Coupled simulation on soil-water-nitrogen transport and transformation and crop growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 19-25. (in Chinese with English abstract)
- [7] 徐春萌, 田芷源, 陈威, 等. 基于 DSSAT 作物模型的中美大豆主产区单产模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 132-139.
Xu Chunmeng, Tian Zhiyuan, Chen Wei, et al. Simulations and validations of the soybean yields per unit area using DSSAT crop model in the major soybean producing areas of China and America[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(3): 132-139. (in Chinese with English abstract)
- [8] 梁浩, 胡克林, 李保国, 等. 土壤-作物-大气系统水热碳氮过程耦合模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 54-66.
Liang Hao, Hu Kelin, Li Baoguo, et al. Coupled simulation of soil water-heat-carbon-nitrogen process and crop growth at soil-plant-atmosphere continuum system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(24): 54-66. (in Chinese with English abstract)
- [9] Huang G. Modeling soil water regime and corn yields considering climatic uncertainty[J]. Plant and Soil, 2004, 259(1/2): 221-229.
- [10] 郑建华, 黄冠华, 黄权中, 等. 干旱区膜下滴灌条件下洋葱水分生产函数与优化灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 25-30.
Zheng Jianhua, Huang Guanhua, Huang Quanzhong, et al. Water production function and optimal irrigation schedules for onion with drip irrigation and mulch of plastic film in arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(8): 25-30. (in Chinese with English abstract)
- [11] Steward J I, Hagan R M. Functions to predict effects of crop water deficits[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1973, 99(4): 421-439.
- [12] Morgan T H, Bieri A W, Kanemasu E T. A dynamic model of corn yield response to water[J]. Water Resources Research, 1980, 16(1): 59-64.
- [13] Jensen M E. Water Consumption by Agriculture Plants[M]// Kozlowski T T. Water Deficits and Plant Growth. New York, USA: Academic Press, 1968: 1-22.
- [14] Igbadun H E, Tarimo A, Salim B A, et al. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1/2/3): 1-10.

- [15] Ben-Gal A, Karlberg L, Jansson P E. et al. Temporal robustness of linear relationships between production and transpiration[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 211-218.
- [16] Woli P, Jones J W, Ingram K T, et al. Predicting crop yields with the agricultural reference index for drought[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2014, 200(3): 163-171.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [18] Lai C T, Katul G. The dynamic role of root-water uptake in coupling potential to actual transpiration[J]. *Advances in Water Resources*, 2000, 23(4): 427-439.
- [19] 关红杰, 李久生, 栗岩峰. 干旱区棉花水分胁迫指数对滴灌均匀系数和灌水量的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1): 52-59.
Guan Hongjie, Li Jiusheng, Li Yanfeng. Response of crop water stress index to drip system uniformity and irrigation amount in arid regions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1): 52-59. (in Chinese with English abstract)
- [20] 胡庆芳, 尚松浩, 田俊武, 等. FAO56 计算水分胁迫系数的方法在田间水量平衡分析中的应用[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 40-43.
Hu Qingfang, Shang Songhao, Tian Junwu, et al. Application of water stress coefficient from FAO56 to the field water balance analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(5): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [21] Shi J, Li S, Zuo Q, et al. An index for plant water deficit based on root-weighted soil water content[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 285-294.
- [22] 王仰仁, 周青云, 孙新忠, 等. 时段划分对棉花作物水模型的影响与改进[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 9-14.
Wang Yangren, Zhou Qingyun, Sun Xinzhong, et al. Effect and improvement of period division on model of cotton crop response to water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(10): 9-14. (in Chinese with English abstract)
- [23] Kipkorir E C, Raes D. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index[J]. *Irrigation & Drainage Systems*, 2002, 16(1): 47-52.
- [24] Georgiou P E, Papamichail D M. Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(6): 487-504.
- [25] 韩松俊, 刘群昌, 王少丽, 等. 作物水分敏感指数累积函数的改进及其验证[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 83-88.
Han Songjun, Liu Qunchang, Wang Shaoli, et al. Improvement and verification of cumulative function of crop water sensitive index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(6): 83-88. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Slack D C, et al. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: Application to a potato crop[J]. *Irrigation & Drainage*, 2010, 53(3): 251-261.
- [27] Zuo Q, Zhang R, Shi J. Characterization of the root length density distribution of wheat using a generalized function[M]//Timlin D, Ahuja L R, *Enhancing Understanding and Quantification of Soil-Root Growth Interactions*. Madison, USA: American Society of Agronomy Publisher, 2013: 93-117.
- [28] Ning S, Chen C, Zhou B, et al. Evaluation of normalized root length density distribution models[J]. *Field Crops Research*, 2019, 242: 107604.
- [29] Wu X, Zhang W, Liu W, et al. Root-weighted soil water status for plant water deficit index based irrigation scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 189: 137-147.
- [30] 刘利宁. 水盐共同胁迫条件下棉花水分亏缺程度的定量表征[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
Liu Lining. Quantitative Characterization of Water Deficit in Cotton under Water and Salinity Stress[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [31] Shi J C, Wu X, Wang X Y, et al. Determining threshold values for root-soil water weighted plant water deficit index based smart irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: 105979.
- [32] Homae M, Feddes R A, Dirksen C. Simulation of root water uptake: II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 57(2): 111-126.
- [33] Rallo P. Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea* L.) to soil water deficit conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 79-88.
- [34] Wu X, Shi J, Zuo Q, et al. Parameterization of the water stress reduction function based on soil-plant water relations[J]. *Irrigation Science*, 2021, 39(1): 101-122.
- [35] Guswa A J, Celia M A, Rodriguez-Iturbe I. Effect of vertical resolution on predictions of transpiration in water-limited ecosystems[J]. *Advance in Water Resources*, 2004, 27: 467-480.
- [36] 吴训, 石建初, 左强. 基于作物水分关系改进土壤水分胁迫修正系数的反求方法[J]. *水利学报*, 2020, 51(2): 212-222.
Wu Xun, Shi Jianchu, Zuo Qiang. Improving the inverse method to estimate the soil water stress reduction function based on crop-water relations[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(2): 212-222. (in Chinese with English abstract)
- [37] Blank H. *Optimal Irrigation Decisions with Limited Water*[D]. Colorado: Colorado State University, 1975.
- [38] Rao N H, Sarma P B S, Chander S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture[J]. *Agricultural Water Management*, 1988, 13(1): 25-32.
- [39] Asseng S, Richter C, Wessolek G. Modelling root growth of wheat as the linkage between crop and soil[J]. *Plant & Soil*, 1997, 190(2): 267-277.
- [40] Musters P, Bouten W. A method for identifying optimum strategies of measuring soil water contents for calibrating a root water uptake model[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 227(1/2/3/4): 273-286.
- [41] Feddes R A, Kowalik P, Kolinska-Malinka K, et al. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function[J]. *Journal of Hydrology*, 1976, 31(1/2): 13-26.
- [42] Wang X X, Wang Q J, Fan J, et al. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 129: 95-104.
- [43] Zhang H, Wang X, You M, et al. Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 1999, 19(1): 37-45.
- [44] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil*

- Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [45] Cai G, Vanderborcht J, Couvreur V, et al. Parameterization of root water uptake models considering dynamic root distributions and water uptake compensation[J/OL]. *Vadose Zone Journal*, 2017, 17. (2017-06-20) [2022-03-07] <https://doi:10.2136/vzj2016.12.0125>.
- [46] Jarvis N J. A simple empirical model of root water uptake[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 107(4): 57-72.
- [47] Zuo Q, Shi J, Li Y, et al. Root length density and water uptake distributions of winter wheat under sub-irrigation[J]. *Plant Soil*, 2006, 285: 45-55.
- [48] Yang Y, Guan H, Hutson J L, et al. Examination and parameterization of the root water uptake model from stem water potential and sap flow measurements[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(20): 2857-2863.
- [49] Wu X, Zuo Q, Shi J, et al. Introducing water stress hysteresis to the Feddes empirical macroscopic root water uptake model[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240: 106293.
- [50] Zhang H, Oweis T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 38(3): 195-211.
- [51] 罗遵兰, 冯绍元, 左海萍. 山西省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J]. *灌溉排水学报*, 2005(1): 16-19.
- Luo Zunlan, Feng Shaoyuan, Zuo Haiping. Preliminary analysis of water production function model of winter wheat in Shanxi Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005(1): 16-19. (in Chinese with English abstract)
- [52] Foster T, Brozovi N. Simulating crop-water production functions using crop growth models to support water policy assessments[J]. *Ecological Economics*, 2018, 152: 9-21.
- [53] Smilovic M, Gleeson T, Adamowski J. Crop kites: Determining crop-water production functions using crop coefficients and sensitivity indices[J]. *Advance in Water Resources*, 2016, 97: 193-204.

Water production function of winter wheat based on root-weighted soil water availability

Wu Xun¹, Xu Yanqi¹, Shi Jianchu¹, Zhang Ting¹, Wang Lichun², Xue Xuzhang², Zuo Qiang^{1*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the effects of the crop water deficit extent and the water stress sensitivity on crop yield, a novel Crop Water Production Function (CWPF) was proposed through combining a Root-Weighted Plant Water Deficit Index (PWDI) and an S-shaped cumulative function of water stress sensitivity index as a function of the normalized heat unit index in this study. Three forms of CWPFs, including Blank additive model (PWDI-B), Jensen (PWDI-J) and Rao (PWDI-R) multiplicative models, were considered. A two-year field lysimetric experiment and a one-year field drip irrigation experiment for winter wheat, respectively conducted in Changping District, Beijing (40°10'31"N, 116°26'10"E) from September 2014 and 2015 to June the next year and Yellow River Delta, Shandong Province, China (37°19'17"N, 118°38'41"E) from October 2020 to June 2021, were employed to optimize the fitting parameter in the nonlinear soil water stress reduction function, and to test the root-weighted PWDI estimation method and to compare and evaluate three different CWPFs. Thirteen and six irrigation treatments with various water supply levels were respectively designed in lysimetric and drip irrigation experiments. The experimental observations included meteorological data, soil water content distributions, daily transpiration, leaf area index, plant height, aboveground dry matter and grain yield of winter wheat. Three statistical indicators were used to evaluate the model performance, including the coefficient of determination (R^2), Root Mean Squared Error (RMSE) and Normalized RMSE (NRMSE). Optimized using a nonlinear least-squares method by minimizing the residual between measured and estimated daily or stage-cumulative transpiration, the fitting parameter in the soil water stress reduction function was used to estimate the PWDI under various irrigation treatments. The results showed the estimated PWDIs were in a good agreement with the measured values, with an R^2 of 0.78, a RMSE of 0.10, and a NRMSE of 0.16 in the lysimetric experiment, and the estimated seasonal mean PWDI was well correlated with plant height ($r = -0.95$), aboveground dry matter ($r = -0.79$) and final yield ($r = -0.81$) of winter wheat in drip irrigation experiment, which indicates that the PWDI estimated based on root-weighted soil water availability could represent crop water deficit extent and its effects on crop growth and yields accurately. The largest daily water sensitivity index estimated was situated at the flowering-filling stage of winter wheat, implying the stages are the most sensitive period of winter wheat to water stress. By combining the daily PWDI estimated based on root-weighted soil water availability and the daily water stress sensitivity index calculated from the S-shaped cumulative function, three different forms of CWPFs were established. All CWPFs provided a reasonable estimation of yields of winter wheat, with the R^2 not less than 0.78 and NRMSE not more than 0.11, respectively. By contrast, the estimation accuracy of winter wheat yield from PWDI-R was successively higher than that from PWDI-J, PWDI-B, and linear regression model (which represents the linear relationship between the seasonal mean PWDI and the yield of winter wheat) in lysimetric and drip irrigation experiments. Consequently, the combination of root-weighted PWDI and S-shaped cumulative water sensitivity index provides a reliable way to establish winter wheat water production function, and PWDI-R was found to be most suitable for winter wheat yield estimation and irrigation schedule optimization. The findings from this research may provide the theoretical basis for water management in the winter wheat field in the study regions.

Keywords: soil moisture; deficit; models; water sensitivity index; winter wheat