

华北夏玉米干物质分配系数对干旱胁迫的响应

谭方颖¹ 李昊² 王建林^{3*} 王志伟⁴

(¹国家气象中心, 北京 100081; ²哈尔滨师范大学, 哈尔滨 150025; ³宁夏回族自治区气象局, 银川 750002; ⁴山西省气候中心, 太原 030006)

摘要 干物质分配系数反映作物各器官干物质的分配与积累, 研究干物质分配系数对干旱胁迫的响应, 是研究干旱胁迫对作物生长发育影响的基础。本文基于华北夏玉米主产省山东、河北和山西 3 个试验点 2013—2015 年田间水分控制试验资料, 建立了夏玉米苗期、抽雄期、灌浆期 3 个主要发育阶段叶、茎、穗的干物质分配系数与土壤相对湿度的定量关系模型, 分析了叶、茎、穗干物质分配系数对不同程度干旱胁迫的响应。结果表明: 3 个阶段叶、茎、穗的干物质分配系数与土壤相对湿度均呈显著的一元二次关系。干旱胁迫下, 叶片向外转运的干物质相对减少, 叶干物质分配比例增加, 并且在轻、中度干旱胁迫时的灌浆期(叶干物质分配系数增加 0.04~0.09)以及重度干旱胁迫时的抽雄期(叶干物质分配系数增加 0.17)响应最敏感。穗干物质分配系数对干旱胁迫表现为负响应, 干旱胁迫越严重, 分配系数越小, 轻-重度干旱胁迫使穗干物质分配系数减小 0.08~0.34。茎干物质分配系数对干旱胁迫的响应总体表现为灌浆期(正响应)>抽雄期(负响应)>苗期(负响应)。

关键词 夏玉米; 干物质分配系数; 干旱胁迫; 华北

Response of dry matter partitioning coefficient of summer maize to drought stress in North China. TAN Fang-ying¹, LI Hao², WANG Jian-lin^{3*}, WANG Zhi-wei⁴ (¹National Meteorological Center, Beijing 100081, China; ²Harbin Normal University, Harbin 150025, China; ³Ningxia Hui Autonomous Region Meteorological Bureau, Yinchuan 750002, China; ⁴Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006, China).

Abstract: The dry matter partitioning coefficient (PC) reflects the distribution and accumulation of dry matter in crop organs. Understanding the responses of PC to drought stress is fundamental for understanding crop development under drought stress. Using field data collected under drought stress conditions during the period 2013–2015 at three sites (Xiajin, Shandong; Gucheng, Hebei; and Yuncheng, Shanxi) in North China, we quantified the effects of different drought stress intensities on the PC of stems, leaves and ears during the development stages (from emergence to jointing, from jointing to tasseling, and from tasseling to maturity). The results showed that PC of stems, leaves and ears showed significant quadratic relationships with relative soil moisture during all stages. Leaf PC was increased by 0.04–0.09 during the grain-filling stage under light and moderate drought stress, and was increased by 0.17 during the tasseling stage under severe drought stress. On the contrary, drought stress had negative effects on the ear PC. With the increases of drought stress, less dry matter was allocated to ears. Under light to severe drought stresses, ear PC was decreased by 0.08–0.34. However, no consistent pattern was observed for the effects of drought stress on stem PC; negative effects were observed during the vegetative growth stage and positive effects were found in the mature stage. Overall, the degree of the responses of crop PC to drought stress under different phenology stages was in the order of grain-filling stage (positive) > tasseling stage (negative) > seedling stage (negative).

Key words: summer maize; dry matter partitioning coefficient; drought stress; North China.

本文由公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306038, GYHY201506001)资助 This work was supported by the Special Fund for Meteorology Scientific Research in the Public Interest (GYHY201306038, GYHY201506001).

2018-05-11 Received, 2018-11-23 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangjl@cma.gov.cn

干物质分配系数是随作物发育进程变化的一个动态参数,能够精确表征干物质向茎、叶和储存器官的积累与分配规律,是作物生长发育模拟模型中的关键参数,其模拟精度会极大地影响干物质生产模拟的准确性^[1-3].20 世纪 80 年代以来,我国学者针对干物质分配的相关问题进行了大量研究^[4-9].李晓航等^[10]对不同灌水处理下小麦干物质分配、转运及其产量进行了研究,认为不同品种间植株干物质积累量及其在各器官的分配规律基本一致.王焱等^[11]通过盆栽试验,研究了不同水分条件对冬小麦干物质积累、分配的影响,结果表明,在水分适宜条件下小麦茎秆干物质积累所占比例较小,过度灌溉和严重干旱胁迫条件下茎秆干物质积累所占比例较大,穗部所占比例较小.胡继超等^[12]研究表明,短期干旱后,水稻叶、根、穗的分配指数均降低,茎鞘的分配指数升高.

玉米是重要的粮食、饲料和经济兼用作物,在我国北方干旱地区广泛种植.尽管目前围绕干旱胁迫对玉米生长发育的影响开展了许多研究^[13-14],但对于干旱胁迫状态下玉米干物质分配的变化趋势研究较少,并且存在以下问题:1) 受研究时间和试验条件限制,开展水分控制试验时间短、结果偶然性大,或试验基于盆栽或在实验室内进行,与大田环境相差较大;2) 研究结果以定性描述为主,缺乏土壤湿度对干物质分配影响的定量分析.因此,本研究以华北夏玉米主产区的山东夏津、河北固城和山西运城 3 个试验点 2013—2015 年田间水分控制试验为基础,对不同发育阶段不同程度干旱胁迫下夏玉米各器官干物质分配系数对干旱胁迫的响应进行了探讨,建立了华北夏玉米各器官干物质分配系数与土壤相对湿度的定量关系,对阐明作物各器官生长对不同环境的动态响应,提高作物模型模拟干旱胁迫条件下

玉米生长发育状况以及作物模型在产量预测、灾害损失评估应用的精确度方面提供理论依据和参考.

1 材料与方法

1.1 试验设计

分别在山东夏津、河北固城和山西运城连续 3 年(2013—2015 年)开展夏玉米田间水分控制试验.试验每年设立 5 个试验小区($T_1 \sim T_5$,单个小区面积约 30 m²),每个试验小区设 3 个重复试验.试验采取遮雨棚遮避自然降水,再根据测墒结果计算灌水量进行灌溉,对夏玉米出苗-拔节、拔节-抽雄、抽雄-成熟 3 个主要生育阶段,以及[(出苗-拔节)+(拔节-抽雄)]、[(出苗-拔节)+(抽雄-成熟)]、[(拔节-抽雄)+(抽雄-成熟)]3 个复合生育阶段轮流进行水分控制^[15].每个水分控制阶段,采取一次性灌溉方式,即在每种处理土壤水分降至该处理的临界点后,一次性灌溉.试验共设置 4 个水分水平,不同控水时段的土壤相对湿度分别控制为 $\leq 40\%$ 、 $40\% \sim 60\%$ 、 $60\% \sim 80\%$ 、 $>80\%$.控水试验每年在不同时段设定不同水分梯度来完成.以河北固城试验站为例,2013—2015 年各小区水分控制试验设计见表 1.山东夏津、山西运城水分控制试验设计原理相同,考虑到篇幅问题,不再赘述.

3 个试验站选用的玉米品种均为‘郑单 958’.试验采取人工播种方式,按当地普遍播种时间进行播种,行距 50 cm,株距 35 cm,深度约 7 cm,密度约 6 株·m⁻².试验在播种前施底肥、拔节-孕穗前追肥 1 次,保证土壤养分供应,为避免土壤肥力差异对试验的干扰,各处理的施肥水平均保持一致.

1.2 试验观测项目

1.2.1 发育期 根据《农业气象观测规范》^[16],判断并记录玉米播种、出苗、七叶、拔节、抽雄、乳熟和成

表 1 河北固城 2013—2015 年水分控制试验设计
Table 1 Water control design in Gucheng, Hebei from 2013–2015 (%)

年份 Year	发育时段 Developmental period	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
2013	出苗-拔节 Emergence-Jointing	≤40	40~60	40~60	60~80	>80
	拔节-抽雄 Jointing-Tasseling	>60	>60	40~60	60~80	>80
	抽雄-成熟 Tasseling-Maturity	>60	>60	>60	60~80	>80
2014	出苗-拔节 Emergence-Jointing	>60	>60	>60	60~80	>80
	拔节-抽雄 Jointing-Tasseling	≤40	40~60	40~60	60~80	>80
	抽雄-成熟 Tasseling-Maturity	>60	>60	40~60	60~80	>80
2015	出苗-拔节 Emergence-Jointing	>60	>60	40~60	60~80	>80
	拔节-抽雄 Jointing-Tasseling	>60	>60	>60	60~80	>80
	抽雄-成熟 Tasseling-Maturity	≤40	40~60	40~60	60~80	>80

熟的日期。

1.2.2 土壤相对湿度 统一采用土壤相对湿度来表征土壤的水分状况,即土壤含水量与田间最大持水量的百分比,土壤含水量由烘干称量法求得.利用土钻法从播种前一天开始观测直至收获,每 7 d 测定 1 次;拔节前土壤取样深度为 0~20 cm,拔节后为 0~50 cm。

1.2.3 生物量 在夏玉米出苗-拔节、拔节-抽雄、抽雄-成熟期,按长势好、中、差在每个小区分别选择具有代表性的玉米植株 1 株,将叶、茎、穗等器官分离、烘干,按器官分别称量,记录干物质量.各器官干物质量取 3 株的平均值。

1.3 分析方法

1.3.1 发育进程 本研究采用由荷兰瓦赫宁根大学开发的 WOFOST 作物模型^[17]中的发育进程(DVS)计算方法,利用气象观测资料将生物量观测时对应的发育期量化为发育进程,其中,出苗期 DVS 为 0.00,抽雄期 DVS 为 1.00,成熟期 DVS 为 2.00。

1.3.2 干物质分配系数 基于生物量观测资料,叶、茎和储藏器官(穗)的分配系数计算方法如下^[3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} FLTB_i = \frac{W_{L_i}}{TAGP_i} \quad (i=1) \\ \text{(七叶期的第 1 个观测值)} \\ FLTB_i = \frac{W_{L_i} - W_{L_{i-1}}}{TAGP_i - TAGP_{i-1}} \quad (i>1) \\ \text{(拔节、拔节后 10 d、抽雄后 10 d 观测值)} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} FSTB_i = \frac{W_{S_i}}{TAGP_i} \quad (i=1) \\ \text{(七叶期的第 1 个观测值)} \\ FSTB_i = \frac{W_{S_i} - W_{S_{i-1}}}{TAGP_i - TAGP_{i-1}} \quad (i>1) \\ \text{(拔节、拔节后 10 d、抽雄后 10 d 观测值)} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} FOTB_i = \frac{W_{O_i}}{TAGP_i} \quad (i=1) \\ \text{(抽雄后 10 d 的第 1 个观测值)} \\ FOTB_i = \frac{W_{O_i} - W_{O_{i-1}}}{TAGP_i - TAGP_{i-1}} \quad (i>1) \\ \text{(抽雄后 20 d、成熟期的观测值)} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: FLTB 为叶片干物质分配系数;FSTB 为茎干物质分配系数;FOTB 为穗干物质分配系数; W_L 、 W_S 、 W_O 分别为叶、茎和储藏器官的干物质量;TAGP 为地上总干物质量; i 表示生物量观测次序, $i=1$ 为第 1 次观测(叶、茎生物量第 1 次观测为七叶期,穗生物

量第 1 次观测为抽雄后 10 d)。

$T_1 \sim T_5$ 各小区叶、茎和穗在各观测时期的干物质分配系数为各小区中 3 个重复试验观测数据的平均值.例如 $T_1 \sim T_5$ 小区叶片的干物质分配系数计算方法为:

$$FLTB_{T_i} = \sum_{j=1}^3 FLTB_{T_{ij}} / 3 \quad (4)$$

式中: $FLTB_{T_i}$ 为 T_i 小区叶片干物质分配系数; i 为小区号, $i=1,2,3,4,5$; j 代表每个小区的重复.各小区茎和穗的干物质分配系数计算方法与式(4)相同。

夏玉米不同发育时段干物质分配系数与土壤相对湿度的回归分析及方程显著性检验均利用 Matlab R2014 和 Excel 2010 软件完成。

1.4 数据订正方法

由于试验受天气、人为操作等因素的影响,导致生物量观测资料出现缺测、个别数据异常,需要对观测数据进行订正处理.本文采用比值法^[3]和线性回归法对观测资料进行订正。

2 结果与分析

2.1 夏玉米叶干物质分配系数对干旱胁迫的响应

本研究参考 WOFOST 作物模型玉米模块中分配系数默认的发育进程,选用 $DVS=0.33, 0.88, 1.20$ 来划分玉米生长过程中主要的 3 个阶段:苗期、抽雄期和灌浆期.对于 3 个阶段轻、中、重度干旱胁迫,均采用该时段轻、中、重度干旱胁迫对应的土壤相对湿度上限^[18],苗期轻、中、重度干旱胁迫上限分别为 60%、50% 和 40%,抽雄期和灌浆期均为 70%、60% 和 50%;土壤相对湿度数据选取与发育进程日期最接近的观测数据。

图 1a 显示夏玉米苗期(y_{aS})、抽雄期(y_{aT})和灌浆期(y_{aF}) 3 个阶段叶、茎、穗的干物质分配系数与土壤相对湿度(x)的关系.3 个阶段叶的干物质分配系数与土壤相对湿度的定量关系模型为:

$$y_{aS} = 2.649 \times 10^{-5} x^2 - 0.005x + 0.854 \quad (5)$$

($r=0.788, P<0.01$)

$$y_{aT} = 1.42 \times 10^{-4} x^2 - 0.024x + 1.371 \quad (6)$$

($r=0.867, P<0.01$)

$$y_{aF} = 4.71 \times 10^{-5} x^2 - 0.011x + 0.620 \quad (7)$$

($r=0.839, P<0.01$)

由式(5)~(7)可见,夏玉米 3 个发育阶段叶的干物质分配系数与土壤相对湿度均呈非线性显著负相关,其随土壤相对湿度的增加呈减小趋势(图 1a),对于干旱胁迫表现为负响应,即土壤相对湿度越

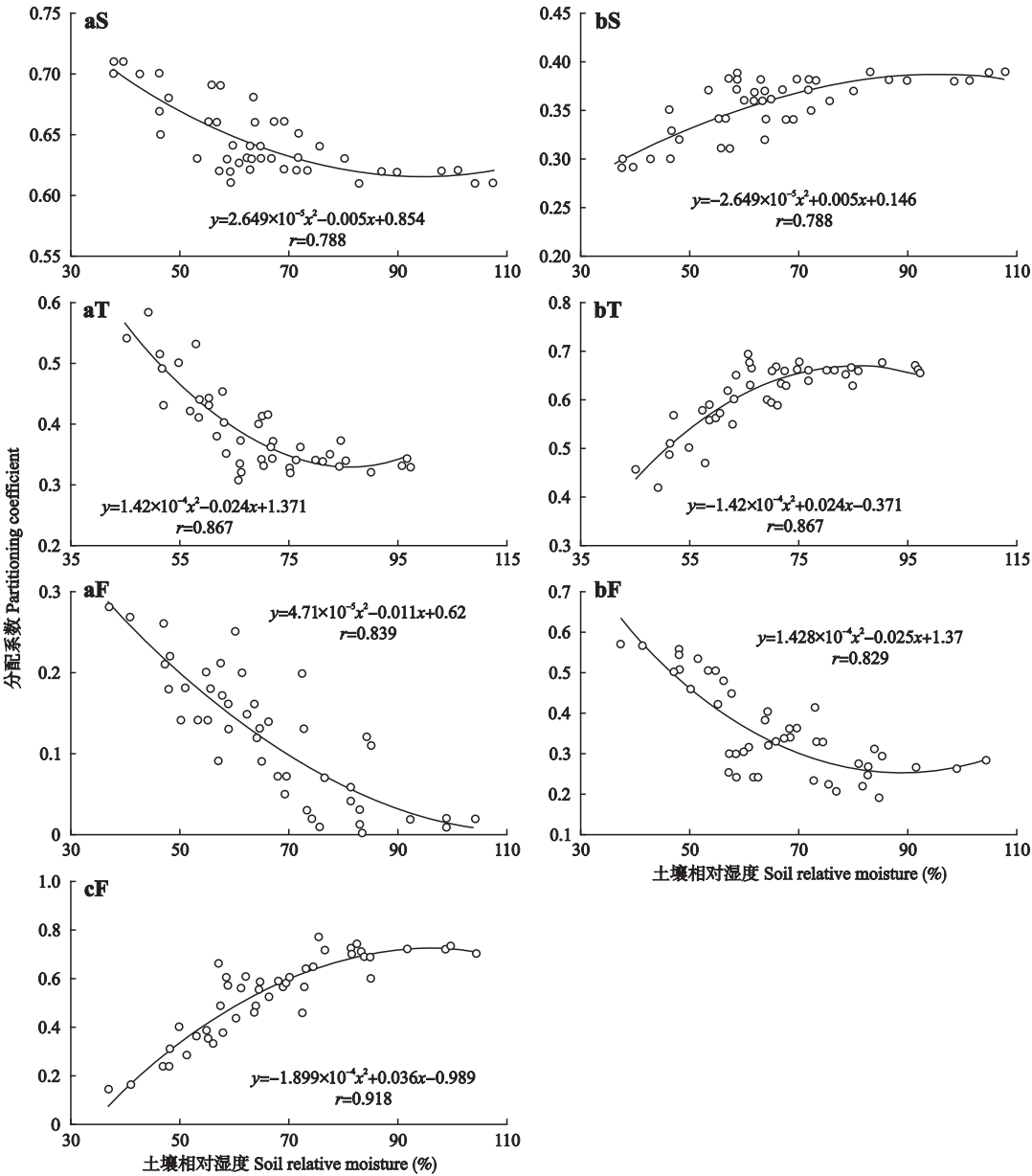


图 1 夏玉米不同发育时段干物质分配系数与土壤相对湿度的关系

Fig.1 Relationships between dry matter partitioning coefficients and soil relative moisture during different developmental periods of summer maize.

a) 叶 Leaf; b) 茎 Stem; c) 穗 Ear. S: 苗期 Seedling stage; T: 抽雄期 Tasseling stage; F: 灌浆期 Filling stage.

小,干旱胁迫越严重,叶的干物质分配系数越大.由式(5)~(7)计算得到不同程度干旱胁迫叶干物质分配系数,由表 2 可知,干旱胁迫程度不同,3 个发育阶段叶的干物质分配系数“响应”不同.无干旱胁迫时,3 个时段叶干物质分配系数分别为 0.63、0.36 和 0.04;轻度干旱胁迫时,叶的干物质分配系数增幅分别为 0.02、0.03 和 0.04;中度干旱胁迫时,增幅分别为 0.04、0.08 和 0.09;重度干旱胁迫时,增幅分别达到 0.07、0.17 和 0.15.可见,轻、中度干旱胁迫时叶的干物质分配系数对干旱胁迫的响应表现为灌浆期

最敏感(干物质分配系数与无干旱胁迫相比增幅

表 2 夏玉米不同时段叶干物质分配系数对不同程度干旱胁迫的响应

Table 2 Response of leaf dry matter partitioning coefficients to drought stress of summer maize in different developmental periods

处理 Treatment	苗期 Seedling	抽雄期 Tasseling	灌浆期 Filling
无干旱胁迫 No drought stress	0.63	0.36	0.04
轻度胁迫 Light drought stress	0.65	0.39	0.08
中度胁迫 Moderate drought stress	0.67	0.44	0.13
重度胁迫 Severe drought stress	0.70	0.53	0.19

最大),而重度干旱胁迫时抽雄期最敏感,苗期在整个发育阶段的敏感性最小.

2.2 夏玉米茎干物质分配系数对干旱胁迫的响应

图 1b 显示了夏玉米苗期(y_{bs})、抽雄期(y_{bt})和灌浆期 3 个阶段茎的干物质分配系数(y_{bf})与土壤相对湿度(x)的关系.3 个阶段茎的干物质分配系数与土壤相对湿度的定量关系模型为:

$$y_{bs} = -2.649 \times 10^{-5} x^2 + 0.005x + 0.146$$

$(r = 0.788, P < 0.01)$

$$y_{bt} = -1.42 \times 10^{-4} x^2 + 0.024x - 0.371$$

$(r = 0.867, P < 0.01)$

$$y_{bf} = 1.428 \times 10^{-4} x^2 - 0.025x + 1.37$$

$(r = 0.829, P < 0.01)$

由式(8)~(10)可见,夏玉米苗期和抽雄期茎的干物质分配系数与土壤相对湿度呈非线性显著正相关,茎的干物质分配系数随土壤相对湿度的增加而增大,对干旱胁迫表现为正响应,即土壤相对湿度越大,茎的干物质分配系数越大.由式(8)~(10)计算得到表 3,结果表明,无干旱胁迫时,苗期和抽雄期茎的干物质分配系数分别为 0.37 和 0.64,轻度干旱胁迫时,茎的干物质分配系数分别减少 0.02 和 0.03;中度干旱胁迫时,减幅分别为 0.04、0.08;重度干旱胁迫时,减幅分别为 0.07 和 0.17.可见,抽雄期茎的干物质分配系数对干旱胁迫正响应的敏感性高于苗期.而在灌浆期,茎的干物质分配系数对干旱胁迫的响应则与前两个阶段相反,为负响应.与无干旱胁迫时相比,轻、中、重度干旱胁迫时,茎的干物质分配系数分别增加 0.04、0.10 和 0.20,说明干旱胁迫越严重,干物质向茎的分配比例越大.综合来看,茎的干物质分配系数在不同阶段对干旱胁迫的响应表现为,灌浆期(正响应)>抽雄期(负响应)>苗期(负响应).

2.3 夏玉米穗干物质分配系数对干旱胁迫的响应

图 1c 显示了夏玉米穗的干物质分配系数(y_c)

与土壤相对湿度(x)的关系,穗的干物质分配系数与土壤相对湿度的定量关系模型为:

$$y_c = -1.899 \times 10^{-4} x^2 + 0.036x - 0.989$$

$(r = 0.918, P < 0.01)$

图 1c 和式(11)表明,穗的干物质分配系数与土壤相对湿度呈非线性显著正相关,其随土壤相对湿度的增加呈增大趋势.由式(11)可知,无干旱胁迫时,穗的干物质分配系数为 0.68,发生轻、中、重度干旱胁迫时,穗的干物质分配系数分别减小到 0.60、0.49 和 0.34,减幅分别为 0.08、0.21 和 0.34.可见,干旱胁迫越严重,干物质向穗的分配比例越小,尤其是重度干旱胁迫时,穗的干物质分配系数减半,对产量影响非常大.

3 讨 论

本研究利用 2013—2015 年河北固城、山东夏津、山西运城进行的夏玉米田间控水试验观测资料,分析了不同发育阶段夏玉米各器官干物质分配系数对不同程度干旱胁迫的响应.夏玉米叶片的干物质分配在苗期、抽雄期和灌浆期 3 个主要发育阶段对干旱胁迫均表现为正响应,这种正响应主要表现为叶面积的增加^[19],增加叶面积可在一定程度上弥补干旱胁迫导致的光合产物不足,通过保证充足的绿叶面积截获更多的光能,生产更多的生物量来提高籽粒产量^[20].在不同发育阶段、不同干旱胁迫程度下叶片“响应”的敏感性不同,轻、中度干旱胁迫时,灌浆期最敏感,重度干旱胁迫时,抽雄期最敏感,敏感性最小的是苗期.说明苗期对干旱胁迫的抵抗力较强,而拔节后干旱胁迫会使玉米根系生长发育受阻,影响花原始体发育^[21],这也从侧面解释了为什么营养生长阶段干旱对玉米产量的影响小于生殖生长阶段^[22].对于茎的干物质分配对干旱胁迫的响应,不同的研究结果不尽一致.孟凡超等^[23]在玉米苗期、拔节期和抽雄吐丝期进行中度干旱胁迫处理,认为干旱胁迫对茎存在正向影响;刘树堂等^[24]对土壤水分实行全程控制,认为中、重度干旱胁迫导致收获期茎干物质质量下降明显;白向历等^[25]在玉米各发育期进行干旱处理,持续胁迫 7 d 后解除胁迫发现,拔节期干旱胁迫使株高下降,但却使茎粗增加.本研究结果显示,在苗期和抽雄期,干旱胁迫使干物质向茎的分配减少,但在灌浆期使茎的干物质分配系数增加,且灌浆期茎的干物质分配系数对干旱胁迫的正响应在不同程度干旱胁迫中的敏感性均为最大,这可能是玉米植株对干旱胁迫导致的早衰、

表 3 夏玉米不同时段茎干物质分配系数对不同程度干旱胁迫的响应

Table 3 Response of stem dry matter partitioning coefficients to drought stress of summer maize in different developmental periods

处理 Treatment	苗期 Seedling	抽雄期 Tasseling	灌浆期 Filling
无干旱胁迫 No drought stress	0.37	0.64	0.28
轻度胁迫 Light drought stress	0.35	0.61	0.32
中度胁迫 Moderate drought stress	0.33	0.56	0.38
重度胁迫 Severe drought stress	0.30	0.47	0.48

减产的适应. 杨国虎等^[26] 也认为, 在干旱环境中生长出粗壮的茎秆是提高玉米耐旱性的途径之一. 对各研究结论的差异, 是因供试土壤和水分控制的程度、时期、方法及试验地点气象条件不同, 还是其他因素所致, 还需更多的试验结果来验证. 穗的干物质分配系数对干旱胁迫表现为负响应, 且干旱胁迫越严重, 干物质向穗的分配越少. 白向历等^[25]、孟凡超等^[22]、于志青等^[27] 的研究也刚好印证了本研究的结论.

此外, 本研究在夏玉米生育期内共设计了 6 个控水时段和 4 个水分水平, 获得了相对较为全面的水分控制试验样本数据, 但不足的是, 受试验站现有条件限制, 所有发育时段和水分梯度的控水试验是通过 3 年试验、每年在不同时段设定不同水分水平来完成. 虽然研究表明, 在水分充足的前提下, 华北地区夏玉米干物质平均分配系数在不同年际、地域间具有十分显著的相关性^[3], 且 2013—2015 年华北夏玉米生育期内未发生高温热害、低温等农业气象灾害^[28-30], 试验操作人员也未曾更换, 但干旱胁迫条件下各器官的分配系数是否具有与水分充足时相同的特征, 年际间温度、光照、风速、空气湿度等气象条件的变化在干旱胁迫下是否会对干物质分配产生较大影响, 目前尚无研究结果证实, 今后还需进一步研究.

4 结 论

华北夏玉米叶、茎、穗在不同发育阶段的干物质分配系数与土壤相对湿度的关系显著, 均可用一元二次方程表示. 叶片在苗期、抽雄期和灌浆期 3 个主要发育阶段对干旱胁迫均表现为正响应, 即干旱胁迫使叶片向外转运的干物质相对减少, 干物质向叶片的分配增加, 尤其是灌浆期轻、中度干旱胁迫以及抽雄期重度干旱胁迫时, 叶干物质分配系数对干旱胁迫的响应最敏感; 而穗干物质分配系数对干旱胁迫存在负响应, 且干旱胁迫越严重, 穗的干物质分配系数越小, 重度干旱胁迫对产量的影响最大; 茎秆干物质分配系数对干旱胁迫的响应较为复杂, 在苗期、抽雄期和灌浆期不尽相同, 在苗期和抽雄期为负响应, 在灌浆期则表现为正响应, 且灌浆期(正响应)>抽雄期(负响应)>苗期(负响应).

参考文献

[1] Grant RF. Simulation of maize phenology. *Agronomy Journal*, 1989, **81**: 451-457

[2] Yin H-Z (尹红征), Lyu B-Q (吕冰清), Zheng G-Q (郑国清), *et al.* Simulation models of the maize yield formation. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2004, **19**(3): 73-76 (in Chinese)

[3] Li H (李 昊), Tan F-Y (谭方颖), Wang J-L (王建林), *et al.* Simulation on dry matter distribution coefficient for summer maize in North China. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2016, **37**(3): 335-342 (in Chinese)

[4] Yao F-F (姚芳芳), Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云). A simulation model of ozone stress on photosynthetic production and its allocation of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(11): 2586-2593 (in Chinese)

[5] Liu S-D (刘寿东), Yang Z-Q (杨再强), Su T-X (苏天星), *et al.* Impact of planting density on the dry matter formation and partition in sweet peppers in a solar greenhouse. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(15): 4056-4064 (in Chinese)

[6] Xu S-J (徐寿军), Yang H-S (杨恒山), Zheng G-C (郑根昌), *et al.* A model for predicting dry matter partitioning in barley. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2010, **30**(4): 735-740 (in Chinese)

[7] Contreras JI, Bueno I, Lao MT, *et al.* Green bean under organic and integrated crop systems in a Mediterranean area greenhouse: Effects on dry matter and nutrient-extraction distribution pattern. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, **44**: 776-782

[8] Liu X-Z (刘贤赵), Kang S-Z (康绍忠). Effects of shading on photosynthesis, dry matter partitioning and N, P, K concentrations in leaves of tomato plants at different growth stages. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(12): 2264-2271 (in Chinese)

[9] Li F-M (李凤民), Guo A-H (郭安红), Luo M (雒梅), *et al.* Effect of water supply from deep soil on dry matter production of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1997, **8**(6): 575-579 (in Chinese)

[10] Li X-H (李晓航), Yang L-J (杨丽娟), Sheng K (盛坤), *et al.* Effects of different irrigation models on yield, distribution and transport of dry matter of wheat plant. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2015, **31**(30): 33-37 (in Chinese)

[11] Wang Y (王 焱), Bi J-J (毕建杰), Liu J-D (刘建栋). Effects of dry stress on dry-matter distribution of winter wheat. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2009, **37**(15): 7039-7042 (in Chinese)

[12] Hu J-C (胡继超), Jiang D (姜 东), Cao W-X (曹卫星), *et al.* Effect of short-term drought on leaf water potential, photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(1): 63-67 (in Chinese)

[13] Ji R-P (纪瑞鹏), Che Y-S (车宇胜), Zhu Y-N (朱永宁), *et al.* Impacts of drought stress on the growth and development and grain yield of spring maize in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应

- 用生态学报), 2012, **23**(11): 3021–3026 (in Chinese)
- [14] Ma S-Q (马树庆), Wang Q (王 琪), Chen F-T (陈凤涛), *et al.* Impact of spring maize seeding growth on yield and assessment models of production cut under background of spring drought. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2015, **31**(suppl.1): 171–179 (in Chinese)
- [15] Xu L-L (徐玲玲), Li H (李 昊), Wang J-L (王建林), *et al.* Response of specific leaf area of summer maize to water gradient in Hebei Gucheng. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(23): 8101–8106 (in Chinese)
- [16] Yao K-M (姚克敏), Zhong G-C (钟国长), Wu Y-H (吴义华), *et al.* Agricultural Meteorological Observation Specification. Beijing: China Meteorological Press, 1993 (in Chinese)
- [17] Wang R (王 锐), Li Y-F (李亚飞), Zhang L-J (张丽娟), *et al.* WOFOST model based on soil moisture driven and its adaptability. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2015, **36**(3): 263–271 (in Chinese)
- [18] Liu R-H (刘荣花), Xue C-Y (薛昌颖), Fang W-S (方文松), *et al.* Drought Grade of Summer Maize in Northern China. Beijing: China Meteorological Press, 2015: 2 (in Chinese)
- [19] Ma Y-P (马玉平), Sun L-L (孙琳丽), Ma X-Q (马晓群). Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang-Huai-Hai Plain. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2016, **34**(4): 85–93 (in Chinese)
- [20] Yan C-P (阎翠萍), Zhang H (张 虎), Wang J-J (王建军), *et al.* Study on law of biomass accumulation, distribution and transference of spring corn in the gully region. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2002, **10**(1): 67–71 (in Chinese)
- [21] Yang D-G (杨德光), Shen X-Y (沈秀瑛), Zhao T-H (赵天宏), *et al.* Research advances on physiological effects of corn drought. *Crops* (作物杂志), 2001(5): 1–4 (in Chinese)
- [22] Liu L (刘 浏). The influence of drought on the growth and yield of maize. *Agricultural Science & Technology and Equipment* (农业科技与装备), 2015(11): 6–7 (in Chinese)
- [23] Meng F-C (孟凡超), Liu M (刘 明), Yu J-L (于吉琳), *et al.* Effects of dry stress on corn yield and dry matter distribution. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2011, **39**(3): 96–98 (in Chinese)
- [24] Liu S-T (刘树堂), Dong X-W (东先旺), Sun C-H (孙朝辉), *et al.* Effect of dry stress on growth development and yield of summer corn. *Journal of Laiyang Agricultural College* (莱阳农学院学报), 2003, **20**(2): 98–100 (in Chinese)
- [25] Bai X-L (白向历), Sun S-X (孙世贤), Yang G-H (杨国航), *et al.* Effect of dry stress on maize yield during different growing stage. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2009, **17**(2): 60–63 (in Chinese)
- [26] Yang G-H (杨国虎), Li J-S (李建生), Luo X-N (罗湘宁), *et al.* Studies on leaf area change and aboveground dry material accumulation and distribution of maize in different droughts. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2005, **33**(5): 27–32 (in Chinese)
- [27] Yu Z-Q (于志青), Yu W-W (于卫卫), Tan X-S (谭秀山), *et al.* Effect of dry stress on dry matter partition of summer maize. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2009, **24**(Suppl.): 149–154 (in Chinese)
- [28] Hou W (侯 威), Duan J-Q (段居琦). National Climate Impact Assessment (2013). Beijing: China Meteorological Press, 2013 (in Chinese)
- [29] Hou W (侯 威), Huang D-P (黄大鹏). National Climate Impact Assessment (2014). Beijing: China Meteorological Press, 2014 (in Chinese)
- [30] Liao Y-M (廖要明), Zhong H-L (钟海玲). National Climate Impact Assessment (2015). Beijing: China Meteorological Press, 2015 (in Chinese)

作者简介 谭方颖, 女, 1982 年生, 硕士, 副研级高级工程师. 主要从事农业气象研究. E-mail: tanfangying0803@163.com

责任编辑 张凤丽