

不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应

宋明丹^{1,3}, 李正鹏^{1,3}, 冯浩^{1,2,3*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100)

摘要: 为了阐明灌水施氮对冬小麦干物质积累和产量形成的影响机制, 通过 2012—2014 年在关中平原进行的 3 个灌水水平、4 个施氮水平的田间试验, 采用 Richards 生长曲线对干物质积累过程进行拟合, 定量分析了干物质积累过程的动态特征和产量效应。结果表明灌越冬水和拔节水均能显著延长干物质积累的总时间, 使最大干物质量由雨养下的 10 831 提高到灌两水条件下的 13 813 kg/hm²。氮肥显著提高了干物质积累过程的平均速率和最大速率, 缩短了达到最大速率的时间, 使最大干物质量由 8 001 (不施氮) 提高到 14 112 kg/hm² (施氮 210 kg/hm²)。年份主要通过控制进入快速生长期和达到最大速率的时间来影响干物质量积累过程。灌水的产量效应年际变异较大, 在 2013 和 2014 年分别通过增加千粒质量和每平方米粒数来影响产量, 2013 年千粒质量由雨养下的 35.8 提高到灌两水下的 41.7 g, 2014 年每平方米粒数由雨养下的 13 833 增加到灌两水条件下的 15 749 粒/m²。氮肥主要是通过增加每平方米粒数来提高产量, 由不施氮下的 10 414 增大到施氮 210 kg/hm² 条件下的 15 911 粒/m², 继续增施氮肥对产量及产量构成要素影响不大。产量和每平方米粒数均与干物质积累过程的平均速率和最大速率呈显著正相关性, 表明在该研究地区小麦产量主要受氮肥限制。该研究为干旱半干旱地区合理调控水肥措施, 实现作物高产高效提供科学依据。

关键词: 水分; 氮; 作物; Richards 方程; 产量构成要素; 水肥互作

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.02.018

中图分类号: S512.1; S184

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-02-0119-08

宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 119—126.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.02.018 <http://www.tcsae.org>

Song Mingdan, Li Zhengpeng, Feng Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 119—126. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.02.018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

作物产量的形成是由干物质积累及分配所决定的, 干物质是产量形成的物质基础。气候、土壤、田间管理措施等自然和人为因素对作物产量的影响, 是通过影响作物的干物质积累过程来实现的。对于作物干物质积累过程的描述, 主要有两种方法: 一种是机理模型, 通过光合和呼吸作用的生理机制进行干物质量的模拟(解释性), 可移植性强, 但模型复杂, 参数变量较多; 另一种是经验模型, 通过统计回归进行干物质量的模拟(描述性), 简单易操作, 针对性和应用性强, 但其解释性较弱^[1]。

在描述干物质积累的经验模型中, Logistic^[2]和 Richards^[3]生长方程具有一定的生物学意义, 得到了广泛

的应用。王信理^[4]研究表明 Logistic 生长方程可以较好地描述干物质积累的动态过程。赵姣等^[5]、肖强等^[6]分别用 Logistic 方程描述了冬小麦、夏玉米的干物质累积过程, 并利用其推导的特征参数对累积过程进行了定量分析。有学者指出 Richards 方程比 Logistic 方程的可塑性强, 更适宜于描述作物生长的过程^[7]。李国强等^[8]、李艳大等^[9]、李向岭等^[10]分别用 Richards 方程描述了小麦、水稻、玉米的干物质积累动态, 并对其过程进行了定量分析。对于冬小麦干物质积累的定量描述, 目前主要集中在品种^[11]、密度^[8,11]、灌水^[12]和施氮^[8]等单因素影响分析上, 例如 Villegas 等^[12]分析了雨养和灌溉条件下的干物质积累过程, 赵姣等^[5]和李国强等^[8]分析了不同施氮量条件下的干物质积累过程。

作物的生长过程受多种因素影响, 其中水分和氮素是影响作物生长及产量的两个主要限制因子^[13]。关中平原是陕西省主要的粮食产区, 其中小麦产量占了全省的 80% 以上。关中平原属于半湿润易旱区, 大部分降水分布于 7—9 月, 小麦生长季(10 月—次年 5 月)降水相对较少, 降水的分布不均加剧了干旱对小麦生长的影响。氮素是小麦叶绿素和籽粒蛋白质的重要组成元素, 通过施用氮肥能弥补土壤中可利用矿质氮的不足, 但过量的氮肥投入则会污染空气、水体和土壤, 引发一系列的环境问题^[14]。在整个小麦生产系统中, 水分的缺乏会抑制小

收稿日期: 2015-11-01 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102904); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306-1); 高等学校学科创新引智计划(111 计划)资助项目(B12007)

作者简介: 宋明丹, 女, 河北衡水人, 博士生, 主要研究方向为农业生态系统模拟研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: mingdan86@sina.com

*通信作者: 冯浩, 男, 陕西延安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土资源高效利用研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: nercwsi@vip.sina.com

麦对氮素的吸收, 而氮素的缺乏会造成植株营养不良, 反过来影响水分的利用从而导致减产, 水分和氮肥在作物生长过程中既相互促进又相互制约^[15-16]。干物质积累是一个随时间变化的连续过程, 其与产量形成密切相关, 而且干物质积累在不同年份和研究地点间差异较大, 目前在从干物质积累与产量关系的角度分析水肥因子对陕西关中平原地区小麦生长过程和产量影响的研究较少。因此本研究通过设置不同灌水施氮的田间试验, 采用 Richards 模型对冬小麦的干物质积累过程进行拟合, 根据推导出的特征量对小麦的生长过程进行定量分析, 同时分析产量及产量构成要素与干物质积累过程的关系, 阐明水氮管理对干物质积累和产量形成的影响机制, 为合理调控水肥措施, 实现作物高产高效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及试验设计

本试验于 2012—2014 年在陕西杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站 (108°05'E, 34°24'N) 内进行。该区小麦生长季为 10 月一次年 6 月, 生长季内的月平均最高温为 15.7℃, 月平均最低温为 5.3℃, 小麦生长季内太阳总辐射量 3 206 MJ, 降水量 296 mm。试验地土壤为壤土, 土壤中砂粉黏粒比例为 8:74:18。试验前 0~20 cm 耕层含有机质 11.17 g/kg、全氮 0.95 g/kg、速效磷 13.67 mg/kg 和速效钾 183.20 mg/kg。

本试验采用裂区试验设计, 灌水为主区, 施氮为副区, 小区长 6 m 宽 3 m, 设置三次重复。其中灌水处理设置 3 个水平: I0 (完全雨养)、I1 (拔节期灌水 46 mm)、I2 (分别在越冬期和拔节期灌水 46 mm)。施氮设置 4 个水平: N0 (不施氮)、N1 (施氮 105 kg/hm²)、N2 (施氮 210 kg/hm²)、N3 (施氮 315 kg/hm²)。所有氮肥按基追比 7:3 施入土壤, 追肥在拔节期进行, 基肥为磷酸二铵, 追肥为尿素。所有小区施入足量的磷肥和钾肥。小麦品种为当地主栽品种小偃 22, 10 月中上旬播种, 行距 20 cm, 播量为 112.5 kg/hm²。在作物生长阶段及时除草, 防治病虫害, 其他栽培管理措施与当地习惯一致。

1.2 测定项目及方法

在 2012—2013 年和 2013—2014 年小麦生长期, 在分蘖期、越冬期、返青期、拔节开始、拔节中期、抽穗、灌浆开始、灌浆中后期、收获期共 9 个时期在每个小区选取有代表性的 10 株小麦, 在 105℃ 下杀青 30 min, 后在 70℃ 下烘干至质量不变, 计算各时期小麦地上部生物量。下文中提到的 2013 年小麦均指 2012—2013 年, 2014 年小麦均指 2013—2014 年。

所用的逐日气象数据来自于距试验地 100m 的杨凌气象观测站。每个采样时期的积温为

$$GDD_i = \sum_{k=1}^i [(TMIN_k + TMAX_k) / 2 - T_b] \quad (1)$$

式中 i 为小麦播后天数, $TMIN$, $TMAX$ 分别为日最高温和日最低温, T_b 为小麦生长的最低温度。

小麦生长的最低温度在不同品种、不同组织器官, 甚至是不同的生长阶段都存在变异^[17]。Porter 和 Gawith^[18] 结合前人的研究成果汇总分析了温度对小麦生长和发育的影响, 结果表明植株生长的最低温度在 0~5℃ 之间变化。本研究参考 Wang 等^[19]和 Johnen 等^[20], 将小麦生长的最低温度 T_b 设为 0℃。

在成熟期收获小区中间 1 m² 小麦, 测定穗数和实际产量, 从 1 m² 小麦中取出 5 株子样进行考种, 测定千粒质量和每穗粒数, 计算理论产量。本研究中产量采用理论产量。

1.3 Richards 方程简介

Richards 方程是一个四参数的非线性方程, 包括了一系列的 S 形曲线。本研究中自变量为积温, 因变量为干物质质量, 方程的基本形式为

$$Y = A / (1 + e^{-bx})^{1/d} \quad (2)$$

式中 A 、 b 、 c 、 d 均为参数, 其中 A 为干物质积累上限。对方程 (2) 求导得到干物质积累的速率方程 (growth rate, GR) 为

$$GR = \frac{dY}{dx} = \frac{Ace^{-bx}}{d(e^{-bx} + 1)^{(d+1)/d}} = \frac{Yc(1 - (Y/A)^d)}{d} \quad (3)$$

根据干物质积累速率方程, 可以推导出干物质积累过程的一些特征量, 对公式 (3) 求导并令其等于零, 可以求得达到最大生长速率时的积温, 记做

$$x_{inf} = (b - \ln d) / c \quad (4)$$

同时求得最大生长速率为

$$GR_{max} = Ac(d+1)^{-(1+1/d)} \quad (5)$$

对公式 (3) 在干物质在区间 0 到 A 上积分再平均即可得到平均生长速率

$$GR_{avg} = Ac / (2d + 4) \quad (6)$$

Darroch 和 Baker^[21]指出当干物质质量达到最大生物量的 95%, 即 0.95A 时认为生长停止, 解方程得到生长停止时的积温

$$x_{max} = (b - \ln(0.95^d - 1)) / c \quad (7)$$

对公式 (3) 求二阶导令其等于零, 可以求得干物质进入快速生长期的积温为

$$x_1 = \ln\left(\frac{3e^b - e^b \sqrt{d^2 + 6d + 5} + de^b}{2d}\right) / c \quad (8)$$

1.4 数据统计分析

本研究中获得的不同时期冬小麦的生长积温和干物质质量数据采用 Curve Expert 1.3 软件进行 Richards 曲线拟合, 然后利用 matlab7.0 软件求解曲线的特征量 x_{inf} 、 GR_{max} 、 GR_{avg} 、 x_{max} 、 x_1 。Keuls 和 Garretsen^[22]指出由函数方程推导出的特征量进行方差分析时, 考虑参数间相关性的多变量方差分析 (multivariate analysis of variance, MANOVA) 更适合。产量和产量构成要素的方差分析采用 ANOVA (analysis of variance) 方法, 多重比较均采用 LSD (least significant difference) 法。统计分析过程采用 SPSS20.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 水氮管理对小麦干物质积累动态过程的影响

用 Richards 曲线拟合的决定系数均在 0.98 以上，表明此方程可以准确地描述干物质随积温的变化过程。由表 1 可以看出无论采用 ANOVA 还是 MANOVA，灌水和施氮的交互作用对各参数均没有显著影响，而且参数 b 、 c 不受灌水、施氮、年份的影响。在 ANOVA 分析中，灌水、施氮、年份影响显著的参数，在 MANOVA 分析下

也显著，而且 P 值更低，表明在未考虑参数相关性的条件下处理因素的效力被低估。MANOVA 分析表明灌水显著影响参数 A 、 x_{\max} ，说明灌水主要通过影响干物质质量积累的总时间来影响最终的干物质质量。施氮显著影响参数 A 、 x_{\inf} 、 GR_{\max} 、 GR_{avg} ，施氮主要通过影响干物质积累速率和控制达到最大生长速率的时间来影响最终的干物质质量。年份显著影响了参数 d 、 x_{\inf} 、 x_1 ，表明年份主要通过影响进入快速生长期和达到最大生长速率的时间来影响最终的干物质质量。

表 1 冬小麦干物质积累的 Richard 曲线参数和特征量的方差分析 (P 值)

Table 1 Significant levels (P -value) of effect of irrigation, nitrogen and years on fitting parameters and derived characteristic parameters from Richards function describing biomass accumulation by ANOVA and MANOVA method

参数 Parameters	灌水 Irrigation		施氮 Nitrogen		年 Year		灌水*施氮 Irrigation * nitrogen	
	ANOVA	MANOVA	ANOVA	MANOVA	ANOVA	MANOVA	ANOVA	MANOVA
A	0.044	2.75E-04	0.008	8.45E-07	NS	NS	NS	NS
b	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
c	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
d	NS	NS	NS	NS	NS	0.032	NS	NS
x_{\inf}	NS	NS	NS	0.047	NS	0.001	NS	NS
GR_{\max}	NS	NS	0.011	0.001	NS	NS	NS	NS
GR_{avg}	NS	NS	0.007	4.71E-04	NS	NS	NS	NS
x_{\max}	NS	0.041	NS	NS	NS	NS	NS	NS
x_1	NS	NS	NS	NS	NS	0.001	NS	NS

注： A 、 b 、 c 、 d 均为 Richards 方程的拟合参数； x_1 、 x_{\inf} 、 x_{\max} ，分别为干物质进入快速生长期、达到最大生长速率、停止生长所需的积温； GR_{\max} 、 GR_{avg} 分别为干物质积累的最大和平均生长速率。NS 表示在 0.05 水平上差异不显著，下同。

Note: A , b , c , d , fitting parameters of Richards function; x_1 , x_{\inf} , x_{\max} , thermal time required from sowing to rapid growth stage, maximum growth rate and terminal growth stage; GR_{\max} , GR_{avg} , the maximum and average growth rate of biomass accumulation; NS, Non-significant of difference at 0.05 levels, the same below.

灌水水平、施氮水平和年份之间的多重比较结果见表 2。在 I0、I1 和 I2 灌水水平下生长停止时所需的积温分别为 1 604、1 761 和 1 936 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ，小麦最大干物质质量分别为 10 831、11 977 和 13 812 kg/hm^2 。这表明灌越冬水和拔节水均能显著延长小麦干物质质量积累的时间，从而提高干物质质量。由图 1a 可以看出灌越冬水和拔节水 (I2) 处理下的干物质质量在整个生长过程中都明显大于另外两个灌水处理，灌拔节水 (I1) 处理在生长后期才明显大于不灌水 (I0) 处理，表明灌水对干物质积累的影响与灌水时间有明显关系。

在 N0、N1、N2 和 N3 水平下干物质积累上限分别为 8 001、12 635、14 112 和 14 078 kg/hm^2 其中 N2 和 N3

没有显著差异。达到最大积累速率所需的积温，仅 N1 (1 292 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$) 与 N2 (1175 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$) 有显著差异，这表明在适量的氮素 (210 kg/hm^2) 供应下小麦可以较快达到干物质积累的最大速率。在 4 个施氮水平下干物质积累的最大速率分别为 9.26 (N0)、17.15 (N1)、17.13 (N2) 和 17.40 (N3) $\text{kg}/^{\circ}\text{C}$ ，平均速率分别为 6.01、10.95、11.35 和 11.29 $\text{kg}/^{\circ}\text{C}$ ，其中 N1、N2、N3 水平下均没有显著差异，表明在本试验条件下施氮 105 kg/hm^2 就可以达到较高的干物质积累速率 (表 2)。由图 1b 可以看出施氮影响了干物质积累的整个生长过程，其中 N2 与 N3 生长曲线几乎重合，表明在本研究中施氮 210 kg/hm^2 及以上，干物质质量的积累不再发生显著变化。

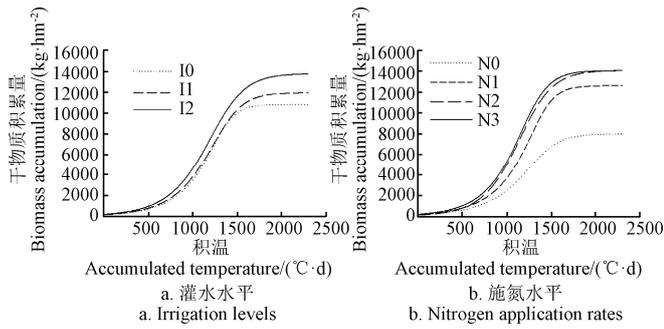
表 2 不同灌水、施氮水平和年份下干物质积累曲线参数和特征量

Table 2 Fitting parameters and characteristic parameters describing biomass accumulation process under different irrigation and nitrogen regimes

因素 Factors	水平 Levels	曲线参数 Fitting parameters				特征参数 Characteristic parameters				
		A	b	c	d	x_{\inf}	GR_{\max}	GR_{avg}	x_{\max}	x_1
灌水 Irrigation	I0	10 831c	11.90	0.00890	2.69	1 240	15.78	10.09	1 604c	1 032
	I1	11 977b	8.58	0.00644	1.96	1 237	14.67	9.61	1 761b	980
	I2	13 812a	6.98	0.00541	1.60	1 250	15.27	9.99	1 936a	948
施氮 Nitrogen	N0	8 001c	9.08	0.00656	2.21	1 285ab	9.26b	6.01b	1 840	1 020
	N1	12 635b	12.06	0.00863	2.77	1 292a	17.15a	10.95a	1 703	1 070
	N2	14 112a	6.73	0.00558	1.36	1 175b	17.13a	11.35a	1 749	901
	N3	14 078a	8.73	0.00691	1.99	1 216ab	17.40a	11.29a	1 774	956
年份 Year	2013	11 897	7.46	0.00631	1.41b	1 179b	15.34	10.09	1 785	913b
	2014	12 516	10.85	0.00752	2.76a	1 305a	15.14	9.71	1 749	1 060a

注：I0、I1、I2 分别为不灌水、灌拔节水 46mm、灌越冬水和拔节水各 46mm；N0、N1、N2、N3 分别表示施氮 0、105、210、315 kg/hm^2 ；同一列中不同字母表示在 0.05 水平下有显著差异；下同。

Note: I0, I1, I2 represents rainfed, irrigated 46 mm at jointing stage, irrigated 46mm at wintering and jointing, respectively; N0, N1, N2, N3 represents applied nitrogen rate 0, 105, 210 and 315 kg/hm^2 ; Different letters within a column indicate significant differences at $P=0.05$ level; same as below.



注: I0、I1、I2 分别为不灌水、灌拔节水 46mm、灌越冬水和拔节水各 46mm; N0、N1、N2、N3 分别表示施氮 0、105、210、315 kg hm⁻²。
Note: I0, I1, I2 represents rainfed, irrigated 46 mm at jointing, irrigated 46 mm at wintering and jointing, respectively; N0, N1, N2, N3 represents applied nitrogen rate 0, 105, 210 and 315 kg hm⁻².

图 1 不同灌水水平和施氮水平下的干物质积累曲线

Fig.1 Biomass accumulation curves according to accumulated temperature with different irrigation amount and different nitrogen application

在 2013 和 2014 年条件下达到最大积累速率所需的积温分别为 1 179 和 1 305 °C·d, 进入快速生长期所需积温分别为 913 和 1 060 °C·d (表 2, 图 2a)。由图 2b 可知 2013 季小麦前期雨水较充足, 11 月份降水 106 mm, 为第 2 年小麦返青后的生长创造了适宜的水分条件, 使 2013 年进入快速生长期的时间提前。2014 年 4 月份的总降水比 2013 年相应时期多 156.4 mm, 使得 2014 年小麦干物质质量积累在后期超过了 2013 年。2013 和 2014 年最大干物质积累量分别为 11 897 和 12 516 kg/hm², 差异不显著。

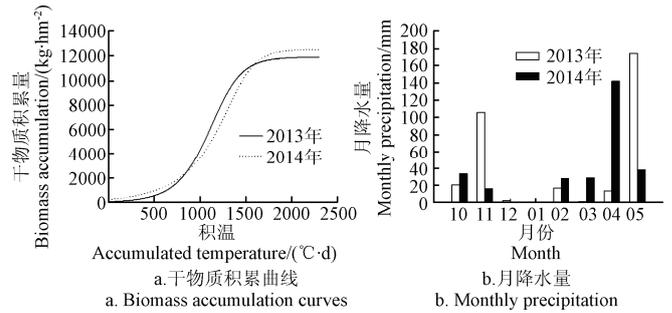


图 2 2013 年和 2014 年冬小麦干物质质量累积曲线和月降水量分布
Fig.2 Biomass accumulation curves according to accumulated temperature and monthly precipitation distribution in 2013 and 2014 year

2.2 水氮管理对小麦产量及产量构成因素的影响

灌水、施氮对干物质积累过程的影响, 必然影响后期产量的形成。产量和产量构成要素的方差分析见表 3。产量均随着灌水次数的增加而增大, 不同灌水水平下, 2014 年小麦产量均比 2013 年要高。这可能是由于 2014 年 3—4 月份降水较多 (图 2b), 此时正是小麦的需水关键期, 充沛的雨水有利于小麦快速生长, 使得 2014 年各灌水水平下产量均较高, 同时, 大量的降水使得 2014 年灌水的产量效应不显著。灌水对产量构成要素的影响在两年表现不同, 在 2013 年灌水对千粒质量影响显著, 由不灌水条件下的 35.8 g 增加到灌两水条件下的 41.7 g, 而 2014 年灌水对千粒质量影响不显著, 各灌水水平下千粒质量均较高。对每平方米粒数, 2014 年灌水对其影响显著, 由 13 833 增加到 15 749 粒, 而 2013 年灌水对其影响不显著。

表 3 2013 和 2014 年小麦产量和产量构成要素的方差分析
Table 3 Variance analysis of yield and yield components in 2013 and 2014 year

因素 Factors	水平 Levels	2013 年			2014 年		
		理论产量 Yield/(t·hm ⁻²)	粒数 Grain number/(No. m ⁻²)	千粒质量 1 000-grain weight/g	理论产量 Yield/(t·hm ⁻²)	粒数 Grain number/(No. m ⁻²)	千粒质量 1000-grain weight/g
灌溉 Irrigation	I0	4.74b	13 322	35.8b	5.98	13 833b	42.8
	I1	5.75a	13 783	39.6a	6.34	14 742ab	43.2
	I2	6.29a	16 132	41.7a	6.94	15 749a	43.8
施氮 Nitrogen	N0	4.30c	10 574c	36.8	4.54b	10 254b	41.5
	N1	5.73b	14 079b	39.4	7.00a	15 988a	43.7
	N2	6.61a	15 554ab	40.1	7.30a	16 268a	44.2
	N3	6.66a	17 442a	40.5	7.55a	16 590a	44.4
灌溉 Irrigation		0.001**	0.06	0.000**	0.062	0.048*	0.787
施氮 Nitrogen		0.000**	0.002**	0.190	0.000**	0.000**	0.609
灌溉*施氮 Irr.*Nit.		0.675	0.790	0.518	0.721	0.452	0.793

注: **分别表示在 0.05、0.01 水平上相关性显著。
Note: *, **represents significant at the 0.05, 0.01 probability levels, respectively.

氮肥对产量和产量构成要素的影响在两年表现一致, 均对产量和每平方米粒数影响显著, 而对千粒质量影响不显著。产量、每平方米粒数均随着施氮量的增加而增大, 综合两年结果, 产量由不施氮条件下的 4.42 t/hm² 提高到施氮 210 kg/hm² 下的 6.91 t/hm², 每平方米粒数由 10 414 提高到 15 911 粒/m², 继续增施氮肥对产量和每平

方米粒数均没有显著影响, 表明施氮 210 kg/hm² 在该地区已经能够满足作物的生长需求, 达到较高的生产效益。灌水和施氮的交互作用在两年试验条件下对产量和产量构成要素均没有显著影响。

2.3 干物质积累与产量及产量构成要素的关系

由表 4 可以看出, 产量、每平方米粒数与干物质积

累速度 (GR_{max} 和 GR_{avg}) 呈显著正相关, 与干物质积累的阶段积温 (x_{inf} 、 x_{max} 和 x_1) 相关性不大, 而千粒质量与进入快速生长期所需的积温 (x_1) 呈显著正相关。产量与每平方米粒数在 0.01 水平上显著正相关, 与千粒质量在 0.05 水平上显著正相关, 每平方米粒数和千

粒质量之间的相关性不显著, 表明产量很大程度上决定于每平方米粒数。干物质积累速率通过影响每平方米粒数来影响最终产量形成。而干物质积累速率又主要受氮肥影响, 表明在该研究地区氮素供应是小麦产量提高的限制因素。

表 4 Richards 特征参数与产量的皮尔森相关

Table 4 Pearson correlation coefficients between yield components and characteristic parameters from Richards function

	x_{inf}	GR_{max}	GR_{avg}	x_{max}	x_1	粒数	千粒质量
产量 Yield	-0.069	0.630**	0.667**	0.146	-0.160	0.920**	0.483*
粒数 Grain number	-0.262	0.696**	0.739**	0.174	-0.311	-	0.11
千粒质量 1000-grain weight	0.438**	-0.019	-0.024	0.086	0.274	-	-

3 讨论

3.1 水分对冬小麦干物质积累和产量的影响

水分是维持生命活动的必要物质, 作物生长所需的水分来源于自然降水、土壤底墒和补充灌水这 3 个途径, 补充灌水能在一定程度上缓解干旱对作物生长产生的不利影响, 延长叶片的持绿时间, 增加干物质积累量和产量。大量研究表明灌水可使作物的叶绿素含量下降速度变慢^[23-24], 增加叶片中的超氧化物歧化酶和过氧化氢酶含量^[25], 使叶片功能性时间延长, 本研究也证明了这一点。灌水显著延长了干物质积累的总时间 (x_{max}), 提高了最终的干物质质量。Villegas 等^[12]和赵姣等^[5]的结果表明灌水能显著缩短进入快速生长 (x_1) 和达到最大速率的时间 (x_{inf}), 而在本研究中灌水对其影响不显著, 而年份对其影响显著。究其原因可能是: 1) 小麦生长早期降水较多抵消了越冬灌水效应。例如 2013 季 11 月份降水较多 (图 2b), 为小麦返青生长创造了适宜的条件, 缩短了达到 x_{inf} 和 x_1 的时间 (表 2); 2) 越冬灌水量太小, 致使灌水效应不明显。例如 2014 季小麦生长前期干旱, 越冬灌水 46 mm 并未对干物质积累产生显著影响, 致使 2014 季小麦的 x_{inf} 和 x_1 值均显著大于 2013 季。综上, 小麦生长早期降水较多和越冬灌水水平较低导致灌水处理对 x_{inf} 和 x_1 没有显著影响, 而年份对其影响显著。Villegas 等^[12]的研究表明灌水对干物质积累的平均速率 (GR_{avg}) 有显著影响, 而本研究中灌水和年份对该指标均无显著影响, 这可能和两年总降水量较多有关。Shimshi^[26]指出当降水量大于 200 mm 时, 小麦生长主要受氮素供应的限制, 试验年份小麦季降水分别为 334.3 和 286.8 mm, 均属于丰水年型, 导致补充灌水对 GR_{avg} 影响不显著。灌水对产量构成要素的影响在两年表现不同, 2013 季灌水对千粒质量影响显著^[27-29], 对每平方米粒数影响不显著。这可能是由于上一年 11 月份降水较多, 在粒数的决定期 (返青期) 水分充足, 致使不同灌水处理下每平方米粒数没有显著差异; 而 4 月份 (孕穗-开花期) 降水较少, 灌水显著影响了小麦的灌浆过程, 使不同灌水处理的千粒质量有显著差异。2014 季降水分布与其相反, 导致不同灌水处理每平方米粒数有显著差异, 而千粒质量无显著差异。

3.2 氮肥对冬小麦干物质积累和产量的影响

氮素是小麦叶绿素的重要组成元素, 氮素的供应直接影响了小麦光合产物的形成, 作物的氮素主要来源于土壤氮的矿化和氮肥投入。本研究中氮肥能显著提高干物质积累的最大速率 (GR_{max}) 和平均速率 (GR_{avg}), 缩短达到最大生长速率的时间 (x_{inf}), 这与李国强^[8]的研究结果一致。而赵姣^[5]的结果表明总施氮量与干物质积累速率的相关性不显著, 这可能与其试验地点的初始肥力和氮肥的水平设置较高有关。本研究中氮肥对产量构成要素的影响在两年表现一致, 均显著提高了每平方米粒数, 对千粒质量影响不显著, 这与赵雪飞等^[27]、吴立峰^[28]和 Karam 等^[29]的研究结果一致。土壤氮素供应能力有限, 所以外源氮肥投入对整个小麦的生长都产生显著的影响, 氮肥同时显著提高了粒数 (库) 和干物质质量 (源) 的大小, 但干物质分配到每个籽粒中的质量不一定增大, 导致氮肥对千粒质量影响不显著。

3.3 水肥交互作用对冬小麦干物质积累和产量的影响

水肥之间存在交互作用已经成为一个不争的事实, 其主要与土壤水分状况、灌水水平、肥料用量、土壤肥力和作物的需水需肥规律有关^[30]。由于大田试验中补充灌水量对作物的影响受土壤底墒和生育期降水的影响, 致使在不同地区不同年份条件下灌水施氮的交互作用表现不一^[31]。例如, 王丹等^[32]采用逐步回归的方法表明灌水施氮的交互项在回归模型中显著。而张玉铭等^[33]采用同样的方法表明灌水施氮交互项在回归模型中不显著。李玉山^[34]采用方差分析方法表明灌水和施氮的交互作用对冬小麦的产量影响不显著。本研究结果表明灌水施氮的交互作用对干物质积累过程和产量及产量构成要素的影响均不显著, 这可能是由于试验年份降水较充沛, 灌水水平间差异较小所导致。

4 结论

本研究主要探讨了在关中平原的气候土壤条件下灌水施氮对冬小麦干物质积累过程和产量的影响。所得主要结论如下:

1) 灌越冬水和拔节水均能显著延长小麦干物质质量积累的时间, 使小麦干物质质量由不灌水条件下的 10 831 提高到灌两水条件下的 13 813 kg/hm²。灌水的产量效应受

年内降水分布的影响, 在 2013 和 2014 季灌水分别通过增加千粒质量和每平方米粒数来提高产量。年份主要通过影响达到最大生长速率和进入快速生长期的时间来影响冬小麦干物质积累过程。

2) 施氮能显著提高干物质积累的最大速率和平均速率, 缩短达到最大生长速率的时间。施氮在 $0\sim 105\text{ kg/hm}^2$ 时, 干物质积累的平均速率由 6.01 提高到 $9.26\text{ kg/}^\circ\text{C}$, 最大速率由 10.95 提高到 $17.15\text{ kg/}^\circ\text{C}$, 继续施氮到 210 kg/hm^2 , 积累速率不再发生明显变化, 但达到最大生长速率的时间明显提前。在施氮 $0\sim 210\text{ kg/hm}^2$ 范围内, 最大干物质质量和产量均随着施氮量的增加而增大, 施氮主要通过增加每平方米粒数来提高产量。在该地区施氮 210 kg/hm^2 冬小麦可以获得较高的干物质质量和产量。

3) 产量、每平方米粒数均与干物质积累过程的平均和最大速率呈显著正相关, 表明在该研究地区氮肥供应状况是限制小麦产量提升的主要因素。

本研究所得到的结论基于 2 年的大田试验, 需要进一步加强在多年多站点的验证。

[参 考 文 献]

- [1] Whisler F, Acock B, Baker D, et al. Crop simulation-models in agronomic systems[J]. *Advances in Agronomy*, 1986, 40(1): 141—208.
- [2] Royo C, Blanco R. Growth analysis of five spring and five winter triticale genotypes[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(2): 305—311.
- [3] Richards F. A flexible growth function for empirical use [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1959, 10(2): 290—301.
- [4] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. *中国农业气象*, 1986, 7(1): 14—19.
Wang Xinli. How to use logistic equation in dynamic simulation of dry matter production[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1986, 7(1): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵姣, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 300—308.
Zhao Jiao, Zheng Zhifang, Fang Yanru, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 300—308. (in Chinese with English abstract)
- [6] 肖强, 闫连波, 朱欣宇, 等. 夏玉米植株干物质、氮磷钾养分积累速度和时间的动态分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 606—612.
Xiao Qiang, Yan Lianbo, Zhu Xinyu, et al. Dynamic analysis of dry matter and NPK accumulation with time in summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 606—612. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邢黎峰, 孙明高, 王元军. 生物生长的 Richards 模型[J]. *生物数学学报*, 1998, 13(3): 348—353.
Xing Lifeng, Sun Minggao, Wang Yuanjun. Richards growth model of living-organism[J]. *Journal of Biomathematics*, 1998, 13(3): 348—353. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李国强, 汤亮, 张文宇, 等. 不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J]. *作物学报*, 2009, 35(12): 2258—2265.
Li Guoqiang, Tang Liang, Zhang Wenyu, et al. Dynamic analysis on response of dry matter accumulation and partitioning to nitrogen fertilizer in wheat cultivars with different plant types[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(12): 2258—2265. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李艳大, 汤亮, 陈青春, 等. 水稻地上部干物质积累动态的定量模拟[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1504—1510.
Li Yanda, Tang liang, Chen Qingchun, et al. Dry matter accumulation in rice aboveground part: Quantitative simulation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1504—1510. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李向岭, 赵明, 李从锋, 等. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立[J]. *作物学报*, 2010, 36(12): 2143—2153.
Li Xiangling, Zhao Ming, Li Congfeng, et al. Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(12): 2143—2153. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘娟, 熊淑萍, 杨阳, 等. 基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5512—5520.
Liu Juan, Xiong Shuping, Yang Yang, et al. A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5512—5520. (in Chinese with English abstract)
- [12] Villegas D, Aparicio N, Blanco R, et al. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under Mediterranean conditions[J]. *Annals of Botany*, 2001, 88(4): 617—627.
- [13] 吕丽华, 董志强, 张经廷, 等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3839—3849.
Lü Lihua, Dong Zhiqiang, Zhang Jingting, et al. Effect of water and nitrogen on yield and nitrogen utilization of winter wheat and summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19): 3839—3849. (in Chinese with English abstract)
- [14] Andraski T W, Bundy L G, Brye K R. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(4): 1095—1103.
- [15] 付秋萍. 黄土高原冬小麦水氮高效利用及优化耦合研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
Fu Qiuping. Study of Water and Fertilizer Efficient Utilization and Coupling on Winter Wheat of the Loess Plateau[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese with English abstract)

- [16] 高亚军, 郑险峰, 李世清, 等. 农田秸秆覆盖条件下冬小麦增产的水氮条件[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 55—59.
Gao Yajun, Zheng Xianfeng, Li Shiqing, et al. Requirements of water and nitrogenous fertilizer to increase winter wheat yield under straw mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 55—59. (in Chinese with English abstract)
- [17] McMaster G S, Wilhelm W W. Growing degree-days: one equation, two interpretations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(4): 291—300.
- [18] Porter J R, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 10(1): 23—36.
- [19] Wang Xiangxiang, Wang Quanjiu, Fan Jun, et al. Logistic model analysis of winter wheat growth on China's Loess Plateau[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2014, 94(8): 1471—1479.
- [20] Johnen T, Boettcher U, Kage H. A variable thermal time of the double ridge to flag leaf emergence phase improves the predictive quality of a CERES-Wheat type phenology model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 89: 62—69.
- [21] Darroch B A and Baker R J. Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis[J]. Crop Science, 1990, 30(3): 525—529.
- [22] Keuls M and Frida Garretsen. Statistical analysis of growth curves in plant breeding[J]. Euphytica, 1982, 31(1): 51—64.
- [23] 惠海滨, 刘义国, 刘家斌, 等. 灌水量和灌水期对超高产小麦花后旗叶衰老及产量的影响[J]. 农学学报, 2012, 2(5): 17—23.
Hui Haibin, Liu Yiguo, Liu Jiabin, et al. Effects of irrigation amount and stage on the flag leaf senescence and yield of super-high-yield wheat after anthesis[J]. Journal of Agriculture, 2012, 2(5): 17—23. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郝树荣, 郭相平, 王文娟. 不同时期水分胁迫对玉米生长的后效性影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 71—75.
Hao Shurong, Guo Xiangping, Wang Wenjuan. After effects of water stress on corn growth at different stages[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [25] Wang Dong, Yu Zhenwen, White P J. The effect of supplemental irrigation after jointing on leaf senescence and grain filling in wheat[J]. Field Crops Research, 2013, 151: 35—44.
- [26] Shimshi D. The effect of nitrogen supply on some indices of plant-water relations of beans (*phaseolus vulgaris L.*)[J]. New Phytologist, 1970, 69(2): 413—424.
- [27] 赵雪飞, 王丽金, 李瑞奇, 等. 不同灌水次数和施氮量对冬小麦群体动态和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(6): 1004—1009.
Zhao Xuefei, Wang Lijin, Li Ruiqi, et al. Effect of irrigation times and nitrogen application rate on population dynamics and grain yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(6): 1004—1009. (in Chinese with English abstract)
- [28] 吴立峰. 不同灌水和施氮对河西地区春小麦生长和水分利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
Wu Lifeng. Effects of Different Irrigation and Nitrogen Application on Growth and Water Utilization of Spring Wheat in Hexi Oasis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [29] Karam F, Kabalan R, Breidi J, et al. Yield and water-production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(4): 603—615.
- [30] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 220—224.
Yu Yajun, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Research progress of water and fertilizer coupling on dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(3): 220—224. (in Chinese with English abstract)
- [31] 高亚军, 李生秀. 北方旱区农田水肥效应分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(7): 74—79.
Gao Yajun, Li Shengxiu. Analysis of the effect of water and fertilizer on crop production In farmland of arid zone in northern china[J]. Engineering Science, 2002, 4(7): 74—79. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王丹, 李玉中, 李巧珍, 等. 不同水肥组合对冬小麦产量的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 28—31.
Wang Dan, Li Yuzhong, Li Qiaozhen, et al. Effect of combined treatment of fertilizer and water on winter wheat yield[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 水肥耦合对华北高产农区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 532—539.
Zhang Yuming, Zhang Jiabao, Hu Chunsheng, et al. Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 532—539. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李玉山, 张孝中, 郭民航. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 1—7.
Li Yushan, Zhang Xiaozhong, Guo Minhang. The field experiments on the field-response of crops to water and fertility in the south of the loess plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 1990, 27(1): 1—7. (in Chinese with English abstract)

Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat

Song Mingdan^{1,3}, Li Zhengpeng^{1,3}, Feng Hao^{1,2,3*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Wheat yield formation is mainly dependent on dry matter accumulation, which is influenced by irrigation and nitrogen input. It will be very helpful for improving yield to understand how irrigation and nitrogen affect wheat dry matter accumulation. Field experiments over 2 years with three-level irrigation and four-level nitrogen input for winter wheat were conducted during 2012-2014 in Guanzhong Plain located in Shaanxi Province, China. Dry matter accumulation with growing degree day was fitted by Richards function, and 5 derived characteristic parameters were analyzed using the univariate analysis of variance (ANOVA) and the multivariate analysis of variance (MANOVA), the result of which was more appropriate when there were significant correlations among dependent variables. None of the 5 derived characteristic parameters of dry matter accumulation was significantly influenced by the interaction of irrigation and nitrogen fertilization. None of irrigation, nitrogen and year had a significant effect on the function parameter *b* and *c*. Irrigation significantly prolonged the thermal time required for the entire dry matter accumulation process and then led to an increase of dry matter at maturity from 10 831 kg/hm² under rainfed condition to 13 813 kg/hm² with irrigation at wintering and jointing stages. Nitrogen fertilization significantly enhanced the average and maximum rate of dry matter accumulation, and shortened the thermal time achieving the maximum rate of dry matter accumulation since sowing. Dry matter at maturity significantly increased from 8 001 to 14 112 kg/hm² under the nitrogen input from 0 to 210 kg/hm² in this study. No more dry matter was gained from more nitrogen input. Weather conditions over 2 years had a significant effect on the thermal time entering the rapid growth stage and achieving the maximum growth rate since sowing, but had no significant effect on the maximum of dry matter. The effect of irrigation on yield and yield components varied with weather conditions in study period. Irrigation significantly increased the yield and the weight of 1 000 grains in 2012-2013, however, it had no significant effect on those in 2013-2014. The weight of 1 000 grains evolved from 35.8 under rainfed condition to 41.7 g with irrigation at wintering and jointing in 2012-2013, which resulted that the corresponding yield increased from 4.74 to 6.29 t/hm². In 2013-2014, irrigation significantly enhanced the grain number per square meter from 13 833 under rainfed to 15 749 with irrigation at winter and jointing. Yield and grain number per square meter were significantly influenced by nitrogen, while nitrogen had no effect on the weight of 1 000 grains over 2 years. Grain number per square meter increased from 10 414 to 15 911 as nitrogen input increased from 0 to 210 kg/hm², which contributed to the corresponding increase of yield from 4.42 to 6.96 t/hm². No more yield and grain number were gained from more nitrogen input, which indicated the nitrogen rate of 210 kg/hm² would be sufficient for wheat growth and yield formation. The interaction of irrigation and nitrogen had no effect on yield and yield components during 2012-2014. The yield had a higher correlation with grain number per square meter than with the weight of 1 000 grains, which indicated that yield was largely determined by grain number. Both of yield and grain number per square meter had a strong correlation with the average and maximum rate of dry matter accumulation, which indicated improving the rate of dry matter accumulation would be a promising measure to raise yield in the future. This also indicated that nitrogen was the limited factor to wheat grain yield improvement in this study area. The results obtained in this research provide scientific basis and valuable information for selecting the optimum irrigation and nitrogen regimes in semi-arid regions of China.

Keywords: water content; nitrogen; crops; Richards function; yield components; interaction of water and nitrogen