

黄土塬区降水变化对冬小麦叶片形态和生物量的影响

倪盼盼^{1,3}, 朱元骏^{1,2}, 崔亚强²

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:明确降水变化对冬小麦叶片形态和生物量的影响,有助于了解冬小麦在水分环境变化条件下形态和产量上的响应。试验采用人工遮雨棚和自流滴灌系统来实时人工干预降水,研究了黄土塬区三种降水条件:正常降水(CK)、降水减少 1/3($R_{-1/3}$)和降水增加 1/3($R_{+1/3}$)下冬小麦不同生育期的叶片形态、生物量及株高变化。结果表明:降水增加,叶长相对变化较大,叶面积增加;降水减少,叶宽相对变化较大,叶面积减少。但叶形系数[(叶长×叶最大宽)/叶面积]不受降水变化的影响,仅和冬小麦的生育期有关。降水增加,冬小麦的叶片、生物量以及株高均保持稳定的生长优势;降水减少,冬小麦叶片、生物量以及株高的生长呈现“先促后抑”的现象。不同降水处理的冬小麦生物量和叶面积均呈明显的线性正相关,减少降水处理的冬小麦生物量对叶面积变化最敏感。总之,在黄土塬区冬小麦通过叶片形态、叶面积和生长速率的改变来影响光合产物积累和产量形成,以适应不同的水分环境。

关键词:降水变化; 叶片形态; 生物量; 冬小麦; 黄土塬区

中图分类号:S512.1⁺1;Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0116-06

Effects of Rainfall Change on Leaf Morphology and Biomass of Winter Wheat in the Loess Tableland

NI Panpan^{1,3}, ZHU Yuanjun^{1,2}, CUI Yaqiang²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Determining the effects of rainfall change on winter wheat leaf morphology and biomass can help understand the responses of winter wheat morphology and yield to water environment change in the loess tableland. We took a real-time rainfall control technique composing of artificial rainfall-shields and gravitational trickle irrigation system to investigate the effects of three rainfall treatments such as normal rainfall (CK), rainfall reducing 1/3 ($R_{-1/3}$), and rainfall increasing 1/3 ($R_{+1/3}$) on leaf morphology, biomass and stem length of winter wheat in the different growth periods in the loess tableland. The results indicated that the leaf length relatively changed more and the leaf area increased in the treatment of $R_{+1/3}$. While in the treatment of $R_{-1/3}$, the leaf width relatively changed more and the leaf area decreased. The leaf shape index [(leaf length×leaf maximum width) / leaf area] was hardly affected by rainfall change and yet mainly depended on the growth period of winter wheat. In the treatment of $R_{+1/3}$, winter wheat leaves, biomass and stem length all kept stable growth superiority in the whole growth period. While in the treatment of $R_{-1/3}$, they were all promoted in the beginning period and restrained in the later period. Winter wheat biomass and leaf area were positively linearly correlated under different rainfall conditions. Winter wheat biomass was the most sensitive to the changes of leaf area in the treatment of $R_{-1/3}$. Generally, winter wheat can change its leaf shape, leaf area and growth speed to affect photosynthate accumulation and yield so as to adapt different water environments in the loess tableland.

Keywords: rainfall change; leaf morphology; biomass; winter wheat; loess tableland

黄土塬区地处我国西北半干旱地区,年降雨量400~600 mm,属于传统的雨养农业区,降水不足是限制该区农田系统生产力提高的主要因素。近年来,受全球气候变化的影响,该区降水年内和年际分布不均的现象加剧,极端气候事件增加^[1],区域气候向暖干化趋势发展^[2],使得该区无灌溉区域的土壤水分在气候变化影响下处于一种不稳定的状态^[3],严重影响作物生长和产量稳定^[4]。研究降水变化对黄土塬区作物生长的影响,对该区农田水分管理具有指导意义,也有助于了解作物在未来气候变化情况下对水分环境变化的适应能力。

降水是影响冬小麦生长发育的重要气象因素之一。叶片作为植物进行光合作用和蒸腾作用的主要器官,对水分变化响应比较敏感,其形态变化是表征环境适应能力的重要指标^[5-7]。当环境条件变化时,植物能通过叶片形态的调整尽可能地降低水分损失,提高水分利用效率,以此增强自身的生存适应能力^[8-11]。降水的波动变化不仅影响小麦的叶片形态,对小麦的生物量及株高也有影响。半干旱区降水增多有利于春小麦干物质质量的积累,增加30%降水能增加春小麦的株高^[12]。土壤干旱,茎、叶生长受抑,株高降低,叶面积及叶面积系数减小^[13]。目前,关于作物水分响应关系的研究主要采用人工模拟降雨^[14]、作物模型^[15]及利用不同降水年型历史观测资料统计分析^[16]的方法。模拟降雨受到水源和人工、机械限制,在土柱^[17]或盆栽条件下进行,又受到土体的限制,不能很好反映田间的实际状况。针对冬小麦生长发育过程中不同生育期的表现形态变化的研究较少。

本研究采用人工遮雨棚和自流滴灌系统来实时人工干预降水,利用天然降水资源形成不同的降水条件。通过对黄土塬区不同降水条件下冬小麦不同生育期生物量、株高以及叶片形态的分析,探讨降水变化条件下冬小麦形态变化特征,为深入理解作物对水分的响应关系提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在地处陕西省长武县的长武黄土高原农业生态试验站(107°41'E,35°14'N)进行。试验站海拔1220 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候。据长武县气象局统计(1957—2006年),该地区多年平均降水量为584 mm,丰水年和枯水年降雨量标准分别为623 mm和534 mm,年最大降水量为954 mm(2003年),年最小降水为296 mm(1995年)。降水年际季

节分布不均,降水集中在7—9月,占全年降水总量的55%以上,蒸发量较大,为黄土塬区典型的雨养农业区。该区年日照时数为2226.5 h,日照率为51%。塬面全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温3029 $^{\circ}\text{C}$,多年平均无霜期171 d。年平均气温9.1 $^{\circ}\text{C}$,1月份平均气温-5.0 $^{\circ}\text{C}$,7月份平均气温22.1 $^{\circ}\text{C}$ 。试验所在地属于黄土旱塬区,土壤为中壤质黑垆土。2014年布设试验前,土壤容重为1.24 g/cm³,土壤颗粒组成为:17.6%黏粒,42.6%粉粒和39.8%砂粒。耕层(0—20 cm)土壤含有机质14.15 g/kg,全氮0.97 g/kg,碱解氮68.26 mg/kg,速效磷22.1 mg/kg,速效钾156.7 mg/kg,pH值为8.6。

1.2 试验设计

试验在站区内未进行灌溉的旱作农耕地上进行。2014年10月布设试验小区,小区面积为30 m²(5 m×6 m),共11个。小区采用透明塑料遮雨棚配套集雨桶和自流滴灌系统来实现小区自然降雨的实时收集和再分配(图1A)。雨棚遮雨采用长5 m,宽弯成直径为20 cm圆弧的透明塑料硬片,间隔44 cm均匀铺设。雨棚前高1.75 m,后高2.10 m。小区中央布设1根中子管,小区四周嵌入1 m深的PVC板,防止表层土壤水分侧渗。小区之间设置2 m间距的保护行。供试冬小麦品种为长旱58,播前施一次冬小麦专用肥954 kg/hm²(N:P:K=20:10:5),肥料撒施地表,翻入土中,田间管理同大田,人工及时清除杂草,但不使用农药。试验冬小麦于2014年10月5日播种,2015年6月25日收获。

站区多年平均降水量为584 mm,在此范围向上浮动1/3则为780 mm,约为半湿润地区降水量上限;在此范围向下浮动1/3则为389 mm,约为半干旱地区降水量下限。考虑到这两个降水量接近降水气候分界线^[18],对试验有很大参考价值,所以试验选择1/3的降水量波动范围,设置3个降水处理,即正常降水(CK)、降水减少($R_{-1/3}$)和降水增加($R_{+1/3}$)。CK处理设置3个重复, $R_{-1/3}$ 处理和 $R_{+1/3}$ 处理各设4个重复(图1B)。冬小麦全生育期仅在 $R_{-1/3}$ 处理的小区上方布置遮盖1/3面积的遮雨棚,将小区1/3面积的降水收集至集雨桶,实现降水减少1/3;收集的降水均匀分配给相对应的平行位置另一行的 $R_{+1/3}$ 处理的小区,实现降水增加1/3。

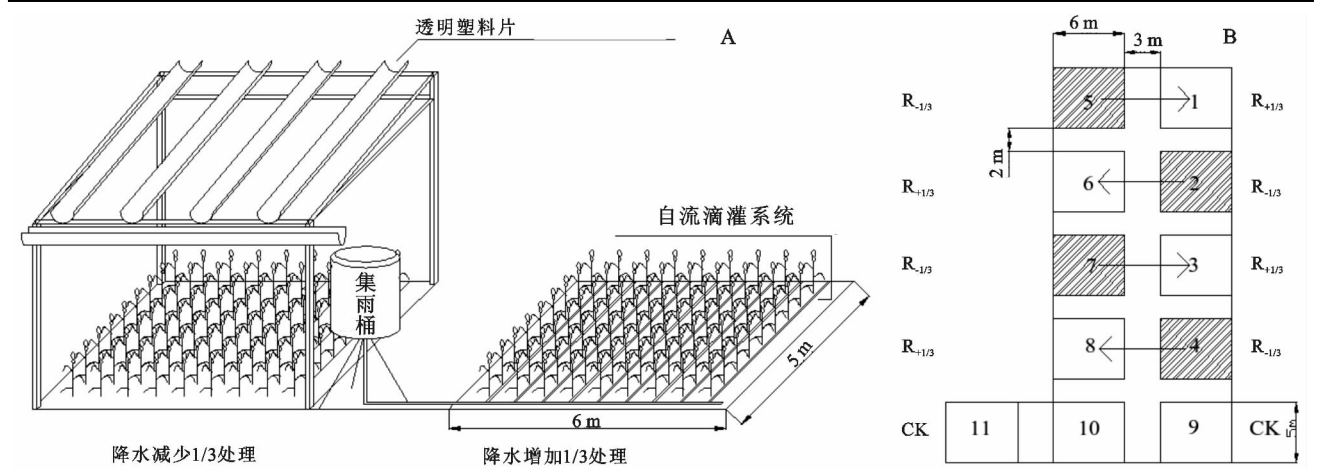
1.3 样品与数据采集

分别于冬小麦拔节期(4月15日)、孕穗—抽穗期(5月2日)、开花期(5月17日)、灌浆期(6月2日)和成熟期(6月15日)测定一次植株鲜重、干重,计算生物量,每个小区随机采具有代表性的植株5

株。采集生物量时用卷尺测定选定冬小麦植株的株高。采集生物量时摘取选定冬小麦植株从顶端向下的第三片叶子,扫描仪扫描后,用 Image pro-plus 软件处理,计算叶片长度、宽度、叶面积和叶形系数。

表 1 2014—2015 年月降雨量

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
2014	0.0	20.5	29.9	95.2	31.7	54.6	24.6	146.2	188.9	13.8	10.5	1.0	616.9
2015	6.6	7.3	17.7	69.4	50.6	99.5	33.3	138.5	62.8	48.0	33.4	11.1	578.2



注:箭头指示方向为供水方向。

图 1 降水实时收集、分配系统和试验小区处理示意图

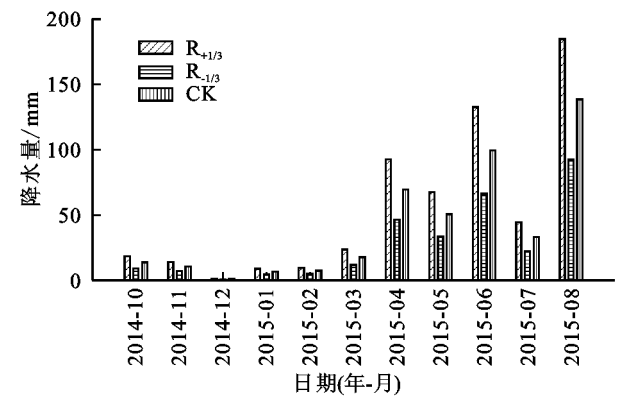


图 2 不同降水处理麦田月降水量

1.4 测定指标及计算方法

1.4.1 生物量干重计算公式为:

$$y_i=w_i-w_0$$
 (1)

式中: y_i 为第 i 个生育期的生物量干重(g/株); w_i 为第 i 个生育期的生物量烘干后总质量(g/株); w_0 为纸袋质量(g)。

1.4.2 叶形系数计算公式为:

$$\text{叶形系数}=\frac{\text{叶长}\times\text{叶最大宽}}{\text{叶面积}}$$
 (2)

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$)。利用 Sigmaplot 10.0 软件作图。各图表中数据为平均值±标准差。

试验期间,由试验站内气象站记录的 2014—2015 年月降雨量见表 1。试验期间(2014 年 10 月—2015 年 8 月)麦田不同降水处理的月降水量分布见图 2。

2 结果与分析

2.1 降水变化对冬小麦生物量的影响

灌浆期之前,不同降水处理的冬小麦植株鲜重和干重均有明显差异($p<0.05$),均依次为 $R_{-1/3}>R_{+1/3}>CK$ (图 3)。灌浆期 $R_{+1/3}$ 处理与 $R_{-1/3}$ 处理冬小麦的鲜重和干重相差较小,均大于 CK 处理。灌浆期之后, $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦植株鲜重明显下降,在成熟期时已经略低于 CK 处理, $R_{+1/3}$ 处理和 CK 处理的冬小麦植株鲜重略有下降。灌浆期后, $R_{+1/3}$ 处理的冬小麦植株干重仍有明显增长,CK 处理和 $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦干重少量增加。

从拔节期到成熟期,不同降水处理的冬小麦株高依次为 $R_{-1/3}>R_{+1/3}>CK$ 。冬小麦从拔节期到开花期为营养生长期,植株迅速生长拔高, $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦株高增长速度最快;开花期后开始进入生殖生长期,根茎叶的生长逐渐减缓,株高增长速度明显变缓。

$R_{-1/3}$ 处理的冬小麦在开花前的营养生长阶段植株鲜重、干重以及株高都显著高于 CK 处理和 $R_{+1/3}$ 处理,地上部生长速度和干物质积累均最快。开花期后,冬小麦进入生殖生长阶段, $R_{+1/3}$ 处理的冬小麦保持相对稳定的生长速率,干物质积累明显增加,高于 CK 处理和 $R_{-1/3}$ 处理;原先生长较快的 $R_{-1/3}$ 处理冬小麦植株鲜重明显下降,干重变化不大,由于水分供

应不足,植株较CK处理和 $R_{+1/3}$ 处理提前进入衰老,未能继续保持开花前的生长优势。

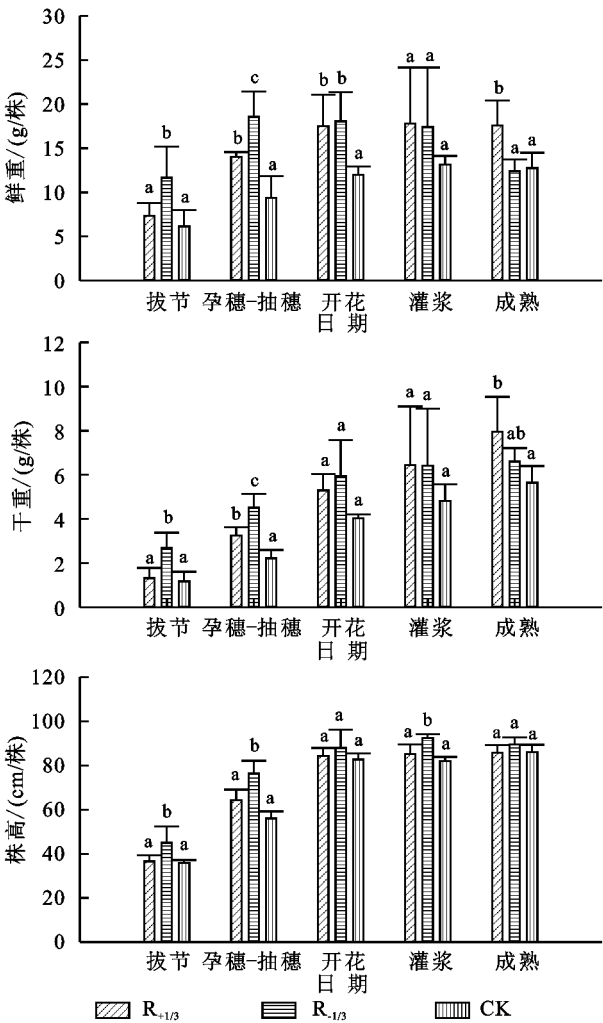


图3 不同生育期冬小麦生长指标

2.2 降水变化对冬小麦叶片形态的影响

2.2.1 叶长、叶宽和叶长宽比 降水变化对冬小麦不同生育期叶长、叶宽和叶长宽比产生了明显影响(表2)。拔节期不同降水处理的冬小麦叶长、叶宽均有明显差异($p<0.05$), $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦叶长、叶宽均最

大, $R_{+1/3}$ 处理冬小麦的叶片长宽比明显大于 $R_{-1/3}$ 处理,叶片相对较窄。孕穗—抽穗期不同降水处理的冬小麦叶长、叶宽均有明显增长; $R_{+1/3}$ 处理的冬小麦叶长、叶宽均增长至最大, $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦叶长有所增长,但叶宽最小; $R_{-1/3}$ 处理和 $R_{+1/3}$ 处理的冬小麦叶片长宽比无明显差异($p>0.05$)。开花期,不同降水处理的冬小麦叶长、叶宽和叶长宽比均无明显差异($p>0.05$)。灌浆期, $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦叶宽增大,高于CK处理;叶长明显小于 $R_{+1/3}$ 处理和CK处理($p<0.05$),叶片的长宽比最小。 $R_{+1/3}$ 处理和CK处理的叶长变化较小,叶宽增加,叶片的长宽比减小。

2.2.2 叶面积和叶形系数 为了进一步描述降水变化对冬小麦叶片形态的影响,结合叶面积(表2)进行分析。拔节期 $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦叶面积明显大于 $R_{+1/3}$ 处理和CK处理($p<0.05$)。随着冬小麦的生长, $R_{+1/3}$ 处理的冬小麦叶面积迅速增大,在孕穗—抽穗期已大于其他降水处理,并在此后一直保持叶面积最大;而 $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦叶面积增长明显变缓。开花期CK处理叶面积超过 $R_{-1/3}$ 处理,此时不同降水处理的冬小麦叶面积均无显著差异($p>0.05$)。灌浆期 $R_{-1/3}$ 处理叶面积最小。结合叶长、叶宽的变化可知, $R_{+1/3}$ 处理的冬小麦叶长相对变化较快,叶面积较CK处理逐渐增大;而 $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦叶宽相对变化较快,叶面积较CK处理呈减小趋势。不同降水处理的冬小麦叶面积变化与叶长的变化一致;相对于叶宽来说,叶长的变化对叶面积的影响更大。

对于叶形系数(表2)的计算结果分析表明,无论降水变化如何影响冬小麦叶片形态,各个生育期内的叶形系数在不同降水处理条件下无明显差异($p>0.05$)。但相同降水处理冬小麦的叶形系数在不同生育期差异明显($p<0.05$)。总的来说,降水变化对不同生育期冬小麦的叶片形态有明显影响,冬小麦通过改变叶片形态来适应水分条件的变化。

表2 叶片形态指标

时期	降水处理	叶长/(cm/叶)	叶宽/(cm/叶)	叶面积/(cm ² /叶)	长宽比	叶形系数
拔节期	$R_{+1/3}$	12.68±0.51b	0.80±0.03a	7.87±0.10a	16.02±1.31b	0.75±0.02aB
	$R_{-1/3}$	13.83±1.13b	1.01±0.13b	11.23±2.08b	13.79±0.78a	0.74±0.01aC
	CK	9.83±1.79a	0.75±0.13a	5.94±2.07a	13.12±0.97a	0.75±0.02aC
孕穗—抽穗期	$R_{+1/3}$	20.78±1.07b	1.34±0.03a	18.89±0.88b	15.81±1.00b	0.68±0.01aAB
	$R_{-1/3}$	19.07±1.59ab	1.26±0.10a	17.02±2.08ab	15.52±0.58ab	0.70±0.03aB
	CK	18.30±1.38a	1.29±0.06a	15.83±2.04a	14.13±0.71a	0.65±0.03aA
开花期	$R_{+1/3}$	22.64±1.20a	1.44±0.07a	21.22±2.59a	16.02±0.88a	0.65±0.06aA
	$R_{-1/3}$	21.76±1.77a	1.29±0.09a	17.55±1.74a	17.57±2.65a	0.63±0.02aA
	CK	20.85±1.07a	1.37±0.16a	18.21±2.34a	16.22±1.48a	0.65±0.02aA
灌浆期	$R_{+1/3}$	21.10±2.30b	2.01±0.18b	27.90±5.70b	10.87±1.14ab	0.67±0.08aA
	$R_{-1/3}$	16.77±1.74a	1.80±0.15ab	18.73±2.75a	9.62±1.18a	0.63±0.04aA
	CK	20.79±2.66b	1.65±0.09a	24.04±3.20ab	12.70±1.34b	0.70±0.02aB

注:同列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。小写字母表示同一时期不同处理间比较,大写字母表示同一处理不同时期间比较。

2.3 生物量与叶面积的相关性

降水变化对冬小麦叶片形态和生物量都产生了明显影响。对降水变化条件下叶面积和生物量之间的关系进行分析,发现不同降水处理的冬小麦生物量和叶面积均呈明显的线性关系(图4),随着叶面积的增大,冬小麦生物量呈线性增加。比较不同降水处理冬小麦生物量和叶面积的线性方程斜率(图4)可知,斜率大小依次为 $R_{-1/3} > R_{+1/3} > CK$ 。线性方程的斜率代表叶面积变化对生物量的影响程度,斜率越大,说明相同叶面积变化量所影响的生物量变化量越大。与CK处理相比, $R_{-1/3}$ 处理和 $R_{+1/3}$ 处理的冬小麦叶面积变化对生物量的影响增大, $R_{-1/3}$ 处理的冬小麦生物量对叶面积变化最敏感。

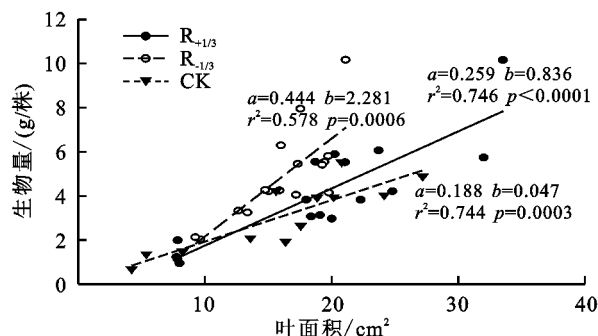


图4 冬小麦生物量和叶面积的相关性

3 讨论

植物叶片利用光合作用将光能转化为化学能,具有储存、运输和供给营养物质的功能^[19]。叶面积变化是反映植物叶片形态变化最直观的指标,也是衡量植物能量收支变化的最重要因子^[14]。干旱年份为了快速降低叶面积从而降低植物总体水分损失量,叶片宽度优先降低;湿润年份为了阻止由于叶面积快速增加带来的植物体水分大量损失,叶片长度优先增加^[8]。本研究通过研究不同生育期冬小麦叶片受降水变化影响表现出的形态变化,也发现了类似的结果。但在开花期,不同降水处理冬小麦叶片的叶长、叶宽、叶面积及长宽比均无明显差异。这说明降水变化虽然在生长初期会影响冬小麦的叶片形态,但冬小麦会进行一定的生长调节,使得营养生长末期的叶片形态能保持相对稳定,保证即将开始的生殖生长,实现不同环境条件下正常的光合作用和基本的植物功能^[20]。此外,冬小麦叶片的叶形系数不受降水变化的影响,但和冬小麦的生育期有关。用叶长×叶最大宽×叶形系数可以较准确地估算叶面积,但叶形系数的选择要考虑冬小麦的生育期。这对小麦叶片可视化建模^[21]有一定借鉴意义。

在干旱、半干旱地区,降水以及降水转化的土壤

水是影响作物生长的重要非生物因素之一,水分与作物生物量之间存在相互依赖和相互制约的关系。很多研究^[22-23]认为水分供应不足会对小麦地上部生长有抑制作用,能显著降低小麦地上生物量的分配,降低叶片的光合强度、冠层蒸腾强度,导致小麦植株的株高、地上生物量干重都会降低。本研究发现在冬小麦拔节期到开花期的营养生长期,降水减少处理的冬小麦没有出现生物量下降,生长缓慢的现象,反而其地上部营养器官生长迅速,茎秆粗壮,株高较高,生物量较大。开花后降水减少处理的冬小麦积累干物质速率迅速下降,生长缓慢,甚至在灌浆后期,有明显的提前衰老。这说明水分减少对生物量的影响可能存在“先促后抑”的现象。有研究者认为,水分减少对作物的影响是一个“适应”到“伤害”的过程^[24],水分会限制植物的生长,但植物也会通过调整不同器官的生长速度来适应水分减少,短期内其叶片的光合作用会有所提高,生物量也会稍有增加^[25]。山仑等^[26]在研究小麦灌浆期水分胁迫的时候发现,任何程度的干旱初期物质运输速率都加强,只有持续干旱才对物质运输起抑制作用。

降水变化通过改变麦田土壤水分状况可能对冬小麦生长发育的两个过程产生影响。其一是自然资源的捕获。降水变化,叶面积改变,叶片的气孔运动、气孔导度、光能的截获量以及利用 CO_2 的能力有所改变^[7,27]。其二是光合产物的生产和积累。降水变化使作物叶片光合速率、光合产物生产及运输能力产生影响,进而影响干物质的积累^[22,27]。本研究发现降水变化条件下,冬小麦的叶片形态和生物量产生了明显的变化,不同降水处理的冬小麦生物量和叶面积均呈明显的线性正相关。增加降水处理冬小麦叶面积变化对生物量的影响程度(线性回归的斜率, $a = 0.259$)小于减少降水处理的影响($a = 0.444$),减少降水处理的冬小麦生物量对叶面积变化最敏感。降水减少,水分成为作物生长的限制因子,叶面积增长缓慢,叶片光合作用能力降低,叶面积大小成为限制作物生物量的内在因素。降水增加,作物需水得到保障,叶片生长不受水分的限制,叶面积大小对作物生长的限制作用降低,导致对作物生物量的影响程度降低。叶片形态和生物量与冬小麦的产量密切相关^[28-29],花后叶片的光合同化作用以及花前积累干物质的转运共同构成作物产量。因此,在干旱少雨的雨养农业区,通过观察冬小麦叶片形态来判断作物水分供应情况,评估生物量积累,能为冬小麦产量预测提供一定参考。

4 结论

(1) 降水变化显著影响冬小麦的叶片形态和叶面积。降水增加,叶长相对变化较大,叶面积增加;降水减少,叶宽相对变化较大,叶面积减少。

(2) 降水变化改变了冬小麦地上部的生长速率。降水增加,冬小麦的叶片、生物量以及株高均保持稳定的生长优势;降水减少,冬小麦叶片、生物量以及株高的生长呈现“先促后抑”的现象。

(3) 不同降水处理的冬小麦生物量和叶面积均存在线性正相关关系,减少降水处理的冬小麦生物量对叶面积变化最敏感。

参考文献:

- [1] 翟盘茂,潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 1-10.
- [2] 刘晓清,赵景波,于学峰. 黄土高原气候暖干化趋势及适应对策[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 627-631.
- [3] 蒋冲,王飞,穆兴民,等. 黄土高原农田土壤湿度演变及其与气候变化的响应关系[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 234-243.
- [4] 权畅,景元书,谭凯炎. 气候变化对三大粮食作物产量影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 361-367.
- [5] 靳占虎. 人工模拟增雨对白刺表型可塑性的影响[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2012.
- [6] Bray E A. Plant responses to water deficit[J]. Trends in Plant Science, 1997, 2(2): 48-54.
- [7] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(3): 239-264.
- [8] 李永华,卢琦,吴波,等. 干旱区叶片形态特征与植物响应和适应的关系[J]. 植物生态学报, 2012, 36(1): 88-98.
- [9] Nicotra A B, Hermes J P, Jones C S, et al. Geographic variation and plasticity to water and nutrients in *Pelargonium australe*[J]. New Phytologist, 2007, 176(1): 136-149.
- [10] McDonald P G, Fonseca C R, Overton J M, et al. Leaf-size divergence along rainfall and soil-nutrient gradients: Is the method of size reduction common among clades[J]. Functional Ecology, 2003, 17(1): 50-57.
- [11] Ackerly D D, Knight C A, Weiss S B, et al. Leaf size, specific leaf area and microhabitat distribution of chaparral woody plants: contrasting patterns in species level and community level analyses[J]. Oecologia, 2002, 130(3): 449-457.
- [12] 张凯,王润元,冯起,等. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 161-170.
- [13] 王晨阳. 土壤水分胁迫对小麦形态及生理影响的研究[J]. 河南农业大学学报, 1992, 26(1): 89-98.
- [14] 李永华. 白刺叶片性状对人工增水的响应[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2010.
- [15] 曹宏鑫,赵锁劳,葛道阔,等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [16] 胡玮,严昌荣,李迎春,等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2367-2377.
- [17] 杨占平,杨稚娟,薛毅芳,等. 原状土柱模拟不同降水年型条件下冬小麦、夏谷子耗水量研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(9): 58-61.
- [18] 郑景云,卞娟娟,葛全胜,等. 1981—2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099.
- [19] Eissenstat D M, Wells C E, Yanai R D, et al. Building roots in a changing environment: implications for root longevity[J]. New Phytologist, 2000, 147(1): 33-42.
- [20] 施宇,温仲明,龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6805-6814.
- [21] 曹宏鑫,石春林,金之庆. 植物形态结构模拟与可视化研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 669-677.
- [22] Wang T, Zhang X, Li C. Growth, abscisic acid content, and carbon isotope composition in wheat cultivars grown under different soil moisture[J]. Biologia Plantarum, 2007, 51(1): 181-184.
- [23] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211-218.
- [24] 山仑,邓西平,张岐岐. 生物节水研究现状及展望[J]. 中国科学基金, 2006, 20(2): 66-71.
- [25] 许振柱,周广胜. 不同温度条件下土壤水分对羊草幼苗生长特性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 256-260.
- [26] 山仑,吴孜君,谢其明,等. 小麦灌浆期生理特性和土壤水分条件对灌浆影响的研究[J]. 植物生理学通讯, 1980(3): 41-46.
- [27] 谷艳芳. 不同水分处理下冬小麦光合产物分配格局、过程及调控机制的研究[D]. 河南开封:河南大学, 2008.
- [28] 李世清,邵明安,李紫燕,等. 小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 2031-2039.
- [29] 王义芹,杨兴洪,李滨,等. 小麦叶面积及光合速率与产量关系的研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(S2): 10-15.