文章编号:1000-7601(2019)05-0137-07 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.20

北部冬麦区小麦新品种(系)的节水生理特性与综合评判

曾占奎,王征宏,王黎明,庞玉辉,韩志鹏,郭　程,王春平

(河南科技大学农学院,河南 洛阳 471023)

摘　要:为了研究不同灌溉条件下北部冬麦区小麦新品种的节水生理特性和选择节水品种,以北部冬麦区有代表性的 30 个小麦品种(系)为研究对象,在节水处理和正常灌溉处理下,对主要生理和农艺性状进行了分析。研究结果表明:不同小麦品种(系)间的植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)在拔节期以后的不同生育时期存在着显著差异,抽穗期的 NDVI 出现拐点,此时期保证水分供给,有利于延长叶片功能期。在不同灌溉处理条件下,NDVI、叶面积指数和光截获的变异系数存在差异,和其他性状相比广义遗传力较低,分别为 48.61%、58.51%和 72.84%,受环境影响较大。由灰色关联度分析可知:NDVI、冠层温度和光截获与产量的关联性较高,位于前列;在正常灌溉条件下,最好的品种(系)为:CA0391-1、中麦 998、农大 211、中麦 175、CA0958、中优 206、农大 5181、航麦 247、CA1146、中麦 818 和京冬 17;在节水处理下,最好的品种(系)为:中麦 175、中麦 818、CA0391-1 、CA1091、中优 206、轮选 1690。因此,可根据 NDVI 值判断小麦受干旱胁迫的影响,将 NDVI、冠层温度和光截获作为评价品种(系)抗旱性主要性状指标,在进行抗旱小麦选育时,可将 CA0391-1、中麦 175、中优 206 和中麦 818 作为抗旱选育亲本加以利用。

关键词:小麦品种(系);植被归一化指数;抗旱性评价;北部冬麦区

中图分类号:S512　　**文献标志码**:A

Water-saving physiological characteristics and comprehensive evaluation of new wheat varieties (lines) in northern winter wheat region

ZENG Zhan-kui, WANG Zheng-hong, WANG Li-ming, PANG YU-hui, HAN Zhi-peng, GUO Cheng, WANG Chun-ping

(*College of Agriculture*, *Henan University of Science & Technology*, *Luoyang*, *Henan* 471003, *China*)

Abstract: In order to study the water-saving physiological characteristics and the selection of water-saving varieties of new wheat varieties in the northern winter wheat area under different irrigation conditions, 30 representative wheat varieties (lines) in the northern winter wheat area were studied. The main physiological and agronomic traits were analyzed under water-saving treatment and normal irrigation conditions. The results indicated that, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of different wheat varieties (lines) had significant differences in different growth stages after jointing stage. The NDVI at the heading stage had an inflection point, which ensured water supply during this period and was beneficial to prolong leaf function period. Under different irrigation conditions, the variation coefficients of NDVI, leaf area index and light interception were different. Compared with other traits, the generalized heritability was lower, which was 48.61%, 58.51% and 72.84%, indicating that it was greatly affected by the environment. From the gray correlation analysis, it was seen that NDVI, canopy temperature and light interception were highly correlated with yield, these traits were in the forefront. Under normal irrigation conditions, the best varieties (lines) were: CA0391-1, Zhongmai 998, Nongda 211, Zhongmai 175, CA0958, Zhongyou 206, Nongda 5181, Hangmai 247, CA1146, Zhongmai 818 and Jingdong17. Under water-saving treat-

收稿日期:2018-12-28　　**修回日期**:2019-08-24

基金项目:"十三五"国家重点研发计划(2018YFD0100904);河南省自然科学基金(162300410077);河南省国际合作项目(172102410052)

作者简介:曾占奎(1992-),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为小麦遗传育种。E-mail:zengzhankui0301@163.com

通信作者:王春平(1969-),女,河南襄城人,博士研究生导师,主要从事小麦遗传育种研究。E-mail: chunpingw@haust.edu.cn

ment, the best varieties (lines) were: Zhongmai 175, Zhongmai 818, CA0391-1, CA1091, Zhongyou 206 and Lunxuan1690. Therefore, the effect of drought stress on wheat can be judged according to the NDVI value. NDVI, canopy temperature and light interception were used as indicators to evaluate the main traits of drought resistance. With the drought-tolerant wheat breeding, CA0391-1, Zhongmai 175, Zhongyou 206 and Zhongmai 818 can be used as drought-resistant breeding parents.

Keywords: wheat varieties (lines); normalized difference vegetation index; drought resistance evaluation; northern winter wheat region

小麦是我国主要粮食作物,其中北部冬麦区是我国冬小麦的主要产区之一[1-2]。在小麦生育期间,北部冬麦区的降水量只占全年降水量的 25%左右,尤其在小麦拔节至灌浆的耗水高峰期,春旱缺雨的现象更为严重[3]。近年来,随着全球气候变暖和大陆性气候特点,我国旱区扩大、季节性干旱频发,旱情危害不断加剧,虽然不断改进的麦田灌溉技术在一定程度上减轻了干旱造成的影响,但干旱仍然是制约北部冬麦区粮食生产的最主要限制因素[4],因此节水高产稳产小麦品种的推广利用成为农业节水生产中的一条新的重要途径和措施,研究小麦的节水生理特性对于培育节水稳产高产小麦新品种具有重要的指导意义。

在目前的小麦育种工作中,在同等水分供应条件下,开发品种自身的生理和遗传节水潜力,选育出耗水量少、水分利用效率高、稳定高输出、具有较好节水性和抗旱性的小麦新品种尤为重要[5]。不同的学者在小麦抗旱性生理研究方面做过大量的探索[6-9],一类是与小麦干旱性相适应的生理指标方面的研究,例如植被归一化指数[10-11]、植被覆盖率[12]、叶面积指数[13]、丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性等[14-16];另一类是受干旱胁迫后与小麦形态及产量相关的农艺性状类指标的变化规律研究,如株高、穗数、穗粒数等[17-19],同时在小麦品种节水性的相关研究方面也取得了一定的进展,包括植株的形态指标、光合作用、呼吸作用、干物质代谢、发育进程等[20-22]。前人除对节水性和抗旱性的生理研究以外,育种家们在遗传机制方面也做了大量研究,例如在小麦中通过增加 DREB2A 蛋白的积累及其下游基因表达、*TaC2DP*1 基因上调表达、蛋白激酶 *TaCDPK*1 基因过量表达等方法,试图提高小麦对干旱胁迫的适应能力和抗逆性[23-25]。虽然前人的研究对选育节水抗旱型小麦新品种奠定了坚实的基础,但在利用 NDVI、植被覆盖率、叶面积指数等表型指标直接判断品种(系)的节水性,并结合大量农艺性状综合评判品种(系)优劣等方面的研究还存在不足。

本研究拟通过对北部冬麦区 30 个小麦品种(系)在节水和正常灌溉 2 种处理下,研究 NDVI、植被覆盖率、叶面积指数等性状,筛选对产量影响较大的节水指标,综合评价节水品种优劣,为加快选育节水新品种提供表型性状判断依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

本试验于 2016—2017 年在北京市中国农业科学院顺义试验基地进行,试验地为壤土,试验地耕层土壤有机质含量 11.6 g·kg^{-1},全氮 0.96 g·kg^{-1},碱解氮 89.8 mg·kg^{-1},速效磷 29.1 mg·kg^{-1},速效钾 163.6 mg·kg^{-1},pH 为 7.9,于 2016 年 9 月 28 日按基本苗 3×10^{6}·hm^{-2}机器条播,于 2017 年 6 月 10 日使用小区收割机进行收获,肥料管理按照当地丰产田标准进行,并进行病虫害及杂草的防治工作。

试验材料选自北部冬麦区有代表性的小麦品种及新品系,共 30 个,即中麦 175、中麦 818、中麦 1062、中麦 14、中麦 998、中麦 1197、中麦 415、中麦 12、中优 9507、中优 335、中优 206、京冬 22、京冬 8 号、京冬 17、京 411、京 9428、轮选 987、轮选 1690、北京 0045、航麦 247、农大 5181、农大 211、CA12077、CA12092、CA0493、CA1091、CA1152、CA0958、CA0391-1、CA1146。

田间试验采用随机区组试验设计,3 次重复,共 180 个小区,每个小区长 4 m,宽 1.5 m,共 6 m^2,为 6 行区。试验分别设节水和正常灌溉 2 种处理,其中节水灌溉只浇越冬水;正常灌溉浇越冬水、拔节水和灌浆水,越冬水于 12 月 2 日进行灌溉,拔节水于 4 月 8 日进行灌溉,灌浆水于 5 月 16 日进行灌溉。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生理性状的测定

(1)植被归一化指数的测定。植被归一化指数即 NDVI 从 2016 年 3 月 25 日开始进行数据采集工作,每周测定 1 次,共测定 10 次。使用 GreenSeeker 505 手持式 NDVI 测量仪(北京麦拓天地科技有限公司,北京)对所有小区进行测量;测量时,仪器的

测量探头与地面平行,与小麦冠层距离为 40 cm,每个小区测量 2 次,取平均值作为该小区 NDVI 的代表值[26]。

(2)植被覆盖率的测定。采用肖永贵等[12]的植被覆盖率(Ground cover,GC)测定及处理方法,测定每个小区的植被覆盖率。

(3)冠层温度的测定。于灌浆期(花后 2 周)测定,试验采用 REYTEL ST20XB 型手持式红外测温仪 SD350 型(北京时代润宝科技发展有限责任公司,北京)测定冠层温度(Canopy Temperature, CT)和空气温度,并用两者计算出气冠温差(Canopy Temperature Depression , CTD),选择晴朗无云的中午测定每个小区的冠层温度,测量时间为 12∶00—14∶00。测定时仪器需顺小区种植走向,以消除太阳方位角和种植方向对观测值造成的影响。

(4)叶面积指数的测定。在灌浆期(花后 2 周),采用便携式叶面积测定仪 YMJ-B 型(浙江托普云农科技股份有限公司,浙江)测定叶面积指数(Leaf area index,LAI),从每个小区中随机选取 10 株小麦,对每株小麦的旗叶进行测定,取平均值作为该小区叶面积指数的代表值。

(5)叶绿素含量的测定。在灌浆期(花后 2 周),采用 SPAD-502 叶绿素仪(北京新宇胜利仪器有限责任公司,北京)测定叶片的叶绿素含量(Chlorophyll Content,Chl),从每个小区中随机选取 5 株小麦,对每株小麦的旗叶中部进行测定,避开叶脉,取平均值作为该小区叶绿素含量的代表值。

(6)光截获的测定。在灌浆期(花后 2 周),使用便携式冠层测定仪 LI-2000 型在晴朗无云的中午 12:00 进行光截获的(Light interception,LI)测定,每个小区重复 2 次。

(7)生物量的测定。在灌浆期(花后 2 周),在每个小区内随机取 30 株小麦,取其地上部分,放入烘箱中烘至重量不再变化,用 0.01 的分析天平测定各小区的生物量(Biomass,Bio)。

(8)株高的测定。株高(Height,H)于灌浆期(花后 2 周)进行测定,每个小区内随机选取除边行外的 3 个点利用米尺进行小麦株高的测定,取 3 个点的平均值作为该小区小麦品种的株高值。

1.2.2　产量及产量相关性状的测定　于成熟期选取小区内除边行外的长势均匀的 2 个 1 m 长的样段调查穗数,随机选取除边行外的 30 穗调查穗粒数,计算出每株穗粒数,将收获后的籽粒晾晒干燥后进行称重,计算小区产量(Yield,Y)(含水量为 13%),并测定每个小区的千粒重。

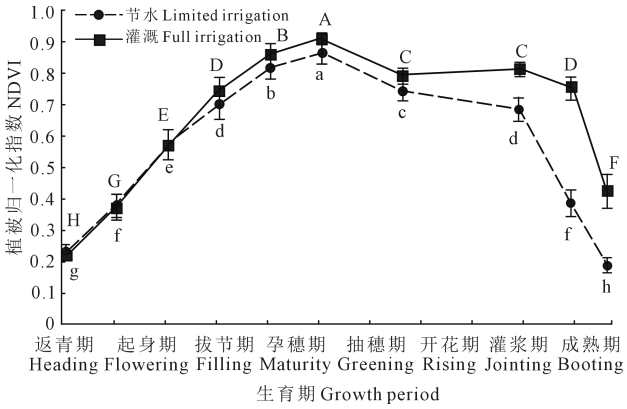
1.3　数据分析

数据分析采用 Excel 2010、SPSS 17.0 和 QTL IciMapping 软件进行处理。

2　结果与分析

2.1　不同灌溉处理下小麦品种(系)间 NDVI 的变化规律

由图 1 可知,在节水处理下,NDVI 从返青期至抽穗期均呈上升趋势,在抽穗期达到最大值,随后至成熟期呈持续下降趋势,下降幅度随不同生育阶段而不同;在正常灌溉处理下,NDVI 从返青期至抽穗期同样呈上升趋势,并在抽穗期达到最大值,抽穗期至开花期呈下降趋势,在灌浆期呈现出一定时期的稳定趋势,随后在灌浆后期至成熟期呈下降趋势。拔节期至成熟期,正常灌溉处理下的 NDVI 一直高于节水处理的 NDVI,且在灌浆前期进行灌溉,能够使 NDVI 在一段时期内处于较稳定的状态,这段时期同时也是籽粒灌浆的关键时期,对后期产量的形成具有重要的作用,由此可知,NDVI 可以反映出不同灌溉处理对小麦生长状态的影响,利用 NDVI 的表现趋势,监测大田中不同品种(系)小麦在生育过程中抵抗干旱逆境的能力。



注:同一处理下大写和小写字母均表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Note: The capital letters and lowercase letters within the same treatment mean significant difference at $P<0.05$ level.

图 1　不同处理下小麦品种(系)NDVI 值变化趋势

Fig.1　Trends of NDVI with cultivars (lines) under different conditions

2.2　不同灌溉处理下小麦各性状间的对比分析

2.2.1　不同灌溉处理下小麦品种(系)各性状的对比分析　由表 1 分析可知,在不同灌溉处理下,植被归一化指数、植被覆盖率、冠层温度、叶面积指数、叶绿素含量、光截获和产量的变异系数较小;其中,植被归一化指数、植被覆盖率、冠层温度、气冠温差、叶面积指数、光截获、株高和千粒重在节水处理

下的变异系数均大于正常灌溉处理下的变异系数，而植被归一化指数、冠层温度、叶面积指数和光截获在 2 种处理下的变异系数均较小，说明这 4 个性状在不同小麦品种(系)中的表现比较稳定，叶绿素含量、干物质、穗粒数、穗数和产量在正常灌溉处理下的变异系数均大于节水处理下的变异系数，气冠温差、株高和千粒重在 2 种灌溉处理下的变异系数均较大，说明这 3 个性状在不同小麦品种(系)中的表现不稳定，因此，植被归一化指数、冠层温度、叶面积指数和光截获可作为参考性状指标。

2.2.2 不同灌溉处理下小麦品种(系)各性状间差异性分析 由表 2 可知，不同灌溉处理下测定的 NDVI、植被覆盖率、冠层温度、气冠温差、叶绿素含量、叶面积指数、光截获、生物量、株高、穗粒数、穗数、千粒重和产量在小麦不同新品种(系)间、节水和正常灌溉处理间以及其互作间的差异均达到极显著水平($P<0.01$)；同时这些性状在品种间的广义遗传力表现有所差异，NDVI、植被覆盖率、冠层温度、气冠温差、光截获、生物量和穗粒数的遗传力分别为 0.4864、0.5851、0.4128、0.5093、0.5955、0.5651 和 0.5394，相对于其他性状而言遗传力较低，说明这 7 个性状受节水和正常灌溉处理的影响较大，能够反映出小麦植株在不同灌溉处理下的生长状态。

表 1 不同处理下小麦品种(系)各性状间基本统计量

Table 1 Basic statistics of traits of wheat varieties (lines) under different treatments

性状 Trait	正常灌溉 Full irrigation				节水灌溉 Limited irrigation			
	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	变异范围 Range	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	变异范围 Range
NDVI	0.8149	0.0153	0.0189	0.7773~0.8470	0.6823	0.0473	0.0694	0.5746~0.7736
GC	0.0030	0.0002	0.05	0.0026~0.0033	0.0015	0.0002	0.16	0.0011~0.0024
CT	26.0094	0.7625	0.0293	24.1000~27.2500	28.3403	0.8544	0.0301	26.7000~30.4500
CTD	8.8097	1.0961	0.1244	6.2000~10.4500	5.2758	0.8567	0.1624	3.8000~7.0500
LAI	5.1655	0.3498	0.0677	4.3500~5.6600	4.0455	0.3618	0.0894	3.1700~4.7200
Chl	55.0833	2.4425	0.0443	50.7500~59.3000	56.2516	2.4441	0.0434	52.5667~63.6500
LI	93.7471	1.1086	0.0118	91.6400~95.6100	89.8558	2.4717	0.0275	81.7600~93.2600
Bio	224.8181	29.4869	0.1312	175.5300~281.0000	205.6935	25.8240	0.1255	161.1000~270.5100
H	83.7803	9.2657	0.1106	67.5000~103.8300	70.6171	7.9116	0.1120	57.1700~89.5000
KNS	32.1913	3.4949	0.1086	26.8000~41.2300	30.9506	2.1485	0.0694	26.5800~35.6000
SN	543.7768	72.4558	0.1332	375.0000~618.2500	494.6100	53.9940	0.1092	358.7500~583.7500
TKW	43.8184	4.4274	0.1010	35.0900~52.6900	40.9452	4.4658	0.1091	32.6300~51.1100
Y	9043.8360	836.3513	0.0925	7163.7400~10581.1400	6569.5158	573.5391	0.0873	5537.2800~7785.0900

注：NDVI：植被归一化指数；GC：植被覆盖率；CT：冠层温度；CTD：气冠温差；LAI：叶面积指数；Chl：叶绿素含量；LI：光截获；Bio：生物量；H：株高；KNS：穗粒数；SN：穗数；TKW：千粒重；Yield：产量。下同。

Note: NDVI: Normalized difference vegetation index; GC: Ground cover; CT: Canopy temperature; CTD: Canopy temperature depression; LAI: Leaf area index; Chl: Chlorophyll content; LI: Light interception; Bio: Biomass; H: Height; KNS: Kernel number per spike; SN: Spike number; TKW: 1000-kernel weight; Y: Yield. The same below.

表 2 不同灌溉处理下小麦品种(系)各性状的显著性和遗传力检验

Table 2 Significance and heritability test of various traits of wheat varieties (lines) under different irrigation treatments

性状 Trait	重复 Repeat	基因型 Genotype	处理 Treatment	基因型×处理 Genotype×treatment	遗传力 H^2
	F 值 F value	F 值 F value	F 值 F value	F 值 F value	
NDVI	7.90**	26.44**	5442.20**	26.87**	0.4864
GC	3.43*	28.76**	19722.82**	19.69**	0.5851
CT	1.72	4.63**	573.09**	5.16**	0.4128
CTD	0.12	3.05**	509.38**	2.69**	0.5093
Chl	0.38	41.85**	99.95**	18.22**	0.6915
LAI	0.62	14.11**	1326.56**	4.89**	0.7284
LI	1.60	21.83**	1057.56**	14.15**	0.5955
Bio	2.35	33.20**	168.70**	24.78**	0.5651
H	3.46*	241.98**	4350.56**	16.57**	0.9357
KNS	2.00	11.15**	32.18**	8.67**	0.5394
SN	0.16	97.58**	464.82**	30.43**	0.7604
TKW	2.03	72.87**	251.01**	13.75**	0.8394
Y	3.77**	36.62**	4427.85**	12.26**	0.7440

注：*，** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。

Note: *, ** indicate significantly difference at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

2.3 不同灌溉处理下小麦品种(系)间不同性状与产量灰色综合评判

表 3 是将灌浆期不同灌溉处理下各性状与产量进行的灰色关联分析[27]。从表 3 中可以看出，在小麦灌浆期，在不同处理下，光截获、冠层温度、植被归一化指数与产量的灰色关联度均较高；其中在节水处理下，光截获与产量的灰色关联度为 0.7980，冠层温度与产量的灰色关联度为 0.7957，植被归一化指数与产量的灰色关联度为 0.7749；在正常灌溉处理下，植被归一化指数与产量的灰色关联度为

0.7787,光截获与产量的灰色关联度为 0.7691,冠层温度与产量的灰色关联度为 0.7616。这 3 个性状与产量的灰色关联度在不同处理下均位于前列,说明在灌浆期测定的 12 个性状中,这 3 个性状与产量同步变化的程度相对于其他 9 个性状而言较高,植被归一化指数与产量、光截获与产量、冠层温度与产量两两之间的变化趋势较为一致。利用在灌浆期测定的这 3 个指标,在一定程度上能够较好地反映出不同灌溉处理下各品种(系)的产量。

表 3　小麦灌浆期各性状与产量的灰色关联分析

Table 3　Gray correlation and ranking with agronomic traits and yield of wheat in filling stage

性状 Trait	正常灌溉 Full irrigation		节水灌溉 Limited irrigation	
	关联度 Correlation	排序 Sort	关联度 Correlation	排序 Sort
LI	0.7691	3	0.7980	1
CT	0.7616	4	0.7957	2
Chl	0.7259	6	0.7834	3
NDVI	0.7787	2	0.7749	4
SN	0.6900	9	0.7457	5
KNS	0.6975	8	0.7428	6
GC	0.7857	1	0.7371	7
H	0.6424	12	0.7359	8
TKW	0.7005	7	0.7347	9
LAI	0.7323	5	0.7281	10
Bio	0.6845	10	0.7089	11
CTD	0.6724	11	0.6034	12

2.4　不同灌溉处理下小麦各品种(系)间的灰色综合评判

由表 4 小麦各品种(系)间的灰色关联度分析可知,在正常灌溉处理下,CA0391-1 的灰色关联度为 0.8370,在节水处理下为 0.8228,中麦 175 在正常灌溉处理下的灰色关联度为 0.8207,在节水处理下为 0.8333,农大 5181 在正常灌溉处理下的灰色关联度为 0.8130,在节水处理下为 0.7650,中优 206 在正常灌溉处理下的灰色关联度为 0.8140,在节水处理下为 0.8170,中麦 818 在正常灌溉处理下的灰色关联度为 0.8057,在节水处理下为 0.8311;其中 CA0391-1 在正常灌溉处理下位于第一位,在节水处理下位于第三位,中麦 175 在节水处理下的灰色关联度居首位,在正常灌溉处理下位于第四位,农大 5181 在正常灌溉处理下位于第七位,在节水处理下位于第九位,中优 206 在正常灌溉处理下位于第六位,在节水处理下位于第五位,中麦 818 在正常灌溉处理下位于第十位,在节水处理下位于第二位;CA0391-1、中麦 175、中优 206 和中麦 818 这 4 个品种(系)在不同灌溉处理下的灰色关联度均较高,且次序相近,说明相对于其他品种(系)而言,这 4 个品种(系)在各性状的表现比较稳定,具有广泛的适应性。

表 4　不同灌溉处理下小麦各品种(系)间的灰色关联度分析

Table 4　Gray correlation and ranking with wheat varieties (lines) under different treatments

品种(系) Variety(line)	正常灌溉 Full Irrigation		品种 Variety	节水灌溉 Limited Irrigation	
	关联度 Correlation	排序 Sort		关联度 Correlation	排序 Sort
CA0391-1	0.8370	1	中麦 175 Zhongmai 175	0.8333	1
中麦 998 Zhongmai 998	0.8280	2	中麦 818 Zhongmai 818	0.8311	2
农大 211 Nongda 211	0.8225	3	CA0391-1	0.8228	3
中麦 175 Zhongmai 175	0.8207	4	CA1091	0.8197	4
CA0958	0.8175	5	中优 206 Zhongyou 206	0.8170	5
中优 206 Zhongyou 206	0.8140	6	轮选 1690 Lunxuan 1690	0.8124	6
农大 5181 Nongda 5181	0.8130	7	京 411 Jing 411	0.7869	7
航麦 247 Hangmai 247	0.8086	8	中麦 1062 Zhongmai 1062	0.7828	8
CA1146 CA1146	0.8065	9	农大 5181 Nongda 5181	0.7650	9
中麦 818 Zhongmai 818	0.8057	10	轮选 987 Lunxuan987	0.7649	10
京冬 17 Jingdong 17	0.8030	11	中麦 415 Zhongmai 415	0.7601	11
轮选 1690 Lunxuan 1690	0.7940	12	CA0958	0.7599	12
CA0493	0.7880	13	京冬 17 Jingdong 17	0.7522	13
中优 335 Zhongyou 335	0.7854	14	北京 0045 Beijing 0045	0.7485	14
CA12092 CA12092	0.7825	15	农大 211 Nongda 211	0.7469	15
京冬 22 Jingdong 22	0.7752	16	CA1146	0.7467	16
中麦 12 Zhongmai 12	0.7712	17	中麦 14 Zhongmai 14	0.7465	17
中麦 14 Zhongmai 14	0.7664	18	CA1152	0.7465	18
轮选 987 Lunxuan 987	0.7634	19	CA12077	0.7453	19
北京 0045 Beijing 0045	0.7616	20	中优 335 Zhongyou 335	0.7428	20
京 411 Jing 411	0.7536	21	京冬 8 号 Jingdong 8 hao	0.7417	21
中麦 1062 Zhongmai 1062	0.7526	22	CA0493	0.7416	22
CA12077	0.7509	23	京冬 22 Jingdong 22	0.7368	23
京 9428 Jing 9428	0.7504	24	中麦 12 Zhongmai 12	0.7298	24
中麦 1197 Zhongmai 1197	0.7503	25	中麦 998 Zhongmai 998	0.7222	25
CA1091	0.7410	26	中优 9507 Zhongyou 9507	0.7120	26
中麦 415 Zhongmai 415	0.7204	27	航麦 247 Hangmai 247	0.6941	27
京冬 8 号 Jingdong 8 hao	0.7203	28	CA12092	0.6882	28
CA1152	0.7188	29	中麦 1197 Zhongmai 1197	0.6800	29
中优 9507 Zhongyou 9507	0.6938	30	京 9428 Jing 9428	0.673	30

3 讨 论

3.1 小麦品种(系)间植被归一化指数变化规律的分析

本研究表明,2 种灌溉处理下的 NDVI 值在抽穗期前均呈上升趋势,且在抽穗期达到最大值,随后至成熟期呈下降趋势,在拔节期正常灌溉处理浇拔节水,节水处理不浇水,导致了 NDVI 从拔节期出现分化,这是由于在拔节以后,小麦进入旺盛生长期,耗水量急剧增加,拔节期至抽穗期的耗水量占全生育期的 25%左右,进行灌溉处理,有助于小麦茎秆和叶片的生长发育,从而使正常灌溉处理下的 NDVI 值显著高于节水处理下的 NDVI 值,节水处理此时受到干旱胁迫的影响;开花期至成熟期,小麦耗水量约占全生育期的 50%左右,尤其在灌浆期,保证小麦水分的充足供应能够延长叶片光合功能的持续期,从而积累更多有机物,增加小麦产量[15,28],此时,正常灌溉处理在花后浇灌浆水,节水处理不浇水,导致正常灌溉处理下的 NDVI 值呈现先稳定后下降的趋势,灌浆前期至中期出现稳定趋势,在灌浆后期开始下降,至成熟期时大幅度下降,节水处理下的 NDVI 值呈现持续下降的趋势,其中灌浆前期至中期下降幅度较缓,灌浆后期至成熟期下降幅度骤增。在 2 种处理条件下,不同小麦品种间的植被归一化指数在不同的生育时期存在着显著差异,这与李升东等[29]的研究结果相符合,由此可知,利用 NDVI 值的变化趋势,能够估测大田中不同品种(系)小麦在生育过程中植株的生长状态,针对目前缺少可靠的抗旱品种筛选指标[26],可将植被归一化指数作为抗旱品种筛选的参考指标之一。

3.2 不同灌溉处理下小麦品种(系)间各性状分析

通过分析不同灌溉处理下小麦品种(系)间各性状变异系数可知,植被归一化指数、植被覆盖率、冠层温度、气冠温差、叶面积指数、光截获、株高和千粒重在节水处理下的变异系数均大于正常灌溉处理下的变异系数,说明这些性状受干旱胁迫的影响较大,其中植被归一化指数、冠层温度、叶面积指数和光截获在 2 种处理下的变异系数均较小,说明这 4 个性状在不同小麦品种(系)中的表现较为稳定。叶绿素含量、干物质、穗粒数、穗数和产量在灌溉处理下的变异系数均大于节水处理下的变异系数,说明这些性状在灌溉处理的适应能力更强,因此在遗传稳定的条件下,植被归一化指数、冠层温度、叶面积指数和光截获在干旱胁迫时,更能反映出外部环境对不同小麦品种(系)间的影响,适宜在筛选抗旱性能优良的小麦品种(系)时作为评价指标使用。

由不同灌溉处理下各性状的显著性和遗传力分析可知,植被归一化指数的遗传力相较于其他性状而言较低,且其在基因型、环境及其互作间的差异达到极显著水平,说明小麦的 NDVI 值会随着品种、环境的不同表现出现差异,通过测定 NDVI 数据能够在一定程度上反映出品种(系)间及品种(系)所处环境的变化;植被覆盖率的遗传力相对较低,说明植被覆盖率同样易受环境及环境与基因互作的影响,小麦的植被覆盖率可以反映出不同品种(系)及品种(系)所处环境的变化;但相对于植被覆盖率而言,植被归一化指数的采集更为方便直接,因此植被归一化指数更适合应用于抗旱小麦品种(系)的选育工作中。

3.3 不同灌溉处理下小麦各性状与产量及各品种(系)间的灰色综合评判

通过对灌浆期不同灌溉处理下各性状与产量进行的灰色关联分析可知,在小麦灌浆期,在不同灌溉处理下,光截获、冠层温度、植被归一化指数与产量的灰色关联度均高,说明这 3 个性状与产量同步变化的程度相对于其他 9 个性状而言较高,利用在灌浆期测定的这 3 个指标,在一定程度上能够较好地反映出不同灌溉处理下各品种(系)的产量,可作为评价不同灌溉处理下各品种(系)产量的性状指标。

由不同灌溉处理下小麦各品种(系)间的灰色关联分析可知,CA0391-1、中麦 175、中优 206 和中麦 818 这 4 个品种(系)在不同灌溉处理下的灰色关联度均较高,且次序相近,说明这些品种(系)在各性状的表现比较稳定,具有广泛的适应性,适宜作为抗旱品种选育的亲本材料。

4 结 论

相对于本研究所测定的其他性状而言,植被归一化指数更适合应用于节水抗旱小麦品种的选育工作中;利用在灌浆期测定光截获、冠层温度、植被归一化指数,在一定程度上可以估测不同灌溉处理下各小麦品种(系)的产量;在进行节水抗旱小麦的选育工作时,可将 CA0391-1、中麦 175、中优 206 和中麦 818 作为亲本加以利用。

致谢:感谢中国农业科学院作物科学研究所何中虎研究员团队给予的试验平台支持。

参 考 文 献:

[1] 胡学旭,孙丽娟,周桂英,等. 2000—2015 年北部、黄淮冬麦区国家区试品种的品质特征[J]. 作物学报,2017, 43(4): 501-509.

[2] 周阳,何中虎,陈新民,等. 30 余年来北部冬麦区小麦品种产量改良遗传进展[J]. 作物学报, 2007, 33(9):1530-1535.

[3] 于振文. 作物栽培学各论/北方本.第一版[M]. 北京:中国农业出版社, 2003: 58-60.

[4] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. 麦类作物学报,2010,30(5):886-895.

[5] 蔡岳. 小麦节水高产育种方法的探讨[J]. 南方农业,2018,12(24):180-181.

[6] 武仙山,昌小平,景瑞莲. 小麦灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价[J]. 麦类作物学报,2008, 28(4) :626-636.

[7] 张伟杨,钱希旸,李银银,等. 土壤干旱对小麦生理性状和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016,36(4):491-500.

[8] 邵宏波,梁宗锁,邵明安. 小麦抗旱生理生化和分子生物学研究进展与趋势[J]. 草业学报,2006,15(3):5-17.

[9] 李云,李维平,李秀峰. 不同品种冬小麦的抗旱性鉴定与分析[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):17-21.

[10] Gitelson A A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(2):165-173.

[11] Preuss C P, Huang C Y, Louhaichib M, et al. Genetic variation in the early vigour of springbread wheat under phosphate stress as characterised through digital charting[J]. Field Crops Research, 2012, 127:71-78.

[12] 肖永贵,刘建军,夏先春,等. 基于图像处理的冬小麦植被覆盖率测定及其遗传解析[J]. 作物学报,2013, 39(11): 1935-1943.

[13] 束美艳,顾晓鹤,孙林,等. 基于新型植被指数的冬小麦 LAI 高光谱反演[J]. 中国农业科学,2018,51(18):3486-3496.

[14] 张军,鲁敏,孙树贵,等. 7 个冬小麦品种灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价[J]. 植物科学学报,2014,32(2):148-157.

[15] 袁蕊,李萍,胡晓雪,等. 干旱胁迫对小麦生理特性及产量的影响[J]. 山西农业科学,2016,44(10):1446-1449,1466.

[16] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management[J]. Agronomy for Sustainable Agriculture, 2009, 29(1):153-188.

[17] 李兴茂,倪胜利. 不同水分条件下广适性小麦品种中麦 175 的农艺和生理特性解析[J]. 中国农业科学,2015,48(21):4374-4380.

[18] 张成军,陈国祥,黄春娟,等. 干旱对高产小麦宁麦 9 号旗叶光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(3):24-27.

[19] Innes P, Blackwell R. The effect of drought on the water use and yield of two spring wheat genotypes[J]. The Journal of Agricultural Science, 1981, 96(3):603-610.

[20] 杨春玲,关立,侯军红,等. 小麦抗旱育种及水分高效利用育种问题探讨[J]. 山东农业科学,2007,(6):45-47.

[21] 肖永贵,陈新民,李思敏,等. 水旱兼用型小麦品种中麦 175 节水特性分析[J]. 麦类作物学报,2017,37(2):212-219.

[22] Honsdorf N, March T J, Berger B, et al. High-throughput phenotyping to detect drought tolerance QTL in wild barley introgression lines[J]. PloS One, 2014, 9:e97047.

[23] 张宁. 小麦 E3 泛素连接酶 TaSAP5 的功能鉴定及调控途径解析[D]. 北京:中国农业大学,2017.

[24] 赵婉莹. 普通小麦钙依赖蛋白激酶基因 TaCDPK1 的抗旱功能研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2018.

[25] 肖瑞霞,王新国,夏国军,等. 小麦逆境胁迫相关基因 TaC2DP1 的克隆及表达分析[J]. 中国农业科学,2015,48(8):1463-1472.

[26] Fan Tinglu, Maria Balta, Jackie Rudd, et al. Canopy temperature depression potential resistance in wheat[J]. Agricultural Sciences in China,2005, 4(10):793-800.

[27] 张正斌,徐萍,周晓果,等. 作物水分利用效率的遗传改良研究进展[J]. 中国农业科学,2006,39(2):289-294.

[28] 冯美臣,杨武德. 不同株型品种冬小麦 NDVI 变化特征及产量分析. 中国生态农业学报,2011,19(1):87-92.

[29] 李升东,王法宏,司纪升,等. 不同基因型小麦 NDVI 值与产量的关系[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(6):47-50.