

两个转 W23 基因小麦株系的抗旱性鉴定

宋兵兵¹, 闵东红¹, 徐兆师², 陈明², 李连城², 马有志²

(1. 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业科学院作物科学研究所, 农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程, 农业部麦类生物学与作物遗传育种重点实验室, 北京 100081)

摘要: 以两个 T₅ 代转 W23 基因小麦株系 G19 - X59、G19 - X61 为材料, 在水培条件下采用 PEG - 6000 人工模拟干旱胁迫措施对转基因小麦株系的根系发育特点、抗旱相关的光合生理等指标进行了测定。结果表明, 干旱胁迫条件下各参试小麦的光合速率 (P_n) 和蒸腾速率 (Tr) 均下降, 转基因株系降幅较小, 且其 P_n 和 Tr 值极显著高于受体品种; 在正常供水和干旱胁迫两种水分处理下, 转基因株系均比受体品种具有较发达的根系, 其根总长、根总表面积、根总体积等参数极显著高于受体品种。这一结果说明, 转 W23 基因小麦株系 G19 - X59、G19 - X61 在苗期依靠发达的根系维持较强的光合作用, 提高其应对干旱胁迫的能力。

关键词: 干旱胁迫; W23; 转基因小麦; 根系; 抗旱性

中图分类号: S512.01 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)01-0258-05

Identification of drought resistance of two transgenic wheat lines with W23 gene

SONG Bing-bing¹, MIN Dong-hong¹, XU Zhao-shi², CHEN Ming², LI Lian-cheng², MA You-zhi²

(1. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Region Areas / College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement / Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Triticeae Crops, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Two T₅ transgenic wheat lines G19 - X59 and G19 - X61 with W23 gene were used as materials, 15% PEG - 6000 was used to simulate the drought stress in hydroponic culture, the root development characteristics of transgenic wheat lines and photosynthetic physiology indexes related to drought resistance were investigated. The results indicated that photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (Tr) of all the wheat materials decreased under drought stress, whereas those of the transgenic wheat lines were not significantly changed. The P_n and Tr values of transgenic wheat lines were extremely significantly higher than that of the control Jimai 19. The transgenic lines were also found to have more developed root system than the control under both normal water supply and drought stress treatments. There were also extremely significant difference in total root length, root surface area and root volume between transgenic lines and the control. The results showed that the transgenic lines G19 - X59 and G19 - X61 could maintain high level of photosynthesis and thereby have strong resistance to drought stress.

Keywords: drought stress; W23; transgenic wheat; root; drought resistance

干旱、高盐和低温等环境胁迫严重影响植物生长和作物的产量^[1]。冬小麦是我国主要的农作物之一, 在旱作农业中占有举足轻重的地位, 在我国北方干旱和半干旱地区, 水分不足是限制粮食生产的最重要因子^[2]。随着分子生物学研究的飞速发展和植物基因工程技术的不断成熟, 通过基因工程手段改良小麦抗逆性已成为近年来小麦抗逆分子育种的重要方法与途径。高世庆^[3]对鲁麦 22 转基因植株的

耐盐、抗旱性研究表明转基因植株的耐盐、抗旱效果比对照明显。张双喜等^[4]对 3 个高代转 W16 基因小麦品系进行抗旱鉴定表明 W16 的过表达增强了转基因小麦对于干旱胁迫的适应能力。目前, 大多研究都是在大田或盆栽条件下研究转基因小麦株系生育中后期的抗旱性^[4-7], 而在水培条件下, 研究高代转基因小麦株系苗期抗旱性的报道较少, 特别是对根系发育特点的研究更是鲜有报道。

收稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家 863 计划项目(2011AA100501)

作者简介: 宋兵兵(1987—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为小麦抗旱生理。E-mail: wwwsbccmcn@126.com。

通信作者: 闵东红(1964—), 男, 研究员, 博士, 博士研究生导师, 主要从事小麦遗传育种研究。E-mail: mdh2493@nwsuaf.edu.cn。

W23 基因是中国农业科学院作物科学研究所马有志课题组克隆的一个 AP2/EREBP 类转录因子基因,通过基因枪转化法将其导入到小麦品种济麦 19,经逐代 PCR 检测获得稳定遗传的 T₅ 代转 W23 基因小麦姊妹株系 G19 - X59 和 G19 - X61,本研究以二者及其受体品种济麦 19 为材料,在水培条件下采用 15% PEG - 6000 模拟干旱胁迫,研究了干旱胁迫对转 W23 基因小麦株系苗期根系发育特点、光合生理等指标的影响,最终评价转 W23 基因小麦株系在苗期的抗旱性,以期对转基因小麦抗旱性鉴定提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试材料: T₅ 代 G19 - X59、G19 - X61 转 W23 基因小麦株系,由中国农科院作物科学研究所马有志课题组提供。受体对照:济麦 19。

1.2 方 法

试验于 2012 年 3—6 月在陕西杨凌西北农林科技大学水土保持研究所干旱大厅进行。采用水培试验,设正常供水(CK)和干旱胁迫(D)两种处理,正常供水处理为完全 Hoagland 营养液^[8],干旱胁迫处理则是按质量体积比于完全 Hoagland 营养液中添加 15%的 PEG - 6000,每个处理设 3 个重复,随机区组排列。用水槽(长 35 cm,宽 27 cm,深 12.5 cm)盛放营养液,将其四周和底部糊上不透明纸,以保证根系的黑暗生长环境,水槽上覆盖一个厚约 2 cm 的泡沫板,用打孔器在泡沫板上均匀打孔,孔径 2 cm,每孔移栽一苗。选取籽粒饱满、大小一致的 T₅ 代转 W23 基因小麦种子,用 10% H₂O₂ 消毒 30 min,而后用蒸馏水清洗种子 3~5 遍,用去离子水培养种子,待露白后将种子置于石英砂中,室温下催芽萌发,当苗长至一叶一心时,选取大小一致的小麦幼苗,用消毒海绵和滤纸将小麦幼苗固定在孔内,株距 4 cm,每个水槽都通有氧气,以保证小麦根系呼吸,小麦幼苗先在 0.2 mmol·L⁻¹的 CaCl₂ 溶液中培养 3 d,然后,换成 1/4 的 Hoagland 营养液培养,一周后换成 1/2 的 Hoagland 营养液,再过一周换成完全 Hoagland 营养液,此后,每 5 d 更换一次营养液。当苗长至五叶一心时,干旱处理添加 15% PEG - 6000 开始干旱胁迫,正常供水处理仍为完全 Hoagland 营养液,干旱胁迫共持续 7 d,处理结束后对与小麦抗旱相关的形态和生理指标进行测定。

1.2.1 根系形态和生长发育指标测定 每个处理选取长势一致的小麦幼苗 3 株,用剪刀沿分蘖节处

剪为地上、地下两部分,其中,地上部分和根系的鲜重、干重测量方法参考文献[9],根总长和根总表面积测量方法参考文献[10],根体积采用一个带刻度的 U 型装置测量,以上每个指标重复 3 次。

1.2.2 光合生理指标测定 光合气体交换参数光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)采用 LI - 6400 光合仪(美国 LI - COR 公司)测定,于晴天上午 9:00—11:30 选择第 5 片叶进行活体测定,每个指标重复 3 次。

1.2.3 数据处理 采用 Excel 2003 和 DPS v7.05 软件进行数据分析,采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对转基因小麦光合速率(P_n)的影响

光合作用强弱决定着干物质产量,是比较可靠的抗旱性鉴定指标之一^[11]。从表 1 可以看出,正常供水处理下各品种(系)的 P_n 没有明显差异,干旱胁迫处理下转基因小麦株系与受体品种的 P_n 均有不同程度下降。受体品种的 P_n 降幅较大,比正常供水处理下降了 47.56%,而转基因小麦株系分别比正常供水处理下降了 32.43%(G19 - X59)和 28.98%(G19 - X61)。转基因小麦株系比受体品种能保持较高的 P_n ,差异极显著($P < 0.01$)。

2.2 干旱胁迫对转基因小麦蒸腾速率(T_r)的影响

干旱胁迫下植物通过降低蒸腾速率来维持体内水分收支平衡,减少蒸腾是植物在干旱胁迫下缓解体内胁迫程度的一个有效途径。对转基因小麦株系的蒸腾速率测定发现(表 1),正常供水处理下各品种(系)的 T_r 没有明显差异,干旱胁迫处理下转基因小麦株系与受体品种的 T_r 均有不同程度下降。受体品种的 T_r 降幅较大,比正常供水处理下降了 72.33%,而对应的转基因小麦株系分别比正常供水处理下降了 64.06%(G19 - X59)和 62.96%(G19 - X61)。转基因小麦株系比受体品种能保持较高的 T_r ,差异极显著($P < 0.01$)。

2.3 干旱胁迫对转基因小麦根系特征的影响

根系是小麦吸收养分和水分的重要器官,与植株的抗旱性和生长以及对产量的形成有密切的关系,在小麦的生长发育、生理功能和物质代谢过程中发挥重要的作用^[12]。干旱胁迫会不同程度地抑制作物根系的生长,造成根量减少,进而影响整个植株的生长,甚至造成不可恢复的损伤。周桂莲^[13]提出发达的根系可以提高作物的吸水能力,减缓旱情,因此,与根系发达程度相关的根重、根长等指标常被用于小麦抗旱性鉴定。

表 1 干旱胁迫下转 W23 基因小麦株系的光合速率和蒸腾速率变化

Table 1 The changes of P_n and T_r in transgenic wheat lines with W23 gene under drought stress

品种(系) Varieties(lines)	光合速率 $P_n/(\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Photosynthetic rate		蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Transpiration rate	
	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress
	G19 - X59	17.6 ± 0.13	11.9 ± 0.10* *	9.84 ± 0.494
G19 - X61	17.1 ± 0.99	12.2 ± 0.80* *	9.75 ± 0.289	3.61 ± 0.208* *
济麦 Jimai19	17.7 ± 0.59	9.3 ± 0.28	9.29 ± 0.532	2.57 ± 0.123

注:表中数值为 3 个重复的平均值 ± 标准差; *: 差异显著 ($P < 0.05$); * *: 差异极显著 ($P < 0.01$); 下表相同。

Note: The data in the table are means ± SD; *: Significant difference ($P < 0.05$); * *: Extremely significant difference ($P < 0.01$); The same is as in the following tables.

2.3.1 根总长 转基因小麦株系根系总长度的变化见表 2,在正常供水和干旱胁迫处理下,转基因小麦株系的根系总长度均比受体品种长,且差异极显著 ($P < 0.01$)。在正常供水处理下,G19 - X59 和 G19 - X61 的根总长分别比受体品种增加 60.97% 和 32.95%,而在干旱胁迫处理下,其根系总长分别比受体品种增加 36.55% 和 36.91%。

2.3.2 根总表面积 从表 2 可以看出,在正常供水和干旱胁迫两种水分处理下,转基因小麦株系的根系总表面积均大于受体品种,且差异极显著 ($P < 0.01$)。在正常供水处理下,G19 - X59 和 G19 - X61 的根系总表面积分别比受体品种增加 59.54% 和 35.95%,而在干旱胁迫处理下,其根系总表面积分别比受体品种增加 32.94% 和 39.15%。

表 2 干旱胁迫下转 W23 基因小麦株系的根系总长和根系总表面积变化

Table 2 The changes of total root length and root surface area in transgenic wheat lines with W23 gene under drought stress

品种(系) Varieties(lines)	根系总长 Total root length/cm		根系总表面积 Total root surface area/cm ²	
	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress
	G19 - X59	11077.7 ± 1125.9* *	8961.9 ± 779.6* *	385.9 ± 7.0* *
G19 - X61	9149.5 ± 462.2* *	8985.8 ± 34.4* *	328.9 ± 2.1* *	304.1 ± 9.6* *
济麦 19 Jimai19	6882.0 ± 367.8	6563.1 ± 565.2	241.9 ± 0.5	218.6 ± 11.6

2.3.3 根总体积 由表 3 可以看出,与转基因小麦株系的根总长和根总表面积的趋势一样,在正常供水和干旱胁迫两种水分处理下,转基因小麦株系的根体积均大于受体品种,且差异极显著 ($P < 0.01$)。在正常供水处理下,G19 - X59 和 G19 - X61 的根体积分别比受体品种增加 26.23% 和 41.80%,而在干旱胁迫处理下,其根系总体积分别比受体品种增加 67.41% 和 55.05%。

和 68.37%、67.45% 和 70.33%。

表 3 干旱胁迫下转 W23 基因小麦株系的根系总体积变化

Table 3 The changes of total root volume in transgenic wheat lines with W23 gene under drought stress

品种(系) Varieties(lines)	根系总体积 Total root volume/cm ³	
	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress
	G19 - X59	5.1 ± 0.25* *
G19 - X61	5.8 ± 0.35* *	4.6 ± 0.36* *
济麦 19 Jimai19	4.1 ± 0.15	3.0 ± 0.32

2.4 干旱胁迫对转基因小麦地上部分、根系生物量的影响

2.4.1 地上部分鲜重和干重 干旱胁迫会抑制作物的生长,减少生物量的积累。由表 4 可以看出,转基因小麦株系的地上部分鲜重、干重在两种水分处理下均高于受体品种,且差异极显著 ($P < 0.01$)。在正常供水处理下,G19 - X59 和 G19 - X61 的地上部分鲜重、干重分别比受体品种提高 68.46% 和 54.80%、53.57% 和 36.14%,而在干旱胁迫处理下,其地上部分鲜重、干重分别比受体品种提高 64.32%

2.4.2 根系鲜重和干重 由表 5 可以看出,转基因小麦株系的根系鲜重、干重在两种水分处理下均高于受体品种,且差异极显著 ($P < 0.01$)。在正常供水处理下,G19 - X59 和 G19 - X61 的根系鲜重、干重分别比受体品种提高 85.84% 和 59.36%、63.34% 和 63.90%,而在干旱胁迫处理下,其根系鲜重、干重分别比受体品种提高 81.17% 和 69.90%、70.35% 和 40.34%。

表 4 干旱胁迫下转 W23 基因小麦株系的地上部分鲜重、干重变化

Table 4 The changes of aboveground fresh and dry weight in transgenic wheat lines with W23 gene under drought stress

品种(系) Varieties(lines)	地上部分鲜重 Aboveground fresh weight/g		地上部分干重 Aboveground dry weight/g	
	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress
G19 - X59	7.63 ± 0.43 **	5.64 ± 0.61 **	1.03 ± 0.04 **	0.88 ± 0.02 **
G19 - X61	7.01 ± 0.67 **	5.78 ± 0.09 **	0.92 ± 0.08 **	0.90 ± 0.01 **
济麦 19 Jimai19	4.53 ± 0.42	3.43 ± 0.02	0.67 ± 0.04	0.53 ± 0.05

表 5 干旱胁迫下转 W23 基因小麦株系的根系鲜重、干重变化

Table 5 The changes of fresh and dry weight of root in transgenic wheat lines with W23 gene under drought stress

品种(系) Varieties(lines)	根鲜重 Fresh weight of root/g		根干重 Dry weight of root/g	
	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress	正常供水(CK) Normal water supply	干旱胁迫(D) Drought stress
G19 - X59	6.04 ± 0.61 **	5.31 ± 0.94 **	0.20 ± 0.03 **	0.19 ± 0.02 **
G19 - X61	5.18 ± 0.72 **	4.98 ± 0.26 **	0.20 ± 0.02 **	0.15 ± 0.02 *
济麦 19 Jimai19	3.25 ± 0.44	2.93 ± 0.43	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.03

3 讨论

作物在干旱胁迫条件下,由于水分亏缺导致叶片水分供应不足,光合作用会受到影响,为了减少干旱胁迫对自身造成的破坏,通过体内一系列的生理代谢变化,促使叶片细胞气孔关闭、降低蒸腾消耗以减少水分散失。光合作用在干旱胁迫下会受到抑制或完全抑制,但抗旱性强的作物品种能维持相对较高的净光合速率^[11,14]。本研究结果表明转 W23 基因小麦株系在 15% PEG - 6000 干旱胁迫条件下比受体品种能保持较高的光合速率,这使得转基因小麦株系比受体品种表现出较强的抗旱性,这一结果与南炳东等^[5]对转 *TaEBP* 基因小麦株系的抗旱性研究结果一致,这说明不同抗逆转录因子基因的表达对于提高干旱胁迫条件下转基因小麦株系光合能力的功能相近。作物在干旱胁迫条件下通过降低蒸腾速率可以减缓干旱胁迫的影响,维持正常的水分生理代谢,这可能是作物应对干旱胁迫的一种有效机制。吕丽华等^[15]以耐旱性较强的河农 859 和耐旱性较弱的豫麦 49 为材料进行了研究,结果表明,干旱胁迫下河农 859 叶片蒸腾速率的降幅小于豫麦 49,这说明抗旱性强的小麦品种蒸腾作用受水分胁迫的影响较小,在水分胁迫下仍能保持相对较高的蒸腾速率,本研究也发现相似的结果,这表明转 W23 基因小麦株系在 15% PEG - 6000 干旱胁迫下能维持相对较高的蒸腾速率,促进植株进行正常的生长代谢,从而表现出较强的抗旱性。在正常供水处理下,转 W23 基因小麦株系的光合速率和蒸腾速

率与受体品种无显著差异,这表明转 W23 基因小麦株系的光合能力在正常供水处理下并没有得到明显提高,与受体对照品种相比没有明显的优势,这与南炳东等^[5]和王刚等^[7]的研究结果一致。

根系是小麦的重要器官,在小麦的生长发育、生理功能和物质代谢过程中发挥重要作用^[16]。本研究结果表明,在 15% PEG - 6000 干旱胁迫处理下,转 W23 基因小麦株系比受体品种具有较发达的根系,其根系表面积、根总长、根体积和根系生物量比受体品种均具有极显著的优势,这与张双喜等^[4]的研究结果一致。在正常供水处理下,转 W23 基因小麦株系也比受体品种具有较发达的根系,这可能与 W23 转录因子基因在组成型启动子 Ubiquitin 作用下超表达,继而调控下游控制根系生长相关基因的表达有关。发达的根系有利于增强转基因小麦株系的根系吸收能力,从而表现出较强的抗旱性。

本研究结果表明,转 W23 基因小麦株系 G19 - X59 和 G19 - X61 在苗期的抗旱性主要表现在其具有发达的根系(表 2、表 3),在 15% PEG - 6000 干旱胁迫条件下,转基因小麦株系依靠发达的根系比受体品种能积累更多的地上部分生物量,表现出极显著的生长优势(表 4),从而表现出较强的抗旱性。在我国北方冬小麦区,小麦在苗期经常会遭受干旱胁迫的影响,严重时会导致小麦产量下降。虽然本试验只对转 W23 基因小麦株系苗期干旱胁迫下抗旱相关的根系形态和光合生理等指标的变化特点进行了研究,但该结果对小麦的抗旱性研究仍具有一定的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] Sakuma Yoh, Liu Qiang, Dubouzet Joseph G, et al. DNA-binding specificity of the ERF/AP2 domain of Arabidopsis DREBs, transcription factors involved in dehydration- and cold-inducible gene expression[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2002, 290(3):998-1009.
- [2] 陈立栋. 冬小麦节水栽培生理生态研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2002.
- [3] 高世庆. 抗逆相关 *DREB* 基因转化小麦及功能鉴定[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2004.
- [4] 张双喜, 徐兆师, 张改生, 等. 转 *W16* 小麦抗旱新品系的创制及抗旱生理机制分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 4971-4979.
- [5] 南炳东, 陈耀锋, 闵东红, 等. 不同水分胁迫下转 *TaEBP* 基因小麦株系拔节期抗旱性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 23-28.
- [6] 周永斌, 闵东红, 徐兆师, 等. 不同水分胁迫下转 *W16* 小麦回交株系基因表达特性及其抗旱机制[J]. 农业生物技术学报, 2012, 20(11): 1271-1281.
- [7] 王 刚, 刘曙东, 闵东红, 等. *W16* 转基因 19 小麦株系抽穗期抗旱性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 1-6.

- [8] Hoagland D R. The water-culture method for growing plants without soil[M]. America San Francisco: California Agriculture Experiment Station, 1950:8-8.
- [9] 周晓果, 景蕊莲, 郝转芳, 等. 小麦幼苗根系性状的 QTL 分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 1951-1957.
- [10] 李秧秧, 张萍萍, 赵丽敏, 等. 不同氮素形态下小麦叶片光合气体交换参数对蒸汽压亏缺的反应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1299-1305.
- [11] 张建军, 王 勇, 李尚忠. 农业生物节水研究进展[J]. 作物杂志, 2006, (6): 4-8.
- [12] 马瑞昆, 蹇家利, 贾秀领, 等. 供水深度与冬小麦根系发育的关系[J]. 干旱地区农业研究, 1991, 9(3): 1-10.
- [13] 周桂莲. 小麦抗旱性鉴定的形态指标及其分析评价[J]. 陕西农业科学, 1996, (4): 33-34.
- [14] 张士昌, 郭进考, 底瑞耀, 等. 不同水分条件下不同抗旱基因型小麦的产量及旗叶光合特性[J]. 河北农业科学, 2009, 13(8): 4-6.
- [15] 吕丽华, 李雁鸣, 胡玉昆. 水分胁迫对不同抗旱性小麦品种光合特性及产量性状的影响[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(3): 1-5.
- [16] 杨兆生, 阎素红, 王俊娟, 等. 不同类型小麦根系生长发育及分布规律的研究[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(1): 47-50.

(上接第 239 页)

确定权重的方法较多, 今后的研究可尝试采用其它赋权方法获取权重, 评价干旱监测效果并开展干旱影响评估研究. 干旱监测效果的评价是一项复杂的工作, 不仅需要合适的干旱监测模型, 确定各生育时期合理的权重, 还需要综合气候特征、人类活动等多种影响因素做出更合理地评估。

参 考 文 献:

- [1] 张树誉, 杜继稳, 陈晓楠. 陕西省干旱影响评估业务系统[J]. 陕西气象, 2008, (4): 40-43.
- [2] 陈 旭, 郝明德, 许晶晶, 等. 干旱对关中地区不同年代小麦品种旗叶光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 159-163.
- [3] 赵世伟, 管秀娟, 吴金水. 不同生育期干旱对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4): 56-59.
- [4] 景蕊莲. 作物抗旱研究的现状与思考[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 79-85.
- [5] 张林刚, 邓西平. 小麦抗旱性生理生化研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(3): 87-92.
- [6] 龚绍先. 粮食作物与气象[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1988: 66.

- [7] 周苏玫, 马元喜, 王晨阳, 等. 干旱胁迫对小麦根系生长及营养代谢的影响[J]. 华北农学报, 2002, 15(2): 57-62.
- [8] 韩绍林. 旱作农业与河南旱地小麦栽培[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010: 142-146.
- [9] 陈学留, 王志芬, 余美炎, 等. 小麦不同生育期的光合速率及光合产物分配[J]. 核农学通报, 1993, 14(5): 225-228.
- [10] 杨永清, 许先云. 改进的层次分析法用于矿井安全管理的综合评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999, (6): 121-125.
- [11] 石 龙, 张瑞芳, 谢启源, 等. 改进层次分析在公共建筑火灾风险分析中的应用[J]. 科技通报, 2009, 54(3): 329-336.
- [12] 张天军, 苏 琳, 乔宝明, 等. 改进的层次分析法在煤与瓦斯突出危险等级预测中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(5): 536-542.
- [13] 陈述云. 综合评价中指标的客观赋权方法[J]. 统计方法研究, 1995, 6: 16-17.
- [14] 刘洪顺. 变异系数赋权法对水准网平差定权方法的改进[J]. 地理空间信息, 2012, 10(4): 142-143.
- [15] 王永弟, 许承权, 范 千. 熵权、变异系数及模糊多准则决策在测量中平差中的综合应用[J]. 工程勘察, 2012, (9): 58-61.
- [16] 李 艳, 王鹏新, 刘竣明, 等. 基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价. I 因子权重排序法和熵值法组合赋权[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 159-163.